



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 18802.12—202X/IEC 61643-12:2020

代替 GB/T 18802.12—2014

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

## 低压电涌保护器（SPD） 第12部分： 低压电源系统的电涌保护器 选择和使用导则

Low voltage surge protective device (SPD)—Part 12: Surge  
protective devices connected to low-voltage power systems—  
Selection and application principles

(IEC 61643-12:2020, IDT)

(征求意见稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会

发 布



## 目 次

前言 .....	VII
引言 .....	IX
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
3.1 术语和定义 .....	2
3.2 符号和缩略语 .....	13
4 保护需求 .....	15
5 被保护的系统和设备 .....	15
5.1 通用要求 .....	15
5.2 低压电源系统 .....	15
5.3 被保护设备特性 .....	18
6 电涌保护器 .....	18
6.1 SPD 基本功能 .....	18
6.2 补充要求 .....	18
6.3 SPD 分类 .....	19
6.4 SPD 特性 .....	20
6.5 SPD 特性的补充资料 .....	21
7 SPD 在低压电源系统的应用 .....	26
7.1 通则 .....	26
7.2 根据试验类别确定 SPD 安装位置 .....	26
7.3 SPD 保护模式及安装 .....	27
7.4 附加保护的必要性 .....	29
7.5 SPD 特性的选择 .....	34
7.6 辅助装置的特性 .....	44
附录 A （资料性） 选用 SPD 的典型资料及试验程序的解释 .....	46
A.1 选用 SPD 需要的典型资料 .....	46
A.2 用于 IEC 61643-11 试验程序的解释 .....	47
附录 B （资料性） $U_c$ 和系统标称电压之间的关系示例及金属氧化物压敏电阻(MOV) $U_p$ 和 $U_c$ 之间的关系示例 .....	54

B.1 $U_c$ 和系统标称电压之间的关系 .....	54
B.2 金属氧化物压敏电阻(MOV) $U_r$ 和 $U_c$ 之间的关系 .....	54
附录 C (资料性) 环境-低压系统(LV)中的电涌电压 .....	56
C.1 概述 .....	56
C.2 雷电过电压 .....	56
C.3 操作过电压 .....	58
附录 D (资料性) 部分雷电流计算 .....	61
附录 E (资料性) 由高压系统和地之间故障引起低压系统的 TOV .....	63
E.1 通则 .....	63
E.2 参考文献 .....	63
E.3 符号 .....	63
E.4 高压接地故障时低压系统中的过电压 .....	64
E.5 TT 系统的示例——可能的暂时过电压的计算 .....	65
E.6 工频暂时过电压取决于不同的低压电源系统和不同的接地类型 .....	67
E.7 美国 TN C 系统暂时过电压的值 .....	74
E.8 IEC 61643-11 中使用的暂时过电压值及其说明 .....	75
附录 F (资料性) 配合规则和原则 .....	85
F.1 概述 .....	85
F.2 能量配合 .....	85
F.3 配合试验: 能量配合和电压保护配合 .....	91
附录 G (资料性) 应用示例 .....	95
G.1 家庭的应用 .....	95
G.2 工业应用 .....	96
G.3 具有雷电防护装置的情况 .....	99
G.4 风力发电机组 .....	100
附录 H (资料性) 风险评估方法和应用示例 .....	105
H.1 概述 .....	105
H.2 GB/T 16895.10 描述的低电压风险评估的简化方法 .....	105
H.3 风险评估时应考虑的因素 .....	110
附录 I (资料性) 系统电应力 .....	113
I.1 雷电过电压和电流[5.2.2] .....	113
I.2 操作过电压[5.2.3] .....	114
I.3 暂时过电压 $U_{TOV}$ [5.2.4] .....	114
附录 J (资料性) SPD 的应用 .....	115
J.1 SPD 的安装和保护[7.1] .....	115

J.2 SPD 的选择.....	125
J.3 受 LPS 保护的建筑物中 I 类 SPD 的 $I_{imp}$ 的简单计算.....	128
附录 K (资料性) 抗扰度与额定冲击电压耐受能力.....	132
附录 L (资料性) 在一些地区中配电盘上安装 SPD 的示例.....	137
附录 M (资料性) 当设备同时具有信号端口和电源端口时的配合.....	141
附录 N (资料性) 短路后备保护和电涌耐受.....	146
N.1 通则.....	146
N.2 单次 8/20 和 10/350 熔断器电涌耐受能力的信息.....	146
N.3 预处理和动作负载试验中影响熔断器的因素(性能下降).....	146
N.4 基于实验数据,并通过基于 IEC 60269 系列规定的参数和极限的计算来确认的熔断器的动作负载承受能力.....	147
N.5 外部脱离器技术的性能.....	148
N.6 在某些国家使用的 SPD 外部脱离器的附加要求和试验值.....	148
附录 O (资料性) 雷电放电条件下系统级抗扰度的实用试验方法.....	152
O.1 概述.....	152
O.2 正常使用条件下的 SPD 放电电流试验.....	152
O.3 雷电电流感应试验.....	152
O.4 系统级抗扰度试验推荐试验分类(遵循 GB/T 17626.5).....	152
附录 P (资料性) 包含多个元件的 SPD 试验指南.....	154
P.1 概述.....	154
P.2 具有电阻性/电容性触发控制电路的多个串联火花间隙的示例.....	154
P.3 具有并联有电容触发控制电路的 2 个串联火花间隙,再与串联 GDT+MOV 电路并联使用的示例.....	154
P.4 具有并联 MOV 旁路/触发控制的三极 GDT 示例.....	155
P.5 具有 GDT+MOV 触发控制的 4 电极型间隙示例.....	156
P.6 具有 GDT 串联 MOV 的并联支路的放电间隙的示例.....	156
P.7 具有触发变压器的 3 电极间隙示例.....	157
附录 Q (资料性) 与 I 类试验 SPD 相关的美国特殊情况.....	158
参考文献.....	159
图 1 一端口 SPD 的示例.....	6
图 2 二端口 SPD 的示例.....	7
图 3 一端口和二端口 SPD 对复合波冲击的响应波形.....	8
图 4 元件及组件示例.....	20
图 5 金属氧化物压敏电阻(MOV)典型 $U_{res}-I$ 曲线.....	24
图 6 间隙放电典型曲线.....	24
图 7 SPD 应用的流程图.....	26

图 8	连接类型 1 的示例 (CT1)	27
图 9	连接类型 2 (CT2) 的示例	28
图 10	SPD 连接导线长度的影响	31
图 11	当引线长度超过 50 cm 时, 可能使用局部接地排的安装方案	32
图 12	当连接引线长度小于 50 cm 时, 需要附加 SPD 的示例	34
图 13	选择 SPD 的流程图	35
图 14	$U_i$ 和 $U_{TOV}$	37
图 15	确保供电连续性的 SPD 和外部脱离器配合	39
图 16	确保保护连续性的 SPD 和外部脱离器配合	39
图 17	短路情况下 OCPD 和 SPD 外部脱离器的选择性	40
图 18	两级 SPD 的典型应用-电路图	43
图 A.1	动作负载试验的试验设置	49
图 A.2	前 15 冲击次冲击的试验时序图	49
图 A.3	附加五次冲击的试验时序图	50
图 D.1	进入配电系统部分雷电流总和的简易计算	61
图 E.1	配电站和低压装置中可能的接地连接以及故障情况下产生的过电压的典型示意图	65
图 E.2	在 TT 系统中, 由变电站 $R_E$ 和 LV 中点接地 (中性线接地) $R_0$ 组成的联合接地示意图	66
图 E.3	TN 系统	70
图 E.4	TT 系统	71
图 E.5	IT 系统, 例 a (IEC 60364-4-44: 2007, 图 44D)	72
图 E.6	IT 系统, 例 b (IEC 60364-4-44: 2007, 图 44F)	73
图 E.7	IT 系统, 例 c1 (IEC 60364-4-44: 2007, 图 44E)	74
图 E.8	根据北美惯例, 由 TN 系统中的配电变压器的一次侧 (4 线 MV 系统 - 直接接地) 故障引起的暂时过电压	75
图 E.9	典型 TOV max p.u. RMS 电压 (V) 表 2, IEEE 1159—2009	79
图 E.10	中心抽头接地的单相 100V/200V 系统与三相三角形接地的 200V 系统共用接地点示例	82
图 E.11	日本中心抽头接地的单相 100V/200V 典型配电系统	83
图 E.12	日本的典型电力系统配置	83
图 E.13	日本高压系统中故障引起的 TOV 特性	84
图 F.1	具有相同的标称放电电流的两个金属氧化物压敏电阻	86
图 F.2	具有不同标称放电电流的两个金属氧化物压敏电阻	87
图 F.3	基于间隙的 SPD 和基于金属氧化物压敏电阻的 SPD 的配合示例	89
图 F.4	LTE 标准冲击参数的配合方法	90
图 F.5	SPD 的协调配合试验的布置	93
图 G.1	家庭的安装	96
图 G.2	工业上的安装	98
图 G.3	工业安装电路	99
图 G.4	雷电防护系统示例	100
图 G.5	DFIG 风力发电机组的配置	101
图 G.6	-转子回路中发电机和变流器之间的 PWM 电压	101
图 G.7	变流器和发电机位置	102
图 G.8	实验室测试的变流器及其 L-PE 电压波形	103
图 H.1	-供电线路各部分的示例	106

图 H.2 电动汽车供电设备示例.....	108
图 H.3 化工厂设施示例.....	109
图 J.1 SPD 在 TN 系统中的安装.....	116
图 J.2 SPD 在 TT 系统中的安装 (SPD 装在 RCD 的负荷侧).....	118
图 J.3 SPD 在 TT 系统中的安装 (SPD 装在 RCD 的电源侧).....	119
图 J.4 SPD 在没有中性线的 IT 系统中的安装.....	120
图 J.5 在 TN C-S 系统中装置电源入口处 SPD 的典型安装模式.....	121
图 J.6 安装一端口 SPD 的通用方法.....	121
图 J.7 考量 EMC 方面时 SPD 可接受的和不可接受的安装示例.....	122
图 J.8 SPD 与被保护设备的物理和电气等效图.....	123
图 J.9 金属氧化物压敏电阻 (MOV) 型 SPD 和被保护设备之间可能的振荡.....	123
图 J.10 两倍电压的示例.....	124
图 J.11 建筑物内部保护分区的细分.....	125
图 J.12 两个金属氧化物压敏电阻的配合.....	127
图 L.1 SPD 通过单独隔离开关 (可安装在 SPD 壳体内) 连接至总开关负载侧的电路图.....	137
图 L.2 SPD 与最近的可用 MCB 相连接后连接至输入电源 (在英国常见的典型 TNS 装置).....	138
图 L.3 在单相电路中 SPD 通过熔断器 (或 MCB) 并联在配电盘的第一条外接电路上的接线图.....	138
图 L.4 SPD 与输入电源上最近的可用断路器相连接 (美国三相 4W+G, TN-C-S 装置).....	139
图 L.5 SPD 与输入电源上最近的可用断路器相连接 (美国 单相 (分离的) 3W+G, 120/240 V 系统——居民住宅和小型办公室的典型应用).....	140
图 M.1 美国电源和通信系统中带有调制解调器的 PC 机示例.....	141
图 M.2 用于试验的电路原理图.....	142
图 M.3 施加电涌电流时在 PC/调制解调器参考点之间记录到的电压 (电压和电流 vs. 时间, $\mu$ s) ...	143
图 M.4 用于仿真的典型 TT 系统.....	143
图 M.5 对图 M.1 所示建筑物安装了多用途 SPD 后施加电涌时测量的电压和电流波形.....	145
图 N.1 SPD 内部脱离器及外部脱离器与 MOV 配合示意图.....	150
图 N.2 SPD 外部脱离器时间-动作特性示例.....	151
图 O.1 用于在正常使用条件下进行放电电流试验的电路示例.....	153
图 O.2 雷电电流引起的感应电流试验电路示例.....	153
图 P.1 具有电阻性/电容性触发控制的多个串联火花间隙的示例.....	154
图 P.2 具有电容性触发控制的 2 个串联火花间隙.....	155
图 P.3 具有并联 MOV 旁路/触发控制的三极 GDT.....	155
图 P.4 具有 GDT+MOV 触发控制的 4 电极放电间隙.....	156
图 P.5 具有 GDT 串联 MOV 的并联支路的放电间隙.....	156
图 P.6 具有触发变压器的三电极放电间隙.....	157
表 1 符号列表.....	13
表 2 缩略语列表.....	14
表 3 IEC 60364-4-44: 2007 给出的最大 TOV 值.....	17
表 4 $I_{imp}$ 的优选值.....	23
表 5 各种低压系统的保护模式.....	28
表 6 各种电源系统中 SPD 的 $U_c$ 的最小建议值.....	36
表 B.1 $U_c$ 和系统标称电压之间的关系.....	54

表 B.2 金属氧化物压敏电阻 $U_b/U_c$ 之间的关系.....	54
表 E.1 根据 IEC 60364-4-44 要求的允许工频应力过电压.....	64
表 E.2 高压接地故障时低压系统中的工频应力电压和工频故障电压.....	67
表 E.3 符合 IEC 60364 系列标准的低压电源系统的 TOV 试验值.....	76
表 E.4 符合 IEC 60364 系列标准的系统的参考试验电压值.....	76
表 E.5 美国低压配电系统的 TOV 试验值 .....	78
表 E.6 按照美国 UL 标准进行 SPD 试验时的 TOV 值 .....	79
表 E.7 日本低压配电系统的标称电压和参考试验电压值.....	80
表 E.8 日本低压配电系统的 TOV 试验值 .....	81
表 E.9 不同接地故障点的 TOV 电压最大值 .....	82
表 E.10 接地电极类别和接地电阻的最大值 .....	83
表 F.1 .....	91
表 F.2 .....	91
表 F.3 .....	91
表 F.4 协调配合的试验程序 .....	94
表 G.1 基于 2011 年在中国调查的两个终端的 PWM 电压和 $du/dt$ 峰值.....	102
表 G.2 交流发电机励磁电路和相关的 SPD 的特性示例.....	103
表 G.3 风力发电系统与低压配电系统比较 .....	103
表 H.1 CRL 的计算.....	105
表 H.2 简化法 .....	109
表 H.3 GB/T 21714.2 方法.....	110
表 J.1 $I_{imp}$ 值的计算.....	129
表 J.2 日本其他常用低压电源系统的 $I_{imp}$ 值的计算 .....	130
表 J.3 常见低压电源系统的导体数量 .....	131
表 J.4 日本其他常用低压电源系统的导体数量.....	131
表 K.1 典型额定冲击电压（源自 IEC60664-1） .....	132
表 K.2 抗扰度试验等级的选择（取决于安装情况）.....	134
表 K.3 交流输入的抗扰度水平 .....	135
表 M.1 模拟结果 .....	144
表 N.1 单次冲击耐受试验与完整预处理/动作负载试验之间的比率示例.....	147
表 N.2 外部脱离器技术的性能 .....	148
表 N.3 SFD 额定电流—电涌耐受能力示例.....	149
表 N.4 SSD 动作电流示例.....	149



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 18802 的第12部分。GB/T 18802 已经发布了以下部分：

- 低压电涌保护器 (SPD) 第11部分：低压电源系统的电涌保护器 性能要求和试验方法；
- 低压电涌保护器 (SPD) 第12部分：低压配电系统的电涌保护器 选择和使用导则；
- 低压电涌保护器 第21部分：电信和信号网络的电涌保护器 (SPD) 性能要求和试验方法；
- 低压电涌保护器 第22部分：电信和信号网络的电涌保护器 选择和使用导则；
- 低压电涌保护器 第31部分：用于光伏系统的电涌保护器 性能要求和试验方法；
- 低压电涌保护器 第32部分：用于光伏系统的电涌保护器选择和使用导则；
- 低压电涌保护器元件 第311部分：气体放电管 (GDT) 的性能要求和测试回路；
- 低压电涌保护器元件 第312部分：气体放电管 (GDT) 的选择和使用导则；
- 低压电涌保护器元件 第321部分：雪崩击穿二极管 (ABD) 规范；
- 低压电涌保护器元件 第331部分：金属氧化物压敏电阻 (MOV) 规范；
- 低压电涌保护器元件 第341部分：电涌抑制晶闸管 (TSS) 规范；
- 低压电涌保护器元件 第351部分：电信和信号网络的电涌隔离变压器 (SIT) 的性能要求和试验方法；
- 低压电涌保护器元件 第352部分：电信和信号网络的电涌隔离变压器 (SIT) 的选择和使用导则。

本文件代替 GB/T 18802.12—2014《低压电涌保护器 (SPD) 第12部分：低压配电系统的电涌保护器-选择和使用导则》，与 GB/T 18802.12—2014 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 1 “范围”中删除“直流电压不超过1 500 V”的描述；
- 新增或修订一些定义；
- 新增第4章“保护需求”；
- 新增脱离器的信息；
- 修订 SPD 特性；
- 修订 SPD 选择参数列表；
- 新增限制电压信息；
- 新增或修订附录。
- （待补充）。

本文件等同采用 IEC 61643-12: 2020（第3版）《低压电涌保护器 第12部分：低压电源系统的电涌保护器-选择和使用导则》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

- 为便于使用，增加了公式编号；

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国避雷器标准化技术委员会 (SAC/TC81) 归口。

本文件起草单位：上海大学、西安高压电器研究院股份有限公司……

本文件主要起草人：周岐斌……

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——本文件于 2006 年首次发布，2014 年第一次修订；

——本次为第二次修订。

# 引 言

## 0.1 概述

电涌保护器（SPD）是在规定条件下，用来保护电源系统和设备免受如雷电电涌和操作电涌等各种过电压和冲击电流损坏的一种保护电器。

应依据环境条件及设备 SPD 可接受的失效率来选择 SPD。

本文件为用户提供有关 SPD 选择和使用的资料。

本文件参照 IEC 62305 第 1 部分到第 4 部分和 IEC 60364 系列标准，提供用来评估在低压系统使用 SPD 必要性的资料。这些标准提供 SPD 选择和配合的资料，同时考虑他们使用的所有环境条件。例如：被保护的设备和系统性能、绝缘水平、过电压、安装方法，SPD 的安装位置、SPD 的配合、失效模式和设备损坏后果。

IEC 62305-2 提供了一种评估电涌和雷击风险的通用方法。GB/T 16895.10—2010 提供了一种评估电力装置风险的简化方法。

IEC 60664 系列标准提供了产品绝缘配合的指导要求。IEC 60364 系列标准提供安全（火，过电流和电击）和安装要求。

IEC 60364 系列标准对 SPD 安装者 提供直接资料。IEC/TR 62066 提供了更多有关电涌保护的科学背景资料。

## 0.2 理解本文件内容的说明

下列章节总结了本文件的结构，并且提供了每一章节和附录所含资料的摘要，主要章节提供了选择和使用 SPD 要素的基本资料。需要对第 4 章～第 7 章所提供的资料有更详细了解的读者，可查阅相应的附录。

第 1 章规定了本文件的范围。

第 2 章列出了本文件可以找到附加信息的规范性引用文件。

第 3 章提供了理解本文件所用的定义。

第 4 章是对风险分析的简介（考虑何时使用 SPD 是有益的）。

第 5 章介绍了与 SPD 选择有关的系统和设备的参数，另外还介绍了由雷电产生的电应力，以及由电网本身产生的暂时过电压和操作过电压引起的电应力。

第 6 章列举了选择 SPD 所使用的电气参数及其相关说明，这些参数涉及的数据在 IEC 61643-11 中给出。

第 7 章是本文件的核心，讲述了来自电网的电应力（在第 5 章论述）和 SPD 特性（在第 6 章论述）之间的关系。它描述了 SPD 的安装模式如何影响其保护性能，给出了选择 SPD 的不同步骤，包括在一个装置中使用多个 SPD 之间的配合问题（附录 F 中详细给出了配合的要点）。

附录 A 给出了查询的资料并解释了 IEC 61643-11 中采用的试验程序。

附录 B 提供了 SPD 两个重要参数之间的关系示例，即金属氧化物压敏电阻（MOV）的  $U_c$  和  $U_n$ ，同时还列举了  $U_c$  和网络标称电压之间关系的示例。

附录 C 补充了第 5 章给出的低压系统中电涌电压的资料。

附录 D 论述了在直击雷电流作用下用于确定 SPD 等级的不同接地系统之间的雷电流分配的计算。

附录 E 论述了由高压系统故障引起的暂时过电压的计算。

附录 F 为第 7 章中关于一个系统中使用多个 SPD 时的配合原则的补充资料。

附录 G 给出了本文件使用的具体示例。

附录 H 给出了第 4 章中风险分析应用的具体示例。

附录 I 是第 5 章中有关系统电应力的补充资料。

附录 J 是第 7 章中关于在各种低压系统中 SPD 应用的补充资料。

附录 K 讨论了电气设备抗扰度水平与绝缘耐受之间的差异。

附录 L 提供了一些国家使用的 SPD 安装的实际示例。

附录 M 讨论了当设备具有信号端口和电源端口时的配合问题。

附录 N 提供了在电涌条件下熔断器耐受能力的补充资料。

附录 O 提供了系统级抗扰度的实用试验方法。

附录 P 提供了包含多个元件的 SPD 的试验指南。

# 低压电涌保护器（SPD） 第12部分： 低压电源系统的电涌保护器 选择和使用导则

## 1 范围

本文件适用于连接到交流 50 Hz/60 Hz，电压不超过 1 000 VRMS 的 SPD 的选择、运行、安装位置和配合原则。

这些设备至少包含一个非线性元件，预期用于限制电涌电压以及泄放电涌电流。

注1：如果需要，特殊应用的附加要求也适用；

注2：IEC 60364和IEC 62305-4也适用；

注3：本文件仅涉及SPD，而不涉及集成在设备内部的电涌保护元件（SPC）。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16895.10—2010 低压电气装置 第 4-44 部分：安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护（IEC 60364-4-44：2007，IDT）

GB/T 16927.4—2014 高电压和大电流试验技术 第4部分：试验电流和测量系统的定义和要求（IEC 62475：2010，MOD）

注1：GB/T 16927.4—2014被引用的内容与IEC 62475：2010被引用的内容没有技术上的差异。

GB/T 16935.1—2008 低压系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验（IEC 60664-1：2007，IDT）

GB/T 21714.1—2015 雷电防护 第1部分：总则（IEC 62305-1：2010，IDT）

NB/T 42150—2021 低压电涌保护器专用保护装置

YD/T 3894—2021 通信局（站）用电源电涌保护器专用脱离器

IEC 60364-5-53 低压电气装置 第 5-53 部分：电气设备的选择和安装—安全、隔离、开关、控制和监测保护装置（Low-Voltage electrical installations—Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment—Devices for protection for safety, isolation, switching, control and monitoring）

注2：GB/T 16895.22—2004 建筑物电气装置 第5-53部分：电气设备的选择和安装—隔离、开关和控制设备 第534节：过电压保护电器（IEC 60364-5-53：2001，IDT）

IEC 60529 外壳防护等级（IP 代码）（Degrees of protection provided by enclosures（IP Code））

注3：GB 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）（IEC 60529：2013，IDT）

IEC61000-4-5 电磁兼容 试验和测量技术 电涌（冲击）抗扰度试验（Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-5: Testing and measurement techniques—Surge immunity test）

注4：GB/T 17626.5—2019 电磁兼容 试验和测量技术 电涌（冲击）抗扰度试验（IEC 61000-4-5: 2017, MOD）

IEC 61643-11: 2011 低压电涌保护器（SPD）第 11 部分：低压电源系统的电涌保护器 性能要求和试验方法（Low-voltage surge protective devices—Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems—Requirements and test methods）

注5：GB/T 18802.11—2020 低压电涌保护器（SPD）第11部分：低压电源系统的电涌保护器 性能要求和试验方法（IEC 61643-11:2011, MOD）

IEC 61643-32 低压电涌保护器 第 32 部分：连接到光伏装置直流侧的电涌保护器 选择和应用原理（Low-voltage surge protective devices—Part 32: Surge protective devices connected to the d.c. side of photovoltaic installations—Selection and application principles）

注6：GB/T 18802.32—2021 低压电涌保护器 第32部分：用于光伏系统的电涌保护器 选择和使用导则（IEC 61643-32: 2017, IDT）

IEC 62305-2 雷电防护 第 2 部分：风险管理（Protection against lightning—Part 2: Risk management）

注7：GB/T 21714.2—2015 雷电防护 第2部分：风险管理（IEC 62305-2: 2010, IDT）

IEC 62305-4 雷电防护 第 4 部分：建筑物内的电力电子系统（Protection against lightning — Part 4: Electrical and electronic systems within structures）

注8：GB/T 21714.4—2015雷电防护 第4部分：建筑物内的电力电子系统（IEC 62305-4: 2010, IDT）

### 3 术语和定义

#### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1.1

**电涌保护器** surge protective device; SPD

用于限制电涌电压和泄放电涌电流的电器，它至少包含一个非线性的元件。

注：SPD具有适当的连接装置，是一个装配完整的部件。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.1]

##### 3.1.2

**持续工作电流** continuous operating current

$I_c$

在最大持续工作电压（ $U_c$ ）下，流过 SPD 每种保护模式的电流值。

##### 3.1.3

**最大持续工作电压** maximum continuous operating voltage

$U_c$

可连续地施加在 SPD 保护模式上的最大交流电压有效值。

注：本文件涵盖的 $U_c$ 值可能超过1000 V。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.11]

##### 3.1.4

**电压保护水平** voltage protection level

$U_p$

由于施加规定陡度的冲击电压和规定幅值及波形的冲击电流而在 SPD 两端之间预期出现的最大电压。

注：电压保护水平由制造商给出，并大于或等于按照如下方法确定的限制电压：

——对于Ⅱ类和/或Ⅰ类试验，由波前放电电压（如适用）和对应于Ⅱ类与Ⅰ类试验中直到  $I_n$  和/或  $I_{imp}$  峰值处的残压确定；

——对于Ⅲ类试验，取决于复合波发生器直到  $U_{oc}$  的限制电压。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.14, 有修改]

### 3.1.5

**限制电压** measured limiting voltage

施加规定波形和幅值的冲击电压时，在 SPD 接线端子间测得的最大电压峰值。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.15]

### 3.1.6

**残压** residual voltage

$U_{res}$

放电电流流过 SPD 时，在其端子间产生的电压峰值。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.16]

### 3.1.7

**暂时过电压试验值** temporary overvoltage test value

$U_t$

施加在 SPD 上并持续一个规定时间  $t_t$  的试验电压，以模拟在 TOV 条件下的应力。

注： $U_t$  是制造厂宣称的 SPD 特性，它给出了在规定持续时间  $t_t$  内，电压  $U_t$  高于  $U_t$  时的 SPD 性能（这表示施加暂时过电压后性能无变化，或者这种故障对人、设备或装置无伤害）。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.17, 有修改]

### 3.1.8

**电力系统暂时过电压** temporary overvoltage value of the power system

$U_{TOV}$

在电网给定位置，持续时间相对较长的工频过电压。

注1：TOV 是由 LV 系统 ( $U_{TOV(LV)}$ ) 或 HV 系统 ( $U_{TOV(HV)}$ ) 内部故障产生的过电压。

注2：这是电网的特点。暂时过电压，典型持续时间可达几秒钟，通常是由开关操作或故障（例如：突然甩负荷、单相故障等）引起的和/或由非线性（铁磁共振效应、谐波等）现象引起的。

### 3.1.9

**Ⅱ类试验的标称放电电流** nominal discharge current for class II test

$I_n$

流过 SPD 具有 8/20 波形的电流峰值。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.9]

### 3.1.10

**Ⅰ类试验的冲击放电电流** impulse discharge current for class I test

$I_{imp}$

流过 SPD 具有指定转移电荷量  $Q$  和在指定时间内具有指定比能量  $W/R$  的放电电流峰值。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.10]

### 3.1.11

**复合波** combination wave

一种在开路条件下具有规定的电压幅值 ( $U_{oc}$ ) 和波形以及在短路条件下具有规定的电流幅值 ( $I_{cw}$ ) 和波形的波。

注：施加给SPD的电压、电流幅值及其波形由复合波发生器 (CWG) 的  $2\ \Omega$  虚构阻抗  $Z_r$  和 DUT 的阻抗确定。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.22, 有修改]

### 3.1.12

#### 8/20 冲击电流 8/20 current impulse

视在波前时间为  $8\ \mu s$ ，半峰值时间为  $20\ \mu s$  的冲击电流。

注：GB/T 16927.4—2014 的第10章定义了放电电流的波前时间、半峰值时间和波形容差。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.21]

### 3.1.13

#### 1.2/50 冲击电压 1.2/50 voltage impulse

视在波前时间为  $1.2\ \mu s$ ，半峰值时间为  $50\ \mu s$  的冲击电压。

注：IEC 60060-1:2010 的第7章定义了波前时间、半峰值时间和波形容差的电压冲击。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.20]

### 3.1.14

#### 热稳定 thermal stability

在引起 SPD 温度上升的动作负载试验后，在规定的环境温度条件下，给 SPD 施加规定的最大持续工作电压，SPD 的温度能随时间而下降达到的状态。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.25, 有修改]

### 3.1.15

#### SPD 的脱离器 SPD disconnectors

把 SPD 或 SPD 的一部分从电源系统断开的装置。

注：这种断开装置不要求具有隔离能力，它防止系统持续故障并可用来给出 SPD 故障的指示。脱离器可以是内部的（内置的）或者外部的（制造商要求的）。可具有多于一种的脱离器功能，例如过电流保护功能和热保护功能。这些功能可在不同的单元。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.28]

### 3.1.16

#### 型式试验 type tests

根据一个或多个代表生产产品的样本所进行的符合性试验。

[来源：GB/T 2900.83—2008, 151-16-16]

### 3.1.17

#### 外壳防护等级 degrees of protection provided by enclosure

##### IP

以符号 IP 开头的分级，表征外壳对接近危险部件、防止固体异物和水进入所提供的保护程度。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.29]

### 3.1.18

#### 电压降（用百分数表示） voltage drop (in percent)

$$\Delta U = [(U_{\text{输入}} - U_{\text{输出}}) / U_{\text{输入}}] \times 100\%$$

式中：

$U_{\text{输入}}$ ——输入电压；

$U_{\text{输出}}$ ——同一时刻在连续额定阻性负载条件下测量的输出电压，该参数仅适用于二端口 SPD。

### 3.1.19



**二端口 SPD 的负载端电涌耐受能力** load-side surge withstand capability for a two-port SPD

二端口 SPD 输出端子耐受其下游负载侧产生的电涌的能力。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.18]

### 3.1.20

**额定短路电流** short-circuit current rating

$I_{SCCR}$

SPD 与指定脱离器连接的电源系统的最大预期短路电流额定值。

注：对二端口SPD或输入/输出分开的一端口SPD，两种额定短路电流可以定义为：一种相当于内部短路电流（内部带电部分短路），另一种相当于直接在输出端的外部短路电流（负载失效）。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.27, 有修改]

### 3.1.21

**一端口 SPD** one-port SPD

在端子间没有特定串联阻抗的 SPD。

注1：一端口SPD可能具有分开的输入和输出端子。

注2：图1为一些典型的一端口SPD和一端口SPD的示意图（图1c）。一端口SPD可并联，如图1a，或和电源线串联，如图1b。第一种情况是负载电流不流过SPD的输入和输出端子。第二种情况是负载电流流过SPD的输入和输出端子且在负载电流作用下，它的温度会上升，相关的最大允许负载电流可能同一个二端口SPD一样。图3b和3d为各种类型的一端口SPD在复合波发生器施加8/20冲击下的响应波形。

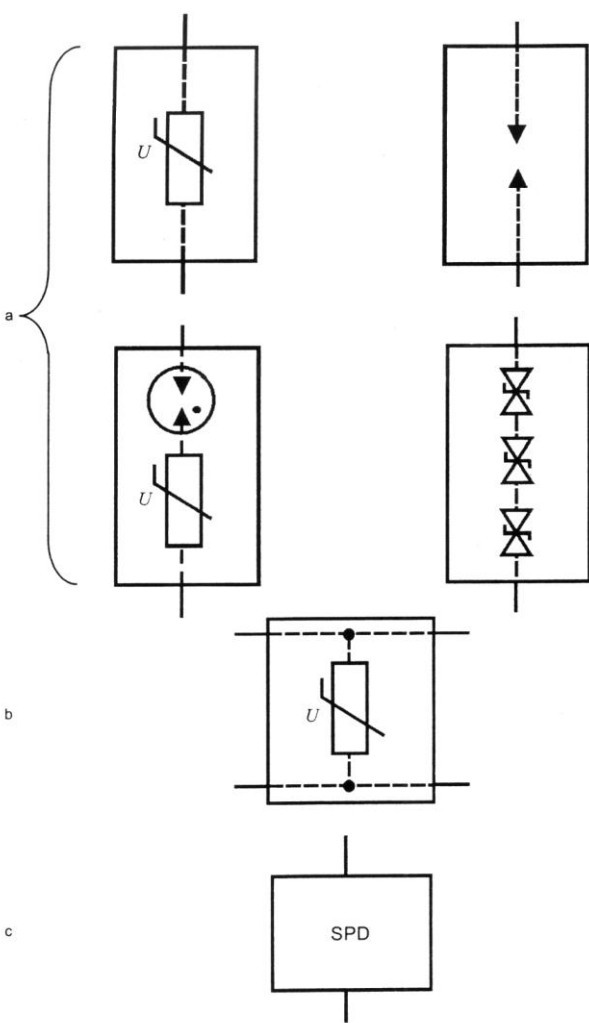
### 3.1.22

**二端口 SPD** two-port SPD

在分开的输入和输出端子之间有特定的串联阻抗的 SPD。

注：输入端限制电压可能比输出端电压高。因此，被保护设备应和输出端相连接。图2为典型的二端口SPD。图3e和图3f为二端口SPD在复合波发生器施加8/20冲击下的响应波形。

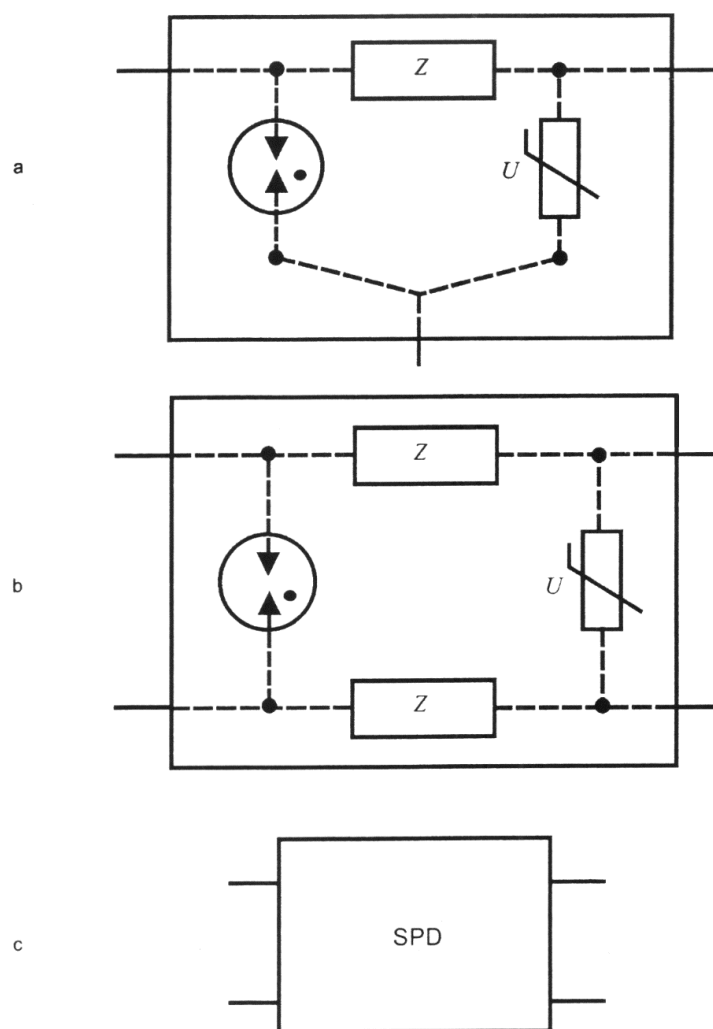
[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.3, 有修改]



标引序号说明：

- a 一端口 SPD；
- b 输入/输出分开的一端口 SPD；
- c 一端口 SPD 的通用符号。

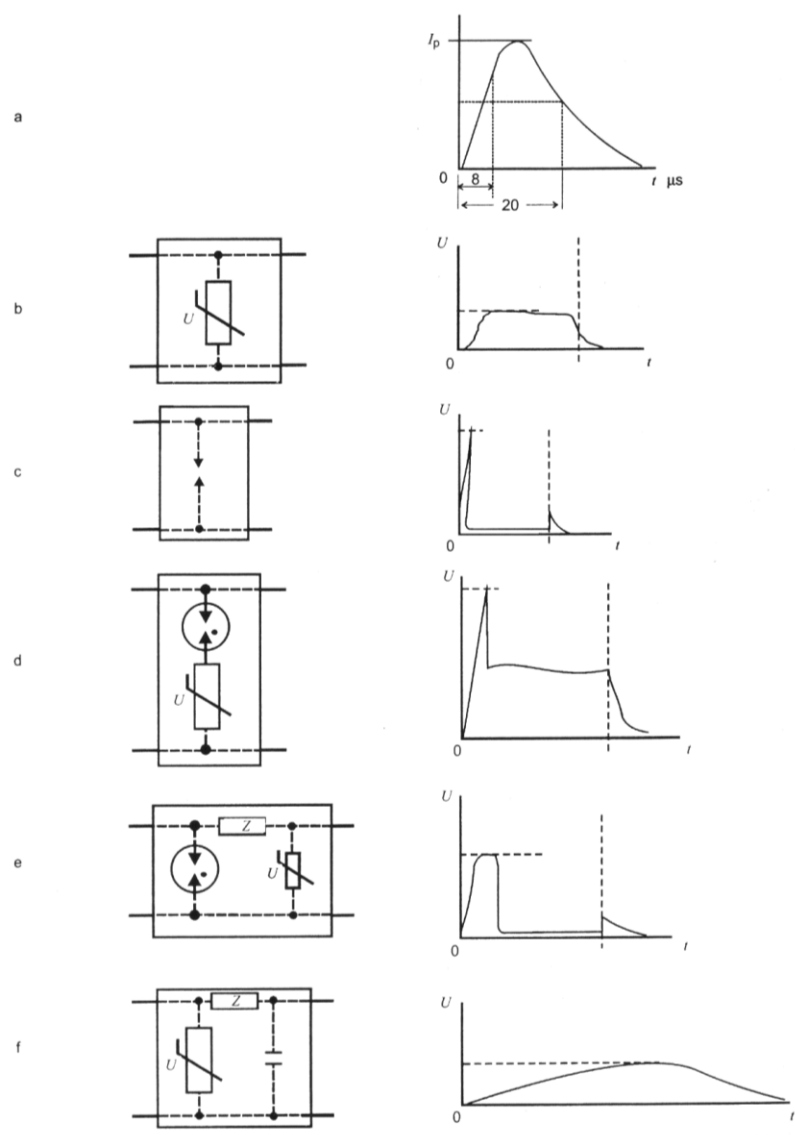
图1 一端口 SPD 的示例



标引序号说明:

- a 三端子二端口 SPD;
- b 四端子二端口 SPD;
- c 二端口 SPD 的通用符号;
- Z 输入端和输出端之间的串联阻抗。

图2 二端口 SPD 的示例



标引序号说明:

- a 施加的电流波;
- b 电压限制型 SPD 的响应;
- c 电压开关型 SPD 的响应;
- d 复合型一端口 SPD 的响应;
- e 复合型二端口 SPD 的响应;
- f 带滤波器的二端口电压限制型 SPD 的响应。

注: 电压水平仅是示意而不是实际值。右边图示里的  $U$  表示 SPD 输出电压值, 左边的图示里的  $U$  代表压敏电阻的符号。

图3 一端口和二端口 SPD 对复合波冲击的响应波形

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.2, 有修改]

3.1.23

电压开关型 SPD voltage-switching type SPD

没有电涌时具有高阻抗, 当对电涌电压响应时能突变成低阻抗的 SPD。

注1: 电压开关型 SPD 常用的元件有放电间隙, 气体放电管和硅基元件 (如晶闸管)。这些有时被称为 “crowbar 型”

元器件。

注2：电压开关型元件有不连续的 $U-I$ 特性，图3c为典型的电压开关型SPD对复合波发生器施加的冲击的响应波形。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.4, 有修改]

### 3.1.24

#### 电压限制型 SPD voltage-limiting type SPD

没有电涌时具有高阻抗，但是随着电涌电流和电压的上升，其阻抗将持续地减小的 SPD。

注1：电压限制型SPD常用的非线性元件是金属氧化物压敏电阻和雪崩击穿二极管。这些有时被称为“箝压型”元器件。

注2：电压限制型元件具有连续的 $U-I$ 特性，图3b是一个典型的电压限制型SPD对复合波发生器产生的冲击的响应。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.5, 有修改]

### 3.1.25

#### 复合型 SPD combination type SPD

由电压开关型元件和电压限制型元件组成的 SPD。

注1：SPD可以表现为电压开关型、电压限制型或两者皆有

注2：图3d和图3e是不同典型的复合型SPD对复合波冲击的响应。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.6, 有修改]

### 3.1.26

#### 保护模式 modes of protection

在端子间保护被保护元件的预期电流路径，例如：相对相、相对地、相对中性线、中性线对地。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.8]

### 3.1.27

#### 续流 follow current

$I_f$

SPD 被施加冲击放电电流以后，由电源系统流入 SPD 的电流峰值。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.12]

### 3.1.28

#### 最大放电电流 maximum discharge current

$I_{max}$

具有 8/20 波形和制造商声明幅值的流过 SPD 电流的峰值。

注： $I_{max}$  等于或大于  $I_n$ 。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.48]

### 3.1.29

#### 劣化 degradation (of performance)

设备或系统的运行性能发生不期望的与预期性能的永久性偏离。

注：耐久性是对SPD在设计寿命期内环境耐受能力的一种测量方法，劣化用两种型式试验方法考核，一个是动作负载试验，另一个是老化试验，两个方法也可以结合起来进行。动作负载试验是对SPD施加规定次数和电流波形的试验，SPD性能变化的允许范围见IEC 61643-11。老化试验是在特定温度下，对SPD施加一个规定时间和规定幅值的电压。SPD性能变化的允许范围见GB/T 18802.11（该试验待定）。

这些试验被用于确定 SPD 预期使用寿命，同时考虑以下内容：

- 替代方式；
- 使用场合和可行性；
- 可接受的失效率；
- 运行经验。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.26, 有修改]

### 3.1.30

**剩余电流装置** residual current device; RCD

在正常运行条件下能接通、承载和分断电流,以及在规定条件下当剩余电流达到规定值时能使触头断开的机械开关器件。

注: 剩余电流装置可以设计为各种独立元件的组合,用以检测和评估剩余电流,并接通和分断电流。

[来源: GB/T 2900.70—2008, 442-05-02]

### 3.1.31

**系统标称电压** nominal voltage of the system

系统或设备标明的电压,某些工作特性与该电压有关(如 230/400 V)。

注1: 在系统标称条件下,供电端的电压可能不同于标称电压,由电源系统的偏差来决定。本文件允许有±10%的偏差。

注2: 相-地的系统标称电压称为 $U_n$ (见IEC 60038)。

注3: 系统相-中性线的电压称为 $U_0$ 。

注4: 系统的线电压称为 $U$ 。

### 3.1.32

**冲击试验分类** impulse test classification

#### 3.1.32.1

**I类试验** class I test

按冲击放电电流( $I_{imp}$ ),峰值电流等于 $I_{imp}$ 峰值的8/20冲击电流和1.2/50冲击电压(如需要)进行的试验。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.34.1, 有修改]

#### 3.1.32.2

**II类试验** class II test

按标称放电电流 $I_n$ 和1.2/50冲击电压(如需要)进行的试验。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.34.2, 有修改]

#### 3.1.32.3

**III类试验** class III test

按1.2/50电压波形和8/20电流波形的复合波发生器进行的试验。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.34.3]。

### 3.1.33

**额定负载电流** rated load current

$I_L$

能提供给连接到SPD保护输出端阻性负载的最大持续额定交流电流有效值。

注: 仅适合输入/输出端分开的SPD。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.13, 有修改]

### 3.1.34

**SPD安装点电力系统最大持续工作电压** maximum continuous operating voltage of the power system at the SPD location

$U_{cs}$

在SPD安装点,SPD可能受到的最大工频电压有效值。

注1: 仅考虑电压调节和/或电压降低或升高。 $U_{cs}$ 也称为视在最大系统电压,与 $U_0$ 有直接关系。

注2: 该电压不考虑谐振、故障、TOV或瞬态条件。

## 3.1.35

**电压开关型 SPD 的启动电压** trigger voltage of a voltage switching SPD

电压开关型 SPD 从高阻抗突变到低阻抗时的最大电压值。

注：电压开关型SPD可以是基于元件的而非间隙（例：硅基元件）。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.36, 有修改]

## 3.1.36

**雷电防护装置** lightning protection system ; LPS

用来减小雷击建筑物造成物理损坏的整个系统。

注：由外部雷电防护装置和内部雷电防护装置组成。

[来源：GB/T 21714.3—2015, 3.1]

## 3.1.37

**多用途 SPD** multiservice SPD

在同一外壳内具有两种或更多保护功能的电涌保护器，例如：在电涌条件下，可对电源、通信和信号提供保护，这些保护共用一个参考点。

## 3.1.38

**剩余电流（残流）** residual current

$I_{PE}$

SPD 按制造商的说明书连接，施加参考试验电压 ( $U_{REF}$ ) 时，流过 PE 接线端子的电流。

注：保护导体 (PE) 是为了安全目的如电击防护中设置的导体（根据IEV 195-02-09）。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.40, 有修改]

## 3.1.39

**供电电源的预期短路电流** prospective short-circuit current of a power supply

$I_P$

在电路中的给定位置，用一个阻抗可忽略的连接短路时可能流过的电流。

注：此预期对称电流用有效值 (r.m.s) 表示。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.38]

## 3.1.40

**额定断开续流值** follow current interrupt rating

$I_{fi}$

SPD 能不依靠脱离器动作而断开的预期短路电流。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.39]

## 3.1.41

**I 类试验的比能量** specific energy for class I test

$W/R$

冲击电流  $I_{imp}$  流过 1  $\Omega$  单位电阻时消耗的能量。

注：其等于电流平方对时间积分 ( $W/R = \int i^2 dt$ )。

[来源：IEC 61643-11: 2011, 3.1.37]

## 3.1.42

**额定冲击电压** rated impulse voltage

$U_k$

制造商对设备或其部件规定的冲击耐受电压值，以表征其绝缘规定的耐受瞬时过电压的能力。

注：在本文件中，仅考虑带电导体和大地之间的耐压。

[来源：GB/T 16935.1—2008, 3.9.2, 有修改]

3.1.43

**冲击耐受电压** impulse withstand voltage

在规定条件下,不造成绝缘击穿、具有一定形状和极性的冲击电压最高峰值。

[来源: GB/T 16935.1—2008, 3.8.1]

3.1.44

**过电压类别** overvoltage category

用数字表征瞬时过电压条件。

[来源: GB/T 16935.1—2008, 3.10, 有修改]

3.1.45

**过电流保护器** overcurrent protective device; OCPD

当电气回路中的电流在规定的时间内超过预定值时,能够断开电气回路的器件。

[来源: GB/T 2900.71—2008, 826-14-14]

3.1.46

**有效的电压保护水平** effective voltage protection level

$U_{p/f}$

SPD 组件连接点处的电压,由 SPD 的电压保护水平及可能存在的脱离器以及连接线两端的电压降形成。

3.1.47

**短路型 SPD** short-circuiting SPD

根据 II 类试验测试 SPD,当电涌电流超过其标称放电电流  $I_n$  时,其特性转变成内部短路状态的 SPD。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.7]

3.1.48

**状态指示器** status indicator

指示 SPD 或 SPD 一部分的工作状态的装置。

注: 此类指示器可是本体的可视和/或音响报警,和/或可具有远程信号发送和/或输出触点功能。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.41]

3.1.49

**开路电压**

$U_{oc}$

在复合波发生器连接被测设备连接处的开路电压。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.23]

3.1.50

**复合波发生器的短路电流** combination wave generator short-circuit current

$I_{cw}$

在复合波发生器连接试品端口处的预期短路电流。

注: 当 SPD 连接到复合波发生器时,流过该试品的电流通常小于  $I_{cw}$ 。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.24]

3.1.51

**(告警) 输出端子** output contact

包含在与主电路分开的电路里并与 SPD 脱离器或状态指示器连接的触头。

[来源: IEC 61643-11: 2011, 3.1.42]

3.1.52

**多模式 SPD** multimode SPD



具有不止一种保护模式的 SPD，或电气上相互连接的作为一个单元供货的 SPD 组件。

[来源：IEC 61643-11：2011，3.1.43，有修改]

### 3.1.53

**总放电电流 total discharge current**

$I_{\text{Total}}$

总放电电流试验期间流经多模式 SPD 的 PE 或 PEN 导体的电流。

注1：目的是考虑多模式SPD的多种保护模式同时进行时发生的累积效应。

注2： $I_{\text{Total}}$ 与根据IEC 62305系列用于雷电保护等电位连接的I类试验的SPD特别相关

注3：PEN导体是兼具保护接地导体和中性导体功能的导体（根据IEV 195-02-12）。

[来源：IEC 61643-11：2011，3.1.44，有修改]

### 3.1.54

**参考试验电压 reference test voltage**

$U_{\text{REF}}$

用于 SPD 测试的电压有效值。它取决于 SPD 的保护模式，系统标称电压，系统结构和系统内的电压波动。

[来源：IEC 61643-11：2011，3.1.45]

### 3.1.55

**短路型 SPD 的额定转换电涌电流 transition surge current rating for short-circuiting SPD**

$I_{\text{trans}}$

导致短路型 SPD 进入短路状态的 8/20 冲击电流，该电流值大于标称放电电流  $I_n$ 。

[来源：IEC 61643-11：2011，3.1.46]

### 3.1.56

**确定电气间隙电压 voltage for clearance determination**

$U_{\text{max}}$

为了确定电气间隙，在施加电涌冲击时的得到的最大测量电压。

[来源：IEC 61643-11：2011，3.1.47，有修改]

### 3.1.57

**压敏电压 Varistor voltage**

$V_v$

在特定时间内以指定电流（通常为 1 mA）测量的 MOV 两端的电压

[来源：IEC 61643-331，3.2.3]

## 3.2 符号和缩略语

下列符号(见表 1)和缩略语（见表 2）适用于本文件。

表1 符号列表

$E_{\text{max}}$	最大耐受能量
$I_c$	持续工作电流
$I_{\text{CW}}$	复合波发生器的短路电流
$I_f$	续流
$I_{fi}$	额定断开续流值
$I_{\text{imp}}$	I类试验的冲击放电电流
$I_L$	额定负载电流

$I_{\max}$	最大放电电流
$I_n$	II类试验的标称放电电流
$I_p$	供电电源的预期短路电流
$I_{PE}$	剩余电流（残流）
$I_{SCCR}$	额定短路电流
$I_{Total}$	多模式SPD的总放电电流
$I_{trans}$	短路型SPD的额定转换电涌电流
$L$	电感
$N_g$	落雷密度
$P_{SPD}$	尽管受到协调的SPD系统的保护，但设备仍可能损坏的可能性
$Q$	冲击电流的电荷量
$t_T$	试验时TOV施加的时间
$U_{cs}$	电源系统的最大持续工作电压
$U_{\max}$	确定电气间隙电压
$U_n$	相对地系统标称电压
$U_o$	系统相线对中性线的电压
$U_{oc}$	复合波发生器的开路电压
$U_p$	电压保护水平
$U_{REF}$	参考试验电压
$U_{res}$	残压
$U_T$	暂时过电压试验值
$U_{TOV}$	电力系统暂时过电压
$U_{TOV(HV)}$	高压系统内部网络的暂时过电压
$U_{TOV(LV)}$	低压系统内部网络的暂时过电压
$U_k$	额定冲击电压
$U_k$	压敏电压
$W/R$	比能量
$Z_i$	（复合波发生器）虚拟阻抗
$\Delta U$	电压降（%）

表2 缩略语列表

ABD	雪崩击穿二极管
CWG	复合波发生器
DFIG	双馈感应发电机
DUT	被试设备
dB	分贝
EB	等电位连接带
EMC	电磁兼容
GDT	气体放电管
HV	高压
IGBT	绝缘栅双极晶体管
IP	外壳防护等级

LEMP	雷电电磁冲击
LPS	雷电防护系统
LPZ	雷电防护区
LTE	允通能量
LV	低压
MEB	总等电位连接
MOV	金属氧化物压敏电阻
MV	中压
OCPD	过电流保护装置
PDS	配电系统
PE	保护地
PV	光伏
PWM	冲击宽度调制
SPC	电涌保护元件
SPD	电涌保护器
RCD	剩余电流装置
TOV	暂时过电压

## 4 保护需求

是否使用 SPD 取决于用户所考虑的一系列参数，应重点考虑条款 H.2 中所列的参数。

可以在以下两个文件中找到关于开展风险分析的更多信息。

——GB/T 21714.2 （用于完整的分析）

——IEC 60364-4-44 （仅针对需要防雷电直击、防雷击建筑附近或雷击线路的建筑）条款 H.1 给出了如何使用这种方法的例子。

当有雷电防护系统时，在给定的电涌条件下（如 GB/T 21714.2 中定义了  $P_{SPD}$ ），GB/T 21714.2 给出了 SPD 的失效概率。当 SPD 电涌耐受能力升高， $P_{SPD}$  相应地减小。

注：如果一个机构规定了对电涌保护的特定应用需求，而不需要进行风险评估，则该机构将规定安装需求和保护水平。在某些情况下，可以额外开展风险评估，以确定 SPD 的试验类别，但不涉及 SPD 的需求。

## 5 被保护的系统和设备

### 5.1 通用要求

当评估一个系统是否需要使用 SPD 时，应考虑两方面因素：

- 使用 SPD 的低压电源系统的特性，包括预期过电压、电涌电流的类型和水平；
- 被保护设备的特性。

### 5.2 低压电源系统

#### 5.2.1 概述

低压电源系统的特性体现为系统接地制式（TN-C，TN-S，TN-C-S，TT，IT）、标称电压，过电压和电涌电流的类型。本部分将过电压和电涌电流分为三类：

- 雷电过电压和电涌电流；
- 操作过电压和电涌电流；
- 暂时过电压。

### 5.2.2 雷电过电压和电涌电流

大多数情况下,雷电冲击强度是选择SPD试验等级和相关电流或电压值( $I_{imp}$ 、 $I_n$ 和 $U_{oc}$ 见IEC 61643-11)的主要因素。

要选择合适的SPD,有必要评估雷电应力(基于电流或电压的波形和幅值)以正确选择SPD。确定SPD的电压保护水平是否足以保护在这种环境中的设备也是相当重要的。

当有雷电防护系统(LPS)存在时,必须在建筑入口安装一个I类试验的SPD。对于具有雷电防护系统(LPS)的建筑物,关于雷电应力的附加信息参见GB/T 21714.1。关于 $I_{imp}$ 的选择,更多的信息参见附录J.3。

一般来说,建筑物外部的电气装置受到的雷电冲击较高(例如,架空线遭受直击雷或雷电感应的情况),在建筑物外部,从装置的入口到内部电路,雷电冲击逐渐减小,这是由回路配置和阻抗变化引起的。

风险分析可以采用IEC 60364-4-44(见条款H.2)中描述的简化方法,也可以采用GB/T 21714.2中描述の詳細风险分析。为了进行风险分析,用户至少需要了解以下内容:

- 当地落雷密度 $N$ (建筑物所在地区年平均落雷密度,每年每平方公里的雷闪次数),现代的雷电定位系统可以提供相当精确的 $N$ 数据;
- 电力设备的外露部分。

为了确定由地下电缆供电的设施是否需要电涌保护,应考虑以下几方面:

- 装置附近有无雷电防护装置;
- 地下电缆的长度是否足以提供足够的电涌衰减?(根据IEC 62305系列,考虑将电涌降低到可接受的水平时,至少需要1000 m的长度);
- 在高土壤电阻率地区的地下电缆可能受到直击雷的影响(屏蔽电缆或穿金属管电缆除外);
- 在连接到建筑的变压器的高压侧供电的架空线路上,可能会出现雷暴产生的大电涌;
- 当由电缆供应电力的建筑物的规模 and 高度增大到一定程度,受到直击雷的危险性将显著增加;
- 存在其它架空设施,进(出)线(电话线、天线系统等)受到的直击雷将影响电力系统和设备。

当许多建筑物由同一个电源系统供电时,没有安装SPD的建筑物的电气系统可能会产生较高的过电压。

雷击事件附近(即雷击建筑物及其附近、雷击电力线路及其附近)的电涌电流波形和大小的评估见GB/T 21714.1—2015的附录E。可参见GB/T 21714.2中描述的方法对每个损伤源进行风险评估。

更多关于雷电冲击的资料见附录C和附录I。

在电气装置内部和SPD上游的设备,可能会影响装置的电涌耐受性能,应该确定其耐受值。

### 5.2.3 操作过电压

操作过电压的应力,包括峰值电流和电压,通常比雷电过电压的应力小,但持续时间较长(例如,由于故障和熔断器操作而产生的瞬态)或能量较低但频繁得多(例如,接触器、功率因数校正电容器组、IGBTs等的操作)。在某种情况下,在建筑物的内部深处或者接近操作过电压源的地方,操作过电压可能高于雷电过电压,需要知道操作过电压的能量,以便选择合适的SPD。

通常情况下,SPD额定参数的选择基于雷电冲击的强度。

有关设施内配电系统产生的电涌的更多信息,请参见IEEE标准C62.41.1—2002的4.3条款和C62.72—2016的5.2.2条款。这些类型的电涌,虽然并不总是立即破坏配电系统或连接的设备,但经

常造成系统运行的间断或中断。这些电涌的波形和幅值与来自配电系统外部的电涌的波形和幅值显著不同，可能需要专门设计 SPD 来减轻这些内部电涌的影响。IEEE 标准 C62.41.2—2002 中定义了代表这些电涌的附加推荐波形和测试幅值。此类电涌的附加信息参见 IEC/TR 62066:2002。

更多关于操作冲击的资料见附录 C 和附录 I。有关操作过电压的其他信息参见 IEC/TR 62066。

## 5.2.4 暂时过电压 $U_{TOV}$

### 5.2.4.1 通则

SPD 在其寿命期内可能会遇到比电力系统正常电压更高的暂时过电压  $U_{TOV}$ 。

暂时过电压有两个要素：幅值和时间。过电压持续时间主要取决于电力系统的接地情况（包括高压电力系统和接有 SPD 的低压系统）。在确定暂时过电压时，应考虑系相电压和线电压（见表 E.3）。

低压系统发生故障时，L-N 或 L-PEN 之间可能会产生暂时过电压：

- 持续一段不确定的时间，直到 OCPD 在短路情况下动作为止；
- 长时间持续失零的情况。

当高压系统发生接地故障时，在有限时间内可能在低压系统 N-PE 或 L-PE 之间产生暂时过电压，这取决于高压系统和低压系统的接地配置或两者之间可能的相互作用。

SPD 不是用来保护系统免受暂时过电压的。SPD 可耐受或以 IEC 61643-11 中描述的方式安全失效。

由于失零造成的 TOV 会导致相线和中性线之间的过电压持续很长时间（长达数小时），其电压值可能会达到电力系统的线电压。SPD 无法保护此类的过电压。在这种情况下可以使用 POP（工频过电压保护装置）。

注：POP 在 IEC 63052 中定义。

更多关于暂时过电压的资料见附录 I 和附录 E。

### 5.2.4.2 标准值

IEC 60364-4-44 给出低压电网中预期的  $U_{TOV}$  的最大值（这些值的详细计算参考附录 E）。

取决于许多因素，如 SPD 的安装位置，电网型式等因素， $U_{TOV}$  的值可能较低。

用户安装时的最大瞬态过电压值见表 1。

用于试验 SPD 的值在附录 E。

表3 IEC 60364-4-44: 2007 给出的最大 TOV 值

$U_{TOV}$ 发生处	系 统	$U_{TOV, HV}$ 最大值
相 - 地	TT, IT	$U_0+250\text{ V}$ , 持续时间 $>5\text{ s}$
		$U_0+1200\text{ V}$ , 持续时间 $\leq 5\text{ s}$
中性线 - 地	TT, IT	250 V, 持续时间 $>5\text{ s}$
		1200 V, 持续时间 $\leq 5\text{ s}$
以上数值是与高压电网故障有关的极端值，可根据附录 E 按电网类型计算。		
$U_{TOV}$ 发生处	系 统	$U_{TOV}$ 最大值
相 - 中性线	TT 和 TN	$\sqrt{3}U_0$

以上数值与低压系统的中性线断线有关。		
相 - 地	IT 系统 (TT 系统见注 1)	$\sqrt{3}U_0$
以上数值与低压系统的相导线意外接地有关。		
相 - 中性线	TT、IT 和 TN	$1.45U_0$ , 持续时间 $\leq 5\text{ s}$
以上数值与相线和中性线短路有关。		
<p>注1: 已证明更高的TOV也可在TT系统出现, 持续时间<math>\leq 5\text{ s}</math>, 详见附录E, IEC 60364-4-44无规定;</p> <p>注2: 在变压器安装点, 最大的TOV值可能与上表不同(高或低), 详见附录E;</p> <p>注3: <math>U_0</math> 为低压系统的相线-中性线电压。</p>		

5.3 被保护设备特性

瞬态条件下被保护设备的特性由以下两种试验方法确定:

- 根据 IEC 60664-1 确定试验设备的抗冲击性能。该试验是一个绝缘配合试验。在试验期间, 设备断电。
- 根据 IEC 61000-4-5 进行设备的抗冲击试验。该试验评估设备运行状态下的抗扰性能。试验主要使用不同水平的复合波发生器(12/ 50, 8/20)进行。它确定在通电操作过程中发生故障、错误或失效的位置。

通过被使用设备在瞬态环境条件下的冲击耐受试验和冲击抗扰度试验的比较, 确定了 SPD 的潜在需求, 更进一步的资料详见附录 0。

注: 选中的SPD对于需要保护的设备可以提供一个比冲击耐受能力低的有效保护。在某些情况下, 设备的连续运行是至关重要的。在7.4.5可以看到,  $U_{p/r}$ 要比设备的冲击耐受值低。 $U_p$ 可按7.5.2和7.5.6选择。

6 电涌保护器

6.1 SPD 基本功能

本部分考虑的 SPD 安装在被保护设备的内部和外部。

注: 电气和电子设备通常用过电压元件(例如: 在IEC 61643-331中兼容的MOVs)来保护, 这里不考虑这些。本文件只考虑符合IEC 61643-11标准的器件(SPDs)提供的过电压保护。

其在电源系统中的功能如下:

- 电源系统无电涌时: SPD 对其所应用的系统工作特性无明显影响;
- 电源系统出现电涌时: SPD 呈现低电阻, 电涌电流通过 SPD 泄流, 把电压限制到其保护水平(大多数情况下远远低于 SPD 的保护水平  $U_p$ ), 电涌可能引起工频续流通过 SPD;
- 当电源系统出现电涌以后: SPD 在电涌及任何可能出现的工频续流熄灭以后, 恢复到高阻抗状态。

规定 SPD 的特性, 使其在正常使用条件下能满足以上功能。正常使用条件包括: 电源系统电压频率, 负载电流, 海拔高度(即气压), 空气湿度和环境温度。

6.2 补充要求

取决于 SPD 的应用，需补充如下要求：

——SPD 防直接接触的保护（见 IEC 60364-4-41）；

——SPD 失效时的安全性。

当电涌大于设计最大持续工作电压和放电电流时，SPD 可能失效或损坏。在本文件中，SPD 的失效模式分为开路模式和短路模式（见 6.5.4）。

注：在本条款中，这并不涉及 IEC 61643-11 的 SPD 分类概念（SPD 失效行为），该概念与 SPD 的特定技术有关。然而，根据定义，属于短路型的 SPD 在达到其寿命结束时将处于短路状态。

SPD 失效时通常很难检测，因为它对系统几乎没有影响。然而，系统不再受到保护。为确保在下次电涌前更换失效的 SPD，需要一个故障指示器（见 7.6.3）。

当失效的 SPD 使用寿命结束时，可能会有短路电流流过。为确保短路电流传导过程中所耗散的能量不会引起火灾，需要进行 IEC 61643-11 短路耐受能力试验。独立于 IEC 61643-11 所宣布的 SPD 失效行为（开路或短路行为），可能需要一个合适的断开装置来在过载时保护 SPD（见 7.5.2.4）。

## 6.3 SPD 分类

### 6.3.1 SPD：分类

电涌保护器依照 IEC 61643-11 分类如下：

端口数：一或二；

设计类型：电压开关型，电压限制型，复合型；

SPD 等级试验：I、II、III 类试验；

使用地点：户内或户外；

易触及性：易触及的，不易触及的；

安装模式：固定的或移动的；

脱离器：位置（外部的，内部的，内外都有，没有）和保护功能（热，泄漏电流，过电流）；

过电流保护：规定或不规定；

SPD 外壳提供的防护等级（IP 代码）；

温度范围：正常或扩展。

注：依据定义，户外是指封闭空间以外，这类 SPD 易受外部环境条件影响。户内指封闭空间以内。这类 SPD 易受户内环境条件影响。

以上选择与制造工艺有关，由制造厂规定。

### 6.3.2 设计的工艺类型

SPD 的主要保护元件分为两类：

——限压型元件：压敏电阻、雪崩二极管或抑制二极管等；

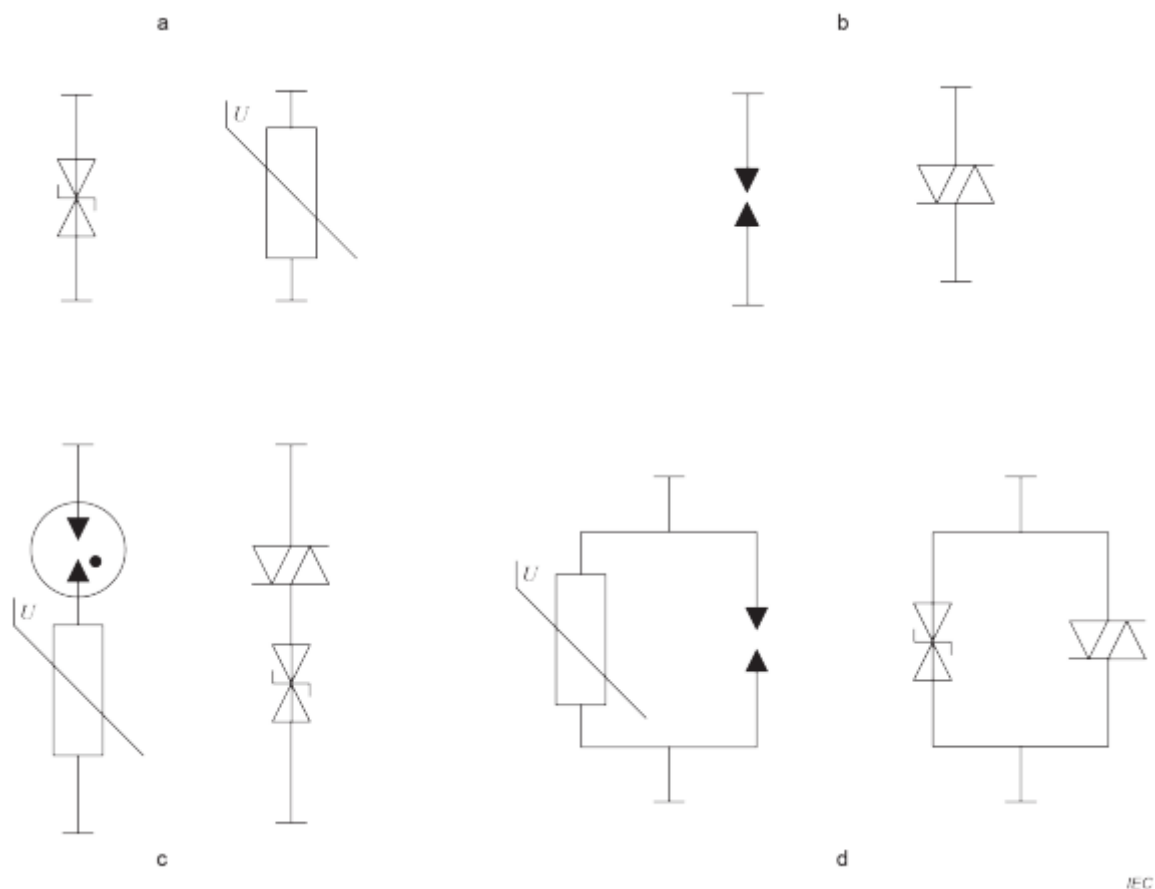
——电压开关型元件：空气间隙、气体放电管、晶闸管（可控硅整流器）、三端双向可控硅开关等。

基于这些元件，典型 SPD 设计分类如下：（见图 4）

——纯电压限制型元件（图 4a）：电压限制型 SPD；

——纯电压开关型元件（图 4b）：电压开关型 SPD；

——限压型和电压开关型元件组合（图 4c 和 d）：复合型 SPD。



- 标引序号说明：
- a 限压型元件；
  - b 电压开关型元件；
  - c 限压型和电压开关型元件串联；
  - d 限压型和电压开关型元件并联。

图4 元件及组件示例

不是所有的SPD都是基本元件的简单排列，可以增加指示器、脱离器、熔断器、电感、电容、热截止器和正温度系数热敏电阻和其它元件。

此外，SPD可设计为：一端口SPD（见3.1.21）和二端口SPD（见3.1.22）。

见附录P，有多个元件的SPD的试验指南。

6.4 SPD 特性

6.4.1 IEC 61643-11 规定的使用条件

6.4.1.1 正常使用条件

- SPD 的正常使用条件为：
- 频率在 47 Hz 和 63 Hz 之间的交流电源；
  - 海拔不超过 2000 m；
  - 工作温度：正常范围为-5 °C 至 +40 °C，扩展范围为-40 °C 至 +70 °C；
  - 室温下相对湿度在 5 %和 95 %之间，扩展范围为 5 %和 100 %之间。



正常范围针对没有温湿度控制、具有气候防护场所的户内应用SPD, 扩展范围针对无气候防护场所的户外应用SPD

注1: 用户决定了SPD的使用场所(户内、户外等), 并确定环境温度条件是在正常范围内或在扩展范围外;

注2: 一般而言, 贮存温度范围要比工作温度范围要大。

#### 6.4.1.2 异常使用条件

对异常使用条件下的 SPD, 在设计和使用时需要作特殊考虑, 并应引起制造厂重视。

阳光辐射: 大多数 SPD 不经受阳光辐射, 通常型式试验不考虑阳光辐射, 对于暴露于阳光辐射下的 SPD 应考虑并且要进行相应的试验。

注: 通常, SPD外壳的防护等级应高于IP2X, 某些场合(例如: 户外型SPD)可能使用其它防护等级。

#### 6.4.2 SPD 参数的选择

以下是用户正确选择 SPD 所需要的通用参数:

注: 其中一些参数是对每种保护模式规定的。

- a)  $U_c$  和  $I_c$ : 最大持续工作电压和持续工作电流;
- b)  $U_i$ : (暂时过电压试验值和/或 SPD 适用的电源系统类型);
- c)  $I_{imp}$ : 适用于 I 类试验;
- d)  $I_n$ : II类试验的标称放电电流;
- e)  $U_{oc}$ : III类试验的复合波开路电压;
- f) 电压保护水平  $U_p$ ;
- g) 失效模式(如制造商有宣称);
- h)  $I_{SCCR}$ : 额定短路电流;
- i)  $I_{fi}$ : 额定断开续流值(限压型 SPD 除外);
- j)  $I_L$ : 额定负载电流(对二端口 SPD 或输入/输出分开的一端口 SPD);
- k) 电压降(用于二端口 SPD);
- l)  $I_{PE}$ : 残流(用于带保护导体端子的 SPD);
- m)  $I_{trans}$ : 转换电涌电流(用于短路型 SPD);
- n) 外部脱离器的额定值和特性(如果需要);
- o)  $I_{max}$ : 最大放电电流(可选);
- p)  $I_{total}$ : 多极 SPD 的总放电电流(如制造商声明);
- q) 二端口 SPD 的负载侧抗电涌能力(如由制造商声明);
- r) 保护模式(适用于具有多种保护模式的 SPD);
- s)  $du/dt$ : 电压上升率(如制造商声明)。

#### 6.5 SPD 特性的补充资料

##### 6.5.1 与工频电压有关的资料

##### 6.5.1.1 最大持续工作电压 $U_c$ , 持续工作电流 $I_c$ , 剩余电流 $I_{PE}$

$U_c$  应足够高, 尽量减小正常条件下 SPD 特性(老化, 热失控等)的任何变化。

$I_c$  是当施加  $U_c$  时通过 SPD 的电流值。如果有经过接地端(PE)的电流称为剩余电流  $I_{PE}$ 。该电流  $I_{PE}$  用于在选择 SPD 时, 避免过电流装置或其他保护装置(例如 RCD)的不必要操作(见 IEC 60364-5-53: 2001 的 531.2.1.2)。

注:  $I_c$  在 IEC 61643-11 中未测量, 为可选参数。

### 6.5.1.2 暂时过电压特性

SPD 的暂时过电压特性通常由电压(工频)与时间(高达数秒)曲线上的若干个点(电压/时间)来表示。

IEC 61643-11 所考虑的 TOV 的持续时间限于三个持续时间:

- 高压侧故障造成的 TOV 为 200 ms,
- 低压系统故障造成的 5 s,
- 失零造成的 120 min。

相关的试验电压值称为  $U_t$ (暂时过电压试验值)。

SPD 既可以经受 TOV 试验, 而其特性没有发生不可接受的变化, 也可以在安全的方式下失效。

按照标准 IEC 60364-5-53 安装的 SPD 应能承受因低压系统故障而产生的 TOV(持续时间参见表 E.3 中的 TOV 值 5 s)。

制造商在安装指导中说明的可以安装在 TT 系统中、位于主 RCD 上游、连接于中性线与 PE 之间的 SPD, 还应承受因高压电源系统故障而产生的 TOV(见表 E.3 中 200 ms 持续时间的 TOV 值)。

暂时过电压试验值由制造商根据 IEC 61643-11 声明。

注: 选择既具有高暂时过电压耐压能力又具有低电压保护水平的 SPD 是很困难的。

用户可通过比较 SPD 的暂时过电压试验值与电源系统中发生的暂时过电压 ( $U_{tov}$ ) 来选择最合适的 SPD。SPD 试验所用的标准值见表 E.3。

制造商的规格书应提供  $U_t$  (暂时过电压试验值)或 SPD 适用的电源系统类型。当提供了适合于 SPD 的系统类型时, 所有必要的试验都已在要求的  $U_t$  值下进行, 因此对于符合 IEC 60364-4-44 中定义的 TOV 的系统, 不需要比较  $U_t$  和  $U_{tov}$ 。通常可在产品规格书中列出了 SPD 所适用的电源系统类型, 以简化用户的选型工作。

### 6.5.2 与电涌电流相关的信息

#### 6.5.2.1 通则

下面讨论的因素与电涌波形的电压、电流和时间特性有关。根据 SPD 暴露程度确定的预期承受的应力, 使用不同的电涌波形和等级进行测试。

在 IEC 61643-11 的引言中阐述了为 SPD 选择适当试验等级的指南, 规定如下:

有三种类别的试验:

- I 类试验旨在模拟部分直击传导雷电流冲击。符合 I 类试验方法的 SPD 通常推荐用于高暴露地点, 例如: 受雷电防护系统保护的建筑物的进线侧。
- II 类或 III 类试验方法试验的 SPD 承受持续时间较短的冲击。

选择 SPD 时必须考虑其试验类别和额定冲击的大小。经 II 或 III 类试验的 SPD 在大多数情况下推荐安装在较少受到直接冲击电流位置。第 II 类试验 SPD 可用于入口和分配电盘, 而 III 类试验 SPD 应用于靠近设备的位置。

注1: II 类试验是对 SPD 施加外加电流。III 类试验对 SPD 施加电压, 所产生的电流与 SPD 的特性有关。SPD 上的印字与所使用的发生器有关, 而与试验过程中通过 SPD 的实际电流无关。

注2: SPD 经受的试验类别标注在铭牌上, 以在方框内标明 T 的方式表示: “T1”表示 I 类试验, “T2”表示 II 类试验, “T3”表示 III 类试验, 或者用文字写出“试验类别”。

#### 6.5.2.2 $I_n$ : 标称放电电流 (8/20)

对于满足 II 类测试的 SPD, 此电流用来作为一个试验参数, 以确定测得的限制电压 (另一项试验是电压开关型和复合型 SPD 的波前放电电压试验), 此电流也用于工作负载试验(施加 15 次)。

$I_n$  对应于预期在现场频繁出现的电流。

$I_n$  的优选值：0.05；0.1；0.25；0.5；1.0；1.5；2.0；2.5；3.0；5.0；10；15 和 20 kA。

IEC 60364-5-53 要求安装入口处的电流至少为 5 kA。

### 6.5.2.3 $I_{imp}$ ：冲击电流（例：10/350）

对于符合 I 类试验的 SPD， $I_{imp}$  是 I 类试验附加动作负载试验中使用的试验参数， $I_{imp}$  与系统中 SPD 所在位置的最大冲击电流值相关。

注：波形为 8/20，峰值为  $I_{imp}$  的冲击用于确定测量限制电压（另一个试验是电压开关型和复合型 SPD 的波前放电电压试验）和用于动作负载试验（施加 15 次）。

根据 IEC 61643-11， $I_{imp}(Q, W/R)$  的优选值见表 4。

表4  $I_{imp}$  的优选值

$I_{imp}$ (kA)	$Q$ (C)	$W/R$ (kJ/Ω)
25	12.5	156
20	10	100
12.5	6.25	39
10	5	25
5	2.5	6.25
2	1	1
1	0.5	0.25
注：10/350 波形是满足表 2 要求的典型示例波形。		

### 6.5.2.4 $I_{max}$ ：最大放电电流

$I_{max}$  是可选的试验参数。在动作负载试验中  $I_{max}$  处没有冲击。它与放电电流的最大值相关，在该 SPD 的安装位置处预期很少发生。

当制造商声明了  $I_{max}$ ，应额外施加测量和记录一次 8/20 波形下、峰值为  $I_{max}$  的电流冲击下的残压。对于电压限制型 SPD，其对应的电压  $U_{max}$  不低于  $I_n$  处的残压。

### 6.5.2.5 $I_{trans}$ ：额定转换电涌电流（用于短路型 SPD）

$I_{trans}$  是一个 8/20 波形数值大于  $I_n$ ，且能使短路型 SPD 进入短路状态的电流。

此电流也用于短路电流性能试验的预处理过程。

$I_{trans}$  的值是从  $I_n$  的优选值中选取。

## 6.5.3 与 SPD 电压保护水平相关的信息

### 6.5.3.1 测量限制电压

#### 6.5.3.1.1 I 类和 II 类试验

限制电压的测量通过以下两项试验确定：

——测量 8/20 波形不同电流值下的残压；

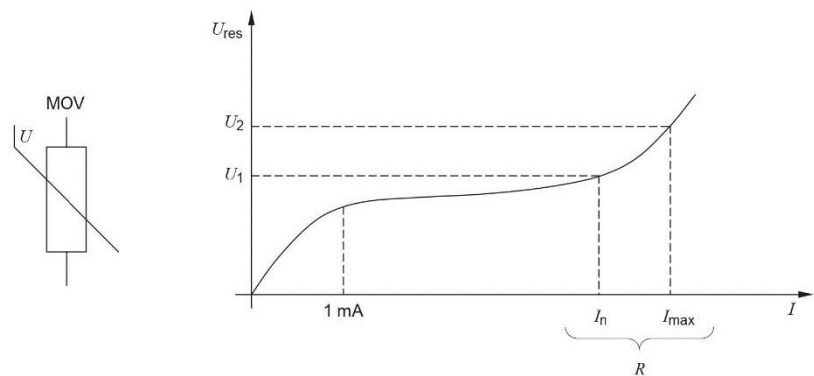
——使用 1.2/50 波形测量波前放电电压（仅适用于电压开关型及复合型 SPD）；

测得的限制电压由以下任一电压最高值确定：

——I 类试验，8/20 波形放电电流下，从 0.1 倍  $I_{imp}$  至 1.0 倍  $I_{imp}$  下的残压；II 类试验，从 0.1 倍  $I_n$  至 1.0 倍  $I_n$  下的残压；

——或使用 1.2/50 波形下测得的波前放电电压。

对于带有电压限制型元器件的 SPD,图 5 给出了金属氧化物压敏电阻(MOV)的典型残压曲线( $U_{\text{res}}-I$ )。该曲线反映了如下情形:当声称  $I_{\text{max}}$  时,SPD 在  $I_{\text{max}}$  下的残压会比  $I_n$  下的残压高。如果  $I_{\text{max}}$  下的残压超过电压保护水平,尤其该残压超过了被保护设备的冲击耐受电压的额定值,那么就存在 SPD 能承受这样的压力但设备将不会受到保护的风险。因此,选择 SPD 的电压保护水平和电涌耐受水平时,需统筹考虑二者的关联。



标引序号说明:

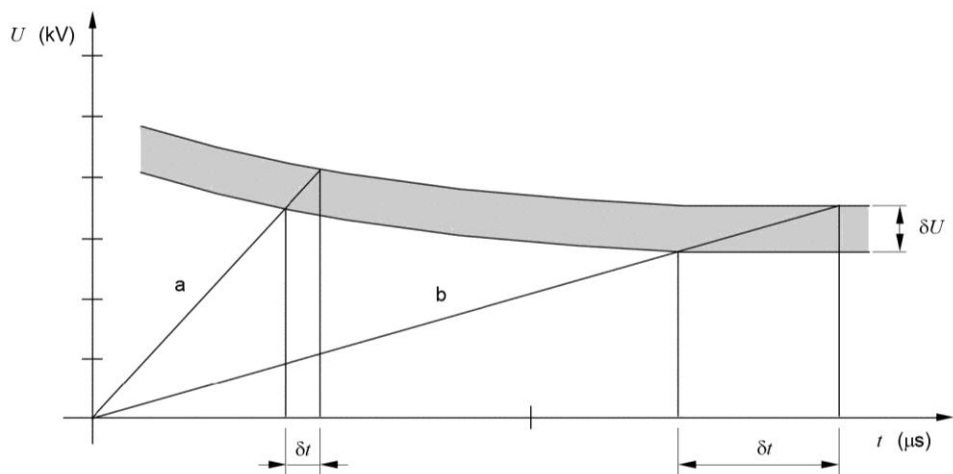
$U_1$ :  $I_n$  下的残压

$U_2$ :  $I_{\text{max}}$  下的残压

R: 数 kA 电流范围

图5 金属氧化物压敏电阻 (MOV) 典型  $U_{\text{res}}-I$  曲线

对于电压开关型元器件的 SPD (如放电间隙、气体放电管等),冲击放电电压取决于施加的瞬态过电压上升沿斜率( $du/dt$ )。在大多数情形下,瞬态电压上升率 ( $du/dt$ ) 越高,对应的冲击放电电压值也越高。由于冲击放电电压是一个根据  $du/dt$  来定义的统计值,因此测量值具有一定的分散性(见图 6)。



标引序号说明:

a 较高上升沿斜率-10 kV/μs

b 较低上升沿斜率-1 kV/μs

$\delta t$  放电时间分布

$\delta U$  放电电压分布

图6 间隙放电典型曲线

### 6.5.3.1.2 III类试验

采用复合波发生器对III类SPD试验，冲击电压从0.1倍 $U_{oc}$ 至1倍 $U_{oc}$ ，将试验过程中测得的最大值作为限制电压值。

### 6.5.3.2 电压保护水平 $U_p$

$U_p$ 值由制造厂声称。按定义，该值应大于等于测量的限制电压的最大值。制造厂选择该值应允许制造偏差。在实际中，SPD提供的保护效果优于 $U_p$ 的情况并不少见。在少数情况下，制造商公布的规格书包含 $U$ 或 $U_{res}-I$ 关系曲线，或者对应于 $I$ 值下的 $U$ 或 $U_{res}$ 。如果流经SPD安装位置预期电流小于确定 $U_p$ 的电流，那么可以使用该电压值( $U$ 或 $U_{res}$ )来达到更好的保护效果。

根据过电压类别和受保护设备的标称工作电压，给出对应的电压保护水平的优选值:0.08; 0.09; 0.10; 0.12; 0.15; 0.22; 0.33; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.2; 1.5; 1.8; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 8.0; 10 kV。

附录B给出了基于金属氧化物压敏电阻(MOV)的电压限制型SPD的 $U_c$ 与 $U_p$ 之间的关系示例。

### 6.5.4 与SPD失效模式相关的信息

SPD的失效模式取决于电涌电流和电压的幅值，冲击次数和波形、电源系统的短路容量和失效时SPD上施加电压的值。本文件考虑SPD的两种失效模式：

- 短路(或低阻抗)；
- 开路(或高阻抗)。

注1：本条款内容不涉及IEC 61643-11:2011第5.12款(SPD失效模式)中与SPD的特定技术相关的SPD分类概念。然而，按5.12.2(短路型SPD)分类的SPD在达到其寿命终结时以短路模式失效。

有时，SPD在某一时段处于一个不确定状态，该状态吸收能量，并最终进入开路(自身或相连的断路器或上游过电流保护器)或短路状态。出于本文件的目的，假定该状态是暂时的，故不予讨论。

注2：中间状态是指参数比制造商规定的水平更低(指劣化)，但这并不意味着SPD失效。

SPD特性变化不必要被认为是失效，详见6.5.7。

### 6.5.5 $I_{scor}$ ：额定短路电流， $I_{fi}$ ：额定断开续流

SPD本身或与其相连的脱离器和/或过电流保护器一起能够耐受制造厂标明的额定短路电流 $I_{scor}$ 。该值按照标准IEC 61643-11定义，需与制造商声明的脱离器或/和过流保护器相连进行试验。试验中SPD不应燃烧、烧焦或排出熔融物质，也不应在外壳上形成开孔。必须确保SPD使用场所的预期短路电流 $I_p$ 不能高于其短路耐受电流。也必须确保存在安装如制造厂推荐合适的脱离器和/或过电流保护装置，且能正常工作。 $I_{scor}$ 值是SPD与指定的脱离器和/或过流保护装置一起配合使用时的额定值。如果需要，由制造商文档提供的该值以及外部脱离器的额定值和特性，随货提供。

对于非电压限制型SPD，续流是在对SPD施加一次冲击放电电流后由电源系统产生的峰值电流。额定断开续流值 $I_{fi}$ 是指SPD不用通过脱离器动作就能够遮断的预期短路电流。在选择非限压型SPD时，应考虑 $I_{fi}$ 的值，这一信息应在厂家随货的产品信息中给出。根据安装规则，用于保护SPD的外部脱离器或过流保护装置应符合有关过流保护装置的IEC标准，或适用的当地国家标准。

### 6.5.6 额定负载电流 $I_L$ 和电压降 $\Delta U$ (二端口SPD或输入/输出分开的一端口SPD)

二端口SPD或串联电源连接的一端口SPD需要确保设备运行时的负载电流不会超过其额定负载电流 $I_L$ 。

注：需考虑负载的类型。如一些负载涌入的电流可能高达有效值RMS值的3倍。这样高的电流会使两端口SPD内串联的元件产生额外的积热。

需检查安装的二端口 SPD 不会对位于下游的设备形成不可接受的电压降,该特征以可选的电压降参数  $\Delta U$  来体现。

6.5.7 涉及 SPD 特性变化的相关信息

某些 SPD 在受到高于标准试验规定的电应力时,可能会进入到一个中间状态,在这种情况下,SPD 的某些特性可能偏离设计值,例如:  $U_b$ ,  $I_n$ ,  $I_c$  等,特别是内部具有多个并联保护元器件的 SPD,在承受电涌以后,带电部件中的一个可能脱离。如此情形下,用户可能不知道这些特性变化。因此,除非出现这种状态时具备清晰的指示,否则在设计 SPD 时应避免存在这种中间状态。

7 SPD 在低压电源系统的应用

7.1 通则

当完成风险评估(见第 4 章)确定需要安装 SPD 时,并且已知系统中可能受到的应力(见第 5 章),可以按图 7 所示步骤确定用来保护设备的 SPD 的特征(在第 6 章中列出)。

配电系统中的 SPD 可以根据条款 7.1 中所列的原则进行选择,并根据条款 7.2 中所述的步骤选择其特性。

SPD 的选择

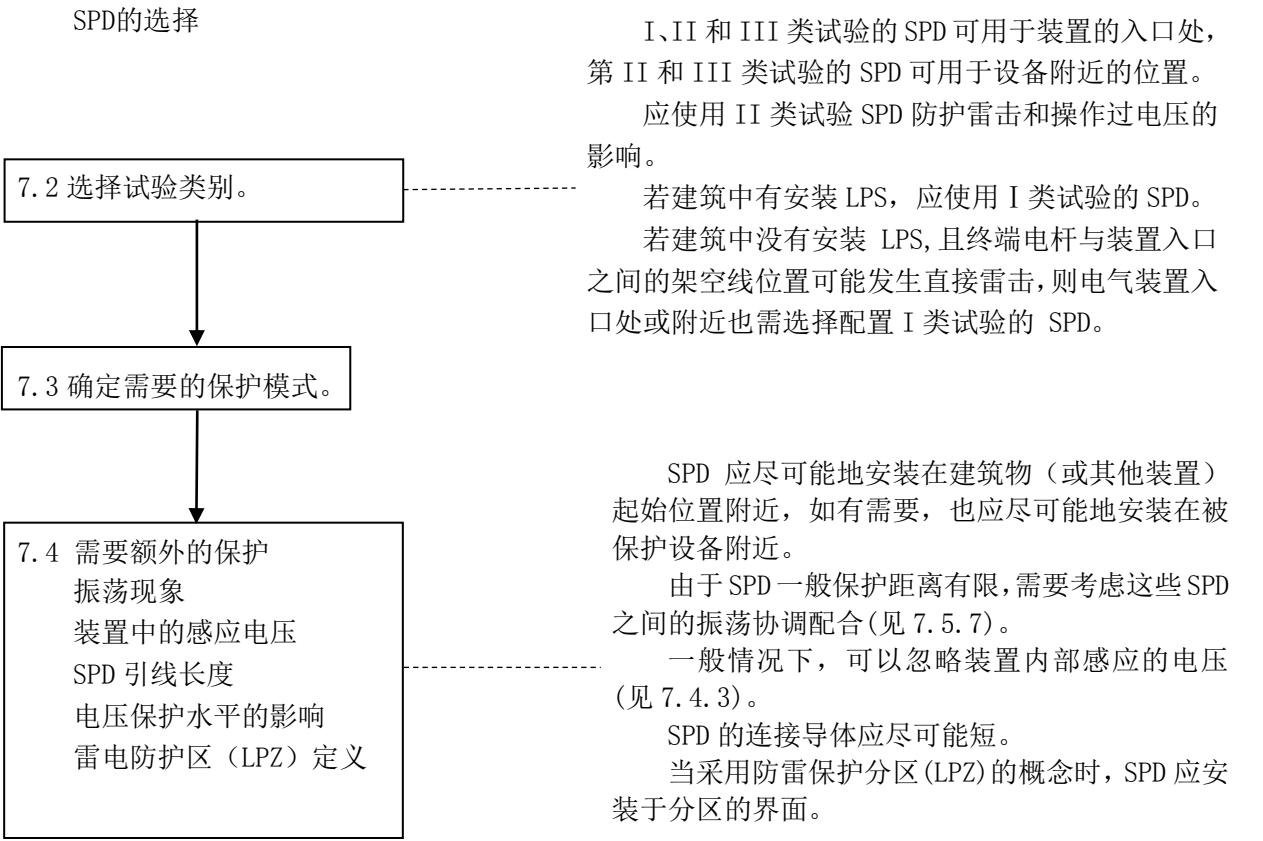


图7 SPD 应用的流程图

SPD 的应用示例见附录 G。

SPD 的实际安装示例见附录 L。

7.2 根据试验类别确定 SPD 安装位置

根据侵入入口处的应力特征，参照风险分析的结果(参见条款 4)可以安装 I 类或 II 类试验的 SPD。SPD 安装尽可能的靠近源头，以减少流经下游装置的电涌电流(如：电能表、终端设备、保护装置、开关装置等)。考虑电涌中包含的电应力是选择合适的 SPD 的关键因素。当装置内产生的开关过电压或其他服务设施侵入过电压，如电话线、互联网连接或服务于其它装置的服务设施时，SPD 应尽可能靠近此类威胁的起始位置。当存在 LPS 时，可以在 IEC 62305 系列标准中找到额外信息。II 类和 III 类试验的 SPD 亦适用于靠近被保护设备的位置。

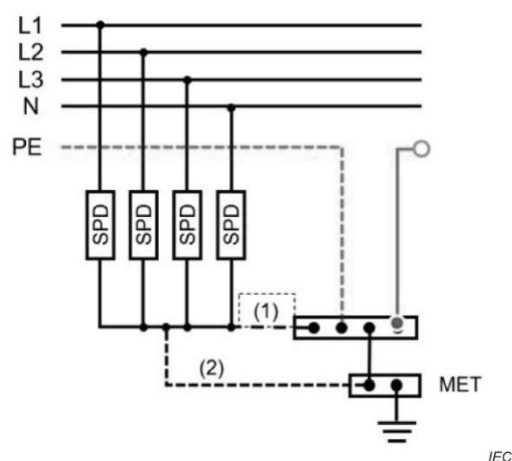
### 7.3 SPD 保护模式及安装

当被保护设备有足够的过电压耐受能力，或设备位于主配电盘附近时，则尽量在靠近装置的入口处安装一个 SPD 可能就足够了。安装在该位置的 SPD 应具有足够的冲击耐受能力。图 L.1 到 L.5 给出了位于不同系统类型的装置入口处 SPD 的典型连接方式。图 L.5 给出了在 TN C-S 系统中的具体示例。

位于或靠近被保护装置起始点的 SPD 应至少按照以下原则连接：

- a) 如果中性线和 PE 在被保护装置的起始点或附近有直接连接，或如果没有中性线，则在每条相线和主接地极或保护导线之间，优先选择较短的连接路径；或  
注1：IT系统中连接中性线和PE之间的阻抗不被视为连接。
- b) 如果中性线和 PE 在被保护装置的起始点或附近没有直接连接，则：  
连接类型 1 (CT1)，见图 8——在每条相线和主接地极或保护导线之间，在中性线和主接地极或保护导线之间，优先选择较短的连接路径，  
或  
连接类型 2 (CT2)，见图 9——在每条相线和中性线之间，在中性线和主接地极或保护导线之间，优先选择较短的连接路径。

注2：如果某根相线意外接地，其可被等效为b)条款中的中性线。

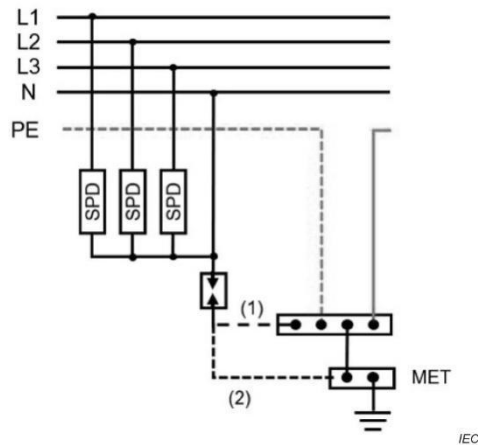


标引序号说明：

MET：总等电位排

注：电涌保护装置的接地连接，其中(1)和/或(2)应选择最短路径；国家法规可能要求使用路径1、2，甚至两者均强制要求。

图8 连接类型 1 的示例 (CT1)



标引序号说明：  
MET：总等电位排  
注：电涌保护装置的接地连接，其中(1)或(2)应为选择最短路径；国家法规可能要求使用1、2，甚至两者均强制要求。

图9 连接类型 2（CT2）的示例

表 3 给出了多种低压系统可能要求的各种保护模式  
注1：如果有多个SPD连接至同一导线时，应确保它们之间的协调配合（见7.5.7）；  
注2：保护模式的数量取决于要保护的设备类型（例如，如果设备不接地，则线-或中性线-（对）地不需保护）；  
设备的耐受性能取决于各个保护模式，电气系统的结构，接地方式，以及线路中侵入波形的特性。例如，相/中性线和PE导线之间，或相和中性线之间一般能实现充分保护，而相和相之间一般不用保护；  
注3：在供电部门计量表前安装SPD装置必须经供电部门同意。

表5 各种低压系统的保护模式

SPD 连接位置	SPD 安装位置的系统制式							
	TT		TN-C	TN-S		IT 带中性线		IT 不带中性线
	安装分类			安装分类		安装分类		
	CT1 <sup>c</sup>	CT2		CT1	CT2	CT1	CT2	
相线和中性线之间	+	•	NA	+	•	+	•	NA
相线和 PE 线之间	•	NA	NA	•	NA	•	NA	•
中性线和 PE 线之间	•	• <sup>b, d</sup>	NA	• <sup>a</sup>	• <sup>a, b</sup>	•	• <sup>b</sup>	NA
相线和 PEN 线之间	NA	NA	•	NA	NA	NA	NA	NA
相线和相线之间	+	+	+	+	+	+	+	+
<p>• ：必需的 NA：不适用 + ：可选，除了必需的 SPD CT：连接类型</p> <p><sup>a</sup> 在 TN-S 或 TN-C-S 系统中，如果 PE 线和 N 线的分离点到 SPD 装置安装位置的距离小于 0.5m，或者上述分离点与 SPD 安装于同一配电盘位置，可以省略中性线和 PE 线之间的 SPD。</p> <p><sup>b</sup> 使用 CT2 时，应将设备的 <math>U_w</math> 与两个 SPD 串联（L-N 和 N-PE）后叠加的电压保护水平进行比较，这种叠加和简单叠加两个模式的 SPD 的电压保护水平的值可能不同。</p> <p><sup>c</sup> 仅位于 RCD 下游。</p>								



<sup>d</sup> 当主 RCD 位于上游使用时, SPD 应能承受 TOV, 见 6.5.1.2。

更进一步的资料, 见附录 J。

## 7.4 附加保护的必要性

### 7.4.1 通则

当需要安装 SPD 时, 应在靠近装置入口的地方安装第一个 SPD。此 SPD 的目的是降低来自设施外部的电涌冲击和影响。在某些情况下, 一个 SPD 是实现充分保护的, 例如, 建筑物进线处侵入的电应力较低时, 或者设备具有很高的电涌耐受能力和/或 SPD 的  $U_p$  很低。

可能需要在分配电箱或靠近要保护的设备(例如, 在插座上)提供额外的保护, 例如:

- SPD 与被保护设备距离过长;
- 装置内部有雷电放电产生的电磁场;
- 位于入口处的 SPD 安装引线过长, 因此降低了该位置的保护效果;
- 存在敏感设备(电子设备、计算机设备): 电涌耐受能力低于 SPD 的  $U_p$ 。

对于其他可能的骚扰源的威胁, 可能增加额外的 SPD 提供瞬态过电压保护是有必要的, 如:

- 由建筑内部设备产生的操作过电压;
- 其他服务设施产生的过电压, 如电话线、互联网连接;
- 为其他建筑物提供服务的设施产生的过电压, 如附属建筑物, 外部装置/照明, 为外部传感器供电的电源线。

当安装有光伏(PV)装置时, 可能还需要额外的保护, IEC 61643-32 提供了更多的关于该应用下的信息。

### 7.4.2 振荡现象对保护距离的影响

注: 保护距离在一些国家也称为间隔距离。

当 SPD 被用来保护建筑物内特定设备, SPD 应安装在尽可能地靠近被保护设备。如果 SPD 和被保护设备之间的距离太长, 设备端产生的振荡电压值可能高达两倍  $U_p$ , 甚至在一些情况下会超过这个水平。因此虽然装有 SPD, 振荡现象仍能引起被保护设备损坏(见图 J.8 到 J.10)。合适的距离(称为保护距离)取决于 SPD 类别、系统类型、侵入电涌的陡度( $du/dt$ )和输入电涌和连接负载的波形。尤其是, 如果设备的阻抗较高、充当电容器或设备内部断开, 就有可能产生两倍的振荡电压。图 J.10 给出了在这种条件下, 振荡现象产生两倍电压的示例。

一般情况下, 距离不到 10 m 的振荡可以被忽略。有时设备内置保护元件(例如压敏电阻), 这种情况可以显著降低因长保护距离带来的振荡影响。在这种情况下需要注意避免出现 SPD 和设备内部保护元件协调配合问题。(见 7.5.7)

### 7.4.3 装置内部感应电压

由于 SPD 与被保护设备之间的回路中会由于雷电流产生感应电压, 保护距离可能进一步减小, 特别是当设施中有 LPS 以及设施未被屏蔽时。

在以下情况下可以忽略保护距离减小的影响:

- 内部电缆具有屏蔽层或布设在金属管道内(屏蔽层或金属管道两端应同时接地);
- PE 导体与带电导体的电缆布设在同一条电缆中; 如果安装了 LPS, 感应回路的长度应限制在 10 m 以内;
- PE 导体在相同的带电导体管道中布设, 感应回路长度应限制在 10 m, 忽略损害源 S1;
- SPD 安装在设备输入端。

在大多数情况下，钢筋混凝土结构提供充分衰减效应，无需再考虑感应电压。感应电压主要是由于回路的大小，在常规安装中，有源导体和 PE 导体在墙壁或管道中一起运行，因此，环路面积可以忽略不计。当不可忽略时，在选择 SPD 电压保护水平时应考虑感应电压(参见 IEC 62305-4)。

更多信息见附录 J。

#### 7.4.4 连接导线长度的影响

为了实现最佳的过电压保护，SPD 的连接导线应尽可能短。连接导线过长将降低 SPD 的保护效果。因此，可能需要选择一个有更低电压保护水平的 SPD 来提供有效的保护。传送至设备的残压的最坏情形为 SPD 的残压和沿导线感应电压降之和，这个电压称为  $U_{p/f}$ 。这两个电压可能并不在同一时刻到达峰值，但在大多数的实践情况下，可以简单地相加；图 J10 给出在冲击放电电流下，连接导线的电感对各 SPD 连接点测得电压的影响。

电压降  $\Delta U$  可用公式 (1) 估算：

$$\Delta U = 0.1 \times I_{SPD} \times \Delta L \quad (\text{kV}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

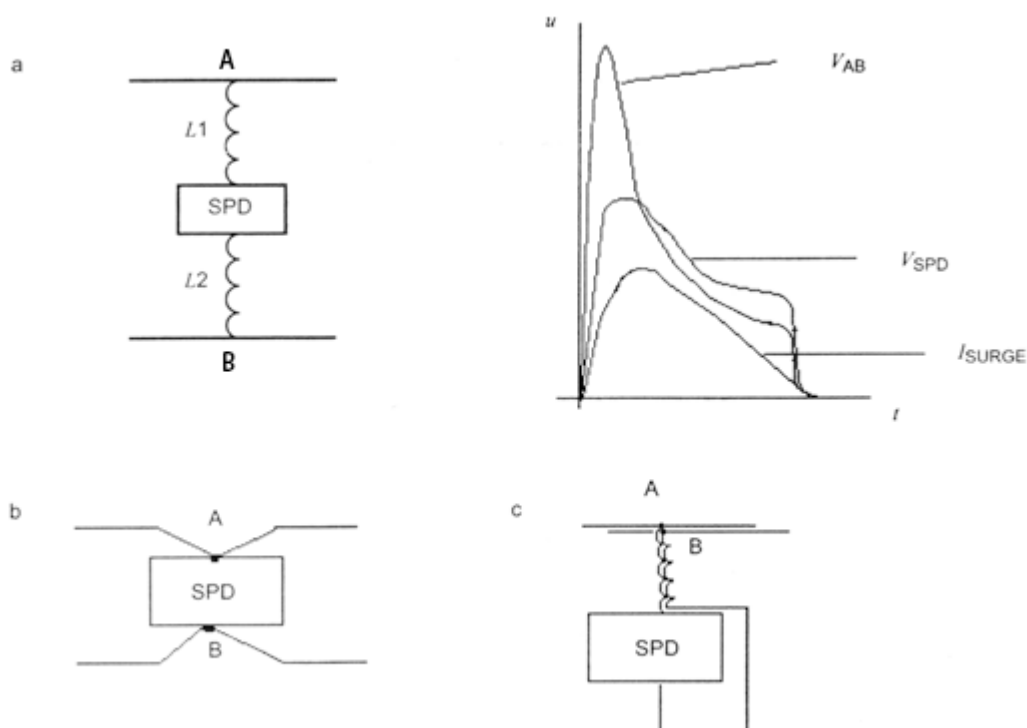
$I_{SPD}$ ——流过 SPD 的电流 (kA)；

$\Delta L$ ——连接引线的长度 (m) (通常  $\leq 0.5 \text{ m}$ )。

当装置中流过 SPD 的电流仅由附近的闪络感应引起的，可以忽略此电压降。尽可能的使用图 10 中所示的方案 b) (有时称为 V 连接)，这种方案将会显著降低电感效应。当不能使用方案 b) 时，可以使用使用双绞线的方案 c)。在大多数情况下，这会使等效引线长度减少 2 倍。应尽可能避免方案 a)。因为增加 SPD 的连接导体的长度会降低过电压保护的有效性，当 SPD 的所有连接导体都尽可能短时 (对于总引线长度最好不超过 0.5 m)，并且没有形成任何环路的情况下，使用方案 a) 才可能实现最佳的过电压保护。0.5 m 的导线长度应符合额定冲击耐压  $U_n$  的 20 % 余量。如果导线长度大于 0.5 m，则应使用  $U_{p/f}$  代替  $U_n$ ，这样就不需要再考虑 20 % 的余量。

当将 SPD 安装在被保护的金属机柜内时，一种减小导线引线长度的方法是使用短导线将 SPD 直接连接到金属柜框架 (板) 上。这仅在金属机柜符合 IEC 60439 的情况下适用。还建议将 SPD 接地导体与金属机柜相连的连接点也与相同的机柜/配电系统的接地母排相连，且导体尺寸相同 (然后有 2 根连接 SPD 接地端子的导体：一根导体连接到金属框架，另一根导体连接到接地总排，后一根导体用于防止 SPD 损坏而使短路电流流过的情况，而金属板主要用于转移电涌的高频部分)。

注：如果使导线相互紧靠而使回路路径导体与入流导体产生磁耦合，其电感将降低 (见图 10c)。



标引序号说明:

a  $L_1, L_2$  导线  $L_1, L_2$  的相应电感;

$I_{SURGE}$  电涌电流-时间的曲线;

$V_{SPD}$  通过电涌时, SPD 端子间的电压;

$V_{AB}$  对于电压限制型 SPD 来说点 A 和点 B 之间通过电涌时的电压  $= U_b/t = V_{SPD} + \Delta U$ , 对于电压开关型 SPD 来说取两者之间较大值 ( $V_{SPD}, \Delta U$ ), 复合型 SPD 可以采用不同的公式。特别是当  $L_1$  或  $L_2$  较大时, 应避免采用这种计算方式;

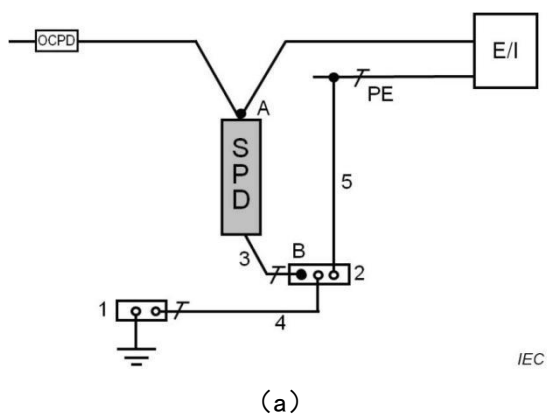
b 推荐首选接线方式;

c 当 b 方式不适合时, 可采用这种接线方式。

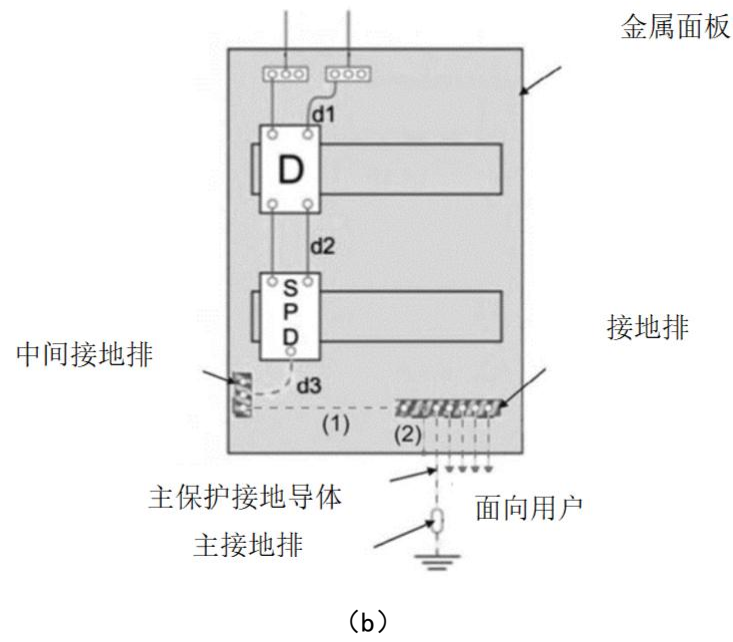
图10 SPD 连接导线长度的影响

如果总引线长度超过 0.5 m, 则应至少选择以下选项之一:

- 选择具有较低电压保护水平  $U_b$  的 SPD (长度为 1 m 的直电缆, 其在 10 kA (8/20) 的放电电流下会增加大约 1000 V 的压降);
- 在被保护设备附近安装第二个协调的 SPD, 以使协调后的电压保护水平  $U_b$  与被保护的设备的耐受冲击电压的额定值  $U_w$  匹配;
- 使用图 11 中描述的安装方案;
- 如果 SPD 安装在由金属外壳制成的配电柜中, 则 SPD 可通过金属部件 (例如, 组件的金属外壳, 请参见 IEC 60364-5-54 的 543.4.2) 连接到主接地端子或保护导体, 前提是已连接至 PE 并符合 IEC 60364-5-54 的保护导体要求。图 11 中定义的局部接地排是指 SPD 与金属外壳之间的连接点, 在这种情况下, 在计算总长度时不应考虑长度 4 (从主接地排到局部接地排), 见图 11 (b)。



- 标引序号说明:
- 1 主接地排
  - 2 局部接地排
  - 3 SPD接地线
  - 4 用于将局部接地排连接到主接地排的附加导体
  - 5 附加导体, 用于从局部接地排分配PE



- 标引序号说明:
- D 脱离器
  - (1) 推荐额外安装的等电位导体
  - (2) 总等电位排
- 注: 局部接地排需使用特别设计或安装而成的连接端子, 并连接到面板的金属结构。

图11 当引线长度超过 50 cm 时, 可能使用局部接地排的安装方案

有关更多信息, 请参见附录J。

7.4.5 电压保护水平的影响

在选择 SPD 电压保护水平时,应考虑被保护系统中最敏感设备的冲击耐受电压  $U_w$  (见 IEC 60664-1),或关键设备持续运行时的耐受冲击抗扰度水平。

在下面的示例中(参见图 12),该设备不是关键设备,仅需考虑  $U_w$ 。

当引线长度不超过 50 cm 时,离该设备最近的 SPD 的电压保护水平 ( $U_{p2}$ ) 至少应比该设备的耐压  $U_w$  低 20%。如果引线长度超过 50 cm,则应使用  $U_{p/f2}$  代替  $U_{p2}$ ,且  $U_{p/f2}$  应低于  $U_w$ 。通常被保护设备上的电压等于  $k$  乘  $U_b$ ,  $k$  介于 1 和 2 之间,具体取决于线路长度和被保护的设备类型。 $k$  可以通过测试或仿真获得。

装置内部可能会产生具有潜在破坏性的操作过电压(请参阅第 5.2.3 节和附件 C),在这种情况下,可能需要补充安装 SPD。

当在同一电路上使用两个 SPD 时,应确保两者之间的协调配合(见 7.5.7)。

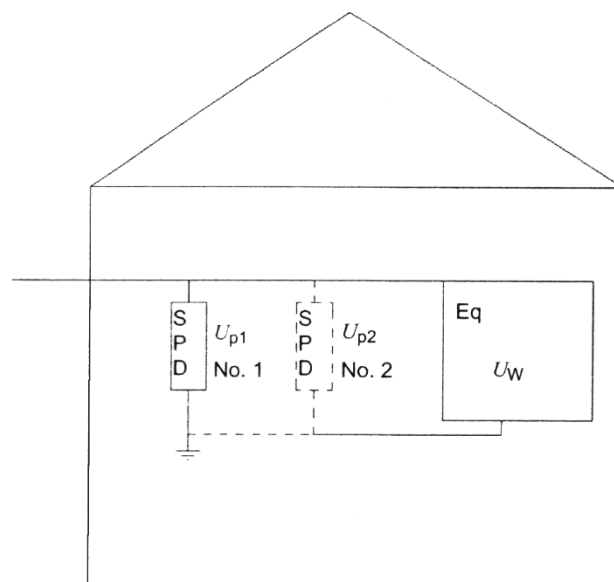
当感应电压  $U_i$  可忽略不计时,在以下情况下可能不需要补充安装 SPD:

- 连接 SPD 的引线长度不超过 50 cm, SPD 与设备之间的距离小于 10 m, 且  $U_b$  小于  $0.8 \times U_w$ 。
- 连接 SPD 的引线长度不超过 50 cm, SPD 与设备之间的距离大于 10 m, 但  $2 \times U_b$  仍低于  $0.8 \times U_w$ 。
- 连接 SPD 的引线长度超过 50 cm, SPD 与设备之间的距离短于 10 m, 并且  $U_{p/f}$  低于  $U_w$ 。
- 连接 SPD 的引线长度超过 50 cm, SPD 与设备之间的距离超过 10 m, 但  $2 \times U_{p/f}$  仍低于  $U_w$ 。

注1: 从 IEC 61000-4-5 获得的设备的冲击抗扰度与 IEC 60664-1 中定义的冲击耐受电压额定值 ( $U_w$ ) 不同。原因是 IEC 61000-4-5 的试验使用复合波发生器, 并且一部分电涌电流可能流经设备(尤其是阻抗较低的设备)。在这种情况下, 需要通过适当的协调配合(见 7.5.7)。附录 K 中提供了有关冲击抗扰度和绝缘耐受性之间比较的更多信息。请注意, 尽管 IEC 60664-1 描述了如何获得  $U_w$ , 但实际上在每种类型的设备上都很难以获得真实的  $U_w$  值。

注2: 在美国, 电压保护水平试验已经包含使用 6 英寸长的导体, 所以当该条款中说明与安装有关的 50 cm 规则时, 美国的电压保护水平不再考虑安装情况。

详见子条款 J.1.2 和图 J.9。



标引序号说明:

如果  $U_{b1} \times k < 0.8 \times U_w$ , 仅需设置 SPD No. 1 (安装在建筑入口处), 除非 SPD 与设备回路之间会产生过电压, 并且近处发生雷击(如建筑物上装有 LPS)。

如果  $U_{b1} \times k > 0.8 \times U_w$ , 那么除 SPD No. 1 外还应安装 SPD No. 2 ( $U_{b2} < 0.8 U_w$ ) 并与之配合;

$E_q$  是被保护设备，其耐受电压额定值  $U$  的定义参见 IEC 60664-1；

$k$  是可能产生振荡的系数（ $1 < k < 2$ ，见 7.1.3）。

图12 当连接引线长度小于 50 cm 时，需要附加 SPD 的示例

#### 7.4.6 雷电防护分区（LPZ）概念

为了设计及合理应用电涌保护器，有必要考虑保护区域的等级，详见 IEC 62305-4。雷电防护分区（LPZ）至少由该区域入口处的 SPD 定义，以减少传导电涌，同时可采取其他屏蔽措施，以减少防雷分区内部的电磁应力（防雷分区内部直接感应电涌）。

这一假定的概念设想将电源系统的开关切换，直击或非直接雷击引起的感应电涌从未保护区域传至被保护区域的敏感设备时能量逐级减小（每一级之间的距离由 7.5.3 决定）。

关于建筑物中电源系统细分的防护分区以及 SPD 分配的位置示例参见图 J.11。

进入该结构的电源和信号网络应互相靠近，并在一个公共汇流排处连接在一起，这对于使用非屏蔽材料（木材，砖块，混凝土等）制成的结构尤为重要，这样的目的是避免在由两个网络的导体构成的回路中产生过电压。

#### 7.5 SPD 特性的选择

##### 7.5.1 通则

SPD 的选择依据下列图表中的六个步骤，从 7.5.2 至 7.5.7，见图 13。

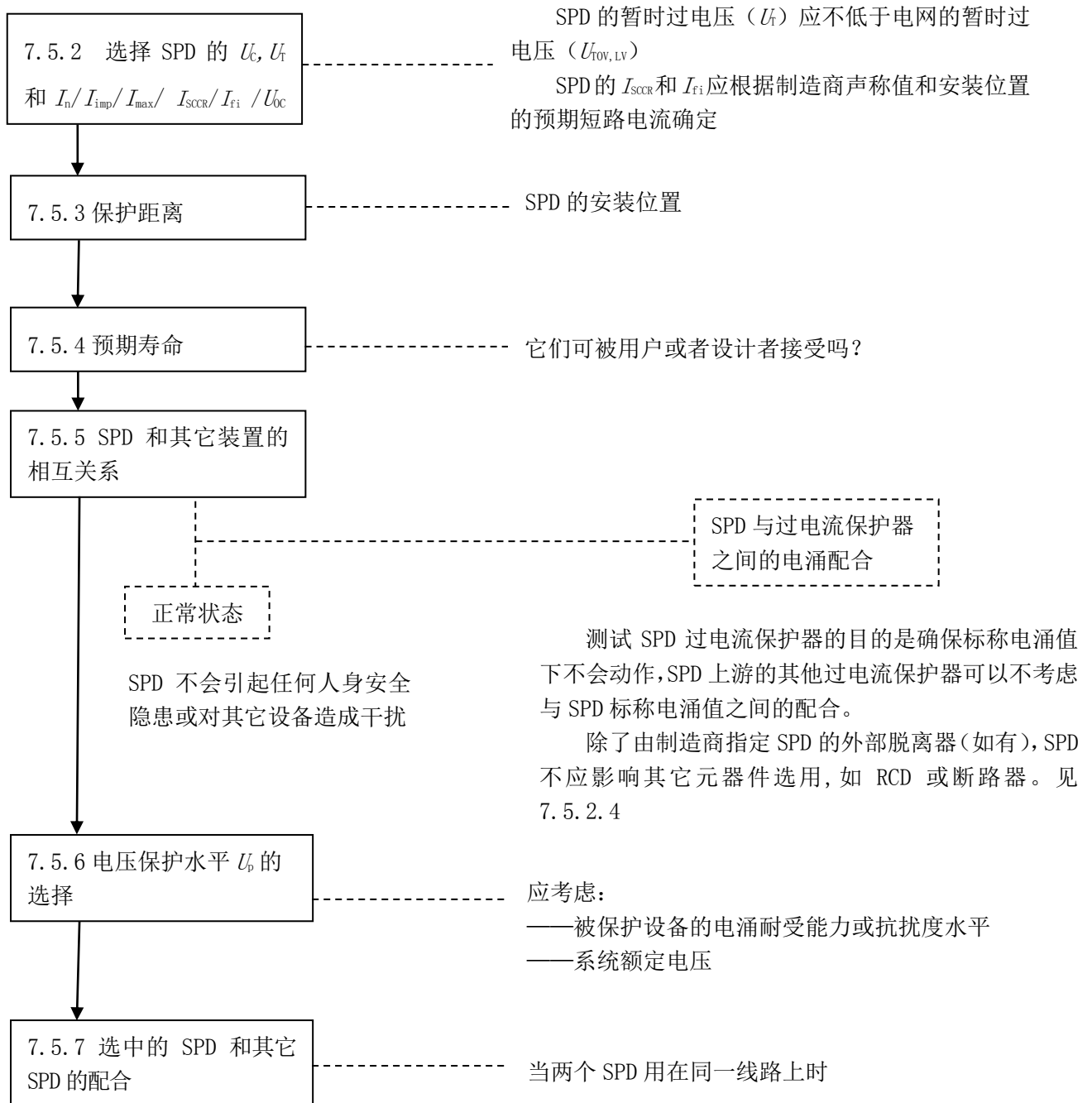


图13 选择 SPD 的流程图

7.5.2 SPD 参数选择:  $U_c$ ,  $U_T$  和  $I_n/I_{imp}/I_{max}/I_{SCCR}/I_{fi}/U_{OC}$ 7.5.2.1 SPD 的最大持续工作电压  $U_c$ 

SPD 的  $U_c$  必须满足下列准则:

$U_c$  应大于或者等于电源系统的最大连续运行电压  $U_{cs}$  ( $=k \times U_0$ ) (见附录 J, 推荐值见附录 B)。

$U_c \geq U_{cs}$

注: 除了 IT 系统,  $U_c$  应足够高到可以覆盖首次故障情况 ( $1.1U_0 \times \sqrt{3}$ ), 见表 6。

表6 各种电源系统中 SPD 的  $U_c$  的最小建议值

SPD连接在（如适用）	配电网系统配置		
	TN系统	TT系统	IT系统
相线与中性线之间	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$
相线与PE线之间	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$	$1.1U$
相线与PEN线之间	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$	N/A	N/A
中性线和PE线之间	$1.1U/\sqrt{3}^a$	$1.1U/\sqrt{3}^a$	$1.1U/\sqrt{3}$ 或 $(0.64\times U)$
相线与相线之间	$1.1U$	$1.1U$	$1.1U$
注1：不适用			
注2： $U$ 是低压系统的线间电压			
a. 这是最严重故障情况下的值，因此未考虑10%的公差			

7.5.2.2 SPD 的暂时过电压试验值  $U_t$

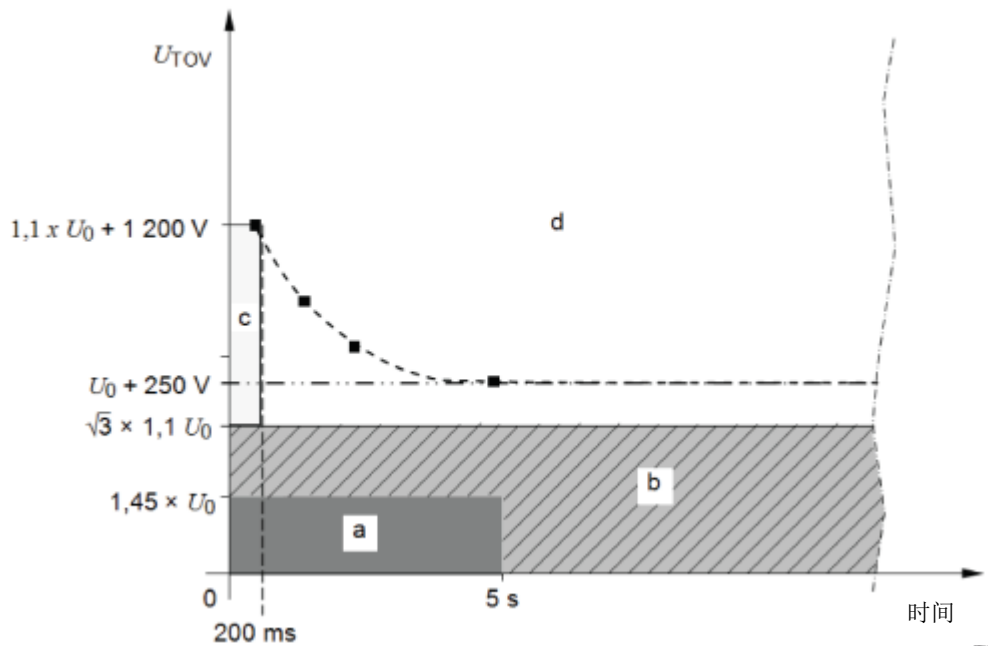
如图14所示，当低压系统发生故障时， $U_t$ 值应该大于或等于设备上预期出现的暂时过电压（TOV）。

$$U_t \geq U_{TOV, LV}$$

注：持续时间超过5 s 的  $U_{TOV, LV}$  应被认为是最大持续工作电压  $U_c$ ，如在IT系统中，接地短路将会持续很长时间（几个小时），则连接在相和地之间的SPD的  $U_c$  值，应至少等于系统最大的相间电压（ $1.1U_c \times \sqrt{3}$ ）。

典型的 TOV 试验值在附件 E 中给出。

如果在 TOV 的值很大的情况下，很难找到一个可以对设备提供电涌保护的 SPD，如果该情况发生的概率很低，而使用不能耐受该 TOV 的 SPD，在这种情况下，必须使用合适的脱离器。



标引序号说明：

- a LV 装置故障时（短路），在 TT、TN 和 IT 系统相-中性线之间的  $U_{TOV, LV}$  区域；
- b LV 装置故障时（偶然接地），IT（TT）系统相-地之间的  $U_{TOV, LV}$  作用区域和 TT 和 LV 装置故障时（中性线断线），TN 系统相-中性线之间  $U_{TOV, LV}$  的区域；
- c 当 HV 系统发生故障时，在 TT 和 IT 系统中，用户端相-中性线之间  $U_{TOV, HV}$  的最大值；



d 未定义区域。

注1：用于3W+G（三线+接地），单相，120/240 V系统的SPD所需的 $U_{TOV(LV)}$ ，以及用于4W+G（四线+接地），三相，120/208 V，277/480 V，347/600 V系统是北美使用其他值。

SPD的 $U$ 值。

注2：如图所示，可根据下列特性选择一个SPD：

$$U_t = U_c \geq U_{TOV(LV) \max}$$

IT系统中尤其要考虑这种情况。

图14  $U_t$  和  $U_{TOV}$

当选择的 SPD 的电压保护水平满足要求时，还应该考虑其在各种 TOV 情况下的特性（耐受特性或失效模式）。

如果发生的可能性足够低，则可以使用不能承受 TOV 应力但按照 IEC 61643-11 可接受的方式失效的 SPD，以达到所需的保护水平。

如果故障模式不可接受，在选择电压保护水平可满足要求的 SPD 前，应该采取额外的措施来限制各种 TOV。

### 7.5.2.3 $I_n$ , $I_{imp}$ , $U_{oc}$ 和 $I_{max}$

在选择 SPD 合适的能量耐受水平时，需考虑  $I_n$ ,  $I_{imp}$ ,  $U_{oc}$  和  $I_{max}$ （如果已声明）。

选择 SPD 的能量耐受（ $I_{imp}$ ,  $I_n$  或  $U_{oc}$ ，取决于试验类别），应基于对电涌发生的概率和可接受的故障率的风险分析（请参阅第 4 章），当涉及多个 SPD 时，需完成协调分析。

注1： $I_{imp}$ 与I类试验有关， $I_n$ 与II类试验有关， $U_{oc}$ 与III类试验有关， $I_{max}$ 是可选的8/20电流冲击。

注2：如有必要，可以使用比6.5.2.2和6.5.2.3的优选值更高的值。

如果需要 SPD 来防护雷暴，则对于每种要求的保护模式，在装置入口处安装的 SPD 的标称放电电流  $I_n$  值应不小于 5 kA。

根据连接类型 2（CT2，参见图 9）进行的安装，对于三相系统，在中性线导体和 PE 之间连接的 SPD 在装置安装入口处的标称放电电流  $I_n$  值不应小于 20 kA，单相系统则不应小于 10 kA。

注3：对于在相同的连接类型下（例如，相线或中性线对PE，见A.2.2.9），如果短路型SPD其声明的 $I_{trans}$ 的值高于  $I_n$ ，则  $I_n$  可以小于上述值。

如果有可能发生直击雷的 LPS 需要 SPD 时，则应评估雷电冲击电流  $I_{imp}$ （见附录 I）。对于此类评估，应考虑安装在 SPD 上游的组件（熔断器、导线的横截面等），因为它们可能会限制整个系统的最大电涌能力，从而限制 SPD 的最大应力。如果无法进行这种评估，则对于每种要求的保护模式， $I_{imp}$  的值应不小于 12.5 kA。

根据连接类型 2（CT2）进行布线的安装，连接在中性导体和 PE 之间的 SPD 的雷电冲击电流  $I_{imp}$  的计算应该与 GB/T 21714.4 一致。如果无法确定电流值，则三相系统的  $I_{imp}$  值应不小于 50 kA，单相系统的  $I_{imp}$  值应不小于 25 kA。

注4：其他信息在GB/T 21714.1—2015附录E中给出。

当使用单个 SPD 来防护雷暴造成的电涌和直击雷时， $I_n$  和  $I_{imp}$  的标称值应与上述要求一致。

选择  $I_n$  和  $I_{max}$ （如果声明）时应根据 7.5.2.4 中所述的协调规则。

$I_{max}$  仅在特殊情况下使用，因为通常  $I_n$  足以表征 II 类试验的 SPD。 $I_{max}$  说明了 SPD 的能量承受能力，因此用来指示特定位置的预期寿命。

### 7.5.2.4 SPD 与安装位置预期短路电流的配合

SPD 应装有必要的脱离装置，以免干扰其他保护装置，例如 RCD，熔断器或断路器。

SPD（在发生故障的情况下）及其过电流保护装置（内部或外部）的短路电流耐受能力，应等于或大于安装处的最大预期短路电流。此时需考虑 SPD 制造商指定的最大过电流保护装置。根据 GB 16895，用于保护 SPD 的外部脱离器或过电流保护装置应符合相关的国标，例如 GB 10963 系列，GB 14048.2 或 GB 13539 系列或适用的当地国家标准。

a) 额定短路电流  $I_{SCCR}$

SPD 及其制造商声明的脱离器和/或过流保护装置的额定短路电流（ $I_{SCCR}$ ）应大于或等于安装处系统的预期短路电流。SPD 应与制造商声明的 SPD 随附文档中的脱离器一起安装。脱离器可以集成在 SPD 中，也可以是 SPD 制造商确定的独立设备（例如断路器或熔断器）。

在 IT 系统中，连接在中性导体和 PE 之间的 SPD 的额定短路电流（ $I_{SCCR}$ ）应与连接在相线和中性线之间的 SPD 的额定短路电流相同（根据 GB 16895.5 的第 4-43 部分 431.2.2 条款）

b) 额定断开续流值（ $I_{fi}$ ）

如果制造商声明了额定断开续流值（ $I_{fi}$ ），则该值应大于或等于安装点处的预期短路电流。对于在 TT 系统或 TN 系统中连接在中性线和 PE 之间的 SPD，额定断开续流值应大于或等于 100 A。在 IT 系统中，对于连接在中性导体和 PE 之间的 SPD，其额定断开续流值必须与连接在相线和中性线之间的 SPD 相同。

注1：续流（见 IEC 61643-11:2011, 3.1.12）是 SPD 被施加冲击放电电流以后，由电源系统流入 SPD 的电流峰值。

实际上，允许续流流过的设备是电压开关型装置（例如火花间隙）。

注2：100A 是在 TT 或 TN 系统故障的条件下，预期在 N 和 PE 之间流过的最大电流。这是 IEC 61643-11 中用于试验的值。

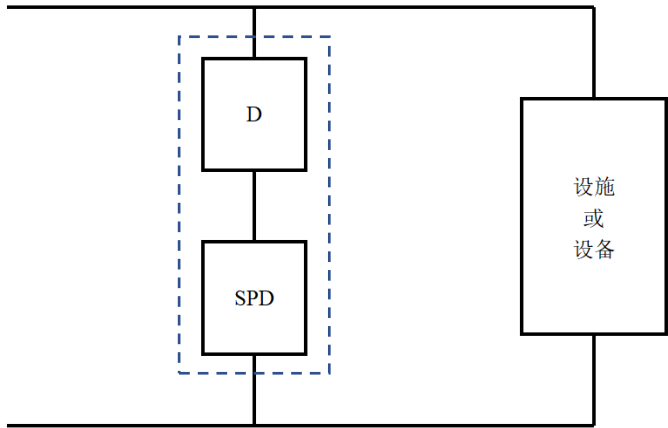
c) SPD 及其脱离器（D）的配合

用于保护 SPD 的后备保护脱离器和/或过电流保护装置的安装位置，会影响设备的供电连续性以及安装点的有效电压保护水平，可以选择如下两种 SPD 与脱离器和/或过电流保护装置组合安装的方式。

示例 1：

可以在 SPD 电路中安装外部脱离器 D（或过电流保护装置-OCPD），如图 15 所示。在这种情况下，如果发生 SPD 故障，脱离器将跳闸，从而保护 SPD，并维持供电的连续性（见注 3），但无法防止设备受到后续过电压影响。在这种情况下，由于与 SPD 串联连接的脱离器存在电压降，设备中的有效电压保护水平（ $U_{p/f}$ ）会增加。因此， $U_{p/f}$  的值会增加（有关  $U_p$  和  $U_{p/f}$  的更多详细信息，见 7.5.6）。如果脱离器作为独立装置集成在 SPD 外壳中，则有效电压保护水平（ $U_{p/f}$ ）保持不变。

注3：此外，SPD 和 RCD 之间的布线结构也会影响供电的连续性。



标引序号说明:

D: SPD制造商声明与SPD配合使用的外部脱离器（或过电流保护装置 - OCPD）


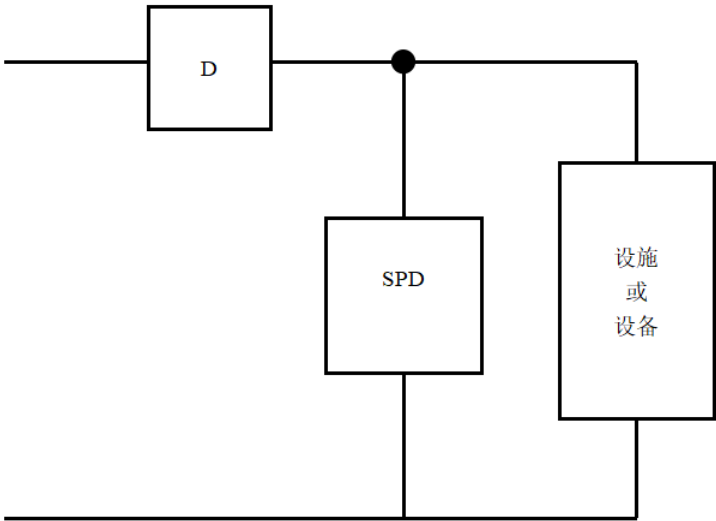
 : 由SPD及其脱离器组成的SPD组件

图15 确保供电连续性的 SPD 和外部脱离器配合

案例 2:

脱离器（或过电流保护装置—OCPD）可在主电路串联安装，如图 16 所示。在这种情况下，如果发生 SPD 故障，则脱离器会动作，从而保护 SPD，但供电的连续性不能维持。在这种安装方式中，装置内的有效电压保护水平（ $U_{p/f}$ ）不会增加。



标引序号说明:

D: SPD制造商声明与SPD配合使用的外部脱离器（或过电流保护装置 - OCPD）

注4: 当SPD上游的非专用脱离器动作时，需确认动作的确切原因。如果SPD达到了使用寿命，请从系统中将其卸下并进行更换，然后再为系统重新通电，如果连接了故障的SPD，电路重新通电可能会导致危险情况。

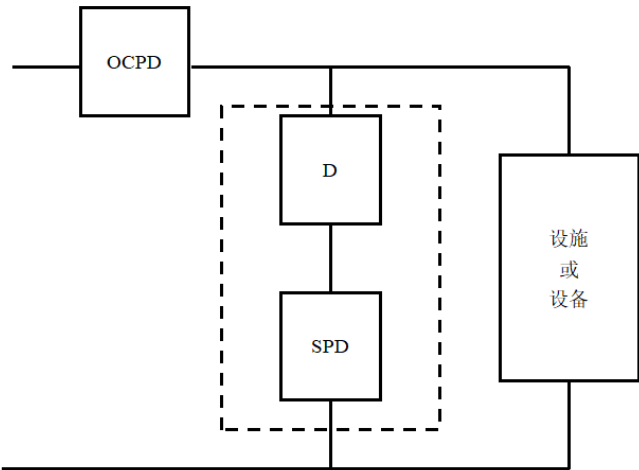
图16 确保保护连续性的 SPD 和外部脱离器配合

在需要保障供电连续性的地方，不使用这种安装方式，因为在 SPD 寿命终止的情况下，只有更换 SPD 后才能恢复供电。

如果使用脱离器为电源线提供过电流保护，则脱离器应符合 GB 16895.5 的第 4-43 部分的过电流保护要求，并符合 GB 14048.2，GB 10963.1 或 GB 13539 系列要求。

d) 考虑短路情形下 SPD 脱离器与系统过电流保护装置的选择

必要时，应仔细研究在短路的情况下的 SPD 脱离器（D）与设备过电流保护装置之间的选择。如图 17 所示，在发生短路的情况下，将根据安装点的预期短路电流，OCPD 和脱离器 D 的选择应确保电源的连续性。电源的连续性要求 OCPD 不应动作，直到脱离器 D 清除故障。如果要求供电连续性，则应根据 OCPD 制造商提供的选型表选择 OCPD 和脱离器 D。



标引序号说明：

D：SPD 制造商声明与 SPD 配合使用的外部脱离器（或过电流保护装置 - OCPD）

OCPD：电气设备的过电流保护装置

图17 短路情况下 OCPD 和 SPD 外部脱离器的选择性

- e) 发生电涌时，SPD 外部脱离器和装置的过电流保护装置之间的配合  
必要时，应考虑在发生电涌时 OCPD 和脱离器之间的协调。发生电涌时，SPD 产品标准（IEC 61643-11）要求脱离器 D 需承受出现的电涌，对于 II 类试验的 SPD 直到  $I_n$ ，对于 I 类试验的 SPD 直到  $I_{imp}$ ，任何情况下 OCPD 也应该承受这些冲击。本文件的附录 N 提供了选择 OCPD 电涌承受能力的有关信息，以确保在发生电涌时 OCPD 不动作。

注：在某些国家，对应试验类别 n（n= I， II 或 III）试验的 SPD 被称为 SPD 类型 n（分别为 n=1， 2 或 3）。

请读者注意以下事实：为避免在发生电涌时不受控制的情况，需要根据上面内容正确选择 OCPD。然后，适当的附加措施是在设备主回路的 OCPD 的上游安装 SPD（如果当地国家安装规则或其他地方法规允许）。在这种情况下，必须使用脱离器 D 保护 SPD。当在 SPD 安装点上游的线路侧上没有隔离装置时，那么脱离器 D 也应具有隔离能力（参见 GB/T 16935.1），或与额外的上游隔离开关设备关联。

### 7.5.3 保护距离

为了确定 SPD 的安装位置（在入口处，靠近设备处等等），有必要清楚保护距离，也就是 SPD 与被保护设备之间的可接受距离。

这一距离取决于 SPD 的特性（ $U_c$  等），SPD 在建筑物中的安装情况（导线长度等）以及系统特征（导体的类型和长度等），还有设备的特性（过电压耐受能力，抗扰度等），更进一步的解释见 7.3 和 7.4，均对所包括的现象作了阐述。

注：设计保护分区时，必须考虑到 SPD 和被保护设备之间的保护距离。

### 7.5.4 预期寿命

SPD 的预期寿命主要取决于超过 SPD 最大放电能力的电涌发生的概率，一个 SPD 的寿命长短取决于电涌实际发生的频次。

例如，如果事先通过适当的风险分析确定选用具有指定冲击电流  $I_{imp}$  值的 SPD，当意外出现超出该  $I_{imp}$  值的电涌电流时，SPD 可能会失效。这种极端情况表明，任何预期寿命仅是一个统计值，无法保证实际寿命。

考虑到预期寿命仅是一种可能性，即使当在安装 SPD 后几秒钟发生异常电涌电流时，如果  $I_{imp}$  标称值低于此电涌电流，任何 SPD 也将被破坏。在这种情况下， $I_{imp}$  值是否比该异常电涌电流低十倍或仅低两倍是无关紧要的。但是，对于特定的应用，只要不超过 SPD 的耐受极限，则更高  $I_{imp}$  值的 SPD 的预期寿命总是比较低的  $I_{imp}$  值的 SPD 的预期寿命更长。

选择 SPD 时，必须考虑到预期的电涌和与任何其他 SPD 之间的必要协调，从而在故障时不会引起火灾或电击等危险。如果要避免电源干扰或中断，SPD 和任何上级后备保护之间的协调也是必要的。

### 7.5.5 SPD 和其它设备之间的相互关系

#### 7.5.5.1 概述

参照 GB 16895 有关本条款的叙述。

#### 7.5.5.2 正常条件

残流 ( $I_{pe}$ ) 不会引起任何人身安全方面的危害 (间接接触等) 或干扰其它设备 (例如 RCD)。

注1:  $I_{pe}$  应比 RCD 的 1/3 的额定剩余电流 ( $I_{\Delta n}/3$ ) 小，SPD 和其它设备的累积效应也应考虑；

注2: 如果 SPD 安装在 RCD、熔断器或断路器的负载侧，那么 SPD 对该电器的故障动作、误动作及由于电涌产生的冲击损坏方面不能提供任何保护。

#### 7.5.5.3 SPD 和 RCD 及过电流保护器，如熔断器或断路器间的电涌配合

在电网中对使用的过电流保护器和剩余电流保护器 (RCD) 的耐受能力不作规定，但延时型 S RCD 需根据标准 (GB 16916.1 和 GB 16917.1) 规定，应耐受 3 kA 8/20 的电流而不断开。

当 SPD 和过电流保护器或 RCD 配合时，在标称放电电流  $I_n$  和/或冲击电流  $I_{imp}$  下，建议过电流保护器或 RCD 应不动作。

然而，当电流比  $I_n$  和/或  $I_{imp}$  大时，允许过电流保护器动作。对于可复位过电流保护器，例如断路器，不应被这种电涌损坏。

在这种情况下，由于这种过电流保护器的时间响应特性，即使过电流保护器动作，全部的电涌都将流过 SPD，因此，SPD 必须有足够的能量耐受能力，由于这种现象引起的 RCD 或过电流保护器的动作不被认为是 SPD 的失效，因为设备仍被保护。如果用户不能接受供电中断，应使用特别的结构或过电流保护器。

注1: 电涌保护器应按照 IEC 61643-11 和其他文件使用其脱离器进行试验；但是，应注意的是，在 SPD 上游经常会存在其他过电流保护装置，与这些装置配合的 SPD 脱离器会使 SPD 标称电涌电流值范围更加复杂，请参阅附录 N。

注2: 在可能遭受大电流侵袭的情况下，例如装置安装有雷电防护系统或采用架空线供电，如果  $I_n$  和/或  $I_{imp}$  大于设备内部过电流保护装置的耐受能力，且允许过电流保护装置的的动作值低于  $I_n$  和/或  $I_{imp}$ ，在这种情况下，SPD 标称放电电流的选择仅取决于实际电涌耐受能力；

注3: 如果一个电压开关型 SPD 产生放电，电力供应服务的质量可能会降低。通常，续流会引起一个过电流保护器动作，除非电压开关型 SPD 是自熄型，否则需要和上一级的 SPD 过电流保护器配合。

注4: IEC 60364-5-53 适用于防止间接接触。

### 7.5.6 电压保护水平 $U$ 的选择

在选择 SPD 合适的电压保护水平值时，应考虑被保护设备的电涌耐受水平（或关键设备的冲击抗扰度水平）和系统的标称电压， $U_p$  值越低，其保护水平越好，但这会受到诸如  $U_c$  和  $U_r$ ，SPD 的劣化及和其它 SPD 配合的限制，见 7.5.2 和 7.5.3。

电压限制型 SPD 的电压保护水平与 I 类试验的  $I_{imp}$  值和 II 类试验的  $I_n$  值有关，III 类试验电压保护水平由复合波试验（ $U_c$ ）确定。

电压开关型 SPD 或复合型 SPD 的电压保护水平也与放电电压有关。

### 7.5.7 选定的 SPD 和其它 SPD 之间的配合

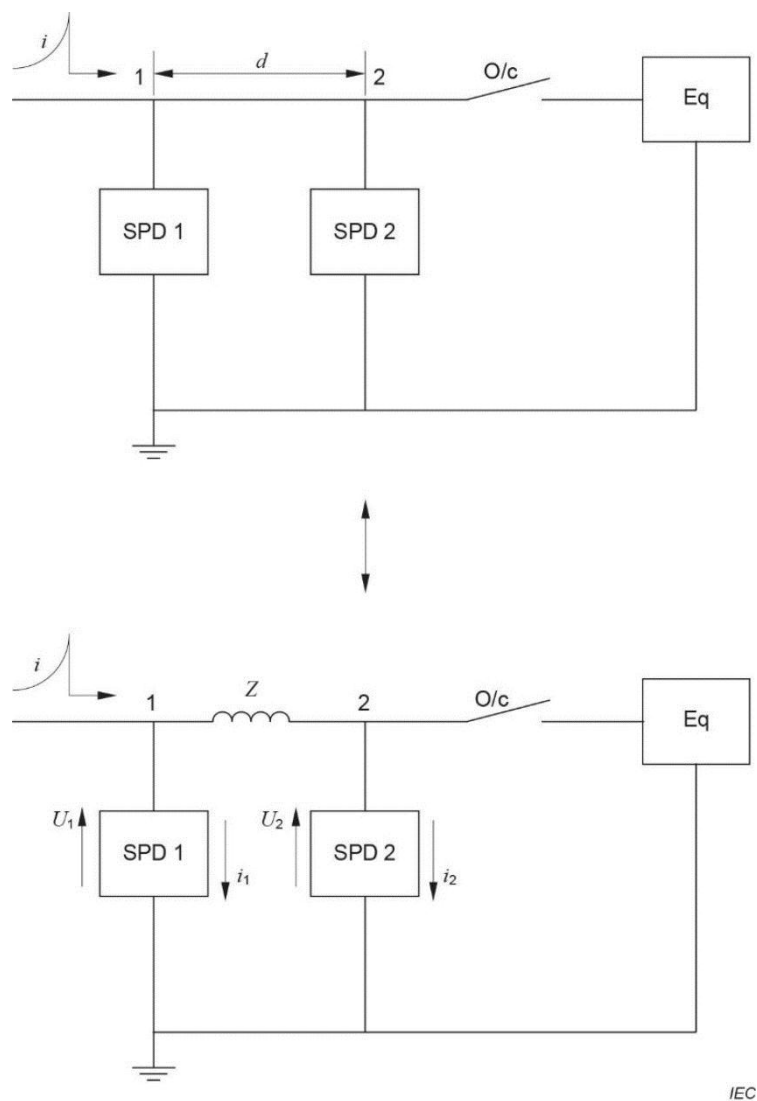
#### 7.5.7.1 通则

正如已讨论过的，某些应用场合需要两个（或更多）SPD 协调配合以使被保护设备的电应力降到一个可接受的值（较低的电压保护水平），并且降低该建筑物内部的瞬态电流。

在协调多级 SPD 时，需要恪守两个原则（见附录 F）：

- 能量协调：根据两个 SPD 的能量耐受水平，在两个 SPD 之间获得可接受的应力分担，以确保两个 SPD 都不会被过量的能量破坏。
- 保护水平协调：为确保下游电压限制型 SPD 的电压保护水平不超出，通过确保较低电流流过下游的限压型 SPD，可以将下游 SPD 的残压降低到其  $U_p$  值以下。

图 18 给出了示例。



标引序号说明：  
Eq 正常工作时的被保护设备；  
O/c 开路（设备从电源系统断开）；  
 $i$  侵入的电涌。

图18 两级 SPD 的典型应用-电路图

两级 SPD 之间的阻抗  $Z$ （通常是一个电感）是一个物理阻抗（嵌入在导线上的特殊元件，可使两级 SPD 之间能量的分配更加容易）或代表两级 SPD 之间电缆长度的电感（通常我们认为  $1\text{ }\mu\text{H/m}$ ），当  $Z$  代表一个物理阻抗，导线的电感可能可以忽略，因为和  $Z$  比较起来，导线的电感值相对较低， $Z$  代表的两种情况在图 18 中用图解的方式表示。

- 注1：图18表明最严酷的情况是设备断开，无电流流过设备，总电应力被两个SPD承担。如果SPD端子和负载间存在电涌骚扰源，则应需要进一步考虑；
- 注2：本示例中连接导线被忽略，实际上，它们对两个SPD之间的电应力的分配可能有影响；
- 注3：如果进出导线相互靠近耦合，形成的回路比较小，那么其电感比 $1\text{ }\mu\text{H/m}$ 小，可低至 $0.5\text{ }\mu\text{H/m}$ ；
- 注4： $1\text{ }\mu\text{H/m}$ 已同时包含了进线和出线的电感。

7.5.7.2 配合问题

SPD 的配合可初步归纳为以下问题：当侵入电涌电流为  $i$  时，其中有多少流入 SPD1 ( $i_1$ )，有多少流入 SPD2 ( $i_2$ )，另外，两级 SPD 能否都能耐受这些电应力。

如果两个 SPD 之间的距离相对于电涌持续时间很短，那么电感的影响可忽略，则 SPD2 可能出现超应力。

选择合适的 SPD 应考虑两级 SPD 之间的阻抗，把  $i_2$  的值降低到可接受的水平，以达到良好的配合效果，当然，这种做法也能将第 2 级 SPD 的残压降低到期望的值。

我们推荐的协调方式，是避免过度设计 SPD2 及其带来的电磁干扰，如果  $i_2$  太高，可能会在建筑物中造成麻烦。

无论怎样，仅考虑电流的配合是不够的，有必要讨论能量形式的配合。

为了确保两级 SPD 很好的配合，有必要满足下列要求，即能量判据：

如果电涌电流在 0 和  $I_{n1}$ ,  $I_{imp1}$ , 和  $I_{max1}$  (如果宣称) 之间取任意值时，通过 SPD2 耗散的能量小于或等于其最大能量耐受值 ( $E_{max2}$ )，则能量配合就可实现。

还应确认 SPD2 上的残压。

更详细的资料见附录 F 和附录 J。

### 7.5.7.3 配合步骤

配合的研究可能比较复杂，如果所有 SPD 由同一制造厂生产，最简单的办法是向制造厂询问相关要求，继而根据所选的 SPD 之间的距离或阻抗进行合理配合。

否则，有必要进行配合研究，有以下三种可能性实现能量和电压保护水平协调：

——通过施加从零到对应于  $E_{max1}$  的电流（包括长波形和短波形）来进行一些试验，需留意元件的允差可能会对结果产生重大影响（请参阅附录 J）；

——进行仿真模拟，应考虑到实际安装线路的细节，并应注意 SPD 特性的精确数据；

——当两个 SPD 属于电压限制型时，可对其  $U-I$  曲线进行分析研究。

当仅考虑能量配合时，可使用另一种叫通过能量法 (LTE) 进行分析。

更多有关这种现象的解释、分析研究和 LTE 分析法，参见附录 F 和附录 J。

## 7.6 辅助装置的特性

### 7.6.1 脱离器

脱离器具有三个基本功能：

——热保护；

——短路保护；

——防止间接接触。

注：对于两端口 SPD 和输入和输出端子分开的一端口 SPD，在某些情况下需要另一功能：过电流保护。

这些功能应通过一个脱离器来实现，甚至可能需要使用多达三个脱离器。

这些脱离器可能内置于 SPD 与 SPD 连接，部分脱离器的功能可能通过系统的后备保护实现，后备保护可能位于 SPD 的一定距离处。

脱离器是装在 SPD 支路中还是主回路上，取决于与过电流保护器的配合，也取决于是需要考虑电涌保护持续优先还是供电持续优先两者之间的平衡（见附录 J 的 J2）。

SPD 可能也需要一些脱离器的其它功能，例如，出现很高的暂时过电压时。

在大多数情况下，SPD 中都应包含热脱离器。

过电流脱离器要么包含在 SPD 中，要么在 SPD 的上游。过电流脱离器可以是熔断器，断路器或专用设备，有时可能是 RCBO（具有过流保护功能的 RCD，见 GB 16917）。



在大多数情况下，间接接触式脱离器由系统装置提供（例如，通过将 SPD 安装在 RCD 的负载侧）。如果装置不能提供足够的保护，则 SPD 制造商应提供其它解决措施。

### 7.6.2 电涌和雷击计数器

电涌（雷击）计数器通常能给出监测到的电涌次数，部分也能给出有关电涌幅值和波形的信息。电涌（雷击）计数器也可用来判断 SPD 安装位置的电涌严酷程度或判断是否需要更换。一些复杂的电涌计数器给出了一些统计数据，例如发生的频率、时间和日期及所含的能量等。电涌计数器应符合标准 IEC 62561-6 要求。

作为 SPD 组件一部分的雷击计数器通常仅提供有关监测的瞬态过电压次数的信息，在这种情况下，不需要符合 IEC 62561-6。

注：用户应意识到，如果设置的阈值太低，则这样的设备提供的信息可能会产生误导。

### 7.6.3 状态指示器

如果提供脱离器（内置于 SPD 或外部连接），则必须使用状态指示器。状态指示器连接至脱离器上，用来为用户提供 SPD 的有关信息，根据其设计结构展示 SPD 是在正常工作或不再起作用，以此提醒用户及时更换 SPD。状态指示器可以是本地展示，也可以是远距离的通信，他们可提供电的、可视的或声音报警。

状态指示器还可以提供类似中间失效功能的提示功能，以便在使用寿命结束之前进行预防性维护。

## 附录 A

(资料性)

### 选用 SPD 的典型资料及试验程序的解释

#### A.1 选用 SPD 需要的典型资料

##### A.1.1 系统数据

- $U_0$ ;
- 电源系统最大电压范围;
- 频率;
- 暂时过电压  $U_{rov}$ ;
- 被保护设备的额定冲击电压耐受值 (或关键设备的冲击抗扰度);

注: 用户应知道绝缘耐受水平随过电压的陡度和持续时间而变化。例如: 耐受4 kV 1.2/50的器件仅能耐受1 kV长波电压。

- 在 SPD 安装点, 系统的短路电流;
- 配电系统的类型 (IT, TT, TN 等)。

##### A.1.2 SPD应用需考虑

- a) 连接:
  - 相对地;
  - 中线对地;
  - 相对中线;
  - 相对相。
- b) 被保护设备的类型:
  - 变压器;
  - 电气设备;
  - 含电子元器件的设备;
  - 其它设备;
  - 电缆 (型号和长度) 等。
- c) SPD 和被保护设备之间导线的最大长度 (保护距离)。

注: 保护距离应尽可能短。

- d) SPD 和所有导线 (相线、中线、地线) 之间从 SPD 端子算起的最大导线长度。

##### A.1.3 SPD的特性

- 最大持续工作电压  $U_c$  (每种保护模式有一个电压值);
- 低压系统的类型 (TN 系统、TT 系统、IT 系统), 包括 SPD 设计应用于的标称交流系统电压和最大允许电压波动;
- 预期的连接方式 (L-N, L-PE, N-PE, L-L);
- 制造商声明的每种保护模式的试验类别和放电参数, 并应相互靠近打印这些参数:
  - I 类试验:

“Ⅰ类试验”和“ $I_{imp}$ ”及以 kA 为单位的数值,和/或“ $\boxed{T1}$ ”(T1 在方框内)或“ $I_{imp}$ ”及以 kA 为单位的数值;

- Ⅱ类试验:

“Ⅱ类试验”和“ $I_n$ ”及以 kA 为单位的数值,和/或“ $\boxed{T2}$ ”(T2 在方框内)和“ $I_n$ ”及以 kA 为单位的数值;

- Ⅲ类试验:

“Ⅲ类试验”和“ $U_{oc}$ ”及以 kV 为单位的数值,和/或“ $\boxed{T3}$ ”(T3 在方框内)和“ $U_{oc}$ ”及以 kV 为单位的数值;

—— $I_{max}$  (可选);

——多极 SPD 的总放电电流  $I_{Total}$  (如果制造商声明)和相应的试验类别;

——电压保护水平  $U_p$  (每种保护模式有一个电压值)。

注:一个 SPD 可被分类成多于一个试验类别[例如Ⅰ类试验( $\boxed{T1}$ )和Ⅱ类试验( $\boxed{T2}$ )]。在这种情况下,应实施所有声明的试验类别的试验要求。如果此时制造商只声明一个电压保护水平,标志中应出现最高的电压保护水平值。

——二端口和输入输出分开的一端口 SPD 的额定负载电流  $I_L$ ;

——二端口 SPD 的负载侧电涌耐受能力(可选);

——端口数量;

——额定短路电流  $I_{SCCR}$ ;

——短路型 SPD 的额定转换电涌电流  $I_{tans}$ ;

——SPD 的暂时过电压额定值  $U_t$  和/或 SPD 适用的电源系统类型;

——二端口 SPD 的电压降;

——失效模式(如果宣称);

——剩余电流(残流)  $I_{PE}$ ;

——额定断开续流值  $I_{fi}$  (电压限制型 SPD 除外)。

#### A.1.4 附加设备和安装:

——安装说明书;

——安装方法;

——SPD 安装地点(户外、户内等);

——正常使用的位置(如果重要时);

——SPD 安装后离任一接地导体表面的最小距离;

——外壳防护等级(IP 代码);

——温度和湿度范围;

——外部脱离器的额定值和特性(如果有要求时);

——可更换部件的信息(指示器,熔断器等,如果适用);

——连接导线的截面积。

#### A.2 用于 IEC 61643-11 试验程序的解释

##### A.2.1 通则

当要求符合 IEC 61643-11 标准时,SPD 的送检样品必须通过所有要求的试验系列。试验系列是一组三个样本必须通过的连续测试。根据 SPD 分类,完成整个型式试验可能最多需要 8 个试验系列。

每一项试验都在产品标准 IEC 61643-11 中有详细说明。以下条款总结了试验和合格判据,但不能取代 IEC 61643-11 的要求。如有疑问,以 IEC 61643-11 为准。

## A.2.2 试验系列和试验描述

### A.2.2.1 概述

在下面描述的试验系列中，要执行的试验与产品标准中相同，括号中的具体编号指 IEC 61643-11:2011 中的具体条款。

### A.2.2.2 试验系列 1

#### A.2.2.2.1 标识和标志 (7.1.1/7.1.2/8.2)

SPD 应在产品本体或安装说明书上提供产品特性或信息。当信息在本体上时，应通过试验来检查标志的耐久性。

#### A.2.2.2.2 安装 (7.3.1)

通过目视检查 SPD 的安装方式和 SPD 部件的机械编码/互锁来避免不正确的组合。

#### A.2.2.2.3 螺钉、载流部件和连接 (7.3.2/7.3.3/8.4.2)

通过外观检查和一系列测试来检查螺钉、载流部件和连接件的可靠性。

连接螺钉以规定扭矩和次数拧紧或拧松在规定的导线上，产品（包括外壳、盖和连接）上不得有任何损坏。

在每个连接处都应进行拉力测试，即对连接的导线施加拉力。根据连接特性（如最大和最小允许导线截面积）和连接类型（如螺钉、无螺钉、绝缘穿刺、扁平快速连接或尾纤连接），需要特定设置（拉力）。在测试结束时，导体不能在产品内移动。

#### A.2.2.2.4 防直接接触试验 (7.2.1/8.3.1)

检查 SPD 是否可触及带电部件。SPD 的设计应保证在安装 SPD 后，在每个可能的位置上试验指都不能触碰带电部件（符合 IEC 60529）。

#### A.2.2.2.5 环境，IP 代码 (7.4.1/8.5.1)

用于防止固体和水的进入的 SPD 外壳，应根据 IEC 60529 所述来声明 IP 代码并进行测试。

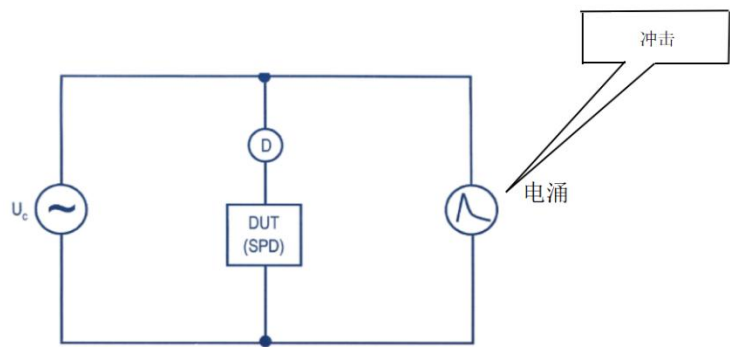
#### A.2.2.2.6 剩余电流（残流） (7.2.2/8.3.2)

将 SPD 连接至标称电压（包括可能的可接受的变化）时，测量到的对 PE 的剩余电流（残流）与声明的剩余电流  $I_{PE}$  进行比较。

#### A.2.2.2.7 动作负载试验 (7.2.4/8.3.4)

该试验包括两部分：“I 类、II 类或 III 类的动作负载试验 (8.3.4.2 / 8.3.4.3/ 8.3.4.5)” 和 “I 类试验的附加动作负载试验 (8.3.4.4)”。

试验装置如图 A.1 所示：



标引序号说明：

$U_c$ ：符合 IEC 61643-11 要求的工频电源

D：由制造商规定的 SPD 外部脱离器。

DUT：被试装置 (SPD)

冲击：进行 I 类和 II 类动作负载试验的 8/20 电流

进行附加动作负载试验的冲击放电电流  $I_{imp}$

进行 III 类动作负载试验的复合波

图A.1 动作负载试验的试验设置

通过以下方法模拟其工作条件：

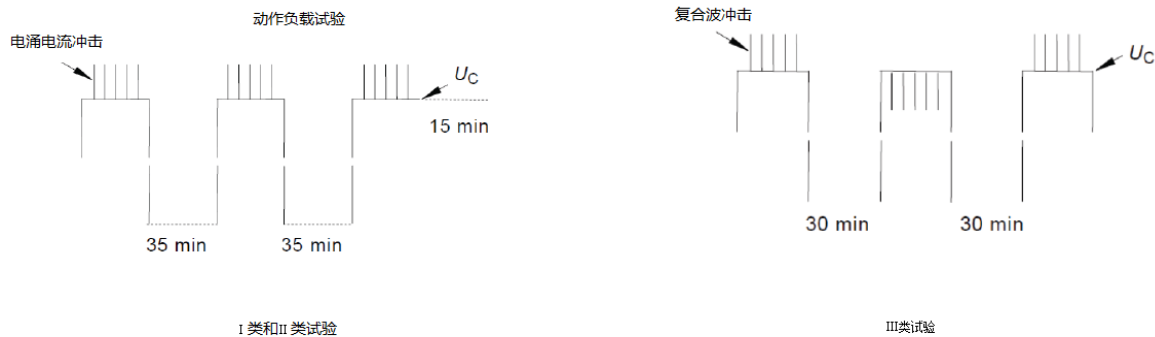
- 对 I 类 ( $I_{imp}$ )，II 类 ( $I_n$ )，III 类 ( $U_{oc}$ ) SPD 进行 15 次冲击；
- 对 I 类 SPD 进行 5 次附加冲击，分别是  $I_{imp}$  的 0.1、0.25、0.5、0.75 和 1.0 倍。

对 I 类和 II 类 SPD 进行 15 次冲击的 8/20 发生器应能提供测试样品声称的  $I_{imp}$  或  $I_n$  的峰值电流。对 III 类 SPD 进行 15 次冲击的复合波发生器（内部阻抗为  $2\ \Omega$ ）的开路电压等于声称的  $U_{oc}$ 。

15 次冲击分成 3 组，每组 5 次冲击，两次冲击之间的间隔时间为 50~60 s，两组之间的间隔时间为 30~35 min，如图 A.2 所示。

对 I 类和 II 类试验进行的 15 次冲击，每次冲击为正极性并与电源频率同步，从  $0^\circ$  角开始，同步角以  $30^\circ$  的间隔逐级增加。

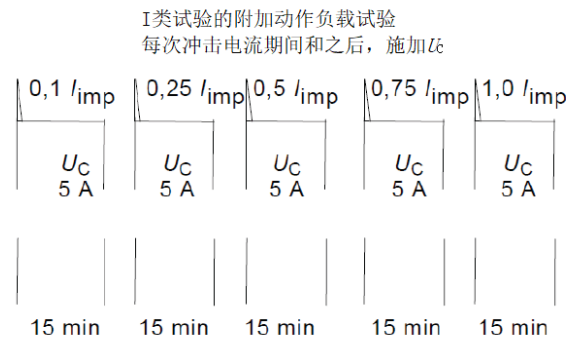
对 III 类试验进行的 15 次冲击，第一组和最后一组冲击为正极性，第二组为负极性。每次冲击与电源频率同步，第一组和最后一组在正极性峰值处，第二组在负极性峰值处。



图A.2 前 15 冲击次冲击的试验时序图

对于 I 类 SPD 进行附加冲击试验的冲击电流发生器应能发生  $0.1 I_{imp}$ ,  $0.25 I_{imp}$ ,  $0.5 I_{imp}$ ,  $0.75 I_{imp}$  和  $1.0 I_{imp}$  的电流（为了发现可能的盲点）。如图 A.3, 冲击施加在工频电压的正极性峰值处。每两次冲击之间有一个热冷却。

注：鉴于 SPD 在  $I_{imp}$  下功能正常，盲点是能导致 SPD 失效且值低于  $I_{imp}$  的电流。一个典型的例子是与火花间隙并联的金属氧化物压敏电阻（MOV）。如果间隙未触发，则总电涌应用于压敏电阻。该压敏电阻可能无法承受与间隙相同的应力而失效。



图A.3 附加五次冲击的试验时序图

在施加 15 次冲击时，SPD 应施加电压  $U_C$ 。交流电源容量的选择应取决于 SPD 是否产生续流（例如有电压开关型元件）。因此确定开关元件和续流幅值的测试必须进行：

- 无续流或续流小于 500 A：交流电源的阻抗或能力应满足在续流流过时，工频电压峰值的下降不能超过  $U_C$  峰值的 10 %。
- 续流大于 500 A：交流电源的预期短路电流等于制造商声称的额定断开续流值  $I_{fi}$  或者 500 A，二者取较大值。

对于仅连接在 TT 和/或 TN 系统的中线和保护地间的 SPD，电源的预期短路电流应至少为 100 A。

当施加 5 次附加冲击时，SPD 应施加电压  $U_C$ ，交流电源能力可减少到 5 A。

在此试验后，施加最后两次冲击来检查残压是否仍低于声称的电压保护水平。SPD 应正常运行且无可见损伤。

**A.2.2.2.8 热稳定试验 (7.2.5.2/8.3.5.2)**

SPD 应防护由于劣化或过载造成的过热。此试验适用于仅包括电压限制型 SPD 和包括电压限制型元件串联电压开关型元件的复合型 SPD。任何与电压限制型元件串联连接的电压开关型元件应短路。电源电压应足够高使 SPD 有电流流过。该电流应被监测并设置为 2 mA 的起始值。当每一步达到热平衡状态时，电流增加 2 mA，应连续监测 SPD 的表面温度。

当电流被脱离器（内部或外部）断开时，试验终止。

当施加到 SPD 上的电压跌落至低于  $U_C$  时，将电压调回  $U_{ref}$ ，电源应具有足够的短路电流能力，从而确保外部脱离器的动作。

检查 SPD 的完整性和温升情况。在试验期间和试验之后，将温升值与最大允许值进行比较（试验期间为 120 K，试验结束 5min 后为 80 K）。

**A.2.2.2.9 电气间隙和爬电距离 (7.3.4/8.4.3)**

在样品上检查和测量电气间隙和爬电距离，并与 IEC 61643-11 中给出的表进行比较。表中所给出的电气间隙取决于在对 SPD 进行的所有冲击试验中测量的最大峰值电压。距离因所分析的部件而异（例如，带电部件与安装表面或壳体之间的间隙要求不同）。

爬电距离取决于标称电压和表面对导电部件的绝缘能力(包括污染方面)。

电气间隙是根据给定海拔定义的。

#### A. 2. 2. 2. 10 球压试验 (7. 4. 2/8. 5. 3)

在不同的温度下(根据外壳部件的功能不同，选择 70℃或 125℃)，把一个半径为 2.5mm 的小球用 20N 的力施加在 SPD 表面，持续时间为 1h。测量变形量，不应超过 2mm。

#### A. 2. 2. 2. 11 耐非正常热和耐燃 (7. 4. 3/8. 5. 4)

根据外壳部件的功能，SPD 施加 650℃或 850℃的灼热丝试验温度进行试验。试品材料不能燃烧或必须在 30 s 内自行熄灭。

#### A. 2. 2. 2. 12 耐电痕化 (7. 4. 4/8. 5. 5)

在绝缘材料表面放置两根电极，距离为 4 mm，施加 100~600 V 交流电压。在被测表面滴入溶液，当电流增大或材料退化时终止测试。然后确定起痕指数与制造商声明进行比较。

### A. 2. 2. 3 试验系列 2

#### A. 2. 2. 3. 1 电压保护水平 (7. 2. 3/8. 3. 3)

本试验包含三个部分：“残压 (8. 3. 3. 1)”、“波前放电电压 (8. 3. 3. 2)”和“用复合波测量限制电压 (8. 3. 3. 3)”。

对于 I 类和 II 类试验，分两个极性，依次施加峰值为 0.1、0.2、0.5、1.0 倍  $I_n$  或  $I_{imp}$  的 8/20 冲击电流测量残压。此外，对于具有开关元件特性的 SPD，额外施加五次 1.2/50 波形的正极性冲击电压和五次负极性冲击电压(1.2/50 电压冲击发生器开路电压为 6 kV，内阻为 500  $\Omega$ )。

对于 III 类试验，设定复合波发生器的电压，使输出的开路电压为制造商对 SPD 规定  $U_{oc}$  的 0.1、0.2、0.5 和 1.0 倍，测量残压。

确定限制电压的残压根据 SPD 试验类别取在  $I_n$ 、 $I_{imp}$  或  $U_{oc}$  时的最高测量电压值。

残压应小于或等于声明的电压保护水平  $U_p$ 。

如果制造商声明  $I_{max}$ ，应施加一个额外的峰值为  $I_{max}$  的 8/20 冲击电流至 SPD 上，并测量残压。

根据 SPD 的试验类别，在  $I_n$ 、 $I_{max}$ （如果声明）或  $I_{imp}$  下测得最高残压用来确定  $U_{max}$  的值。

#### A. 2. 2. 3. 2 负载侧电涌耐受能力 (7. 6. 2. 2/8. 7. 3)

在二端口 SPD 的负载侧重复进行 II 类或 III 类试验的冲击试验。除了 III 类试验，采用正极性冲击，并按照 A. 2. 2. 2. 7 中对 II 类试验所描述的相同方式进行测试。SPD 试品应功能正常，无任何外部或内部变化，且残压小于等于声称的电压保护水平。

#### A. 2. 2. 3. 3 二端口和输入/输出端子分开的一端口 SPD 的负载侧短路电流特性 (7. 5. 1. 3/8. 6. 1. 3)

SPD 连接至电压为  $U_c$  的工频电源，第一步测试采用预期短路电流  $I_{SCCR}$ ，第二步测试采用 5 倍的后备保护最大额定电流值且负载侧短路，SPD 应当能够承受电流而不受任何损坏，直到它被自身或内部或外部脱离器断开。

### A. 2. 2. 4 试验系列 3

#### A.2.2.4.1 绝缘电阻 (7.2.6/8.3.6)

在潮湿环境下保持 48 h 后, 测量所有可触及导电部件之间的绝缘电阻。检查电阻测量值是否高于产品标准中要求的最小值。

#### A.2.2.4.2 介电强度 (7.2.7/8.3.7)

根据 SPD 的工作电压设置交流高压源的测试电压, 在所有可触及的导电部件之间施加 1min 的测试电压。在测试期间, 不应发生闪络和击穿。对于户外型 SPD, 该测试需在潮湿的环境中进行 (喷水)。

#### A.2.2.4.3 带有分开隔离电路 SPD 的隔离 (7.5.3/8.3.6, 8.3.7)

在内部辅助电路和电源电路之间重复进行绝缘电阻和介电强度测试。

#### A.2.2.4.4 机械强度 (7.3.5/8.4.4)

在从不同高度抛出的铰接式杠杆上的重物所产生的冲击应力下测试样品。这个测试可以与锤击测试相比较, 以不同的能量锤击样品的不同部位 (前部、侧面、后部等)。如果没有发现明显的损坏, 则样品通过测试。

#### A.2.2.4.5 耐温试验 (7.2.5/8.3.5.1)

SPD 在 80 °C 下保持 24 h。不应发生外部或内部损坏。脱离器不应动作。

如果制造商声明电压降 (7.6.2.1/8.7.2), 当为 SPD 供电时, 测量电压降 (比较 SPD 输入和输出电压损失), 并通过调节负载将电流值调节至最大负载电流。将电压降测量值与声明值进行比较。

#### A.2.2.5 试验系列 4

##### A.2.2.5.1 耐热试验 (7.4.2/8.5.2)

SPD 在温度为 100 °C 的加热箱中保持 1 h, 即使发生内部脱离器动作, SPD 也不应出现任何可见的显著劣化或影响功能的劣化。

##### A.2.2.5.2 TOV 试验 (7.2.8/8.3.8)

该试验分为两个部分: “低压系统故障或干扰引起的暂时过电压: (7.2.8.1/8.3.8.1), ” “高 (中) 压系统故障引起的暂时过电压: (7.2.8.2/8.3.8.2) ”。

样品施加不同持续时间的指定电压, 并具有相应的预期短路电流能力。这些特定应力应能模拟三种可能的暂时过电压事件。根据低压系统类型及其接地方式, 不同的事件对不同的保护模式产生不同的应力电压, 具体取决于低压系统以及接地类型:

——高压/低压变压器高压侧接地故障引起的暂时过电压可能会导致 N-PE 和 L-PE 之间的电压升高。

测试使用电源的预期短路电流为 300 A, 测试时间持续 200 ms。

——由 TT 系统中的接地故障、TN 系统的地线故障或 TT 和 IT 系统中的中线故障引起的电力系统低压侧暂时过电压。测试应在非限制性电源上测试 5 s。

——由所有两/三相低压系统中的失零造成低压负载侧产生的暂时过电压。测试在全相间电压和 10 A 的限制电流下进行 120 min。

根据 TOV 发生的类型和 SPD 声称的模式, SPD 在 TOV 试验后符合不同的要求。

在每次 TOV 试验后, 电力系统恢复正常运行, 检查 SPD 的状态, 以确保没有安全问题 (没有爆炸、开裂或其他潜在的危险事件)。

TOV 耐受模式由 SPD 厂商声明, 具体参数请参见表 E.3。



### A.2.2.6 试验系列5

#### A.2.2.6.1 短路电流特性(7.2.5.3/8.3.5.3)

对于拟连接到可能存在预期短路电流的电源的保护模式，应在两个不同的测试设置下测试 SPD，并为每个设置准备一组单独的样品。

将不同电流路径上的非线性元件使用适当的铜块代替。本测试的目的是检查 SPD 内部通流路径耐受短路电流的能力，同时避免产生如起火、爆炸或电击等危害。

第一步测试采用预期短路电流  $I_{SCCR}$ ，第二步测试采用5倍的后备保护最大声称电流值(如果未声明，则设置为 300 A)。

施加两次  $I_{SCCR}$  和一次低电流。在电压过零后的  $45^\circ$  相位角开始。

当电流被内部或外部脱离器断开时，或当施加较低的预期短路电流的时间达到 5 s 时，测试停止。选择 5 s 作为典型的最大绝缘失效时间。

当声明  $I_{fi}$  且  $I_{SCCR}$  大于  $I_{fi}$  时，重复  $I_{SCCR}$  测试，但不需要制备特殊样品。SPD 的电压开关元件由冲击电流触发，冲击电流应足够高以触发续流。此测试导致外部脱离器动作。

### A.2.2.7 试验系列6

#### A.2.2.7.1 多极 SPD 的总放电电流试验(7.6.1.1/8.7.1)

与单极电涌耐受不同，多极 SPD 能够体现总的抗电涌能力。

本测试旨在检查 SPD 承受同时通过所有有源端子至 PE 端子（或导线）的电涌电流的能力。将所有有源端子连接在一起，电涌发生器连接到此公共端和 PE 端。该测试采用将所有保护模式对 PE 平均分配电涌电流的方式进行。

施加一次声明的电涌电流  $I_{total}$ ，SPD 不能有任何损坏。 $I_{total}$  可以是 8/20 或 10/350 波形，匹配声明的 SPD 的 I 类或 II 类试验等级。

### A.2.2.8 试验系列7

#### A.2.2.8.1 户外型 SPD(7.5.2/8.6.2)

对于声明户外使用的 SPD，必须进行附加试验：

- 紫外线（UV）辐射的加速老化试验；
- 浸水试验；
- 介电试验；
- 温度循环测试；
- 抗腐蚀的验证。

这些试验在 IEC 61643-11: 2011 的附录 F 中进行了阐述。

#### A.2.2.9 试验系列8—短路型 SPD(7.5.4/8.6.4)

本试验包含三个部分：“特性转换过程（短路状态下的预处理试验）(8.6.4.1)”、“电涌耐受试验（在短路状态下）(8.6.4.2)”和“短路电流特性试验（在短路状态下）(8.6.4.3)”。

在不发生任何损坏的情况下，施加声明的  $I_{trans}$  使样品进入短路状态，然后对样品进行 A.2.2.6.1 中描述的短路电流特性试验。

附 录 B  
(资料性)

$U_c$ 和系统标称电压之间的关系示例及金属氧化物压敏电阻(MOV)  $U_p$ 和  $U_c$ 之间的关系示例

B.1  $U_c$ 和系统标称电压之间的关系

IEC 60364-5-53 给出的  $U_c$ 值与按照 IEC 60664-1 规定的系统标称电压的关系见表 B.1。

表B.1  $U_c$ 和系统标称电压之间的关系

依据 IEC 60664-1 给定的 系统标称电压		IEC 60364-5-53 给出的 $U_c$ 值示例			
三相四线制, 中性 线接地	三相三线制或 三相四线制, 中性线不接地	在 TN 系统 <sup>a</sup> 中, SPD 安装在相和 PE 或 PEN 之间或在 TT 系统 <sup>a</sup> 中 SPD 安装在相和中性 线之间 $U_c$ 最小值	在 TT 系统 <sup>a</sup> 中 SPD 安装在相和地之 间或中性线和地 之间 $U_c$ 最小值	在 IT 系统中 SPD 安装在相和地之 间或中性线和地 之间 $U_c$ 最小值	在 TT、TN 或 IT 系统中, SPD 安装在 相和相之间 $U_c$ 最小值
TT 和 TN 系统	IT 系统	电压调整率 等于 10%的情况	$1.5 \times U_c$ 的值已被 使用的情况	$\sqrt{3} \times U_c$ 的值已 被使用的情况	电压调整率 等于 10%的 情况
V	V	V	V	V	V
120/208	——	132	180	——	229
127/220	220	140	191	220	242
——	230, 240	——	——	240	264
——	260, 277, 347	——	——	347	382
220/380, 230/400	380, 400	253	345	400	440
240/415, 260/440	415	286	390	415	484
277/480	440, 480	305	416	480	528
<sup>a</sup> 在某些情况下可能需要较高的值 (例如, 在 TT 系统中出现中性线断线)					

B.2 金属氧化物压敏电阻(MOV)  $U_p$ 和  $U_c$ 之间的关系

在描述 SPD 的特性方面,  $U_p/U_c$ 之值是一个重要参数, 这个比值取决于所使用的元件。表 B.2 给出了金属氧化物压敏电阻元件(MOV)的  $U_p/U_c$ 值的典型值, 该值与元件的大小和所施加的电流  $I_n$ 有关。

表B.2 金属氧化物压敏电阻  $U_p/U_c$ 之间的关系

$I_n$ (8/20) kA	直径 mm	$U_p/U_c$
1	14	3.3
2.5	20	3.8
5	32	4.1
10	40	4.6
20	60	4.6

更低和更高的比值可通过其它技术获得。

注：其它参数（例如电涌耐受）也随生产技术变化。

## 附录 C

(资料性)

### 环境 - 低压系统 (LV) 中的电涌电压

#### C.1 概述

三种情况会引起低压系统中产生电涌电压:

- 自然现象, 如雷击电力系统或击中附近的其他物体引起过电压;
- 对电力系统的有意操作, 如公用事业部门在输电或配电系统切换负载或电容器, 或终端用户在低压系统操作;
- 意外事件, 如电力系统的故障和排除; 或不同系统之间的耦合, 如电力系统与信号/通信系统之间的相互作用。

本文件中考虑的电涌电压是指超过两倍峰值工作电压 (2.0 p.u.) 过电压, 持续时间从几分之一微秒到一毫秒范围。此处不考虑低于两倍峰值工作电压的过电压, 也不考虑电力设备运行和寿命终止导致的持续时间较长的瞬变。因为普通的电涌保护器不对这类低幅值和持续时间长的电涌起作用, 它们需用与本文件讨论的不同的保护方式进行分析。

本附录介绍和总结了 IEC/TR 62066 中低压系统的电涌电压的重要信息, 方便本文件的使用。

#### C.2 雷电过电压

##### C.2.1 概述

雷电是不可避免的事件, 它通过几种机理影响低压系统 (包括电力系统和信号/通信系统)。最明显的影响是雷电直击系统, 但其它耦合机理也能引起系统电压升高。在此将讨论引起低压系统过电压的三种耦合机理方式。在讨论过电压时, 也考虑与过电压相关的过电流, 由初始电流引起的过电压也是本附录的一个重要方面。三种类型如下:

- a) 雷电直击电力系统, 这能发生在 MV/LV 配电变压器的初级、LV 配电系统 (架空的或埋地) 和单个建筑的加快进户线;
- b) 非直接雷击: 雷击附近物体, 通过电感耦合或共模路径耦合在 LV 配电系统中产生过电压。虽然非直接雷击产生的过电压和电流低于直接雷击所产生的过电压和电流, 但其出现的频次更高;
- c) 直击到防雷系统或终端用户建筑物的外部 (结构钢, 非电气部件如水管、暖气和空调管道、电梯井等), 这样的雷击有两种影响: 建筑物外部流过雷电流产生的感应耦合, 以及在低压系统的线路与局部接地之间设置必要的 SPD, 或者安装所谓的等电位连接, 不可避免地将建筑物内的雷电流导入低压系统。对于一次雷击, 在终端用户设备出现的过电压的严重程度将反映耦合路径的特征, 例如闪络点和终端用户之间的距离和性质, 接地方式和接地连接阻抗, 路径上 SPD 的数量, 以及配电系统的分支。

##### C.2.2 由MV传输到LV系统的电涌

雷击 MV 系统中产生的过电压电涌通过两种不同的方式传递到 LV 配电系统:

- 通过 MV/LV 变压器进行电容和电感耦合;
- 通过接地耦合。

传递的电涌强度取决于许多参数, 例如:

- LV 接地系统 (TT, TN, IT);

- LV 线路特性和 LV 负载；
- LV 过电压保护装置；
- MV 与 LV 接地间的耦合状况；
- 变压器的结构。

如果直接雷击 MV 线，避雷器动作或绝缘子闪络使电涌电流通过接地系统泄放，能在 MV 和 LV 系统之间产生阻性接地耦合，过电压传递到 LV 系统。根据接地阻抗的值，这种接地耦合过电压能远高于通过变压器的容性耦合过电压。

在 TN 系统中，如果中性点也在用户安装处接地，将出现较小的过电压。还应注意的是，这类电阻耦合可通过在变压器的低压部分使用单独的接地系统来避免。

通过容性耦合和感性耦合传输到 MV/LV 变压器次级侧的过电压的典型值为 MV 相对地电压的 2%，相对中线电压的 8%。这些值是低压电路带载的典型值。当变压器低压侧为开路或极轻负载时，该值能明显升高，这取决于低压系统。

MV 系统上的雷击感应产生的电涌电流（通常小于 1 kA）要比直接雷击小得多，而且过电压实际上只通过容性耦合转移到低压系统，该值一般不超过几千伏。在这种情况下，低压系统（至少在离雷击点不远的部分）直接感应的过电压一般要高于从中压侧传递的过电压。如果一个 SPD 工作或发生了火花，电流将很小且电阻耦合是可以忽略的。

### C.2.3 直击于 LV 配电系统引起的过电压

雷电流通道的有效阻抗较高，因此实际上可认为雷电流是理想的电流源。因此，产生的过电压由雷电流通道的瞬态有效阻抗的大小决定。

导线遭受雷击，第一时刻的电压取决于导线的特征阻抗（电涌阻抗），电流（ $I$ ）最初分为两部分，且电涌电压（ $U$ ）按公式（C.1）计算：

$$U = Z \times I / 2 \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

$U$ ——电涌电压，单位 kV；

$Z$ ——线路的电涌阻抗，单位  $\Omega$ ；

$I$ ——电涌电流，单位 kA。

假设中等电流为 10 kA，电涌路径阻抗为 400  $\Omega$  时，则预期的电涌电压为 2000 kV。因此，雷击通常发生在所有线路导体之间，并且大多数情况下发生在对地之间。发生雷击后，有效阻抗降低的程度取决于接地电阻。然而，即使在相当低的有效阻抗（如 10  $\Omega$ ）的情况下，假如雷电电流为 10 kA，线路上的电压将达到 100 kV。

在架空线与综合电缆系统中，由于电缆电涌阻抗比架空线低，过电压略有降低。其降低程度决定于电流持续时间和系统对地总电容量。然而，降低的程度通常不能完全避免低压系统中的过电压超过正常绝缘水平。因此，大多数情况下，应预料直击雷将损坏这种系统。

### C.2.4 LV 配电系统中的感应过电压

由于雷击期间电磁场的变化，即使距离雷击点相当远的各种架空路线也会感应出电涌。

从下面公式能粗略估计导线上产生的预期的过电压（ $U$ ）按公式（C.2）计算：

$$U = 30 \times k \times (h/d) \times I \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

$U$ ——预期过电压，单位 kV；

$I$ ——雷电流，单位 kA；

$h$ ——导线离地高度，单位 m；

$k$ ——系数，取决于雷电流回击的速率；

$d$ ——发生雷击点到导线距离，单位 m。

参数  $k$  的变化很小（1.0 至 1.3）。

对于 30 kA 的中等雷电流，当架空线距离地面高度为 5 m，发生雷击到导线距离为 1 km 以内，则电压将超过 5 kV。即使在 10 km 的距离，100 kA 的电流将产生 1.8 kV 的预期电压。

### C.2.5 雷击雷电防护系统或附近建筑物产生的过电压

当雷击建筑物，该建筑物 LV 配电系统采用并联供电方式时，雷电流通过可利用的不同路径流入大地。这些路径包含本地接地（建筑物接地），以及通过任意金属路径（主要是电缆馈线）的远端接地。

来自于雷电防护系统接闪器的电涌电流通过引下线进入接地系统。这样，雷电流至少分为两部分，一部分流入建筑物的局部接地系统，另一部分通过电缆线路流向远端接地（电流通常也可能沿着其他路径，例如金属管道和其他传导装置）。分流的大小与阻抗成反比。冲击电流起始阶段，分流的比例取决于电感量。在冲击电流的末尾阶段，电流的变化率是低的，分流的比例取决于电阻值。

随着几个建筑物电气连接，有效电阻值降低，这意味着从击中的建筑物流出到 LV 系统的雷电流的比例将随着连接到一起的建筑物数量的增加而增加。

不同国家对中性点接地有不同的做法，因此可以预料雷电流在可用路径的分流存在一些差异。系统设计人员应该考虑这些不同。

电流在可用的泄放路径中，主要在导线和局部接地之间分流将引起过电压。根据 LV 装置的结构以及有无 SPD，这些过电压可能高或中等。经验表明了在服务设施入口处改进中性线接地的有益效果以及考虑阻抗、电感和相互耦合的重要性。

宜注意的是，直击雷落在建筑物或其结构上而导致的地电位上升通常会超过低压装置的绝缘耐受水平，因此产生的闪络和过电压将会传导至连接到同一低压配电网络的相邻建筑物（装置），除非安装了等电位 SPD。

因此，一个建筑物即使没有遭受直接雷击也可能遭受低压配电系统传导的过电压。而且，在给定的落雷密度区域，存在的高大建筑物虽然降低了雷电直击附近较小建筑物的概率，却增加了传导过电压的概率。

根据 IEC 60664-1 的建议，导体和局部接地之间的过电压会对连接设备的绝缘产生应力，连接设备的绝缘通常有足够的耐受水平，而电力设备的工作元器件会承受导体之间出现的过电压。初看最具威胁的情况可能是施加到电力设备工作元器件上的过电压。然而，对地过压可能会成为一个问题，这并不是因为电力设备的绝缘，而是由于电力系统和可能连接到设备的通信系统之间的参考电位发生变化。

## C.3 操作过电压

### C.3.1 概述

设备产生的操作过电压或干扰可能超过该装置过电压类别规定的值，则应考虑对操作过电压的防护。例如：由低压发电机供电，安装感性或容性负载（如电机、变压器、电容器组等等），安装储能装置或大电流负载。在这种情况下，应考虑尽可能靠近这些危险源安装 SPD。这些应力，如电流、电压和持续时间，通常低于雷电应力。然而，在某些情况下，特别是在建筑物内部或接近操作过电压源处，操作冲击产生的电应力将会高于雷电冲击产生的电应力。因此有必要知道操作电涌的能量，以便选择合适的 SPD。操作电涌的持续时间，包括电网故障和熔断器动作引起的瞬态，能比雷电冲击持续时间长很多。

在大多数情况下，电气装置内的任何开关操作，发生故障，中断等，会跟随出现暂时过电压。系统中的突变能引起高频阻尼振荡（由网络的谐振频率决定），直到系统再次稳定到一个新的稳定状态。

操作过电压的大小取决于许多参数，如回路类型，开关操作类型（合闸、分闸、电弧重燃），负载，断路器或熔断器。

开关操作产生的振荡频率由系统特性决定,有时会出现共振现象。在这种情况下,可能引发非常高的过电压。操作频率与系统工频谐波共振的概率通常较低。然而,如果系统部分操作频率特性接近系统其余中的一个或多个谐振频率,则可能会发生瞬态谐振。

### C.3.2 综述

操作电涌的典型波形取决于低压装置的响应特征。在大多数情况下,会产生振铃现象。频率通常为几百 kHz 的数量级。最大上升斜率通常为每微秒几千伏。电涌持续时间分布比较宽的时间范围内。如果不考虑熔断器动作引起的操作过电压,典型持续时间(到半峰值)为  $1\ \mu\text{s}$  到  $50\ \mu\text{s}$ 。统计显示,同时出现幅值较高且持续时间较长(大于  $100\ \mu\text{s}$ )的电涌的可能性较低。

### C.3.3 断路器和开关操作

#### C.3.3.1 概述

断路器和开关广泛用于每个电气装置和控制设备中,以便在过载或短路情况下断开电气设备或由开关控制设备动作来实现对电气设备的保护和控制。开关操作的频次依其使用的场合而定,在工业上其频次较高,在家庭中其频次相对较低。

阻性负载条件下的操作电流在电气设备的额定电流范围内。但是,对于使用开关电源的设备,开关电流远高于额定电流。例如,一台 100 W 的电视机,额定电流为 0.4 A,而冲击电流约为 20 A,是 50 倍。

机械开关无论手动或者电动操作释放,每次开关操作都会产生电弧。突然的电压变化与开关环境中的电感和电容相互作用,会产生高频振荡。这种振荡会叠加在线路导体之间以及线路导体与大地之间的电压上,该叠加的电压对电气设备与暴露的导电部件和其他电路的绝缘施加压力。与通过公共配电网进入用户的瞬态过电压相比,用户安装的断路器和开关产生的瞬态对电气设备的影响没有明显衰减,所以这些瞬态的幅值相对较高。

#### C.3.3.2 在用户室内的断路器和开关操作

通常设备分闸比合闸产生更高的振幅。在分闸过程中,负载侧的操作电涌比线路侧的有更高的幅值和能量。然而,这主要是关于这类设备的设计问题,特别是它的绝缘。如果有并联的其他设备,该设备也将承受电应力。线路侧的过电压对整个系统和与其连接的设备比负载侧更重要。

#### C.3.3.3 在在电源系统(LV 和 HV)中的断路器和开关操作

在每个电源系统中都能观察到电气设备的瞬态过电压。在埋地电源系统中,几乎所有的瞬态过电压源都是机电系统开关设备引起的。

在高压和低压装置中,与电源并联安装的如变压器、阻抗线圈、接触器线圈和继电器等具有电感性的设备操作都会引起振幅达几千伏的操作过电压。由于线路自身的电感,同样的现象存在于纵向电感,如导体回路和纵向阻抗线圈,或者电源系统自身的开关切换。

在电源侧,操作过电压也可能由开关操作、旋转电机的刷状电弧、电机或变压器负载突然下降、以及功率因数补偿的电容单元的开关切换引起。

就低压装置的影响而言,在某些罕见情况下,这种过电压的频率和能量可能大大高于来自大气的过电压。

低压电源切换引起的瞬态过电压可以达到几千伏的振幅,尽管可以假设在低压电源系统运行时,存在某些条件的限制,这个最大值是受到限制的。在那些安装了保护装置控制过电压的电源系统中,可以预期低压用户的装置在大多数情况下不会超过 6 kV 的最大幅值。另一种类似于操作过电压的现象是高压电源发生短路和接地故障。接地故障在无故障的线路能引起线路对地的过电压,该电压范围在线-线电压之间。此外,在这种情况下还能出现瞬态过电压。这种瞬态会从高压传递到低压电源。

#### C.3.4 熔断器动作（限流熔断器）

熔断器广泛用于配电系统和电力装置，用于过电流保护和中断短路。如果熔断器动作，例如，在一个配电系统消除短路，该动作产生近似于三角形的过电压，是一种频率较低的现象。过电压发生在系统的线路之间，以及线路和保护地之间，这取决于中性线是否接地，或者 IT 系统的接地电容。因此这种过电压也会对暴露的导电部分和其他电路的绝缘施加应力。当然，相对于由于开关动作电流引起的过电压，它发生的频率较低，该过电压也会通过汇流排传输到同一配电系统的其它用电设备。

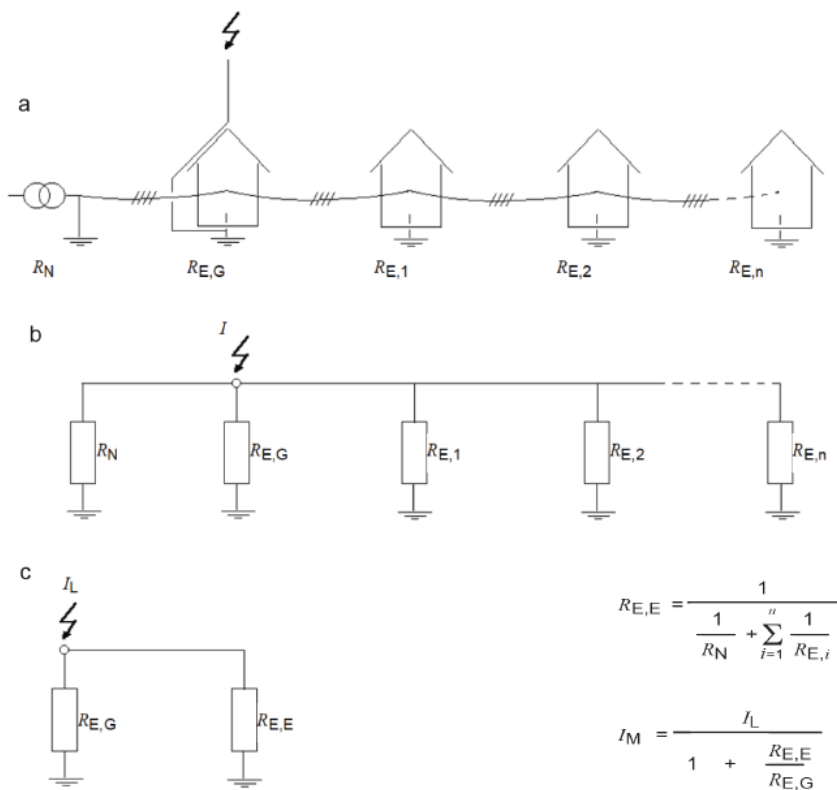
与开关操作引起的其它电涌相比，熔断器动作引起的电涌发生频率较低。然而，在中断短路电流的情形下，会产生非常严重的过电压电涌。这主要受短路电流的上升率、熔断器的特性、额定电流和回路的电感量的影响。

通过安装在汇流排附近的熔断器清除配电系统支路中的短路电流会产生一个相关问题，因为熔断器动作产生的过电压会影响连接到同一汇流排的其他所有用电设备。实际的统计情况表明，在低压公共电源系统中发生此种故障是非常少见的。但是当考虑工业配电系统时，由于出现短路并非小概率事件，这种故障有一定的关联性。



附录 D  
(资料性)  
部分雷电流计算

如图 D.1 所示，带有 LPS 系统的建筑物被雷击，雷电电流  $I_L$  将沿着接闪器向下进入被击中建筑物的接地系统，这将导致地电位上升，并因此产生闪络和或安装的 SPD 动作，从而使雷电流  $I_L$  部分进入到系统的四条线路中。



标引序号说明：  
 $R_N$  中性线接地电阻；  
 $R_{E,G}$  被击建筑物的接地电阻；  
 $R_{E,i}$  第  $i$  个建筑物接地电阻；  
 $R_{E,E}$  除  $R_{E,G}$  外的总电阻；  
 $I_L$  建筑物雷电电流；  
 $I_M$  进入电源系统的雷电流。

图D.1 进入配电系统部分雷电流总和的简易计算

计算时，附件建筑物的接地电阻  $R_{E,E}$  应等于或小于被击建筑物的接地电阻  $R_{E,G}$ 。

分布的部分电流  $I_M$  将在系统和装置中产生过电压，对绝缘和连接的设备造成压力。因此，不仅被击中的建筑物会受到威胁，附近的建筑物和装置也会受到威胁。

部分电流  $I_M$  进入到电源配电系统可以通过如（图 D.1 b）和 c）所示的简化电网进行简单的计算。

注：该计算只对能量分配有效（雷电流的波尾）

在电涌条件下，SPD 所承受的应力是许多复杂且相互关联的参数的结果，这些包括：

- 建筑物中 SPD 的位置：它们位于主配电盘或者是二级配电盘的设施内，甚至是在终端用户的设备前边；
- SPD 上游的元件：例如，熔断器，导线横截面积等，都可能会限制整个系统的电涌承受能力和 SPD 所承受的最大电应力；
- 设备与雷击的耦合路径：例如是经过雷电直击建筑物的雷电防护系统，还是由于附近的雷击感应到建筑物线路上；
- 雷电流在建筑物中的分布：例如，雷电流中有多少进入了接地系统，剩下多少雷电流通过配电系统和等电位连接的 SPD 寻找路径流向远端接地泄流；
- 配电系统的类型：中性线的接地方式会显著影响雷电流在配电系统的分布。例如，中性线多重接地的 TN-C 系统可提供一条比 TT 系统更直接和更低阻抗的泄放雷电流的路径；
- 与设备相连的其余导电装置：这些将分流一部分雷电流，从而减少了通过等电位连接 SPD 而流入配电系统的雷电流，应注意这些导电装置可能被非导电物体代替。
- 电涌波形：在产生电涌的情况下，不能仅简单地考虑 SPD 传导的电流峰值，还必须考虑电涌的波形。

人们已经做了大量的尝试来定量分析电气环境和设施内不同位置的 SPD 将经受的“威胁等级”。GB/T 21714.4 已经通过基于雷电防护等级考虑 SPD 上可能出现的最大电涌幅值来阐述这个问题。例如，该标准假定在 I 类雷电防护等级下，直接击中建筑物雷电防护系统的雷电流幅值可高达 10/350 200 kA。尽管这个等级是可能发生的，但它的统计概率仅为 1%。换言之，99%的放电将小于假定的 200 kA 峰值电流等级。

此外，假设该电流的 50%是通过建筑物的接地系统泄放，而 50%是通过连接到三相线路及中性线配电系统的等电位 SPD 泄放。假设没有其它的导电装置存在，这意味着初始 200 kA 的雷电流分配到每相 SPD 中的电流都是 25 kA。

雷电流分流的简化计算对确定 SPD 可能承受的威胁等级是十分有用的，但要注意考虑假设条件。在上述示例中，在假定 200 kA 的雷电流情形下，等电位 SPD 的威胁等级在 99%的概率下将小于 25 kA。另外，这种流过 SPD 的电流分量的波形与初始放电电流的波形相同，然而实际电流波形可能由于建筑物内线缆的阻抗而发生改变。

基于长时间的现场经验积累，许多标准考虑了运行中的 SPD 可能经受的威胁等级。例如 IEEE 标准 C 62.41.1 和 C 62.41.2，基于 SPD 安装位置的条件给出了不同位置的暴露水平。

从上面可以看出，选择合适的 SPD 的  $I_{imp}$ 、 $I_n$  或  $I_{max}$ （如果已声称）取决于许多复杂且相互关联的参数。用户不仅需要考虑到侵入电流将如何在建筑物及其配电系统内分布，还需要考虑该放电流的幅值和所涉及的波形下对应的统计概率。

必须注意到，通过电力线路，电话线以及数据线进入建筑物的电涌对建筑物内电子系统造成破坏的概率远大于雷电直击建筑物本身造成破坏的概率。

许多建筑物没有或可能不需要 LPS，这样的话，也许不需要高能量的 I 类 SPD，而采用低电压保护水平  $U_p$  的 II 类 SPD。

在解决此类复杂问题时，需要记住选择 SPD 最重要的一点是：在出现预期电涌时 SPD 在限制电压方面的性能，而不是其所能耐受的能量大小（如声称的  $I_{imp}$ ， $I_n$ ， $U_{oc}$  或  $I_{max}$ ）。一个具有低限制电压的 SPD，可以确保对设备提供足够的保护，而一个具有高耐受能量的 SPD 仅能延长其运行寿命。

## 附录 E

(资料性)

## 由高压系统和地之间故障引起低压系统的 TOV

## E.1 通则

如 IEC 60050-614-03-13 中定义和 IEC 60364-4-44 中描述, 高压系统中的接地故障和低压系统中的故障会导致最严重的暂时过电压, 需要对二者进行充分考虑。

必须考虑以下条件:

- 高压系统和为低压配电系统供电的变电站接地之间的故障, 这取决于不同的低压系统(TN, TT, IT)以及高压和低压系统之间的不同接地配置;
- 低压系统或装置中的电源中性线断开;
- 低压系统或装置中的短路;
- 低压 IT 系统的线路导体的意外接地(接地故障)。

IEC 61936-1 中给出了高于 1 kV 的变电站的接地布置要求。

在 IT 系统中, 带电部件应与地绝缘或通过足够高的阻抗接地。在发生意外接地(接地故障为第一次故障)时, 能保证供电连续不中断, 因此, IT 系统越来越多地用于需要确保供电连续性的场所。

必须满足以下条件:  $U_t \leq R_A \times I_d \leq 50 \text{ V}$

在 IT 系统中, 通常由绝缘监测器(IMD)来指示第一次故障的发生, 并尽可能以最短的实际时间消除第一次故障。这就是为什么 TT / TN 和 IT 低压系统之间情况有所不同的原因; 此外, 高压系统中的接地故障可能与某低压系统中的接地故障同时发生。

对于在 IT 低压装置内部的相线与地(PE)之间连接的 SPD, 要求  $U_t$  等于或高于最大系统线电压, 以耐受持续时间不确定的第一次低压故障电压。

本附录导则为如何在低压配电的变电站中, 当高压系统与给低压系统供电的变电站接地之间发生故障时, 正确选择低压装置内的电涌保护器(SPD)提供了详细的信息。

在变电站高压侧接地故障期间, 连接到低压配电的 SPD 可能会受到工频应力电压的影响。可能的工频应力电流对选择的 SPD 的失效模式很重要。在低压系统中, 不同的接地连接类型可能会导致不同的应力电压( $U_1$  和  $U_2$ )以及不同的应力电流。由于不同接地类型可能产生的  $U_1$  和  $U_2$  可能不同, 变电站的低压侧和用户(负载)侧的低压装置中可能会出现不同的工频应力电压。对于 IT 系统, 必须考虑到变电站或用户的 LV 装置中同时存在第一次低压侧接地故障的情况。以下条款提供了暂时过电压  $U_{TOV(HV)}$  的相关信息和计算方法。

## E.2 参考文献

- IEC 60364-5-53
- IEC 60364-4-44
- IEC 60364-1
- IEC 61936-1

## E.3 符号

以下符号代表的含义:

$I_E$ : 高压系统中流经变电站接地装置的一部分接地故障电流。

$R_E$ : 变电站接地装置的电阻。

$R_A$ : 低压电气装置中设备裸露导体部分的接地电阻。

$R_B$ : 低压系统中性点接地装置的电阻, 适用于变电站和低压系统中性点两者之间接地装置保持电气隔离的低压系统。

$U_0$ : 在 TN 和 TT 系统中: 标称相电压的交流有效值。

在 IT 系统中: 视情况, 表示相线与中性线或中性点之间的标称交流电压, 在没有中性线的 IT 系统中, 通常使用符号  $U$ , 表示线电压。

$U_f$ : 在故障期间, 在低压系统中裸露导电部分与地之间的工频故障电压。

$U_1$ : 在故障期间, 相线与变电站低压设备裸露的导电部分之间的工频应力电压。

$U_2$ : 在故障期间, 相线与低压设备裸露导电部分之间的工频应力电压。

注: 工频应力电压 ( $U_1$ 和 $U_2$ ) 出现在低压系统中设备的绝缘部分, 以及低压系统电涌保护器两端的有源导线和接地之间的电压。

对于 IT 系统使用以下附加符号, 其中连接到接地装置的低压电气设备裸露导电部分与变电站的接地装置保持电气隔离。

$I_f$ : 在出现高压故障和低压系统第一次故障期间, 从低压装置设备裸露导电部件流到接地装置的故障电流。

$I_L$ : 在低压系统中的第一次故障期间, 从低压装置设备裸露导电部件流到接地装置的故障电流。

$Z$ : 低压系统和接地装置之间的阻抗 (如 IMD 内部阻抗、人工中性线阻抗)。在没有中性线和 IT-三角形接线的 IT 系统中, 需要参考线路中的接地导体。

#### E.4 高压接地故障时低压系统中的过电压

如果变电站的高压侧发生接地故障, 以下类型的过电压可能会影响低压侧设备:

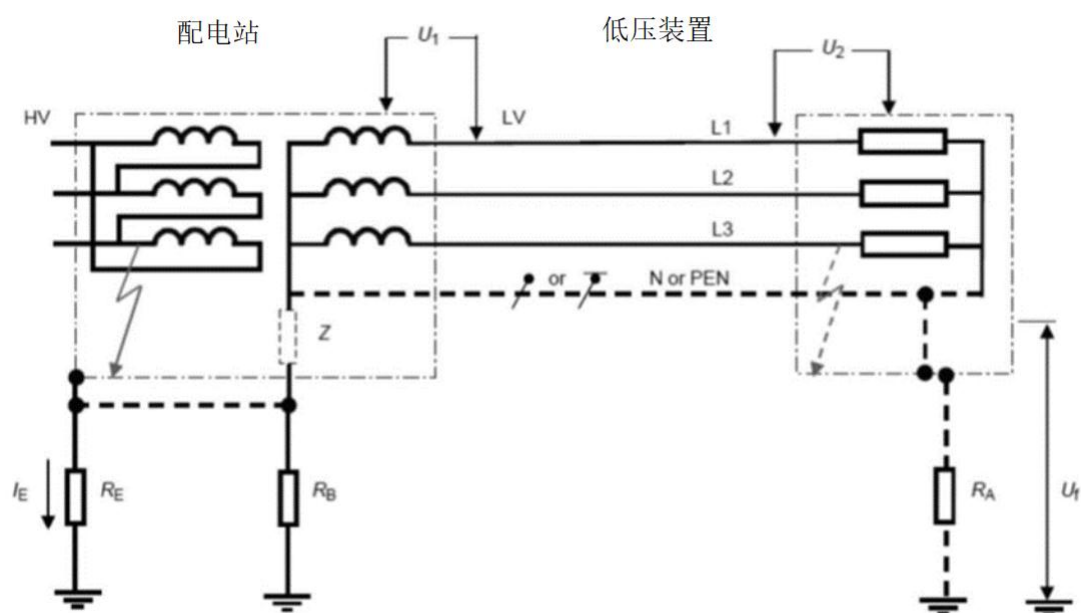
——工频故障电压 ( $U_f$ );

——工频应力电压 ( $U_1$ 和 $U_2$ )。

表 E.1 给出了设备和 SPD 上可能出现的工频应力电压。

表E.1 根据 IEC 60364-4-44 要求的允许工频应力过电压

高压系统中接地故障的持续时间 $t$	低压装置中设备上预期工频应力过电压 $U$
$>5\text{ s}$	$U_0+250\text{ V}$
$\leq 5\text{ s}$	$U_0+1200\text{ V}$
在没有中性线的系统中, $U_0$ 为线电压	
注1: 表的第一行适用分断较长的高压系统, 如中性点绝缘的高压系统和谐振接地的高压系统。第二行涉及分断时间较短的高压系统, 例如低阻抗接地的高压系统。两行都是根据低压设备绝缘出现暂时工频过电压时的相关设计标准, 具体参见IEC 60664-1。	
注2: 在中性点直接连接到变电站接地装置的系统中, 即使低压设备安装在建筑物外部, 未接地的绝缘外壳与接地导体之间也会存在这种暂时工频过电压。	



图E.1 配电站和低压装置中可能的接地连接以及故障情况下产生的过电压的典型示意图

如果存在邻近且独立的高压和低压接地系统，则目前主要使用两种接法：

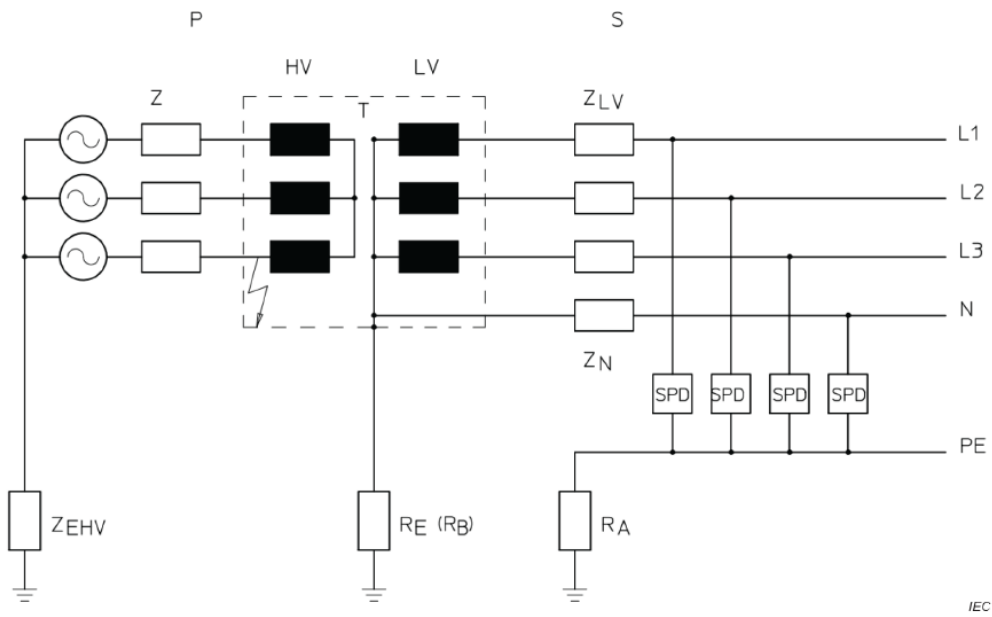
- TN / TT 系统中所有高压（ $R_E$ ）和低压（ $R_B$ ）接地系统的互连；
- IT 系统中所有高压（ $R_E$ ）和低压（ $Z$ 和  $R_B$ ）接地系统的互连；
- TN / TT 系统中高压（ $R_E$ ）和低压（ $R_B$ ）接地系统的分离；
- IT 系统中的高压（ $R_E$ ）和低压（ $Z$ 和  $R_B$ ）接地系统的分离。

以上情形中较为常用的方法是将接地系统互连。如果低压系统完全局限在高压接地系统所覆盖的区域内，则应将高压和低压接地系统互连。（请参阅 IEC 61936-1）。

不同类型的接地系统的详细信息（如 TN、TT、IT 系统，请参见 60364-1）。

## E.5 TT 系统的示例——可能的暂时过电压的计算

### E.5.1 由高压系统接地故障引起的低压装置可能出现的电应力



标引序号说明:

P HV 系统;

S LV 系统;

T 变压器。

$Z_{EHV}$ : 高压系统的接地阻抗 (取决于星型接法的高压系统中性点的接地方式)

$Z_{LV}$ ,  $Z_N$ : 线路阻抗和中性线阻抗

图E.2 在 TT 系统中, 由变电站  $R_E$  和 LV 中点接地 (中性线接地)  $R_B$  组成的联合接地示意图

如果变压器低压侧采用中性点接地的星形接法 (如图 E.2), 当高压侧出现接地故障将会产生影响低压系统的过电压。即使变压器两侧星形接地未连接至公共接地极, 接地故障 (变压器套管击穿或内部电气故障) 也会引起低压系统中性点电压上升。高压系统故障时, 接地电流流经阻抗  $R_E$  并在其上产生电压降是引起变压器低压侧中性点电压上升的原因。因此,  $R_E$  和接地电流值决定低压系统的暂时工频过电压。

## E.5.2 高压系统的特性

### E.5.2.1 限制接地电流的高压系统

通过对 HV 系统采用消弧线圈接地, 接地电流被限制到  $I_{\text{earth}}=50\text{ A}\sim 60\text{ A}$ , 以保证电弧自熄能力。

对应的接地阻抗  $Z_{EHV}$  范围是  $100\ \Omega\sim 500\ \Omega$ , 因此, 高压系统接地电流由  $Z_{EHV}$  决定, 短路功率、接地阻抗  $R_E$  ( $R_B$ ) 和  $R_A$  对其无明显影响。

在有限制接地电流的高压系统供电的低压系统中, 变电站接地阻抗应在  $R_E=2.5\ \Omega$  至  $5\ \Omega$  的范围内, 如果电流  $I_E$  为  $50\text{ A}$ , 中性点对地电压将上升至  $U_{TOV(HV)}\approx 125\text{ V}$  至  $250\text{ V}$ 。在 TT 系统中, 如果安装了绝缘和过电压保护元件, 那么这些元件将承受来自暂时过电压的电应力。由于  $U_{TOV(HV)}$  引起的流经安装在中性线和地之间的过电压保护元件的最大电流被限制到小于  $50\text{ A}$  以下, 因此在中性线和地之间的放电间隙应能分断较小的工频短路电流。

注: 在某些国家/地区, 由于接地电阻  $R_E$  可能高达  $10\ \Omega$ , 因此  $U_{TOV(HV)}$  的值高达  $500\text{ V}$ 。

### E.5.2.2 中性线经低阻抗接地的高压系统

对于全埋地系统,通过限制接地电流不再能够实现故障电流自熄(当电缆中出现绝缘故障损坏绝缘)。因此,越来越多的高压系统采用中性线经低阻抗接地方式。通常,接地电阻应将接地短路电流限制到  $I_{\text{earth}} \approx 2 \text{ kA}$ 。

对于额定电压为  $U_n=20 \text{ kV}$  的 HV 系统,此时适合这种要求的接地电阻为  $Z_{\text{EHV}} \approx 5 \Omega$ 。小功率的变电站通常没有昂贵的过电流保护装置,因此使用熔断器用于分断短路电流,分断时间取决于熔断器的额定电流,大约为  $100 \text{ ms}$ 。

假设典型的  $20 \text{ kV}$  系统给定的参数如下:

$Z_{\text{EHV}}=5 \Omega$ ;  $P_{\text{short circuit}}=100 \text{ MVA}$ ;  $U_n=20 \text{ kV}$  (L-L)

其 LV 系统特性为:

$R_E=1 \Omega$        $U_n=230 \text{ V}$

$R_A=5 \Omega$        $Z_V=Z_N=150 \text{ m}\Omega$

在  $R_E$  上产生的 TOV 为:  $U_{\text{TOV} \cdot \text{HV}} \approx 1200 \text{ V}$

通过安装在中性线和地之间的过电压保护元件的最大电流取决于  $R_E$  与  $R_A$  和  $Z_N$  之和的比值,在本例中 TT 系统可计算出电流约为  $200 \text{ A}$ 。

## E.6 工频暂时过电压取决于不同的低压电源系统和不同的接地类型

### E.6.1 概述

表 E.2 中给出了高压接地故障时低压系统中的工频应力电压和工频故障电压。

表E.2 高压接地故障时低压系统中的工频应力电压和工频故障电压

电源系统接地类型	接地连接类型	第一次低压接地故障的位置	$U_1$	$U_2$	$U_f$
TT	配置 1 图 E. 4a: $R_E$ 和 $R_B$ 连接 $R_E=R_B$ , 分离的 $R_A$	N. A.	$U_0$	$R_E \times I_E + U_0$	0
	配置 2 图 E. 4b: $R_E$ 和 $R_B$ 分离, 分离的 $R_A$	N. A.	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0$	0
TN	配置 3 图 E3a: $R_E$ 和 $R_B$ 连接 $R_E=R_B=R_A$	N. A.	$U_0$	$U_0$	$R_E \times I_E$
	配置 4 图 E. 3b: $R_E$ 和 $R_B$ 分离 $R_B=R_A$	N. A.	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0$	0
IT	配置 5 图 E6: $R_E$ 和 $Z$ 连接 $R_E=R_B$	无低压故障	$U_0$	$R_E \times I_E + U_0$	0
		变压器侧	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}^*$	$0^{***}$

	和 RA 分离	负载侧	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_A \times I_E \times R_E / Z^{**}$
	配置 6 图 E. 5: RE 和 Z 连接 R <sub>E</sub> =R <sub>B</sub> 和 R <sub>A</sub> 连接	无低压故障	$U_0$	$U_0$	$R_E \times I_E$
		变压器侧	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_E \times I_E$
		负载侧	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_E \times I_E$
	配置 7 图 E. 7: R <sub>E</sub> 和 Z 分离 R <sub>E</sub> 和 R <sub>A</sub> 分离	无低压故障	$R_E \times I_E + U_0^{(**) ***})$	$U_0$	0 <sup>***</sup>
		变压器侧	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	0 <sup>***</sup>
		负载侧	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}^*$	$R_A \times I_E \times R_E / Z^{***}$

\*无需考虑，因为在 IT 系统中，SPD 的  $U_0$  必须等于或高于线电压。

\*\*在这种高压接地故障条件下，可能会出现最大应力电压，但应力电流受阻抗 Z 限制。

\*\*\*需要考虑的是，如果在低压装置两侧安装 SPD，在其中一个位置上 SPD 限压动作会立即对另一位置上的 SPD 产生类似的应力。

IT LV 电源系统中常见和首选的接地布置类型

工业 IT LV 电源系统中常见和首选的接地布置类型

注1：对于IT系统，认为第一次低压故障会同时出现在变电站低压侧或用户侧低压装置中。
注2：在TT和TN系统中，“连接”和“分离”的含义是指 $R_E$ 和 $R_A$ 之间的电气连接。对于IT系统，是指 $R_E$ 和Z之间以及 $R_E$ 和 $R_A$ 之间的电气连接。

## E. 6.2 结论 – 最坏的情况：HV-TOV下的SPD应力电流

根据上表, 在不同的电源系统和不同的接地类型中, 如果变电站高压侧发生接地故障, 则流经电流值可能会影响到电涌保护装置的对地保护模式 (N 到 PE, L 到 PE):

在 IT 系统中:

- 在所有将 HV 接地 ( $R_E$ ) 和 LV 接地 ( $R_A$ ) 装置相互独立的系统中, 出现第一次 LV 接地故障时, 最大电流为 300 A。
- 即使在出现第一次 LV-接地故障的情况下, HV 和 LV 接地装置互连的 IT 系统也没有电压应力和电流应力。
- 在 IT 系统中, 如果 HV 接地和 LV 接地相互独立, 则只要不存在第一次 LV 接地故障, 应力电流就会受到阻抗 Z 的限制, 但是无论发生在变压器端还是在用户端, 在理想情况下都会受到任意 SPD 限压动作的影响, 低压装置中的 HV-TOV 应力电流可能会增加到 300 A。

在 TT 系统中:

- HV 接地 ( $R_E$ ) 和 LV 接地 ( $R_B$ ) 装置之间相互独立, 仅在变压器侧出现最大 300 A 的电流。
- HV 接地 ( $R_E$ ) 和 LV 接地 ( $R_B$ ) 装置之间相互连接, 仅在用户侧出现最大 300 A 的电流。

在 TN 系统中:

- HV 接地 ( $R_E$ ) 和 LV 接地 ( $R_B$ ) 装置之间相互独立, 仅在变压器侧出现最大 300 A 的电流。
- 在已连接 (互连) HV 和 LV 接地装置的 TN 系统中, 没有应力电压, 也没有电流应力。

## E. 6.3 结论-如果SPD在N-PE和/或L-PE之间接地, 则SPD在HV-TOV最坏情况下的试验源:

对于配置 1、5 和 7: 1 200 V AC (N-PE);  $U_0+1$  200 V AC (L-PE) /300 A 持续 200 ms (如果在低压用户侧使用 SPD, 或者未知)

对于配置 2 和 4: 1 200 V AC (N-PE);  $U_0+1$  200 V AC (L-PE) /300 A 持续 200 ms (如果在低压变压器侧使用 SPD, 或者未知)



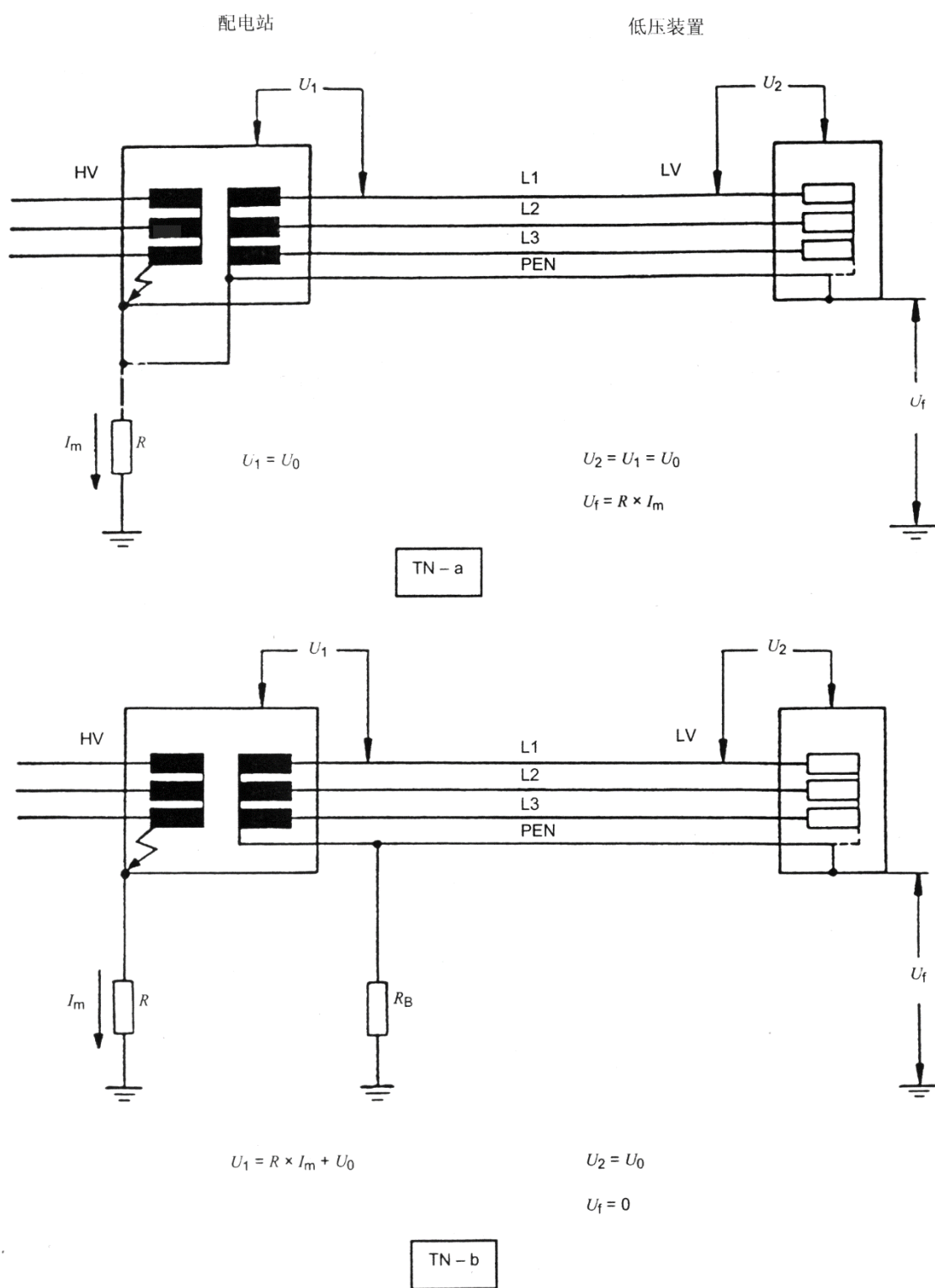
对于配置 3 和 6：如果 SPD 仅用于将 HV 和 LV 接地装置互连的 TN 和 IT 系统，则无需试验。

注1：在没有中性线的系统中， $U_0$ 是线电压。

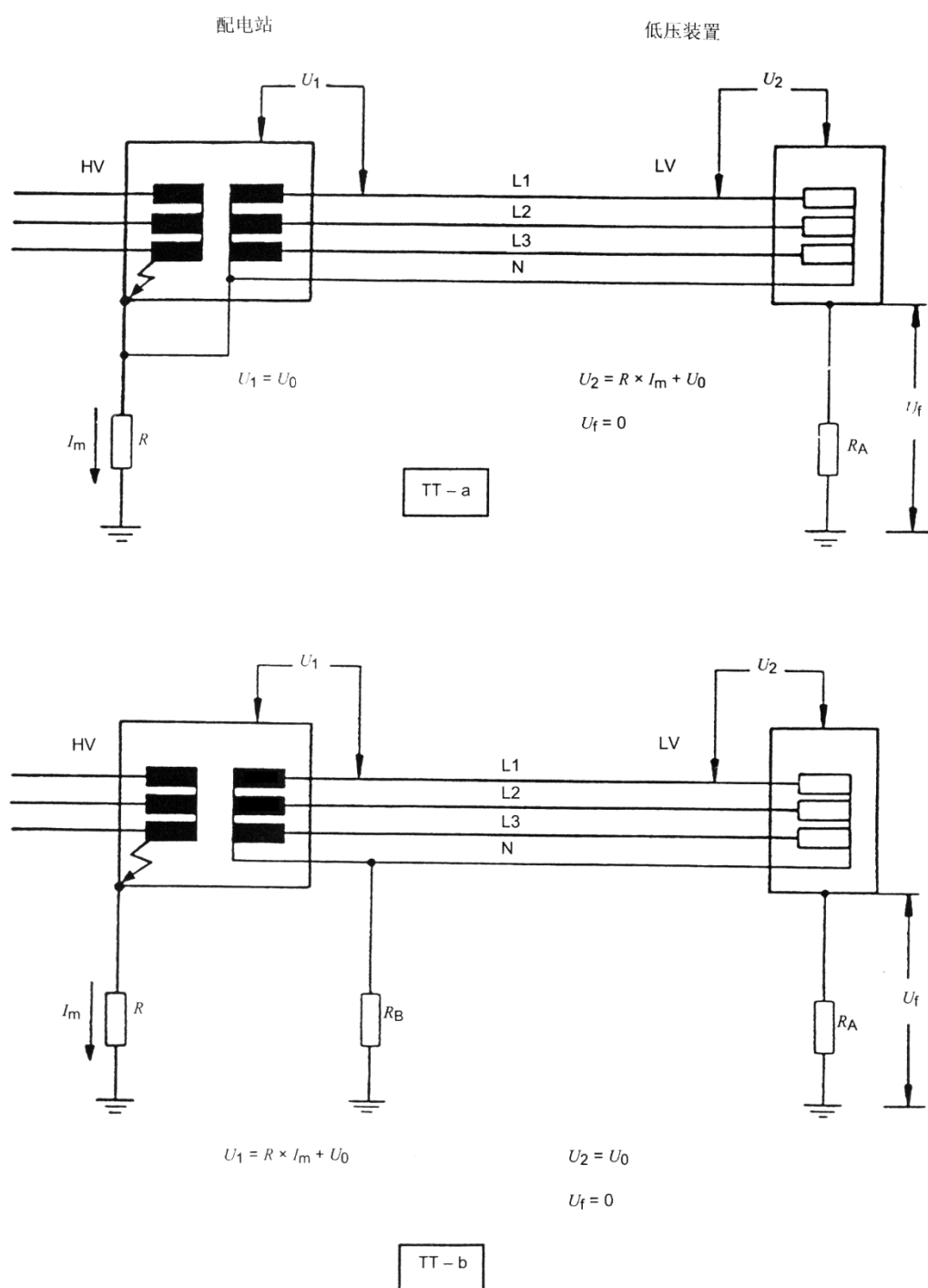
SPD 必须按照制造商所提供的安装说明，根据应用和电源系统对应的 TOV 耐受模式或安全失效模式下通过试验。对于 SPD 的选择和安装，应符合标准 IEC 60364-5-534 的要求。

注2：制造商在安装说明中声明，其可安装在主RCD上游中性点和PE之间的TT系统中的SPD，必须考虑TOV耐受模式标准。这涵盖了IEC 60364-5-53: 2001的534.2.3.3中描述的应用。

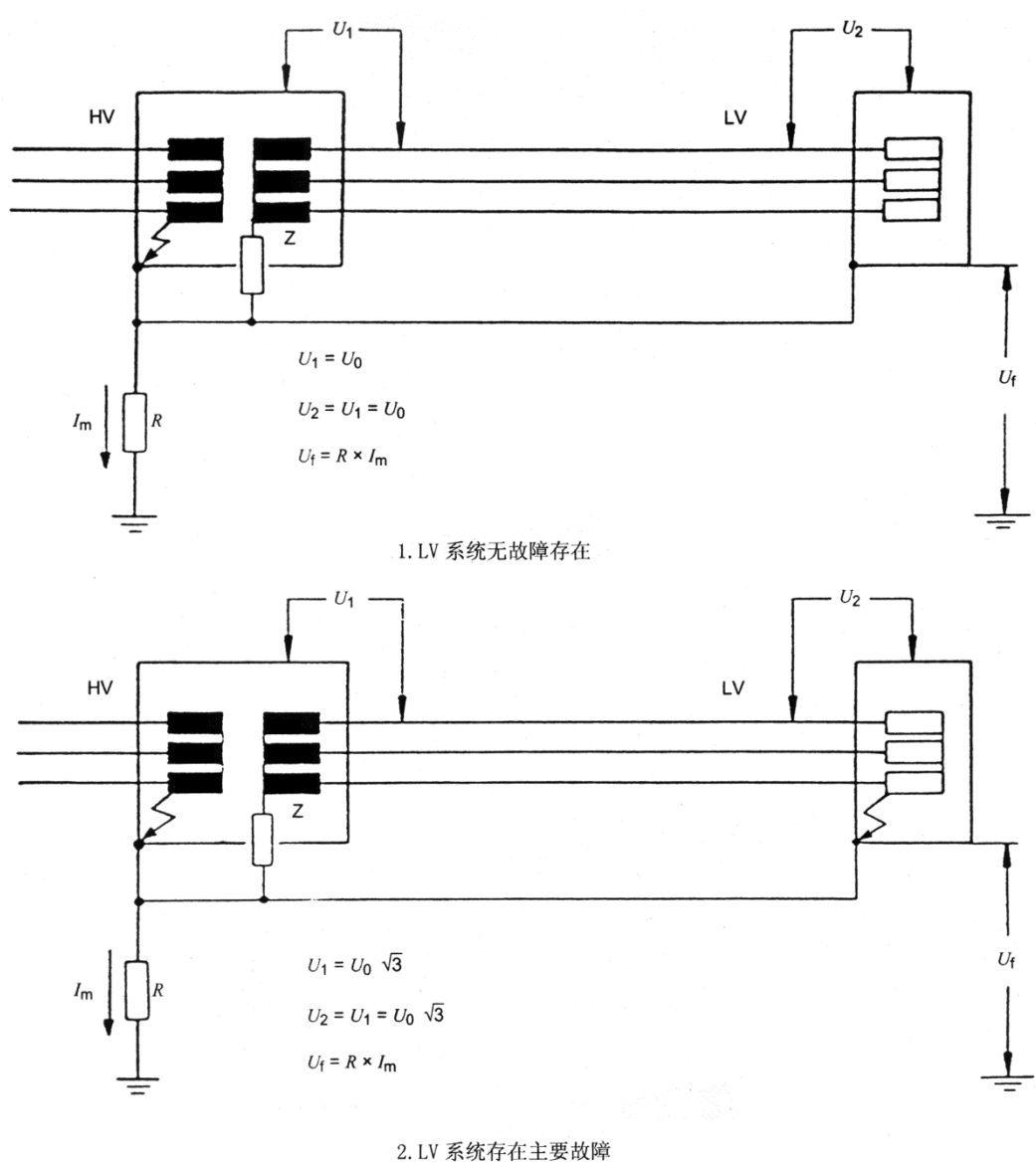
#### E. 6. 4 不同低压系统的示例及其可能的接地配置



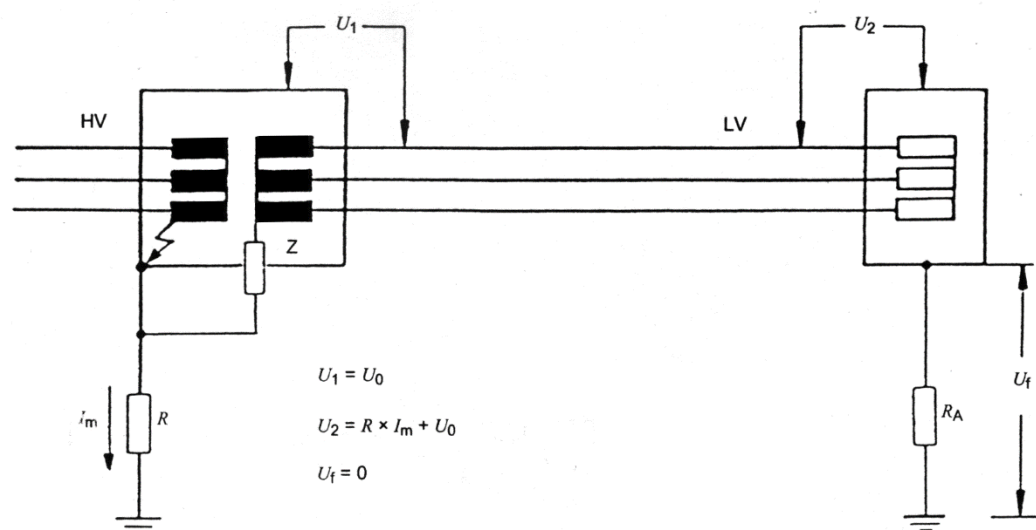
图E.3 TN 系统



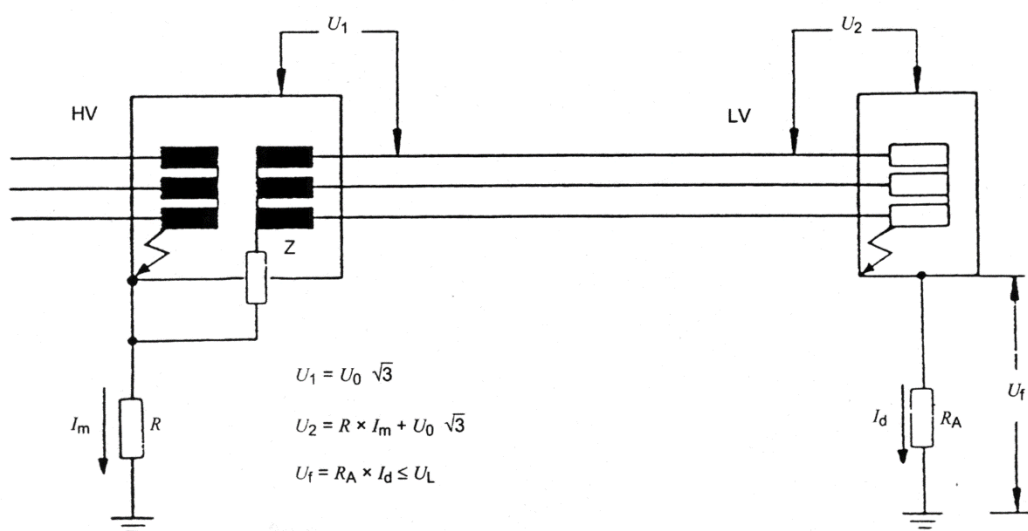
图E.4 TT 系统



图E.5 IT 系统，例 a（IEC 60364-4-44：2007，图 44D）

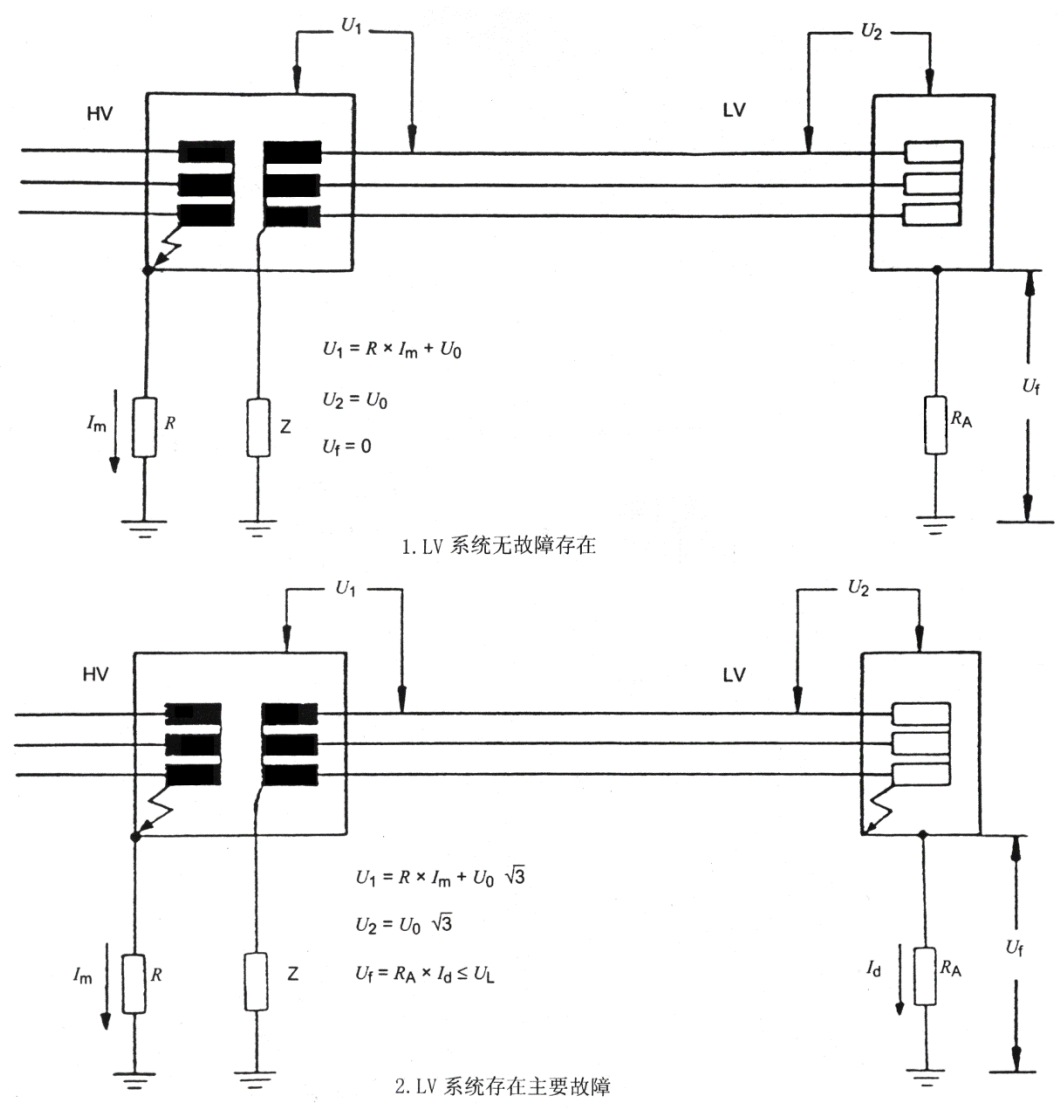


1. LV 系统无故障存在



2. LV 系统存在主要故障

图E.6 IT 系统，例 b (IEC 60364-4-44: 2007, 图 44F)



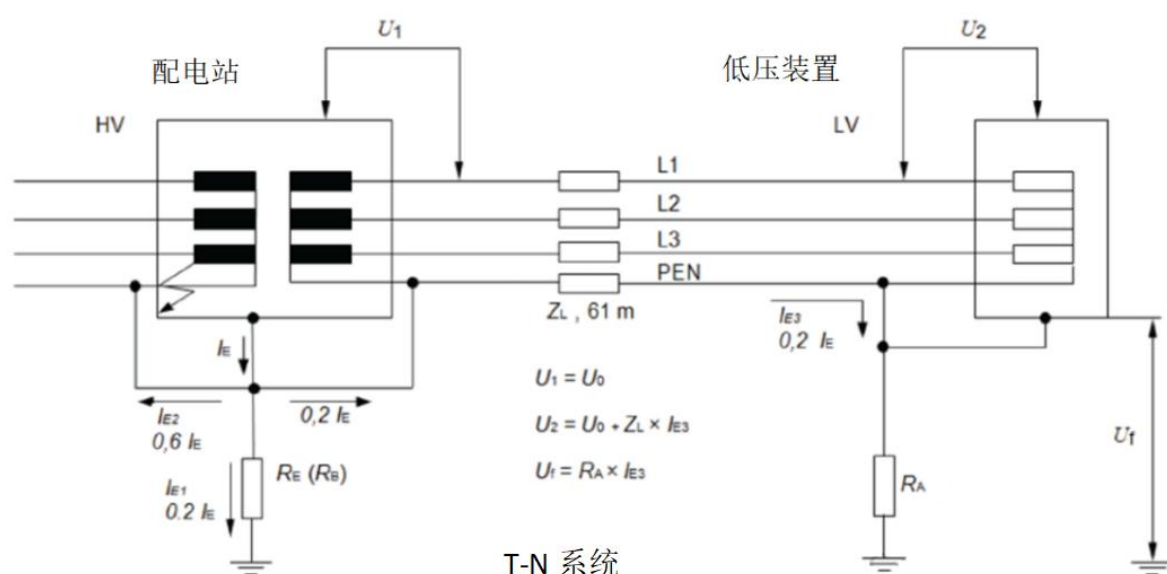
图E.7 IT 系统，例 c1（IEC60364-4-44：2007，图 44E）

E.7 美国 TN C 系统暂时过电压的值

图 E.8 中给出了配电变压器高压侧故障时的工频续流的分布情况。在此示例中，假定变压器和用户引入线的接地电阻均为 15 Ω。

$U_i = U_0$ ，这里  $U_0$  是二次侧的最大工作电压。

$Z$  是变压器和用户配电柜之间的导线的阻抗



图E.8 根据北美惯例，由TN系统中的配电变压器的一次侧（4线MV系统-直接接地）故障引起的暂时过电压

以北美 23 kV/13.2 kV Y 型配电回路典型情况为实例，其最大的故障电流（ $I_m$ ）为 10 kA。用于 3 kVA 到 25 kVA 三相安装的单相架空线配电变压器的典型三绕组次级导体阻抗（ $Z_L$ ）为 0.041  $\Omega$ 。计算用的铜导线线号为 4/0 AWG（根据 IEC 60999-1 其横截面积等效值为 25 mm<sup>2</sup>），长度约为 60 m。其故障电流分配的假设是基于多点接地配电回路发生阶段故障情况下的计算和现场测量。

本例中： $U_0=132$  V

$$U_1=U_0=132$$

$$U_2=U_0+0.2 \times I_E \times Z_L=132+0.2 \times 10000 \times 0.04=214$$

虽然这表明过电压是系统额定电压的 1.78 倍（1.78 p.u.），如果假定  $R > R_0$ ，则表明在上述同样故障条件下，所得到的值  $U_2=294$  V 或者是系统额定电压的 2.45 倍（2.45 p.u.），其暂时过电压（TOV）将持续到熔断器或上游的断路器断开或是自动重合闸动作而清除故障，这些器件将根据故障隔离器件的特性在 0.016 s 到 1.5 s 之间动作。此外，缩短用户导线的长度和减小故障电流可以减少恶劣情况的发生。

该示例虽然表明一次侧故障能产生 2.45 倍系统额定电压的过电压，但这是极少见的情况。因为配电回路产生的实际故障电流达到 10 kA 的情况是非常罕见的。大多情况下故障电流小于 4 kA，因此，TOV 将会大大减少。通常二次侧用户不超过 30 m，长距离的二次侧用户是不常见的，而短距离的用户产生的过电压较低。因此，如果故障电流是 4 kA，并且二次侧用户小于 30 m，其 TOV 大约是 1.24 倍的系统标称电压，即 148.4 V。

## E.8 IEC 61643-11 中使用的暂时过电压值及其说明

### E.8.1 概述

根据制造商提供的安装说明、SPD 在低压配电系统中的预期应用将确定试验程序。

对于 IEC 60364 系列标准定义的系统，表 E.3 给出了产生的 TOV 值；表 E.4 给出了考虑电压波动的参考试验电压  $U_{REF}$ 。

表 E.3 给出了根据 IEC 60364 系列标准定义的低压电源系统中位于用户侧的 SPD 的最坏情况试验值。在 IT LV 系统中，若 HV 和 LV 用户侧之间的接地配置相互连接，则不需要进行 HV-TOV 试验。对于此类互连的 IT 系统，条款 E.6 提供了附加信息。

表E.3 符合 IEC 60364 系列标准的低压电源系统的 TOV 试验值

应用		TOV 试验参数	
SPD 连接到:	对于 $t_t=5\text{ s}$ (用户装置内的 低压系统故障)	对于 $t_t=120\text{ min}$ (配电系统 中的低压系统故障和失零)	对于 $t_t=200\text{ ms}$ (高压系 统故障)
	耐受模式	耐受或可接受的安全失效模 式	耐受或可接受的安全失 效模式
TOV 试验值 $U_t$ (V)			
TN 系统			
连接 L- (PE) N 或 L-N	$1.32 \times U_{\text{REF}}$	$\sqrt{3} \times U_{\text{REF}}$	——
连接 N-PE	——	——	——
连接 L-L	——	——	——
TT 系统			
连接 L-PE	$\sqrt{3} \times U_{\text{REF}}$	$1.32 \times U_{\text{REF}}$	$1\,200 + U_{\text{REF}}$
连接 L-N	$1.32 \times U_{\text{REF}}$	$\sqrt{3} \times U_{\text{REF}}$	——
连接 N-PE	——	——	1 200
连接 L-L	——	——	——
IT 系统			
连接 L-PE	——	——	$1\,200 + U_{\text{REF}}$
连接 L-N	$1.32 \times U_{\text{REF}}$	$\sqrt{3} \times U_{\text{REF}}$	——
连接 N-PE	——	——	$1\,200 + U_{\text{REF}}$
连接 L-L	——	——	——
$U_{\text{REF}}$ : 用于试验的参考试验电压, 考虑了电源系统的最大电压波动 (请参阅附录 A)。 $U_0$ : 在 TN 和 TT 系统中为线电压对地的标称交流有效值; 在 IT 系统中为线导体和中性线或专用的中间导体之间的 标称交流电压, 视情况而定 (请参阅 IEC 60364-4-44 的 442.1.2)。 $1.32 \times$ : 在电压波动不超过+10 %的情况下, $U_{\text{REF}}$ 等于 $1.45 \times U_0$ (请参见 IEC 60364-4-44 的 442.5)。 <b>注:</b> 由于某些国家地区的电压波动超过10%, 但本文件中 $U_{\text{REF}}$ 仅适用于一般普遍性情况。 有关电压波动的更多 信息, 请参见 IEC 60038。			

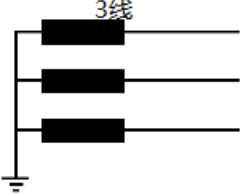
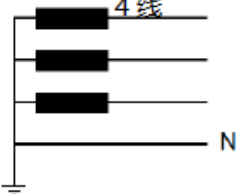
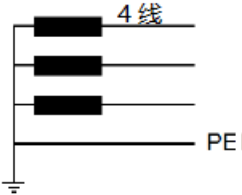
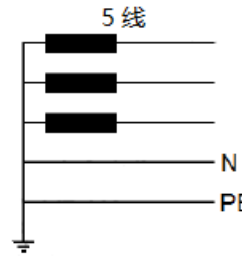

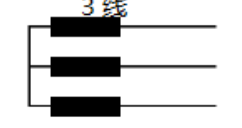
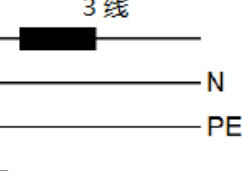
表 E.3 的值适用于所有 SPD, 它们应按照 IEC 61643-11 的要求进行试验和声明。对不同于与表 E.1 给出条件的特殊应用及其它特殊配电系统的要求, 制造商和用户之间可以根据实际情况确定附加的 TOV 试验值  $U_t$  和试验持续时间, 并在 SPD 规格书中加以声明。

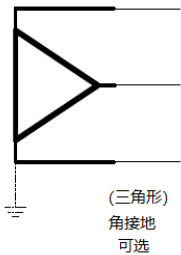
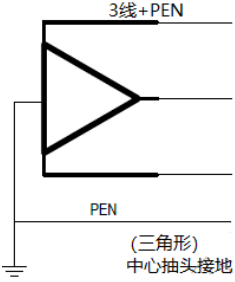
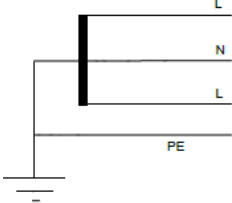
某些国家/地区要求附加的 TOV 试验值和试验持续时间, 如下所示, 请参阅 E.8.2 和 E.8.3。

表E.4 符合 IEC 60364 系列标准的系统的参考试验电压值

配电系统	交流系统 标称电压 L-PE/ L-L V	配电系 统的预 期电压 波动最 大值+ (%)	参考试验电压 $U_{\text{REF}}$ (取决于保护模式)			
			V			
			L - N (PEN)	L - PE	L - L	N - PE



无地线 和中性 线的三 相 TT 系 统		230 / 400	10	—	255	440	—
有中性 线的三 相 TT 系 统		230 / 400	10	255	255	440	255
有 PEN 线的三 相 TN-C 系统		230 / 400	10	255	255	440	—
有地线 和中性 线的三 相 TN-S 系统		230 / 400	10	255	255	440	255
		240 / 415	6	255	255	440	255
		120 / 208	10	132	132	230	132 <sup>a</sup>
		277 / 480	10	305	305	530	305 <sup>a</sup>
有中性 线的三 相 IT 系 统		230 / 400	10	255	440	440	255
没有中 性线的 三相 IT 系统		230	10	—	255	255	—
单相 TN-S 系 统		230	10	255	255	—	255
		120	10	132	132	—	132

三相(三角形)角接地 TN 系统或 TT 或 IT 系统		230	10	——	264	264	——
		200 (202)	10	——	222	222	——
		460	10	——	528	528	——
三相(三角形)中心抽头接地的 TN 系统或 TT 系统		230	10	132	264	264	——
		200 (202)		——	129 192	222	——
		460		——	528	528	——
分裂的 TN 系统		120 / 240	10	132	132	264	132
注：如果在某些应用中需要应对更高的电压波动（例如+15 %），则应遵循制造商与用户之间的特殊协议。 a：这些值已从 IEC 61643-11：2011 表 A.1 中进行了更正（修订）							

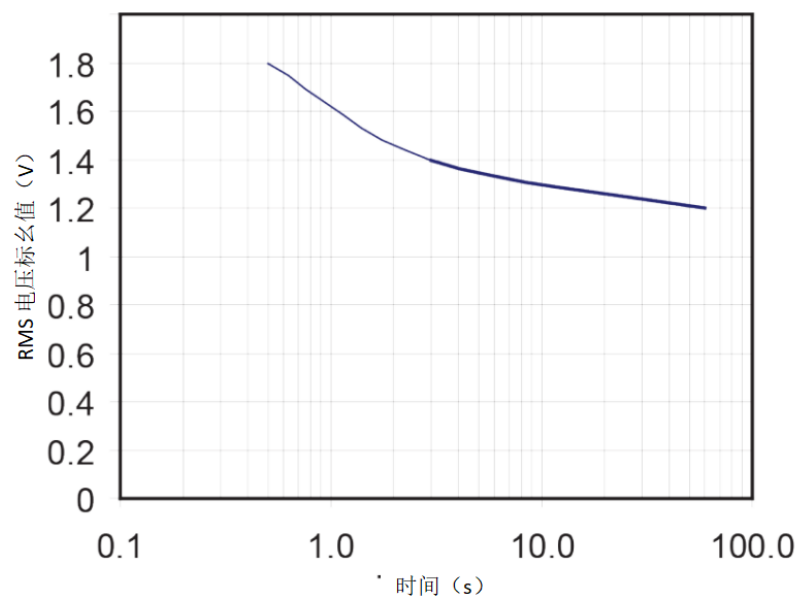
E.8.2 美国的低压配电系统暂时过电压值

根据 IEEE 1159，表 E.5 给出了美国低压配电系统的 TOV 试验值。

表E.5 美国低压配电系统的 TOV 试验值

IEEE 1159—2009 表 2 的条款和类别	典型的最大持续时间 (s)	典型的交流电压最大有效值 (V)	典型峰值电压 (V)	SPD TOV 承受力±5 %
2.0 短时变化-2.1 瞬时-2.1.2 涌浪	0.5	1.8*U <sub>0</sub>	2.55*U <sub>0</sub>	1.89
2.0 短时变化-2.2 短暂-2.2.2 涌浪	3.0	1.4*U <sub>0</sub>	1.98*U <sub>0</sub>	1.47
2.0 短时变化-2.3 暂时-2.3.3 涌浪	60.0	1.2*U <sub>0</sub>	1.70*U <sub>0</sub>	1.26

在图 E.9 中，每单位 (p. u.) 是 U<sub>0</sub> 的倍数。它以不同于表 E.5 的形式显示美国低压配电系统的 TOV 试验值。



图E.9 典型 T0V max p. u. RMS 电压 (V) 表 2, IEEE 1159—2009

但是，在美国测试 SPD 时，UL 1449 的要求超过表 E. 6 中给出的值。

注：在北美，UL 1449适用于SPD TOV试验。

表E. 6 按照美国 UL 标准进行 SPD 试验时的 TOV 值

额定电压	相数	试验电压 <sup>a</sup>
0-109 V	单相	两倍额定电压
110-219 V	单相	240
220-229 V	单相	380
230-239 V	单相	400
240-345 V	单相	480
346-399 V	单相	600
400-499 V	单相	690
500-1 000 V	单相	两倍额定电压 最高到 1 000 V
110-120/220-240 V	分相	240
120/208 V	三相 Y 形	208
220/380 V	三相 Y 形	380
230/400 V	三相 Y 形	400
200-240/380-415 V	三相 Y 形	415
240/415 V	三相 Y 形	415
254-277/440-480 V	三相 Y 形	480
346/600 V	三相 Y 形	600
400/690 V	三相 Y 形	690
120/240 V	High Leg Δ 型	240
240/480 V	High Leg Δ 型三角形	480

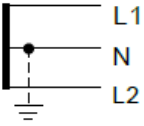
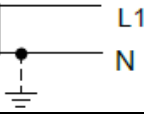
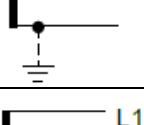
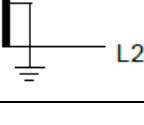
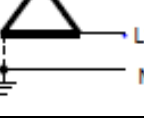
240 V	三角形	c
480 V	三角形	c
600 V		b
<sup>a</sup> 对于此表中未指定的设备额定值，试验电压应为最大相电压（如果有）或两倍的额定电压，最高为 1 000 V。		
<sup>b</sup> 对额定电压为 600 V 的产品不需进行非正常过电压试验，但应进行短路试验。		
<sup>c</sup> 短路和中等电流试验在全相电压下进行。		

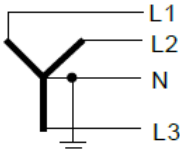
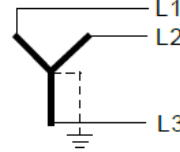
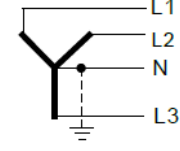
E.8.3 低压配电系统的暂时过电压值

表 E.7 给出了日本低压配电系统的标称电压和参考试验电压。

表 E.8 给出了日本低压配电系统的 TOV 试验值。

表E.7 日本低压配电系统的标称电压和参考试验电压值

配电系统		额定电压		试验电压参考值 $U_{\text{REF}}$			
				L-N	L-PE	L-L	N-PE
单相中心抽头接地 100/200 V TT 系统 (IT 系统)		L1-N L2-N	100	110	110	220	110
		L1-L2	200				
单相 100 V TT 系统 (IT 系统)		100		110	100	—	110
单相 200 V TT 系统 (IT 系统)		200		220	220	—	220
单相中心抽头接地 200 V TT 系统		200		—	110	220	—
三角形接地 200 V TT 系统 (IT 系统)		200		220	220	220	220
单相 和三相中 心抽 头接 地共 用的 TT 系 统	单相 L1, N, L2	L1-N L2-N	100	110	110	220	110
		L1-L2	200				
	三相 L1, L2, L3	200		—	110 (L1) 110 (L2) 191 (L3)	220	191

星形连接三相 100/173 V TT 系统		L1-N L2-N L3-N	100	110	110	191	110
星形连接三相无零 线 400 V TT 系统 (IT 系统)			400	-	255	440	-
星形连接三相有零 线 230/400 V TT 系 统 (IT 系统)			400	255	255	440	255

表E.8 日本低压配电系统的 TOV 试验值

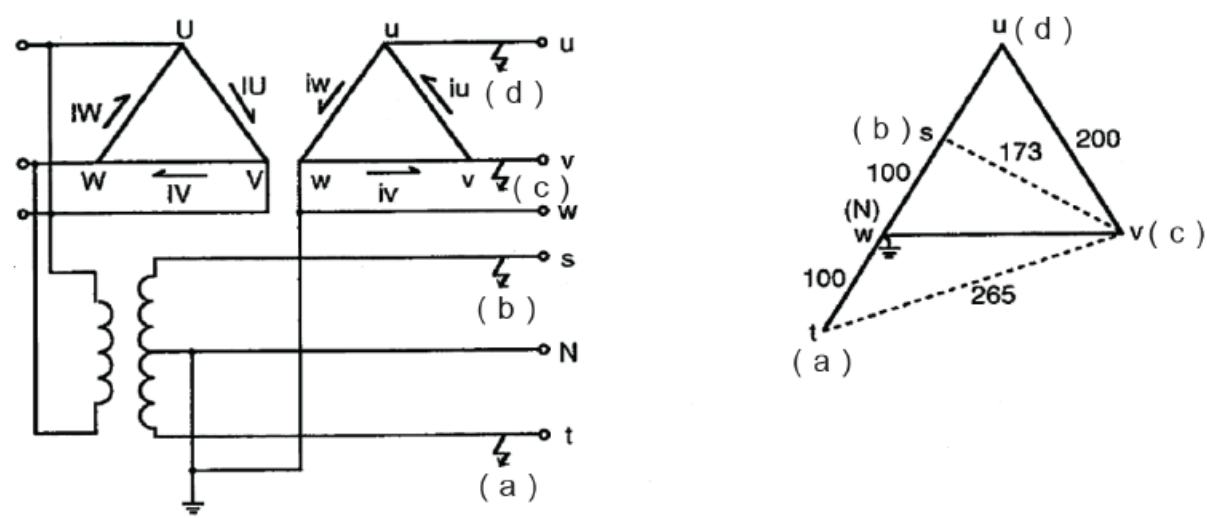
应用	TOV 试验参数			
SPD 连接到:	对于 $t_t=120\text{ min}$ (配电系统中的低压系统故障和失零)		对于 $t_t=1\text{ s}$ (高压系统故障)	
	耐受或可接受的安全失效模式		耐受或可接受的安全失效模式	
	TOV 试验值 $U_t$ V	预期短路电流 A	TOV 试验值 $U_t$ V	预期短路电流 A
交流系统额定电压 100 V				
连接 L-PE	330	20	710	30
连接 L-N	330	20		
连接 N-PE			600	30
连接 L-L				
交流系统额定电压 200 V				
连接 L-PE	330	20	820	30
连接 L-N	330	20		
连接 N-PE			600	30
连接 L-L				
交流系统额定电压 400 V				
连接 L-PE	440	20	855	300
连接 L-N	440	20		
连接 N-PE			600	300
连接 L-L				

注：这些值是电力设施技术标准的部颁法令所要求的。

在日本的低压配电系统中，由故障引起的 TOV 电压  $U_t$  如下。

图 E.11 给出了日本低压系统中因故障产生的特定 TOV 电压值。在日本，中心抽头接地的单相 100 V/200 V 系统与三相三角形接地的 200 V 系统共用接地点的情况有很多。例如，在这种情况下，当三相  $\Delta$  角接地 200 V 系统的一条线出现接地故障（图 E.10 的接地故障点（d））时，中心抽头接地的单相 100 V/200 V 系统中，一条线（图 E.10 的 t）与 PE 之间的电压为 300 V AC。同理，当中心抽头接地的单相 100 V/200 V 系统中的一条线出现接地故障（图 E.10 的接地故障点（a））时，三相三角形接地的 200 V 系统中一条线（图 E.10 的 u）与 PE 之间的电压为 300 V AC。对于表 E.7 所示的标称电压为 100 V/200 V

的系统，一般情况下，其 TOV 电压为 300 V；当考虑到配电系统的最大预期电压波动为 10%，因此在表 E.8 中将 TOV 试验电压提高到 330 V。



图E.10 中心抽头接地的单相 100 V/200 V 系统与三相三角形接地的 200 V 系统共用接地点示例

表E.9 不同接地故障点的 TOV 电压最大值

接地故障点	三相（Δ型）角接地 200 V			单相中心抽头接地 100/200 V	
	u	v	w	s	t
(a)	300 V	265 V	100 V	200 V	0 V
(b)	100 V	173 V	100 V	0 V	200 V
(c)	200 V	0 V	200 V	173 V	265 V
(d)	0 V	200 V	200 V	100 V	300 V

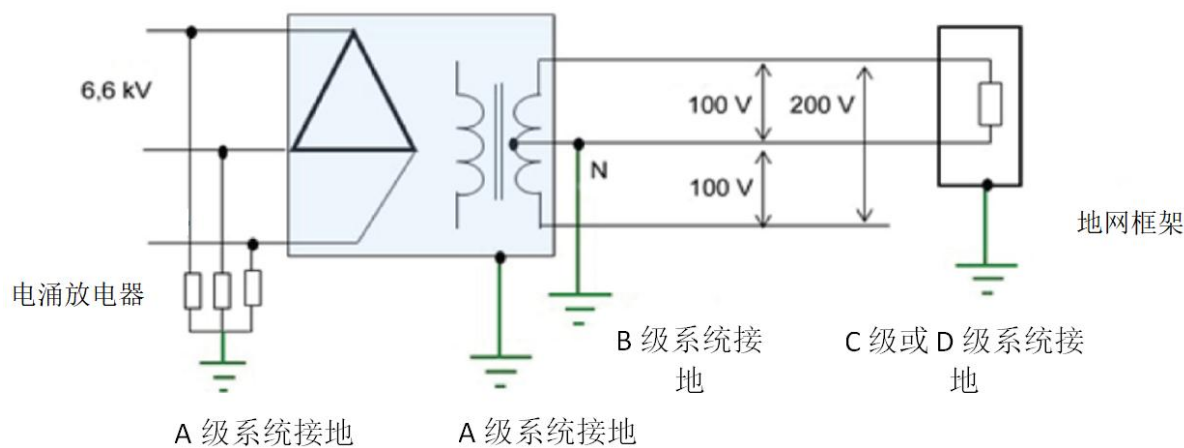
在日本，高压系统故障引起的 TOV 是由于接地故障和电力系统故障（高压系统与低压系统之间的故障）引起的。在这种情况下，由 TOV 引起的电流（接地故障电流或电力系统故障电流）如下。

在日本，所有的交流 100 V 和交流 200 V 配电系统均由未接地的 6.6 kV 高压电网供电。因此，高压系统故障时由 TOV 引起的电流将流经 6.6 kV 高压电网与地之间的分布电容，在交流 100 V 和交流 200 V 的配电系统中，该故障电流可高达 30 A。

在日本，90 %的 400 V 交流配电系统是由未接地的 6.6 kV 高压电网供电；10 %的 400 V 交流配电系统是由 6.6 kV 以上的高压接地电网供电。类似于欧洲（IEC）系统。因此，在日本 400 V 交流配电系统中，高压系统故障时由 TOV 引起的电流为 300 A（等同于 IEC 61643-11: 2011, 8.3.8.2）。

图 E.11 给出了日本中心抽头接地的单相 100 V/200 V 典型配电系统。

图 E.12 给出了日本的典型电源系统配置。



图E.11 日本中心抽头接地的单相 100 V/200 V 典型配电系统

根据日本法规，接地电极分为 4 类，如表 E. 10 所示。

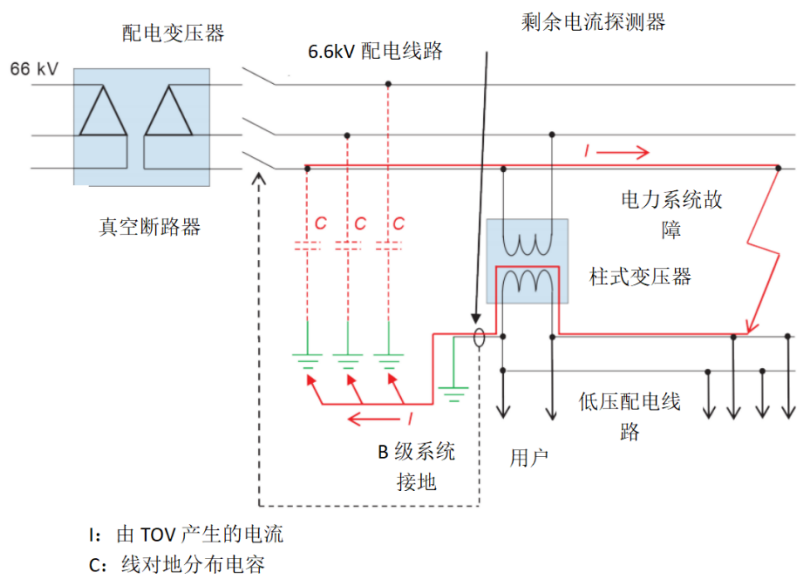
表E.10 接地电极类别和接地电阻的最大值

等级	接地电阻最大值（Ω）	参考
A	10	应用于高压下的设备
B	$150/I$	接地故障和电力系统故障保护
C	10	应用于使用 300 V AC 以上的设备
D	100	应用于使用 300 V AC 以下的设备

B 级的接地电阻（R）最大值通过以下公式计算得出，如表 E. 10 所示。

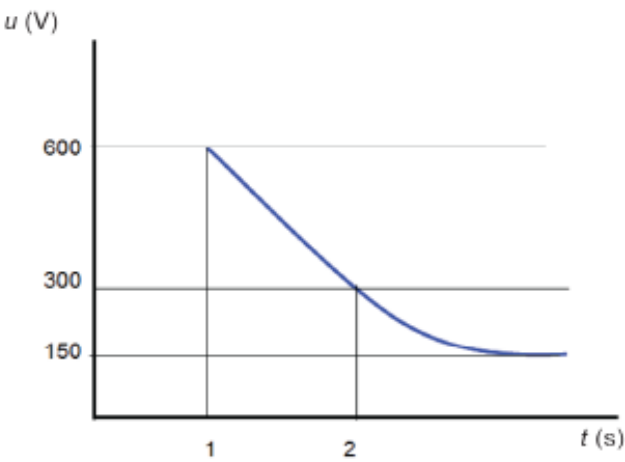
$$R=150/I$$

如果 B 级接地电极的电位增加到 150 V 以上，则真空断路器应在图 E. 13 所示的时间-电流特性曲线范围内及时断开。



I: 由 TOV 产生的电流  
C: 线对地分布电容

图E.12 日本的典型电力系统配置



图E.13 日本高压系统中故障引起的 TOV 特性



## 附录 F (资料性) 配合规则和原则

### F.1 概述

如 7.5.7 所述, SPD 级间配合是为了达到能量协调和电压保护水平协调。

### F.2 能量配合

#### F.2.1 通则

能量配合是以第二级 SPD 的最大能量耐受能力为基础的, 然而如 IEC 61643-11 所述, 该能量有时取决于试验波形及试验类别。由于试验一般仅用某一个类型的波形(例如 II 类试验波形为 8/20), 因此直接从制造商获取  $E_{\max}$  值是更好和更容易的办法(大多数情况下  $E_{\max}$  值印刷在技术文件中)。

为了满足 SPD 能量耐受, 必须定义以下两个值:

- $E_{\max S}$  为短持续电流波形, 例如, 8/20 (II 类试验);
- $E_{\max L}$  为长持续电流波形, 例如, 10/350 (I 类试验)。

在某些技术条件下  $E_{\max S}$  和  $E_{\max L}$  的值可能相等。

于是 SPD 可由两个特征电流来表征, 即短波(用于 II 类试验)  $I_{\max}$  和长波(用于 I 类试验)  $I_{\text{imp}}$ , 相应的能量耐受为  $E_{\max S}$  和  $E_{\max L}$ 。因此, 简单的 SPD 可根据 I 类和 II 类试验进行试验。

如果制造商声明了  $I_{\max}$ , 则  $E_{\max S}$  必须考虑到  $I_{\max}$ 。

SPD1 和 SPD2 需要在相应电涌电流波形的最大能量耐受  $E_{\max}$  下进行配合。这就意味着必须考虑以下两种情况:

- 长波的配合;
- 短波的配合。

通常, 短波配合相对比较容易。

对于开关型 SPD, 还有必要考虑长波前时间的情况, 该项工作 IEC 正在考虑。

#### F.2.2 分析研究: 用于两个基于金属氧化物压敏电阻的 SPD 级间配合的简单示例

##### F.2.2.1 通则

下面的内容仅适用于进行 I 类和 II 类试验的一端口限压型 SPD, 且其  $U_{\text{res}}(I)$  的曲线已知。该曲线经 8/20 波形进行测量, 并在 SPD 制造商的技术文件中提供。III 类试验和二端口 SPD 需特殊考虑(待定)。

下面的示例有助于理解协调配合的过程, 分析研究的前提是 SPD1 和 SPD2 须由金属氧化物压敏电阻组成。须注意这种分析研究仅基于电流分配。为了确保满足能量判据, 或许要另外进行通常难度较大的计算。

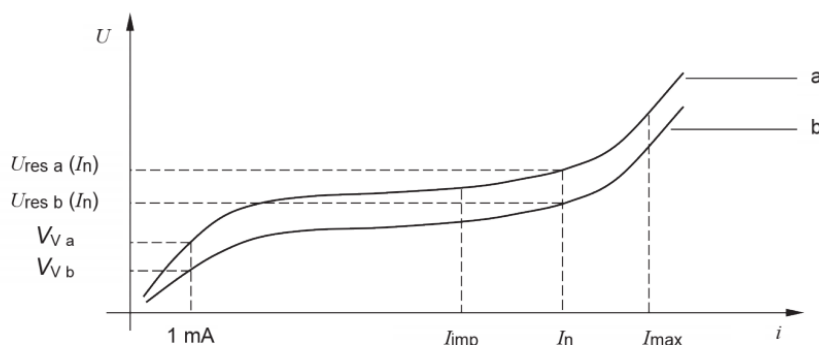
- 如果两个 ZnO 压敏电阻片直径相同(具有相同的标称放电电流  $I_n$  和相同的能量耐受; 相同的  $I_{\max}$  (如声明) 和  $I_{\text{imp}}$ ), 但有不同的电压保护水平  $U_{p1}$  和  $U_{p2}$  (不同的厚度), 则有下面的计算公式:

$$I_{n1} = I_{n2}$$

$$I_{\max 1} = I_{\max 2} \text{ (如声明)}$$

$$I_{\text{imp}1} = I_{\text{imp}2}$$

那么可能的  $U_{\text{res}}(I)$  曲线如图 F.1 所示。



图F.1 具有相同的标称放电电流的两个金属氧化物压敏电阻

如果  $U_{p1} > U_{p2}$ ，此时曲线 a 对应于 SPD1，曲线 b 对应于 SPD2。

如果距离  $l$  大于数米（典型的在 5 m~10 m），通常通过短波进行配合更容易接受。

在长波作用下退耦效应会降低，因此，SPD2 可能不得不耐受总的侵入电涌电流  $i$ ，其应具有耐受与 SPD 1 相同设计要求的总电应力。

如果  $U_{p1} < U_{p2}$ ：此时，曲线 a 对应于 SPD2，曲线 b 对应于 SPD1，大部分电流将流过 SPD1。这时，通过 SPD2 的电流小于侵入电涌电流。

在上述两种情况下，两个 SPD 具有相同的通流能力，满足能量判据。

讨论第一种情况是为了解释小概率下具有相同的能量耐受能力的两级 SPD 的配合机理。

——如果两个压敏电阻具有不同的标称放电电流：

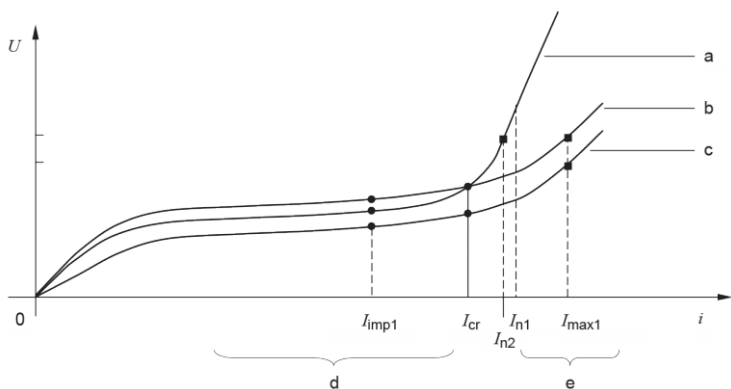
对应于此的实际应用情况是： $I_{n1} > I_{n2}$  和  $E_{max1} > E_{max2}$ 。此外，SPD1 和 SPD2 具有如  $U_{res1}(I_{n1}) < U_{res2}(I_{n1})$  的特性。因此， $U_{res}(I)$  曲线如图 F.2 所示，图中未注明阻抗，因为很难对它进行分析研究。此时，图 F.2 可以看作短波配合，大部分电流将流过第一个 SPD，但对长波下是否协调配合很难确定。长波波形的侵入电流幅值低于两条曲线交叉点（见图 F.2）可能无法实现，也就是无法协调配合。如  $U_{res2}$  曲线所示，该情形下大部电流都通过 SPD2，因为在这个电流水平下， $U_{res2}$  的曲线比  $U_{res1}$  的低，为此有必要在两个 SPD 之间加入一个电感。

因此，有必要，在  $I$  从  $0.1 \times I_{n2}$  到  $I_{n1}$  或  $I_{max1}$ （如声明）之间对比  $U_{res}(i) - I$  曲线，而不是仅比较由制造厂技术文件中给出的  $U_{res1}(I_{n1})$  和  $U_{res2}(I_{n2})$  值（分别与  $U_{p1}$  和  $U_{p2}$  对应），以检查它们是否彼此相交，且交点（如果有）的电流值  $I_{cr}$  应尽可能低。

此时，能量判据实现的概率很高，较低的  $I_{cr}$  达到协调配合的概率更大。如果有任何不确信的地方，有必要计算通过第二级 SPD 的能量，应考虑 SPD 之间的阻抗和长波，这种计算一般较难进行分析。

如果因为信息不充分而无法得到这些曲线，或者需要简单而快速的结果，则有必要在同一水平比较曲线  $U_{res1}$  和  $U_{res2}$ 。此时，较易实现且较佳的配合条件是  $U_{res1}(I_{n2}) < U_{res2}(I_{n2})$ 。当然，保守曲线（如图 F.2 所示）适合这种情况，使用这种压敏电阻或许有不必要的裕度。此外，该压敏电阻在耐受源自于电源系统暂时过电压时可能会有问题。

在这种情况下，即使流过第二级 SPD 的电流较低，也不能满足长持续电涌的能量判据，此时有必要计算通过第二个 SPD 的能量。而且，核实被保护设备是否仍被保护也是必要的（因为压敏电阻的非线性，SPD2 中低电流可能引起较高残压）。



- 标引序号说明：
- a SPD 2 对应曲线；
  - b SPD 1 对应曲线（与 SPD 2 曲线相交）；
  - c SPD 1 对应保守曲线（与 SPD 2 曲线不相交）；
  - d 长波电涌电流范围；
  - e 短波电涌电流范围。

图F.2 具有不同标称放电电流的两个金属氧化物压敏电阻

F.2.2.2 结论

任何情况下，需要配合的两个金属氧化物压敏电阻，应按下列五个步骤进行：

- a) 确认在没有任何 SPD 时可能出现的过电压，应区分长波和短波；
- b) 选择合适的 SPD1 以耐受这种过电压，如果从步骤 a 得不到信息，用一个有足够裕度的 SPD（见风险分析），并从制造商处得到  $I_{n1}$ 、 $I_{max1}$ （如声明）和  $I_{imp1}$  的值，然后把这些值与步骤 a 中所给数据综合考虑；
- c) 然后根据保护特性期望值选择 SPD2；
- d) 比较曲线  $U_{res}(I)$  中  $I$  的值，从  $0.1 \times I_{n2}$  到  $I_{n1}$  或  $I_{max1}$ （如声明），确定交叉点  $I_{cr}$ ，如果  $I_{cr}$  足够小（典型值取  $0.1 \times I_{n2}$ ），就不必计算下游 SPD 的能量。无论 SPD 之间的距离如何，能量判据都可实现。如有任何疑问，则考虑 SPD 之间的阻抗，并计算通过下游 SPD 中的能量，判断能量是否协调，如果这样的曲线方法不可行，则推荐用下列简化方法选择 SPD2：  
若 SPD2 有相同的标称放电电流： $U_{res1}(I_n) = U_{res2}(I_n)$ ；  
若 SPD2 有较小的标称放电电流： $U_{res1}(I_{n2}) < U_{res2}(I_{n2})$ ；  
最好计算 SPD2 中的能量，以验证能量判据且确认设备是否仍受到保护。
- e) 重复各步骤直到步骤 c 给出满意结果。

- 注1：极小电流下的电压值（通常称参考电压）不适用协调；
- 注2：在任何情况下（有或无金属氧化物压敏电阻），考虑EMC（电磁兼容）要求则流过SPD2的电流应尽可能小；
- 注3：曲线 $U_{res}(I)$ 是最大值，有必要考虑由于制造允差带来的曲线变化范围；
- 注4：前面的研究的结论可以推广到两个以上的SPD。

F.2.3 分析研究：带空气间隙的SPD和带金属氧化物压敏电阻的SPD级间配合

F.2.3.1 概述

另一种常见情形是使用空气间隙作为 SPD1，使用金属氧化物压敏电阻作为 SPD2，见图 F.3。这种情况实现协调配合的前提是在 SPD2 过载前，SPD1 的间隙发生火花放电。

在火花放电前,有:

$$U_1 = U_{\text{res2}}(i) + L \times di/dt$$

通常,当  $U_{\text{res2}}(i)$  的值未知,下列公式给出一个保守的结论:

$$U_1 = U_{v2}(i) + L \times di/dt$$

$U_{v2}$  是金属氧化物压敏电阻 2 的参考电压,参考电压是压敏电阻的特性参数,它非常接近  $U-I$  特性曲线的拐点电压。

只要  $U_1$  超过间隙动态放电电压(本附录命名为  $U_{\text{dyn}}$ )时,便能实现两级协调配合,并且只有很小一部分电流流经第二级 SPD。协调过程取决于金属氧化物压敏电阻 (SPD2) 的特性、间隙 (SPD1) 的动态放电电压、侵入电涌的上升率和幅值  $i$  以及 SPD 之间的距离  $d$  (电感  $L$ , 阻抗  $Z$  的阻性分量  $R$  可忽略)。

### F.2.3.2 间隙和压敏电阻级间的解耦电感估算值计算示例

如一个现代蜂窝式通讯基站,由于内部物理空间的限制,其下游 SPD 的 MOV 可将瞬态电压降到远低于上游 SPD 的间隙的触发电压,这将限制间隙动作,并使得所有故障能量进入下游 SPD 的 MOV 中。如果安装在较大的空间里,SPD 之间的电缆距离将会更长,这样可形成足够大的电感从而使间隙放电。

总是存在这样的可能性,故障瞬态电涌通过并联回路疏散,使得电压降低到不足以使间隙放电的程度。此时,下游的 SPD 应具有足够的额定通流能力,独自吸收所有能量。

当较高能量的电涌侵袭时,上游间隙型 SPD 不动作将使较高能量侵袭至下游的 SPD 并导致其损坏,可以通过串联足够的解耦阻抗来达到能量协调,确保在超过下游 SPD 的所有能量水平下间隙型 SPD 可以动作。

实现协调配合的电感值能要求能通过简单计算得到。首先,要知道间隙的参数,火花间隙典型的放电电压一般低于 4 kV,响应时间在 200 ns 以内。

其次,应清楚下游的 SPD 参数,一个交流 275 V,压敏电压 1 mA 为 430 V $\pm$ 10% 的典型单元组件,其起始限制电压约为 800 V,这可能是基于 8/20 试验波形的 II 类试验,  $I_n$  为 10 kA 到 20 kA。

然而,必须知道,间隙型 SPD 标定的 I 类试验采用 10/350  $\mu$ s 波形试验,或等效的长尾波冲击。下游 SPD 的峰值电流必须能耐受这类冲击降容的额外能量,降容因子可假定为 10:1,因此,如果峰值电流 (10/350  $\mu$ s 波形) 为 12.5 kA 将降至 1.25 kA, 10  $\mu$ s 上升时间将产生 125 A/ $\mu$ s 的  $di/dt$ 。

要求确保间隙可靠动作的电感值的计算公式如下:

$$U = L \times di/dt + I \times R$$

其中:

$U$ : 火花间隙放电电压

$di/dt$ : 冲击的上升率

$I \times R$  下游 SPD 的电压降 (注意  $R$  是非线性值)

上式可得:

$$L = \frac{U - I \times R}{di/dt}$$

假定间隙在 200 ns 内放电,通过下游的 SPD 的电流为:

$$I = 0.2/10 \times 1250 \text{ A} = 25 \text{ A}$$

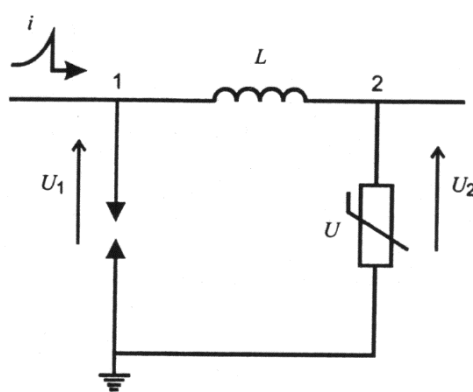
电压  $I \times R$  取 600 V, 因此

$$L = \frac{4000 - 600}{125 \times 10^6}$$

则

$$L = 27.2 \text{ } \mu\text{H}$$

电感值可以是单一的集总参数值,预设 27.2 m 长的电力电缆电感值为 1  $\mu$ H/m,如果是一定长度的复合型电缆,则其电感值会降低。



标引序号说明:

$L$ : 电感。

图F.3 基于间隙的 SPD 和基于金属氧化物压敏电阻的 SPD 的配合示例。

通过这个示例,可以获得设计这种配合的一般条件。

### F.2.3.3 结论

若选择了 SPD1 为间隙型,则 SPD2 必须满足以下要求。

——与 I 类试验波形有关的侵入电涌:

$$U_{\text{dyn}} < V_{\text{v2}} + L \times I_{\text{imp2}} / 10$$

——与 II 类试验波形有关的侵入电涌:

$$U_{\text{dyn}} < V_{\text{v2}} + L \times I_{\text{n2}} / 8 \quad (\text{如声明 } I_{\text{max2}}, \text{ 则 } I_{\text{n2}} \text{ 取 } I_{\text{max2}})$$

这些规则给出一个保守的结果,当必须采用一个较小值的  $L$  时,可通过计算机仿真来确定是否实现协调配合。

注:其它情况可给出更严格的结果,尤其是用正待考虑的长波,IEC TC81目前正在研究更长的波前时间:100  $\mu\text{s}$ 。

### F.2.4 分析研究:两个SPD的一般配合

通过对两个压敏电阻或间隙-压敏电阻之间协调配合的研究,说明了协调问题的复杂性。考虑到  $u-i$  曲线不易获知,而在实际上又存在较大误差,所以为了让分析研究更加清楚仅用了简单的示例。一旦第二级 SPD 的能量必须考虑时,最简单的办法是通过仿真模拟实现,这种分析方法的用处在于可以让用户更好地理解这一现象。

无论 SPD 采用什么样的技术,上述的一般性规则,尤其是能量判据仍然适用。

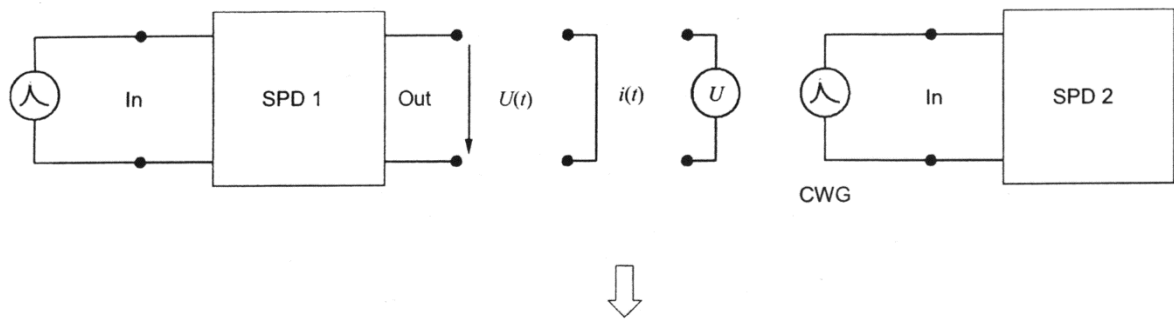
为达到一个可接受的协调配合,通常要求制造厂或用户进行仿真或试验,或使用下述简化的方法。

设备中可能内置一个特性未知的 SPD,由于在其安装寿命内设备可能发生变化,理应关注并确保设备内的 SPD 在未协调配合时不会过载。

### F.2.5 允许通过能量法 (LTE)

#### F.2.5.1 概述

如 GB/T 21714.4—2015 所述,实现标准电涌冲击参数下的能量配合是选择 SPD 并使 SPD 间协调配合的过程,这种方法的主要优点是可将 SPD 看成是一个黑盒(见图 F.4)。这里对于在输入端口提供的电涌,不仅包含开路电压,还有输出电流(例如:进入短路)均可确定(“允许通过能量”原则),这样输出特性转化成等效于“2  $\Omega$ -复合波发生器”产生的电应力(开路电压 1.2/50,短路电流 8/20),这种方法的优点是:不必对 SPD 的内部设计具备专门的知识。



转换为类似的标准冲击 – 1,2/50, 8/20 with  $Z_1 = 2 \Omega$ .

$$U_{oc} \text{ SPD1/ 输出} \leq U_{oc} \text{ SPD2/ 输入}$$

标引序号说明:

U: 负载电压。

图F.4 LTE 标准冲击参数的配合方法

采用该协调配合方法的目的是能将 SPD2 的输入值（如放电电流）和 SPD1 的输出值（如电压保护水平）进行对比。

多级保护的方法必须注意通过下游 SPD（没有损坏）的等效输入复合波冲击应不低于上一级 SPD 的等效输出复合波冲击。

对于可靠的协调配合，等效的复合波冲击应由最坏情况（ $I_{max}$ ， $U_{max}$ ，允许通过能量）决定。

对于设计解耦单元来说，最严苛的情形为短路情况，但这对于配合而言过于困难，比较实际的做法是引入一个“负载侧电压”（下文称“反向电压”）。

火花间隙下游的 SPD 通常包括金属氧化物压敏电阻，这样 SPD 的残压在任何情况下都高于系统标称电压的峰值（例如，在交流系统中标称电压为 240 V，其峰值电压为  $\sqrt{2} \times 240 = 340 \text{ V}$ ，低于安装的 SPD 的残压），系统标称电压的峰值与 SPD 的最小残压相对应，因此峰值电压可看成最小的反向电压。用短路电流代替假定的反向电压，会导致解耦元件的尺寸超大。

注：当 SPD1 的特性与 SPD2 的特性差别很大时，且 SPD2 上侵入电涌状态是类似的电流特征，那么这种方法能提供较好的结果，例如在火花间隙和 MOV 之间就能满足条件。

此方法的约束条件如下：

- 为了确保得到保守的结果，此方法中解耦单元必须作为第二级 SPD 的一部分；
- 为了确保得到保守的结果，当第二级 SPD 包括开关元件时，“反向电压”应等于 0；
- 由于此方法无法真实地对开关元件进行建模，当第二级 SPD 包含开关元件时，结果有可能低估，此时，在应用中使用该方法时要特别注意；
- 侵入到装置入口处的电涌波形，可以等效为一个电流波（10/350 或 8/20）和一个电压波，电涌电流的幅值众所周知，电涌电压的幅值取决于电力系统的电涌阻抗；
- 研究必须考虑 SPD 特性的允差。

#### F.2.5.2 方法

下面讨论的方法给出了两级 SPD 之间解耦元件（阻抗）的保守值，这意味着，如果这样的阻抗装在两个 SPD 之间，实际配合将比计算预期的要好。

基础的方法是将每个 SPD 的输出表示为等值的复合波发生器，由开路电压  $U_{oc}$  1.2/50 和短路电流  $I_{sc}$  8/20 决定，发生器的虚拟阻抗为  $2\ \Omega$  ( $U_{oc}=2\times I_{sc}$ )。

III类试验 SPD 已通过 CWG(复合波发生器)试验，对于根据 II 类试验测试的 SPD 而言，需要认为  $I_{sc}=I_n$  或  $I_{max}$ （如声明）。

前级 SPD 可能按照直接雷击建筑物情形进行 I 类试验测试，或根据 II 类试验进行测试。

每个 SPD 的输出电压，通常会有一个与 1.2/50 及 8/20 的波形没有直接关系的波形，有必要将实际波形标准化以便转变为 1.2/50 和 8/20 波形。

可通过下列值的计算来进行：

波峰值  $u=\hat{u}$ ， $\int u dt$  和  $\int \hat{u}^2 dt$   
波峰值  $i=\hat{i}$ ， $\int i dt$  和  $\int \hat{i}^2 dt$

注：公式和表格中的单位应该一致。

这些值用于表 F.1：

表F.1

电 压	$\hat{u}$	$\int u dt$	$\sqrt{\int u^2 dt}$
电 流	$\hat{i}$	$\int i dt$	$\sqrt{\int i^2 dt}$

针对输出电压幅值为 1V 复合波发生器，如表 F.2：

表F.2

电 压	1	$70\times 10^{-6}$	$6\times 10^{-3}$
电 流	0.5	$12\times 10^{-6}$	$2\times 10^{-3}$

因此，用表 F.1 中每个单元除以表 F.2 中相应的值，得到新表 F.3：

表F.3

电 压	$\hat{u}$	$\int \hat{u} dt / (70\times 10^{-6})$	$\sqrt{\int \hat{u}^2 dt (6\times 10^{-3})}$
电 流	$\hat{i}\times 2$	$\int \hat{i} dt / (12\times 10^{-6})$	$\sqrt{\int \hat{i}^2 dt (2\times 10^{-3})}$

表 F.3 中最大值给出了  $U_{oc(CWG)}$  值，相当于 SPD 输出与 CWG 的  $U_{oc}$  相等的值。

一旦下游的 SPD 按照 CWG 不带负载电压  $U_{oc\ test}$  进行过III类试验(或相当于 CWG 的 II 级试验)测试通过，就可以迅速判断配合是否满足，仅仅通过判断  $U_{oc\ test}>U_{oc\ CWG}$  就足够了。

当输入参数给定时，上一级 SPD 的输出值可通过仿真软件来计算。这样的参数不必每次都进行计算，因为这些值的计算可由 SPD 制造厂来完成。对每一个产品给定的应力(I 类试验  $I_{imp}$  或 II 类试验  $I_n$ 、 $I_{max}$ （如声明）或III类试验 CWG  $U_{oc\ max}$ )，制造厂可计算出等效 CWG 冲击的输出，应注意 SPD 特性和可能的任何盲点的误差(有时，SPD 输出端的最重要的应力不是由  $I_{imp}$ 、 $I_n$  或  $I_{max}$ （如声明）和  $U_{oc\ max}$  的最大值决定，而是由较低点的值决定)。

F.3 配合试验：能量配合和电压保护配合

F.3.1 通则

为了保护电气装置,根据被保护设备的过电压类别和电气装置的接线(电缆长度、走线等),有必要使用一种以上的 SPD 类型。在这种情况下,应检查 SPD 配合的有效性,以使后级 SPD 不会过载,并将过电压水平限制在被保护设备过电压耐受值以下(这个新判据被称为电压保护水平判据,下文将描述)。本节旨在提供一些实现 SPD 的有效配合的范例。

### F.3.2 配合判据

如上所述,SPD 的配合需要检查两个基本判据:能量判据和电压保护水平判据。

如果所有侵入的总雷电/电涌电流值,通过前级 SPD 耗散的能量部分高于通过后级 SPD 耗散的能量部分,则可以实现能量协调。此外,前后级 SPD 之间的任何元件都应该能够承受与后级 SPD 相同的能量。

此外,建议后级 SPD 的电压保护水平应不高于前级的 SPD,因为它们位于尤为需要严控电压保护水平的设备附近。

在协调两级 SPD 时,最应考虑的重要参数如下:

- SPD 类型(即开关型——放电间隙,限压型——金属氧化物压敏电阻);
- SPD 类型的对应特征(如放电间隙的放电电压,MOV 的最大持续工作电压,电压保护水平,最大放电电流等);
- 输入波形(即 8/20、10/350 等);
- 被保护设备的类型(即高感性负载、敏感电子设备等);
- 两级 SPD 之间的距离。

### F.3.3 配合技术

在进行任何协调配合之前,应遵循特定步骤来选择适当的 SPD 以及它们之间的配合方法。

#### ——步骤 1

确定在没有 SPD 的情况下的过电压水平,以选择响应更好的 SPD 类型。降低快速过电压需要采用电压限制型 SPD 而不是开关型,识别过电压需要评估在理想的 SPD 存在的条件下预期雷电/电涌电流的最大能量,根据最大能量水平,选择适当的 SPD 类型。

#### ——步骤 2

根据可以承受最大能量选择上游的 SPD。

#### ——步骤 3

根据设备预期的电压保护水平选择下游的 SPD。

#### ——步骤 4

选择的 SPD 应同时满足能量和电压保护水平判据,这主要可以通过软件仿真或实验测试来实现,在后一种情况可以使用下面的方法来检查。

### F.3.4 试验方案

#### F.3.4.1 通则

SPD 之间的配合基于电流分配。在建立协调配合规则时,有三个参数是必不可少的:

- SPD 本身(一级 SPD 与另一级 SPD 配合);
- 入口电涌电流(由首级的 SPD 特性确定);
- 两级 SPD(首级和下游的 SPD)之间的解耦阻抗  $Z$ 。

两个 SPD 之间的阻抗  $Z$ (通常是一个电感)可以是一个物理的(为了促进两个 SPD 之间的能量共同承担而嵌入在线路中的特定元件),或者相当于两级 SPD 之间一段电缆的电感。

SPD 的协调配合试验可以由 SPD 制造商、安装人员或用户执行。

在大多数情况下,如果满足以下两种判据,SPD 的协调配合就能实现:

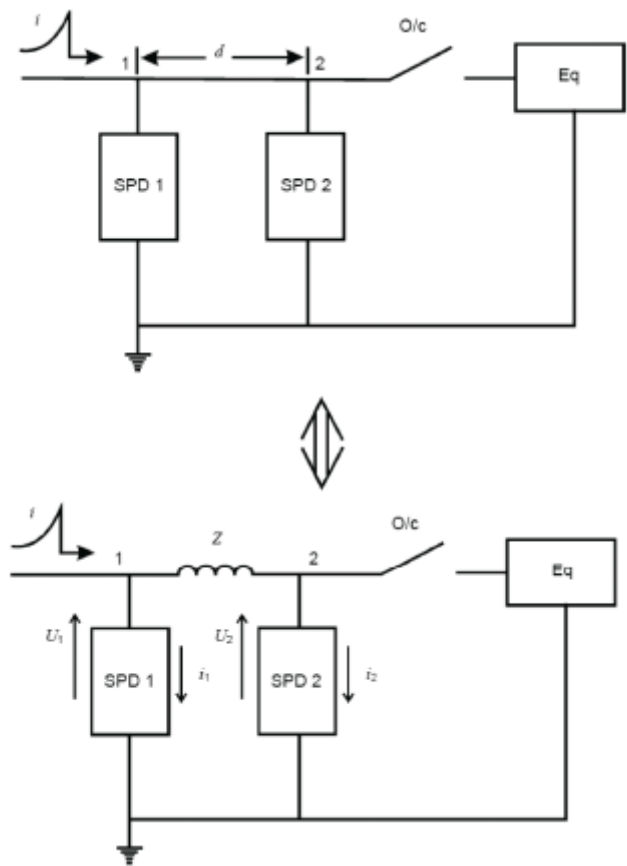


- a) 如果从最小试验能量到最大试验能量的所有电涌电流值(Ⅱ类试验为 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 倍  $I_n$ , 在Ⅰ类试验中, 8/20 电流冲击峰值等于 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1 倍  $I_{imp}$ , 和首级 SPD 的 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1 倍  $I_{imp}$ ), 通过 SPD2 分流的能量部分应小于或等于其最大承受能量 ( $E_{MAX2}$ ), 这样能量配合就能实现。
- b) 如果从最小试验能量到最大试验能量的所有电涌电流值(Ⅱ类试验为 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1 倍  $I_n$ , 和Ⅰ类试验 8/20 放电电流的幅值等于 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 倍  $I_{imp}$ , 加上 0.1, 0.25, 0.5、0.75 和 1 倍的首级 SPD 的  $I_{imp}$ ), SPD2 的残压低于或等于其标称的电压保护水平  $U_p$ , 这样保护配合就能实现。

试验声明的部分  $I_n$  或  $I_{imp}$  电流是为了研究是否不存在从低应力到最大应力的盲点, 如果Ⅱ类试验声称了  $I_{max}$ , 则  $I_n$  应用  $I_{max}$  代替, 对于Ⅰ类试验的 8/20 放电电流, 其峰值应为  $I_{imp}$  或  $I_{max}$ , 两者中取较大者。

F.3.4.2 试验设置

SPD 的配合测试的布置如图 F.5。



标引序号说明:  
Eq: 正常运行时的被保护设备  
O/c: 开路(设备与电源断开)  
I: 侵入的电涌电流

图F.5 SPD 的协调配合试验的布置

试验不考虑连接引线, 连接线应尽可能短, 两级 SPD 的连接应类似。外部脱离器(如有)在本协调配合试验中不予考虑。

当用  $Z$  代表物理阻抗时，则导线的电感值比  $Z$  小很多，因此可以忽略。然后，对于这两种情况， $Z$  是用图 F.5 所示的示意图表示。

当  $Z$  代表两个 SPD 之间一段导线的电感时，进线和回线须按照厂家要求、安装程序或用户声明安装。如无具体安排。进线和回线不得互相缠绕，线距不超过 10 mm，并应避免形成环路。

试验应在三组未经受过任何试验的样品上进行。

应根据协调配合程序测试不同 SPD 类型的配合可能性：

- I 类 SPD 与 II 类 SPD 配合使用；
- I 类 SPD 与 III 类 SPD 配合使用；
- II 类 SPD 与 II 类 SPD 配合使用；
- II 类 SPD 与 III 类 SPD 配合使用。

在试验过程中，在 SPD 所在系统施加  $U_c$  电压，短路电流应足够高以检测到其中一个被测 SPD 的故障（最小 5 A）。电源支路可以采用电流保护，但电涌电流支路不可以。如果 SPD1 和 SPD2 是多极 SPD，例如带有相线、中性线和接地（PE）的 SPD，则所有模式都必须进行 L-N、N-PE 和 L-PE 试验，且此情形下 SPD1 和 SPD2 之间的其余端子需互相互连。

当首级 SPD 采用 I 类试验时，其声明的  $I_{imp}$  应用于协调配合试验程序。如果声称了  $I_{max}$ ，对于 8/20 放电电流的峰值应为  $I_{imp}$  或  $I_{max}$ ，两者中取较大值。

当首级 SPD 采用 II 类试验时，它声明的  $I_n$  应用于协调配合试验程序，如果声称了  $I_{max}$ ，配合试验程序应采用  $I_{max}$ 。

SPD 应在  $U_c$  处于过零点后  $60^\circ$  角时施加过零正电流冲击。冲击放电之间的间隔应足够长，以使 SPD 冷却到环境温度。

根据首级 SPD 的不同，表 F.4 总结了试验过程。

表F.4 协调配合的试验程序

首级 SPD (SPD1)	下游 SPD (SPD2)	试验放电电流
SPD I 类试验	SPD II 类试验或者 III 类试验	取 8/20 的放电电流峰值为 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 倍 $I_{imp}$ 或 $I_{max}$ (如声明)，并和首级 SPD 声称的 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 倍 $I_{imp}$ 相比，取两者中较大值。
SPD II 类试验	SPD II 类试验或者 III 类试验	取 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 倍 $I_n$ 或 $I_{max}$ (如声明)，并和首级 SPD 相比，取两者中的较大值。

协调配合试验程序可以在仅超过下游 SPD 的 8/20 放电电流参数下进行。

F.3.4.3 通过判据

协调配合试验中若能达到续流自熄且达到热稳定，则表示 SPD 通过试验。电压和电流记录，连同目视检查，都应显示没有样品击穿或闪络的迹象，试验期间也不应发生机械损伤。

测量的 SPD2 的残压不得超过其声称的  $U_p$ 。

## 附录 G

### (资料性)

### 应用示例

注：本附录为SPD应用于家庭和工业设施（如无线基站塔，风力发电机组等）提供了一种假设的系统。本附录在有限情况下为阐述有关SPD选择的应用准则尝试提供有关的信息，但并不是针对所有设施或系统的唯一配置。

#### G.1 家庭的应用

MV 电网：架空线 10 km。

LV 电网（230/400 V）：架空线 1000 m，地下电缆 200 m。

$N_g$ ：2 次/(km<sup>2</sup>·年)（见 5.2.2）。

被保护建筑物位置：平原。

电气装置的结构：入口处装有 S 型 RCD 保护（耐受 3 kA 8/20，见 7.2.5.3），建筑入口处短路电流为 3 kA，在入户处（一层）有一个主配电盘和在第二层有辅助配电盘。

被保护建筑物的接地电阻：50 Ω。

LV 电网的接地系统：TT 系统；一根相线和中性线。

需保护设备的特性：洗衣机、电脑、入口处的警报器、录像机和电视机等。

根据风险分析（见第 4 章），使用 SPD 可能有益处（ $N_g$  的较高值，变压器 MV 和 LV 侧的架空线，电子设备等）。

由于是架空线，预期会有中等强度的雷电流；入口处每根导线标称放电电流（ $I_n$ ）≥5 kA 8/20。

入口处，警报器需要保护（敏感元件） $U_p$ ≤1.5 kV。这可由一台一端口 SPD（见 3.1.21）保护，它由 II 类试验来测试， $U_p$ =1.5 kV。

入口处，短路电流为 3 kA (r.m.s)，SPD 的短路耐受电流≥3 kA r.m.s, (见 6.5.4)。对此，制造厂家建议使用一个熔断器或者一个有短路断开特性的 RCD 断路器(后备保护)。如果入口处用的是一个 S 型 RCD，当侵入的电涌超过 3 kA 8/20 时，就不能保证入口处保护的连续性。

由于有 RCD 存在，间接接触不需要附加保护。SPD 本身包含一个热脱离器。（见 7.3.1）。

由于是一个 TT 系统，为避免相与中性线之间产生太高的过电压，建议一个 SPD 有三种保护模式(相对中性线，中性线对地及相对地，见 7.1.3)。

其他需要保护的电器仅需要在相线与中性线之间保护，因为相线和中性线不接地，除非出于安全目的把洗衣机接地，在这种情况下，相与地和中性线与地之间的保护可能是必需的。

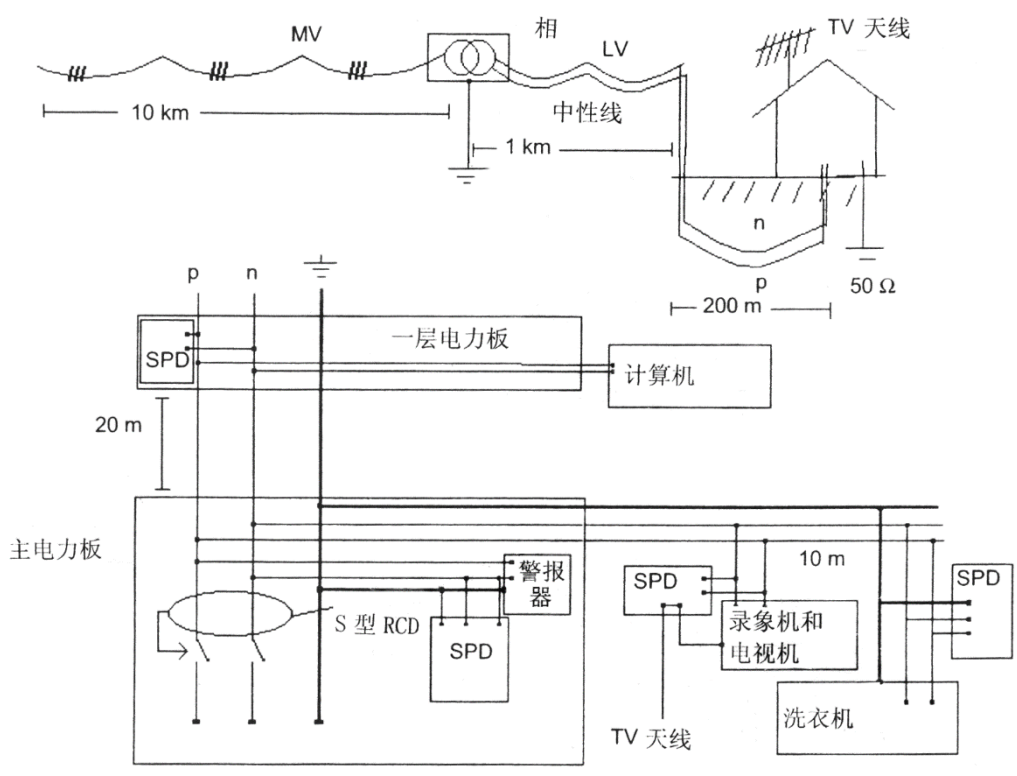
若电视天线接地，则需额外增加保护。

在入口处 SPD 和其他电器之间的距离，尤其在第一级，是很长的(分别为 10 m 和 20 m)，其他的 SPD 必须紧靠被保护电器(7.2.3)。一个必须靠近洗衣机安装，一个靠近录像机和电视机，另一个接在第一层的配电盘上，也可直接与电脑插头相连，(计算机与配电盘之间的距离很小)。

其他的 SPD 可认为电涌电流较低，当  $I_n$ =2 kA 时，II 类试验已经足够，在制造厂的资料中建议  $U_p$ =0.8 kV。

20 m 的距离足够使装在入口处和第二层之间的 SPD 产生耦合，但 10 m 的距离对入口处 SPD 和其他地面上的 SPD 由于  $U_p$  值=0.8 kV 较低，不足以充分退耦。对其他地面上的 SPD 最好选择另一个  $U_p$  的 SPD，如  $U_p$ =1.5 kV。

对这些 SPD，安装处短路电流较低，制造厂已安装了必要的脱离器(热效应和短路效应)，见图 G.1。



图G.1 家庭的安装

G.2 工业应用

MV 电网：架空线 10 km。

LV 电网（230/400 V）：2 根 100 m 长的地下电缆。

$N_g$ ：0.5 次/(km<sup>2</sup>·年)（见 5.2.2）。

被保护建筑物的位置：空旷位置。

电气装置的结构：

MV/LV 变压器在主建筑 MB 内部；

LV：TN-C 配电系统为主体建筑 MB 中的主配电盘 MDB 提供三相电。以 TN-C 系统和 TN-C-S 系统分别为独立建筑物 B1 和建筑物 B2 提供三相电。B1 和 B2 与主体建筑 MB 都相距约 100 m。

被保护的设备：

主建筑 MB——电源（MV/LV 变压器）向工业制造设备供电，包括空调、工厂照明、工业电动机控制器、变速驱动以及数控（CNC）机床。

建筑物 B1——一般的办公设备，包括：影印机、传真机、局域网、离 DB1 很近的电话交换机（PABX）。

建筑物 B2——过程控制设备，包括：用于工厂管理的可编程逻辑控制器（PLC）、监测控制和数据采集系统（SCADA）、称重设备、监视器，一般与 DB2 距离 50 m。

建筑物的接地：主体建筑 MB 的接地电阻为 11 Ω，建筑物 B1 和建筑物 B2 的接地电阻分别为 49 Ω 和 51 Ω，当用 TN-C 系统的 PE 导体连接时，整个接地系统电阻大约为 7 Ω。建筑物 MB、B1、B2 中分别有等电位连接排 EB、EB1、EB2。

风险分析（见第 4 章）：虽然设备未暴露在直击雷的影响区域内，但是 MV/LV 变压器的 MV 侧需要用避雷器进行防护（因为使用的 MV 架空线具有固有的高暴露特征）。因为变压器的地电位上升，电涌电流也可以通过局部接地系统，所以需要在建筑物 B1 和 B2 的入口处和变压器的 LV 侧安装 SPD。

保护原则：在风险分析中对这种需要连续工作的工业设备分类为典型的具有“重要性”的对象。因此，在整个设施中分布的电涌保护装置既为主配电盘 MDB 提供了入口处保护，也为建筑物 B1 和 B2 中的独立配电盘 DB1 和 DB2 提供保护。

**主体建筑物**——主配电盘内的 SPD 连接接到各相和主等电位排 EB 之间。这些 SPD 应按照 II 类试验进行测试。例如：标称放电电流  $I_n$  为 10 kA (与避雷器额定值相同)，电压保护水平  $U_{p1} \leq 1.2$  kV 的 SPD，可用于此位置以确保与后级使用的额外 SPD 配合，见下文。

SPD 的短路耐受能力 (以及开关型 SPD 的额定续流断开值) 需要与 MDB 的预期短路电流配合。这可以通过使用脱离器来实现，脱离器是由制造商指定的外部串联连接过流器件 (如熔断器、断路器等)，也可以内置于 SPD。

建筑物内有各种类型的设备，它们具有不同的耐压能力，包括敏感性设备 (根据 IEC 60664-1，电压耐受能力  $U_w = 1.5$  kV)。设备与安装在设备入口处的 SPD 距离 30 m。这可能会导致电压振荡 (见 7.1.4)。

在这种情况下，设备的最大电压可达  $2 \times U_{p1}$ ， $U_{p1}$  为入口处 SPD 的保护水平。在这个例子中，描述了一个最坏的情况，根据 7.1.4， $U_{p1}$  应该小于  $1.5 \text{ kV} \times 0.8/2$  (即 600 V)。由于可能存在的 TOV，如此低的保护水平可能会增加 SPD 失效的概率，因此在入口处可以选择具有较高  $U_p$  值 (对 TOV 值不太敏感) 的 SPD，例如  $U_{p1} = 2.5$  kV 的 SPD。在这种情况下，需要在设备 ( $E_n$ ) 前面增加一个  $U_{p2} \leq 1200 \text{ V}$  ( $0.8 \times U_w$ ) 的 SPD，由于已经很接近这种敏感性设备性能，不需要再除以 2。

如果使用较低电压保护水平  $U_{p1}$  的 SPD ( $U_{p1} \leq 600 \text{ V}$ )，则不需要安装第二级的 SPD。这个过程解决了设备的耐受电压额定值  $U_w$  (绝缘配合)。

为避免设备故障，可能需要较低的电压保护水平  $U_p$  (若使用两级 SPD，则为  $U_{p2}$ ，若使用单级 SPD，则为  $U_{p1}$ ) (见 7.1.4.5，考虑冲击抗扰度)。

连接 SPD1 到 EB 的引线长度不符合 7.1.4.4 的要求。为此，在 SPD1 和 PEN 之间使用一个额外的导体。连接 SPD2 到 PEN 的引线长度符合 7.1.4.4 的要求，因此不使用额外的导体。

数据和控制回路的保护参照 IEC 61643-22。

**建筑物 1**——建筑物 B1 和主体建筑物 MB 之间的给定距离是 100 m，在各相与等电位连接排之间安装 II 类试验的 SPD (SPD3)。假定安装的 SPD 的标称放电电流  $I_n$  为 5 kA，电压保护水平  $U_p \leq 1$  kV (由于 B1 中安装了敏感性设备，所以需要  $U_p \leq 1$  kV。因为建筑物很小，且设备靠近 DB1，无需考虑 2 倍电压效应，见 7.1.4)。这部分强调的是设备的耐受电压额定值  $U_w$  (绝缘配合)。为避免设备故障，可能需要较低的电压保护水平  $U_p$ 。

连接 SPD3 到 EB1 的引线长度符合 7.1.4.4 的要求，因此不使用附加导体。

数据和控制回路保护参照 IEC 61643-22。

**建筑物 2**——B1、B2 和主体建筑 MB 之间相距约 100 m，因而在各相和 PE 导体/母排、PEN 导体/母排之间都需安装 SPD (SPD4)。这些 SPD 应通过 II 类试验测试。假定 SPD 的标称放电电流  $I_n$  为 5 kA，电压保护水平  $U_p \leq 1.2$  kV。

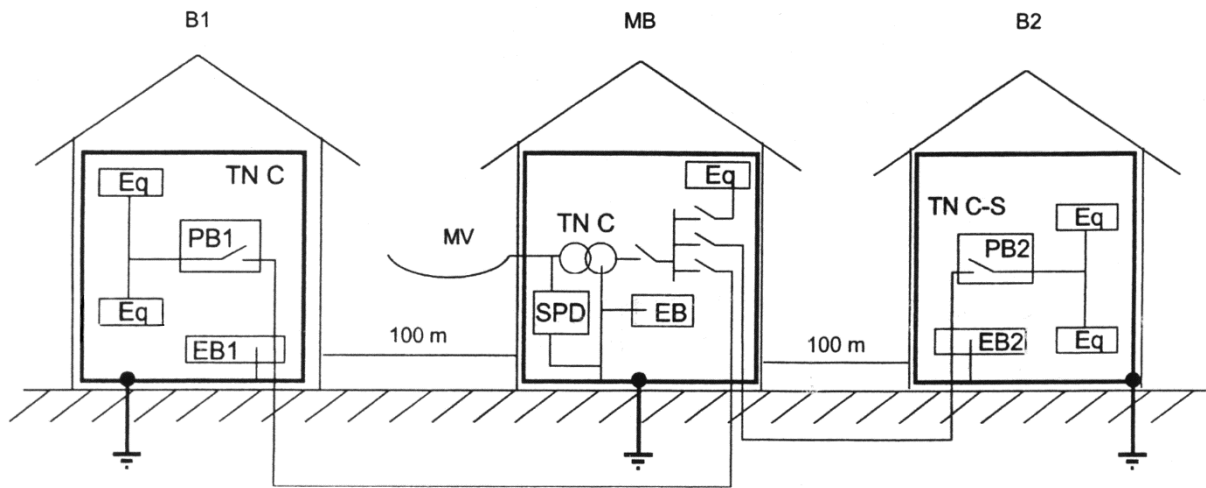
建筑物内部有各种类型的设备，其具有不同的电压耐受能力，包括敏感性设备 (根据 IEC 60664-1，耐受电压额定值  $U_w = 1.5$  kV)。设备距离入口处 SPD 为 50 m。这可能会导致振荡 (见 7.1.4)。在这种最严酷的情况下，设备上的电压保护水平最高可达  $2 \times U_{p1}$ ， $U_{p1}$  为入口处 SPD 的保护水平。根据 7.1.4.5， $U_{p1}$  应小于  $1.5 \text{ kV} \times 0.8/2$  (即 600 V)，应像建筑物 1 一样考虑暂时过电压。入口处 SPD (SPD4) 的  $U_{p1}$  可能高达 1.2 kV。在这种情况下，需要在设备  $E_n$  前端安装一个  $U_{p2}$  小于或等于 1.2 kV ( $0.8 \times U_w$ ) 的 SPD (SPD5)。如果使用较低  $U_{p1}$  ( $U_{p1} \leq 600 \text{ V}$ )，则无需安装第二级的 SPD。这部分强调的是设备的耐受电压额定值  $U_w$  (绝缘配合)。为避免设备发生故障，可能需要较低的电压保护水平  $U_p$  (若使用两级 SPD，则为  $U_{p2}$ ，若使用单级 SPD，则为  $U_{p1}$ ) (见 7.1.4.5 注)。

如果需要在便携式设备附近安装额外的 SPD (SPD5)，则 SPD 应能在每相和中性线之间以及中性线和 PE 之间提供保护。这是为了避免由于设备距离在 DB2 中与 NDE 等电位连接点达到 50 m 而导致中性线的电位上升的风险，见图 G.3。

连接 SPD4 到 EB2 的引线长度以及连接 SPD5 中性线到 PE 级之间的引线长度符合 7.1.4.4 的要求，因此不需要使用其他导体。

数据和控制电路保护参照 IEC 61643-22。

见图 G.2 和 G.3。



标引序号说明：

B1、B2 建筑物 1、2；

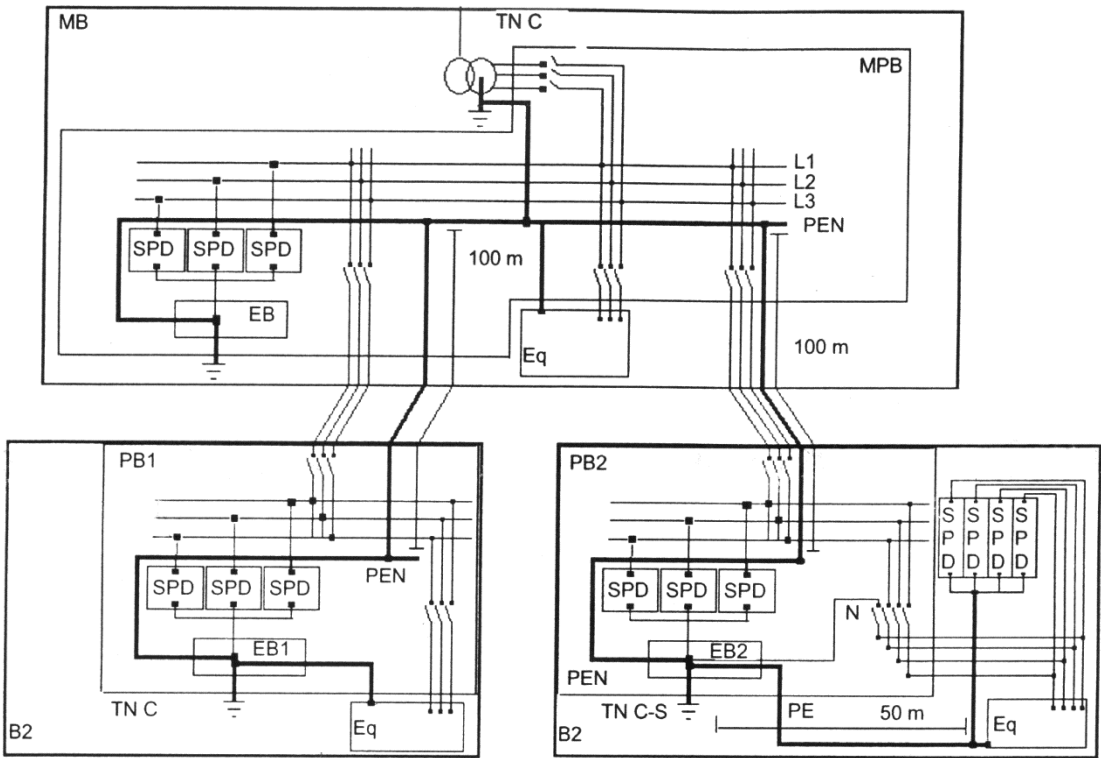
MB 主体建筑；

EB 等电位连结；

PB 配电盘；

Eq 负载设备。

图G.2 工业上的安装



标引序号说明:

B1、B2 建筑物 1、2;

MB 主体建筑;

EB 等电位连接;

MDB 主配电盘;

E<sub>q</sub> 负载设备;

PB 配电盘;

MVA 中压避雷器。

图G.3 工业安装电路

G.3 具有雷电防护装置的情况

无线电塔装有一个雷电防护系统;

MV 电网: 架空线 10 km;

LV 电网: 架空线 500 m;

$N_g$ : 6 次/(km<sup>2</sup>·年);

被保护建筑物的位置: 山顶;

电气装置的结构: 中性线在山脚下接地;

设备接地至本地保护接地处;

被保护建筑物的接地电阻: 10 Ω;

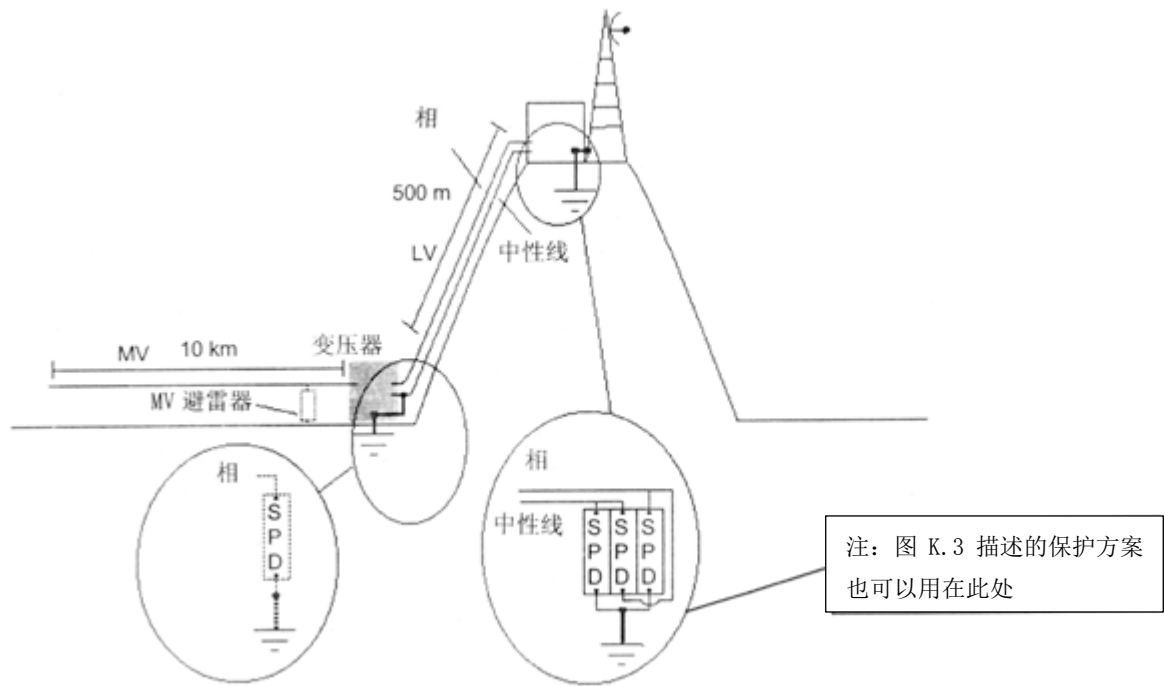
MV/LV 变压器接地电阻: 10 Ω;

LV 电网接地系统: TT 系统; 一相和中性线配置;

被保护设施的特性: 电子设备。

根据装置的重要性（风险分析见第 4 章），安装符合 I 类试验的 SPD 是必要的。SPD 被安装在相线对地、中性线对地和相线对中性线之间。如果没有计算电流分布，这些 SPD 应依据 I 类试验进行测试，并且 SPD 的通流容量为 25 kA，因为它们必须释放冲击杆塔的大部分直击雷电流（见附录 D），架空线的另一侧可以使用相同通流容量的 SPD 来保护变压器。例如：靠近敏感性设备的 SPD 的电压保护水平应小于或等于 1.5 kV（可能需要较低值来覆盖冲击抗扰度），靠近变压器端的 SPD 的电压保护水平可以提高到 6 kV（基于绝缘配合的典型变压器绝缘耐受）。

也可以在变压器 MV 侧安装避雷器，IEC 60099-5 对此进行了说明，见图 G. 4。



图G.4 雷电防护系统示例

## G.4 风力发电机组

### G.4.1 概述

在风力发电系统中有三种类型的风力发电机组，包括双馈感应发电机组 (DFIG)，直驱发电机组和中速传动发电机组（半直驱发电机组）。目前，DFIG 在风电场中应用最为广泛。

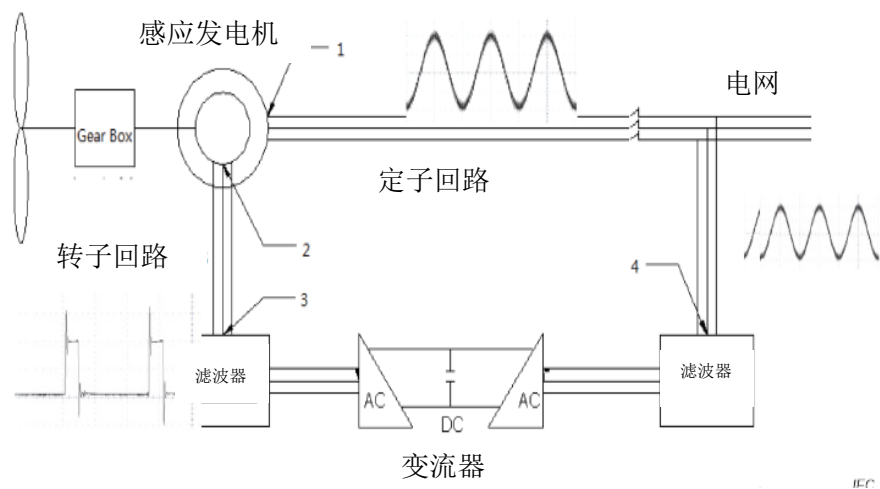
注：DFIG 也称为双馈发电机组。

使用高频开关的能量转换系统给 SPD 带来了一系列特殊的问题。DFIG 变流器电路就是一个示例。

### G.4.2 DFIG 变流器电路中的瞬态过电压

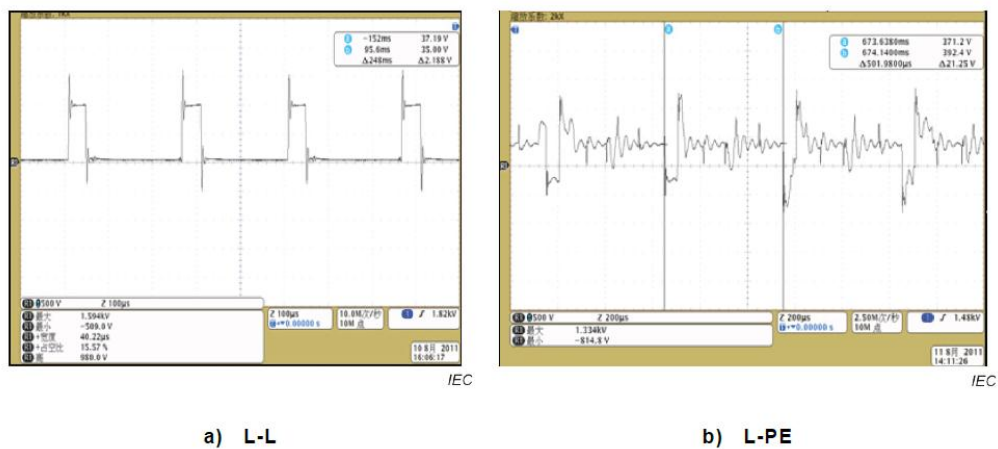
DFIG 由感应发电机、变流器和电网组成。图 G.5 显示了能量在发电机转子回路和电网之间传输。





图G.5 DFIG 风力发电机组的配置

IGBT 作为变流器的开关器件被广泛应用。超过 1MW 的变流器开关频率通常是几千赫兹。例如：一个 1.5 MW 变流器的开关频率为 2 kHz。转子回路上的直流电压通常高达 1 050 V。IGBT 调制会在输出 PWM 电压上产生高峰值和陡上升时间的重复瞬变，如图 G.6 所示。这种峰值和陡上升时间 ( $du/dt$ ) 可能会对发电机和变流器的绝缘以及安装在两者之间的 SPD 产生负面影响。



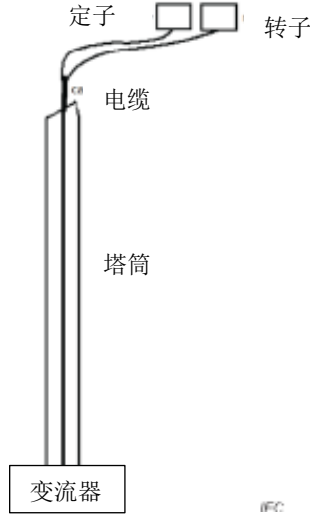
图G.6 -转子回路中发电机和变流器之间的 PWM 电压

- DFIG 的定子回路和转子回路具有不同的特点：
- 定子回路以与电网相同的交流频率直接连接电网。
  - 转子回路通过变流器与电网相连。它产生的 PWM 电压是由高峰值重复瞬态电压和  $du/dt$  的矩形波组成。

G.4.3 长电缆瞬态电压的传输效应

事实上，变流器通常与发电机分开安装，如图 G.7 所示。发电机通常安装在塔筒顶部的机舱内。变流器通常安装在塔筒的底部。发电机和变流器通过从机舱连接到塔筒底部的长电缆连接。

由于发电机和变流器安装距离较远，并且通过大约 100 m 的电缆连接，沿电缆传输的 PWM 波在发电机处引起反射。这会使发电机侧的 PWM 波和  $du/dt$  峰值高于变流器侧。根据 2011 年中国的一项调查，图 G.5 中点 2 和点 3 处的 PWM 电压和  $du/dt$  峰值见表 G.1。



图G.7 变流器和发电机位置

表G.1 基于 2011 年在中国调查的两个终端的 PWM 电压和  $du/dt$  峰值

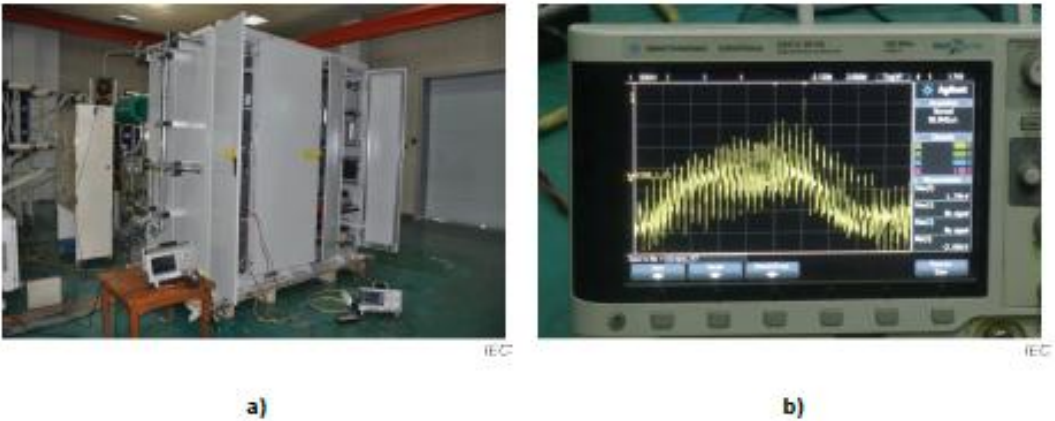
	$U$ 的峰值(L-L) (kV)	$du/dt$ 的峰值(L-L) (V/ $\mu$ s)	$U$ 的峰值(L-PE) (kV)
点 2	1.70	970	2.0
点 3	1.54	852	1.96

在表 G.1 中，发电机侧(点 2)的 PWM 相间电压峰值比变流器侧(点 3)的峰值高 10 %以上。 $du/dt$  高出约 14 %。这种差异是由于沿电缆的传输反射效应造成的。这样，发电机的绝缘以及安装在发电机侧的 SPD 将受到更大的应力。

#### G.4.4 风力发电系统中SPD与设备间的电压协调

在实验室对一台 2.5 MW 直驱机组变流器进行了试验。最初在发电机侧的 L-PE 之间安装了多个 MOV 为  $U_n=750$  V 和  $U_c=1\,450$  V 的 SPD。它们的内部脱离器在打开变流器后就会动作。然后观察变流器发电机侧的 L-PE 电压，观察到一些峰值高达 2 kV，如图 G.8 b)所示。从图 G.8 b)可以看到，SPD 的  $U_c$  远低于峰值。在这种情况下，SPD 会损坏，并且漏电流会引起 MOV 发热。这导致内部脱离器动作。安装一个额定  $U_c=1\,000$  V 的 SPD，该问题就可以解决。

注：由于存在泄漏电流，当 SPD 连接在 L 和 PE 之间时，也需要考虑 SPD 的电容。



图G.8 实验室测试的变流器及其 L-PE 电压波形

表 G.2 摘自 CLC/TR 50539-22，描述了类似情况

表G.2 交流发电机励磁电路和相关的 SPD 的特性示例

系统最大工作电压，L-L	750 Vrms (±10 %)，0…200 Hz
叠加在 L-Earth 电压上的重复瞬态过电压	1.7 kV
叠加在工作电压 L-L 上的重复瞬态过电压	2.95 kV
叠加在电压上的重复瞬态的 $du/dt$	1.4 kV/us
变流器开关频率	2 000 Hz
SPD 主要特性	
$U_c$	应选择能承受叠加在工作电压上的重复瞬变应力
工作频率	应根据变流器的开关频率来选择
$I_{imp}$ , (T1) 每个保护模式	1~5 kA
$I_{n1}$ , (T2) 每个保护模式	15 kA
短路电流 $I_{SCCR}$	<20 kA, 50-60 Hz
应遵守的标准	IEC 61643-11

类似的特性也适用于变流器。

表G.3 风力发电系统与低压配电系统比较

序号	因素	低压配电系统	DFIG 电气系统		评价
			定子电路	转子电路	
1	波形	正弦交流	正弦交流	PWM	
2	频率	50 Hz	50 Hz	开关频率: ≤3 kHz 基本频率: ≤20 Hz	
3	接地系统	TN, TT, IT	IT	IT	
4	电力系统	单相系统, 三相系统	三相系统	三相系统	
5	短路电流	根据配电变压器容	根据发电机和升压	待定	

		量	变压器的容量		
6	TOV	TT 和 IT 系统中高(中)压系统故障引起的 TOV	—	—	升压变压器与风力发电机等电位连接
		TN、TT 或 IT 系统的低电压故障或干扰引起的 TOV	—	—	
7	电压峰值	$\sqrt{2}U_k(U_k=230/400)$	$\sqrt{2}U_k(U_k=230/690)$	方波, 上升陡峭度 $\leq 1.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 峰值 $\leq 1.7 \text{ kV}$ (L-PE) 峰值 $\leq 2.95 \text{ kV}$ (L-L)	根据 CLC/TR 50539 -22

G.4.5 CLC/TR 50539-22中描述情况的可能解决方案

基本上存在两种解决方案:

一种是使用更高  $U_c$  的 SPD。

MOV 的  $U_k$  应大于或至少等于瞬态峰值。通常,  $U_k/U_c \approx 1.6$ 。由此可以推断:

为了经受高达  $1.7 \text{ kV}$  的瞬态, L-PE 之间 SPD 的  $U_c$  应不小于  $1.06 \text{ kV}$ 。因此, SPD 的  $U_b$  通常会达到  $4 \text{ kV}$ 。

为了经受高达  $2.95 \text{ kV}$  的瞬态, L-L 之间 SPD 的  $U_c$  应不小于  $1.85 \text{ kV}$ 。因此, SPD 的  $U_b$  通常达到  $6 \text{ kV}$ 。

由于引线和外部脱离器处的压降, 变流器和发电机绝缘层上的电压应力将非常严重。为了实现成功的绝缘协调, 应考虑或试验验证。

另一种是使用能够承受这种压力的专门设计的 SPD。

注: 有些情况下, 这样的解决方案可以延伸到其他情况

## 附录 H (资料性) 风险评估方法和应用示例

### H.1 概述

GB/T 21714.2 是一种确定建筑物和连接设施雷击风险的成熟方法。GB/T 16895.10 中描述了一种基于 GB/T 21714.2 的简化风险分析方法,该方法仅限于供电线路传导的电涌。具体如下。下面还提出了一个建议的方法,可以应用在其它领域。

### H.2 GB/T 16895.10 描述的低电压风险评估的简化方法

#### H.2.1 过电压控制

GB/T 21714 系列适用于下列过电压影响安装の場合:

- a) 具有爆炸危险的建筑物;
- b) 雷击造成的损害殃及周围建筑或者环境(如化学品泄漏或放射性辐射)的建筑物。在过电压引起的后果影响到以下方面时,应提供瞬态过电压保护;
- c) 生命关怀,例如安全服务,医疗护理设施;
- d) 公共服务和文化遗产。例如公共服务、IT 中心、博物馆的损失;
- e) 商业或工业活动,如酒店、银行、工业、商业市场、农场。

对于其它情况,应进行风险评估,以确定对瞬态过电压的保护是否有利。如果没有进行风险评估,则电气安装应提供对瞬态过电压的保护。然而,根据当地的电气要求,这种保护可能不需要用于单个住宅单元。

如果设备可能产生的操作过电压或干扰超过装置过电压类型规定的值,则应考虑操作过电压保护,例如 LV 发电机为装置供电或者安装电感、电容性负载(如电机、变压器、电容器组等),存储单元或大电流负载。

#### H.2.2 简化的风险评估方法

计算风险等级(CRL)用于确定是否需要雷电引起的瞬态过电压进行保护:

如果  $CRL \geq 1\,000$ , 则不需要对雷电引起的瞬态过电压进行保护。

如果  $CRL < 1\,000$ , 需要对雷电引起的瞬态过电压进行保护。

CRL 值根据表 H.1 计算。

表H.1 CRL 的计算

环境	CRL
农村和郊区环境	$(85 \times F) / (L_p \times N_g)$
市区环境	$(850 \times F) / (L_p \times N_g)$

其中:

——对于所有装置,系数 F 的值应取为 1。但是,国家委员会可能会将住宅的系数 F 值从 1 调整到

3。

—— $N_G$ ，是与供电线路和连接建筑物所在位置相关的雷击大地密度(每年每平方公里雷击大地的次数)

——风险评估计算长度  $L_d$  由下式计算：

$$L_d = 2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4 L_{PAH} + 0.2 L_{PCH}$$

式中(见图 H.1)

$L_{PAL}$ ：低压架空线路长度(km)；

$L_{PCL}$ ：低压地下电缆长度(km)；

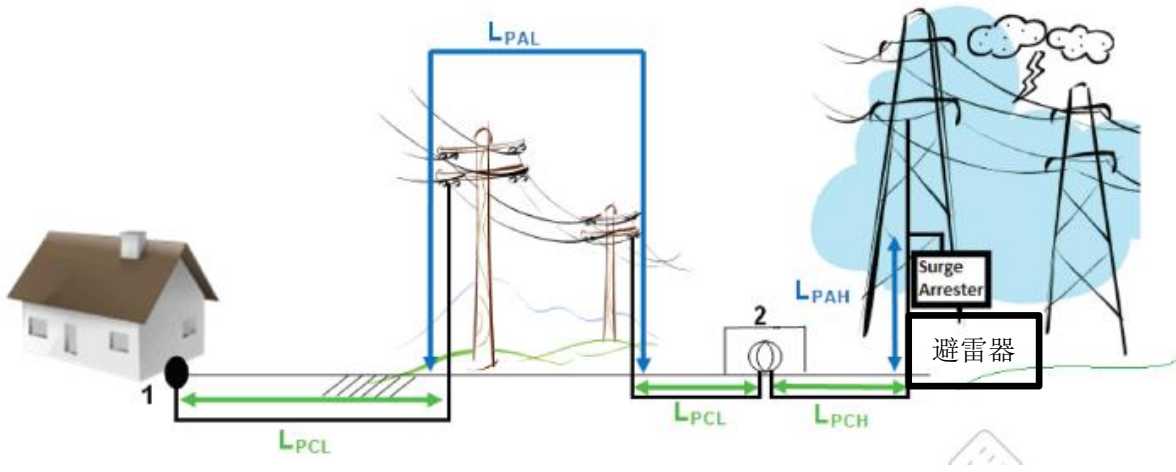
$L_{PAH}$ ：高压架空线路长度(km)；

$L_{PCH}$ ：高压地下电缆长度(km)。

$L_{PAL} + L_{PCL} + L_{PAH} + L_{PCH}$  的总长度限制不超过 1 km，或者为从电网中安装的第一个过电压保护装置(SPD 或避雷器)到设备入口的距离，以较小者为准。

如果配电网长度全部或部分未知，则  $L_{PAL}$  等于使配电网总长度为 1 km 的剩余距离。

例如，如果只知道地下电缆的距离(如 100 m)，则认为  $L_{PAL}$  的长度为 900 m。



标引序号说明：

1：安装起点

2：低压/高压变压器

图H.1 一供电线路各部分的示例

当由于雷电引起的低风险而不需要 SPD 时，可能仍然需要对操作电涌进行保护(见 5.2.3)，见上面的图 H.1。

H.2.3 范例1-农村环境下的建筑物

$$N_G=1, F=1$$

$$\begin{aligned} L_d &= 2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4 L_{PAH} + 0.2 L_{PCH} \\ &= (2 \times 0.4) + (0.4 \times 0.6) \\ &= 1.04 \end{aligned}$$

式中：

$L_{PAL}$ (低压架空线路长度)：0.4 km

$L_{PAH}$ (高压架空线路长度)：0.6 km

$L_{PCL}$ (低压地下电缆长度)：0 km

$L_{PCH}$  (高压地下电缆长度): 0 km

$$CRL=85 \times F / (L_p \times N_g) = 85 \times 1 / (1.04 \times 1) = 81.7$$

此情形下, 应安装电涌保护器。

## H. 2. 4 范例2-高压配电的农村环境下的建筑物

$$N_g=0.4, \quad F=1$$

$$L_p=2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4L_{PAH} + 0.2L_{PCH}$$

$$=0.2 \times 1$$

$$=0.2$$

$L_{PAL}$  (低压架空线路长度): 0 km

$L_{PAH}$  (高压架空线路长度): 0 km

$L_{PCL}$  (低压地下电缆长度): 0 km

$L_{PCH}$  (高压地下电缆长度): 1 km

$$CRL=85 \times F / (L_p \times N_g) = 85 \times 1 / (0.2 \times 0.4) = 1062.5$$

此情形下, 可不强制要求安装电涌保护器。

## H. 2. 5 范例3-市区环境下的建筑物

$$N_g=1, \quad F=1$$

$$L_p=2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4L_{PAH} + 0.2L_{PCH}$$

$$= (2 \times 0.4) + (0.4 \times 0.6)$$

$$=1.04$$

式中:

$L_{PAL}$  (低压架空线路长度): 0.4 km

$L_{PAH}$  (高压架空线路长度): 0.6 km

$L_{PCL}$  (低压地下电缆长度): 0 km

$L_{PCH}$  (高压地下电缆长度): 0 km

$$CRL=850 \times F / (L_p \times N_g) = 850 \times 1 / (1 \times 1.04) = 817$$

此情形下, 应安装电涌保护器。

## H. 2. 6 范例4-高压配电的市区环境下的建筑物

$$N_g=0.5, \quad F=1$$

$$L_p=2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4L_{PAH} + 0.2L_{PCH}$$

$$=1$$

式中:

$L_{PAL}$  (低压架空线路长度): 0 km

$L_{PAH}$  (高压架空线路长度): 0 km

$L_{PCL}$  (低压地下电缆长度): 1 km

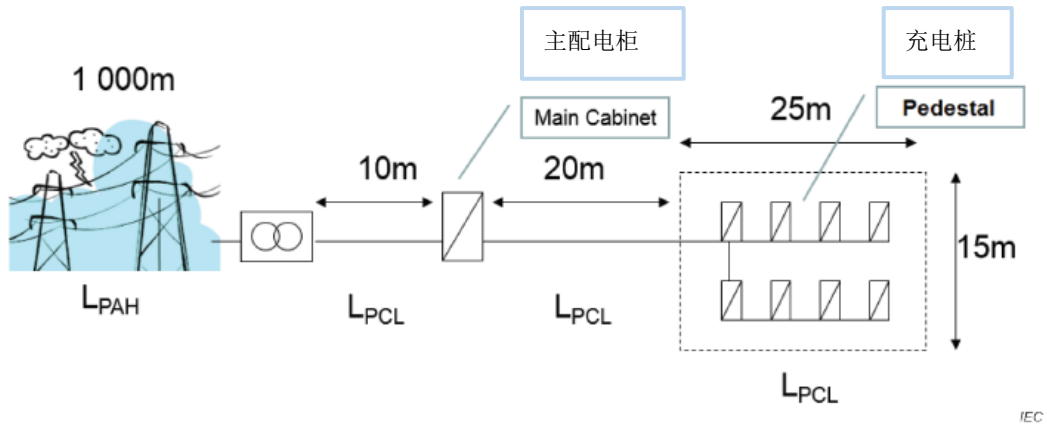
$L_{PCH}$  (高压地下电缆长度): 0 km

$$CRL=850 \times F / (L_p \times N_g) = 850 \times 1 / (1 \times 0.5) = 1700$$

此情形下, 可不强制要求安装电涌保护器。

## H. 2. 7 范例5-电动汽车供电设备

本案例为电动汽车供电设备（EVSE）由高压/低压变压器供电，见图 H. 2。高压线的长度超过 1 km，变压器高压侧无避雷器，低压侧无电涌保护器。主配电柜位于超市建筑物内，充电站位于停车场，在 25 m×15 m 停车场的专用区域设有多个充电桩，该区域位于郊区。 $N_g$  等于 1, F 也等于 1。



图H. 2 电动汽车供电设备示例

$N_g=1, F=1$

$$\begin{aligned} L_P &= 2 \times L_{PAL} + L_{PCL} + 0.4 L_{PAH} + 0.2 L_{PCH} \\ &= (2 \times 0.07) + (0.4 \times 0.93) \\ &= 0.512 \end{aligned}$$

式中：

$L_{PAL}$  (低压架空线路长度)：0.07 km (70 m=10 m+20 m +40 m，与最远的充电桩距离为 40 m)；

$L_{PAH}$  (高压架空线路长度)：0.93 km (这个长度实际由  $L_{PAL}+L_{PAH}=1$  km 决定)

$L_{PCL}$  (低压地下电缆长度)：0 km

$L_{PCH}$  (高压地下电缆长度)：0 km

$$CRL=85 \times F / (L_P \times N_g) = 85 \times 1 / (0.512 \times 1) = 166$$

此情形下，应在高压/低压变压器的低压侧或主配电柜安装电涌保护器。另外，由于配电柜和充电桩之间的线路会产生感应电涌，建议在充电桩位置额外安装 SPD。

H. 2. 8 范例6-化工设施

一条 500 m 长的高压架空线通过一条 100 m 的地下高压电缆向某化工设施配电站输送电力，见图 H. 3。配电站 (5 m×5 m, H=3 m) 向一座办公建筑 (10 m×10 m, H=6 m) 和一个化工设施 (100 m×20 m, H=6 m，加上烟囱 H=9 m) 供电。该地区为农村， $N_g$  等于 1, F 也等于 1。





标准中的最大值。火灾风险除化工单元较高外，其他所有建筑物可认为是平均的，化工单元设置自动灭火系统，其他建筑物仅提供人工灭火系统。

下表 H.3 为所列参数(根据 GB/T 21714.2 对  $R_B$  到  $R_Z$  的解释， $R_i$  是所有  $R_i$  中  $i$  从 B 至 Z 的和)：

表H.3 GB/T 21714.2 方法

	1	2	3
	配电站	化工单元	办公建筑
$R_B$	$1.72 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-4}$	$6.90 \times 10^{-6}$
$R_C$	$2.30 \times 10^{-6}$	$3.67 \times 10^{-5}$	$9.20 \times 10^{-6}$
$R_V$	$1.99 \times 10^{-7}$	$1.45 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-7}$
$R_U$	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.87 \times 10^{-4}$	$9.22 \times 10^{-6}$
$R_W$	$1.60 \times 10^{-4}$	$6.23 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-5}$
$R_Z$	$2.40 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-4}$
$R_i$	$2.68 \times 10^{-3}$	$2.20 \times 10^{-3}$	$3.38 \times 10^{-4}$
$N_g$	1	1	1
环境	农村	农村	农村
SPD	需要	需要	不需要

在这种特殊情况下，尽管基于不同的参数，完整法和简化法在经济价值损失风险方面是一致的。然而，对于人身和环境的风险或公众服务损失使用完整的方法可能会导致不同的结果，特别是可能会导致需要安装雷电防护系统，以及要求安装不同类型的 SPD 或增加 SPD。

### H.3 风险评估时应考虑的因素

#### H.3.1 环境

雷击概率和严重程度：

$N_g$ 是指年雷击大地密度, 数值为雷击大地次数/km<sup>2</sup>/年(见 5.2.2 和 I.1.1.1)：

- 直击建筑物雷电保护装置(LPS)或供电和通信线路；
- 电阻或电感的耦合。

风险评估需要考虑所有类型的直击和非直击雷引起的感应能量, 包括进入雷电保护装置、输入供电线路, 金属电话线、数据电缆、射频电缆、波导管, 以及进入非电力传输导体如水管等。假若光纤电缆无金属导体穿过保护区域, 则光纤电缆通常不受影响。

电源开关频率和危害程度：

靠近或与电源开关设备在同一个电路中的电子设备, 如电机控制器, 可能因为瞬态负荷变化而遭受损坏或劣化。另外, 由于电源设备的切换, 系统故障或负荷处的内部扰动都会产生暂时过电压。

与周围建筑的 LPS 的接触和耦合：

周围建筑或设施的 LPS 中的雷电流通过瞬态耦合的方式造成损害, 包括泄放雷电流时发生的地电位抬升。通常, 该能量分配通过用电设备线路进行的, 且并不受用户控制, 能量的泄放与局部接地系统的接地电阻的大小有关。

设施或建筑物的位置

- 地形；
- 相邻建筑和树的保护作用。

在小丘或高山旁边或者顶部的设施相比在山谷或自然暴露较低位置相同的设施更容易遭受雷电直击，类似地，安装在高通讯塔上的装置同样增加雷电直击风险，小型和低层设施更容易得到相邻较高的物体的保护，使其避免雷电直击，然而这种保护不能阻止能量通过电缆进入设施。

### H.3.2 设备和设施

设备耐冲击类型和抗扰度水平

制造厂可以对电气和电子设备设计不同的冲击电压耐受水平。耐受水平越低，风险就越大。除非制造厂另有建议，否则最好假定设备中没有受到任何专门的抗扰度防护措施。正确的保护设计是期望在电缆进入点最大限度的转移能量，同时最大限度的减少向设备的侵袭。

接地系统：

- 接地电阻和阻抗；
- 布局和邻近物；
- 连接到其它接地系统。

最重要的是通过等电位或 SPD 连接实现了联通，如采用独立接地系统应慎重考虑。

电力系统布局

- 架空的；
- 地下的；
- 两者都有。

虽然埋在地下的低压电力电缆比架空线路遭受直接雷击风险相对更低，但雷电直击地下电缆附近时也能引起较大的过电压，在高电阻率的土壤中尤为明显。无论是架空线路离现场有一定距离，还是中压电力公用电网采用架空安装，两种情况设计者都应考虑埋设电缆的长度。对于低压和中压供电线路，总长度和高度是一个相关的参数，较长较高的线遭受雷击的风险更大，并将雷电能量传入设施或建筑物中的风险也更大。

### H.3.3 经济和服务中断

服务劣化或服务中断：

服务中断和设施损坏会给企业经营增加难度，因此服务劣化是一个除直接财产损失之外的定性分析要素，如解决方案之一是返回到人工操作而不再大范围使用自动化和计算机化，但实际上是不可能的。

经营损失：

这包括设备、计算机、通讯和信息技术系统无效服务的实时费用及经营收入和/或商业生产力有关的损失。关键系统例如紧急服务装置，某个集中式的信息系统可以与经营损失有关的非常高的直接或间接的费用。

商业企业系统停工时，会损失直接收入，预期修复和恢复操作的时间将取决于工作人员、备用品、程序和信息的可用性。

设备或设施的修理或替换：

物理损坏的花费包括设备替换、直接/间接的重新安装费。设备部件的逐渐劣化可能是由于低幅值持续冲击引起，导致设备发生表面上的随机故障，这些事件可能不会立即或直接与故障时的雷击或开关事件相关联。由于这种累积效应，可能会增加日常或预防性维护的费用。

紧急服务：

当出现设备损坏或人员受到伤害时应采用紧急服务，例如消防车、救护车或警察等等，此时公司、个人或社会团体将遭受经济损失。火灾报警系统和紧急通信系统的损坏必定降低这种装置响应的效率，所以通常应急系统的保护措施要求较高防护等级。

### H.3.4 安全

设计者和安装者都应该以人的安全为本，每个国家都应意识到职业健康和安全制度的重要性。  
如果介质击穿导致对人的安全风险，应考虑使用 SPD。

#### H.3.5 保护的**成本**

- 装置的设计；
- 材料和设备；
- SPD 的安装。

保护的**成本**包括 SPD、工程设计和**管理**，以及电气安装。

## 附录 I

(资料性)

## 系统电应力

注：本附录是本部分第5章的引伸，与特定条款有关的信息，标识在下列[\*\*\*]中。

## I.1 雷电过电压和电流[5.2.2]

## I.1.1 影响SPD需求的配电系统方面的因素

## I.1.1.1 概述

IEC 60364-4-44: 2007 第 443 条中指出，根据风险分析，如果没有内部操作过电压引起的电涌风险，可以不安装 SPD(见第 H.1 条)。

该指南适用于一般情况下的装置，如果所考虑的装置的特定因素比较特殊，可能对于电涌保护有更大的需求，在 I.1.1 和 I.1.2 中考虑了其中一些因素。

应根据侵入电涌的可能性和保护与结果之间的经济平衡进行风险分析。

## I.1.1.2 雷击活动

决定雷击于装置时危险程度的最重要的数据是当地地闪密度  $N_g$ 。

地闪密度  $N_g$  是每年每平方公里的雷击次数。在世界上许多地区，这个值可以从遵循 IEC 62858: 2015 的闪电定位系统(LLS)提供的数据中得出。在没有地面闪电定位系统的地区，可以使用  $N_g$  地图。

在没有地面闪电定位系统或  $N_g$  地图的地区，请参阅 GB/T 21714.2。

## I.1.1.3 装置的外露

采用地下电缆供电时，电缆并不总能够保护设备，尤其是在直击雷或在其附近发生雷击时，这在 IEC 60364-4-44: 2007 第 443 条中并没有考虑，这就是为什么地下电缆供电不能单独用来决定是否需要 SPD 的原因。

## I.1.2 建筑物内部电涌电流的分配

见 IEC 62305-1 和 IEC 62305-4 了解更多信息。

注1：雷电冲击电流包括两个关键参数，第一个是快速上升沿时间，用于决定由于电感效应引起的电压值。第二个是长持续时间，主要与冲击能量有关。高频效应在后一阶段没有体现，因此可以用欧姆定律电阻来计算电流分布。

对于具有雷电防护装置的建筑物中的 SPD 安装，可利用接地电阻值(如建筑物及配电系统的接地、管道等)进行计算，来确定流过 SPD 的电流大小。

如果无法进行单独评估(例如通过计算)，则可以假设 50 %的总雷电电流( $I$ )通过给定建筑物的雷电防护装置的接地端入地，其余 50 %的电流( $I_s$ )分散在进入建筑物服务管线中，如外部的导电部件、电源和通信线等。每个设备中流过的电流值( $I_i$ )可以用  $I_i = I_s / n$  来估计，其中  $n$  为设备个数。

在非屏蔽电缆中，单根导体中的电流称为  $I_v$ ， $I_v$  的数值由电缆电流  $I_i$  除以导体数  $m$  来决定。 $I_v = I_i / m$

在电缆有屏蔽层的情况下，两端必须直接接地或经过 SPD 接地，在这种情况下，电缆中大部分的雷电电流通过屏蔽层接地(通常 50 %)，小部分雷电流进入内部导体，在所有情况下 SPD 应尽可能安装在屏蔽层的接点附近。

注2: SPD的 $I_{imp}$ 或 $I_{max}$ 的优选值对应于 $I_v$ 。

可以以类似的方式考虑架空线路遭受雷电直击的情况。

## 1.2 操作过电压[5.2.3]

更多关于操作过电压引起的电应力的资料见附录 C.3。

## 1.3 暂时过电压 $U_{TOV}$ [5.2.4]

低压系统故障时产生的暂时过电压,可以用两个因素  $k_1$  和  $k_2$  来定义:

—— $k_1$  是最大电压和系统标称电压之比,考虑电压水平的正常调节,其值通常为 1.05~1.1。

$$U_{CS}=k_1 \times U_0$$

—— $k_2$  是系统最大过电压和电力系统的  $U_{CS}$  之比。当三相低压系统故障时,非故障相电压可升至额定值的 1.25 倍到理论上的  $\sqrt{3}$  倍;

注1: 在单相, 三线(分相)系统,  $k_2$  可高至2;

总的暂时过电压可表示为:

$$U_{TOV(LV)}=k_1 \times k_2 \times U_0=k_2 \times U_{CS}$$

暂时过电压通常是由低压配电系统故障、电容器切换、电机启停等事故引起的。这些过电压持续时间很短。由三相电源系统故障引起的暂时过电压持续时间为 0.05 s 到 5 s, 中性点连接不良的单相电动机启动会在一段时间(通常长达 5 s)内导致过大的过电压。电容器切换和电压调节不应产生持续时间超过 5 s 的过电压。因此,暂时过电压持续时间为 0.05 s 到 5 s;

注2: 某些网络中,由于高压系统( $U_{TOV(HV)}$ )故障,需要考虑 $U_0+1\ 200\ V$ 的短时(低于5 s)暂时过电压(见IEC 60364-4-44),如果这种高电压值会导致SPD失效,应进行适当的试验以确保这一失效不会对人员、设备和设施造成任何危险。 $U_0+1\ 200\ V$ 的值是最大持续时间为5 s的暂时过电压的最大值,根据低压装置和高压系统中接地系统的不同类型,此值可能存在,也可能不存在(见附录E)。另外,在IEC 60364-4-44中定义了持续时间超过5 s的暂时过电压,由于持续时间较长,也可能导致故障。

本部分中,由低压系统故障产生的暂时过电压,用  $U_{TOV(LV)}$  表示。而在高压系统中,则用  $U_{TOV(HV)}$  表示。

根据上述公式,理论上可以绘一条电源系统中  $U_{TOV}$  和时间的变化曲线。但在实践中,尤其是在 SPD 的安装位置,并不总是清楚电源系统中  $U_{TOV}$  的实际值。在这种情况下,仅知道一些典型的点,很难绘制出上述曲线。

通常仅通过了解标准的最大值,将曲线简化为一些典型值,例如选择对 SPD 有特别参考意义的时间值为 200 ms 和 5 s。

$U_{TOV}$  最大标准值见图 14。

## 附录 J

### (资料性)

### SPD 的应用

注：本附录是本部分第7章的引伸，与特定条款有关的信息，标识在下列的[\*\*\*]中。

#### J.1 SPD 的安装和保护[7.1]

##### J.1.1 保护和安装的可能模式[7.3]

图 J.1 到 J.5 给出了多种接地的备选方案

注1：在SPD与PE接点和与共同接地点之间的连接线缆尽可能短的前提下，最佳的方式是同时使用这两种接地连接来保持装置上低电压保护水平和最小应力。

合理的 SPD 安装应遵循以下 5 个步骤。

注2：以下步骤主要适用于连接在相线或中性线与地线之间的SPD，其它的SPD可能需要遵循另外的规则。

- a) 确定放电电流路径；
- b) 确认在设备端上产生额外电压降的导线。（图 J.6a 和 J.6b）；

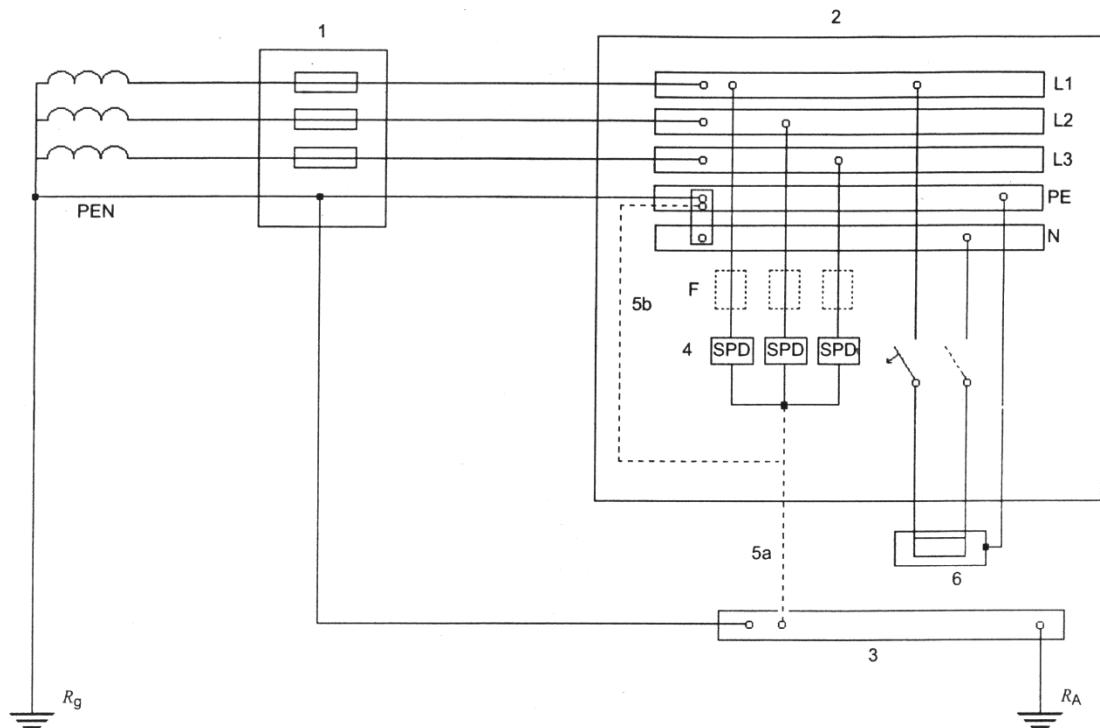
注3：图J.6中的 $U_{res}$ 是SPD根据I和II试验得到的残压或大多数情况下的限制电压；

- c) 合理安排每一设备导线的布线,从而避免不必要的感应回路,见图 J.6c、图 J.6d 和图 J.7。如果不能共用一个接地点,如图 J.6d 就需要安装两个 SPD；
- d) 建立设备和 SPD 之间的等电位连接；
- e) 依据协调配合的要求来选择 SPD。

应采取措施限制装置未保护部分和受保护部分的感应耦合。可通过分离干扰源和受扰电路、限制回路面积和选择回路角度来减少互感(见图 J.7),当载流导线是回路区域的一部分时,可以通过将该导线靠近电缆来降低感应电压(见图 J.7a)。

通常,最好是将受保护线与非保护线隔离开,同时,应采取措施避免电源和通信电缆之间的瞬态交叉耦合。(见图 J.7b)

图 J.7 是在考量 EMC 方面时的 SPD 安装示例。



标引序号说明:

1 建筑进线口;

2 配电盘;

3 总接地端子或母排;

4 电涌保护器;

5 SPD 的接地连接, 可为 5a 或 5b;

6 被保护设备;

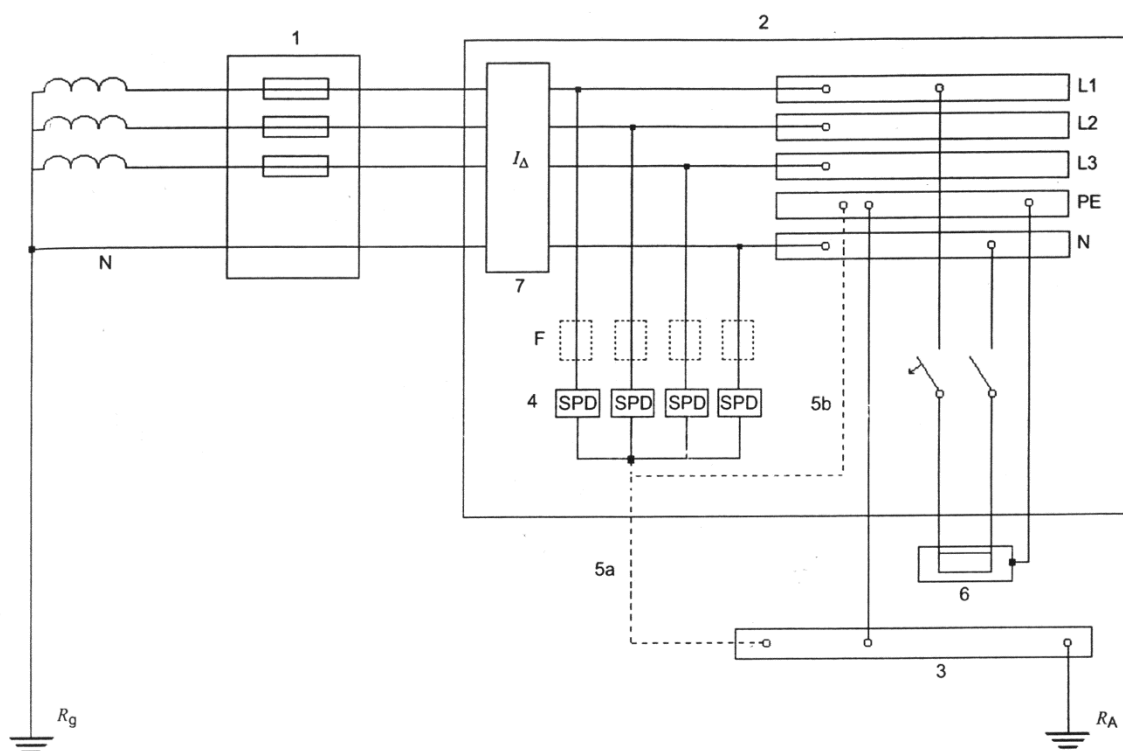
F SPD 制造商要求装设的后备保护器(例如:熔断器、断路器、RCD);

$R_A$  装置的接地极(接地电阻);

$R_g$  电源系统的接地极(接地电阻)。

图J.1 SPD 在 TN 系统中的安装





a) 连接类型 1 (CT1)

标引序号说明:

1 建筑进线口;

2 配电盘;

3 总接地端子或母排;

4 电涌保护器;

5 SPD 的接地连接, 可为 5a 或 5b;

6 被保护设备;

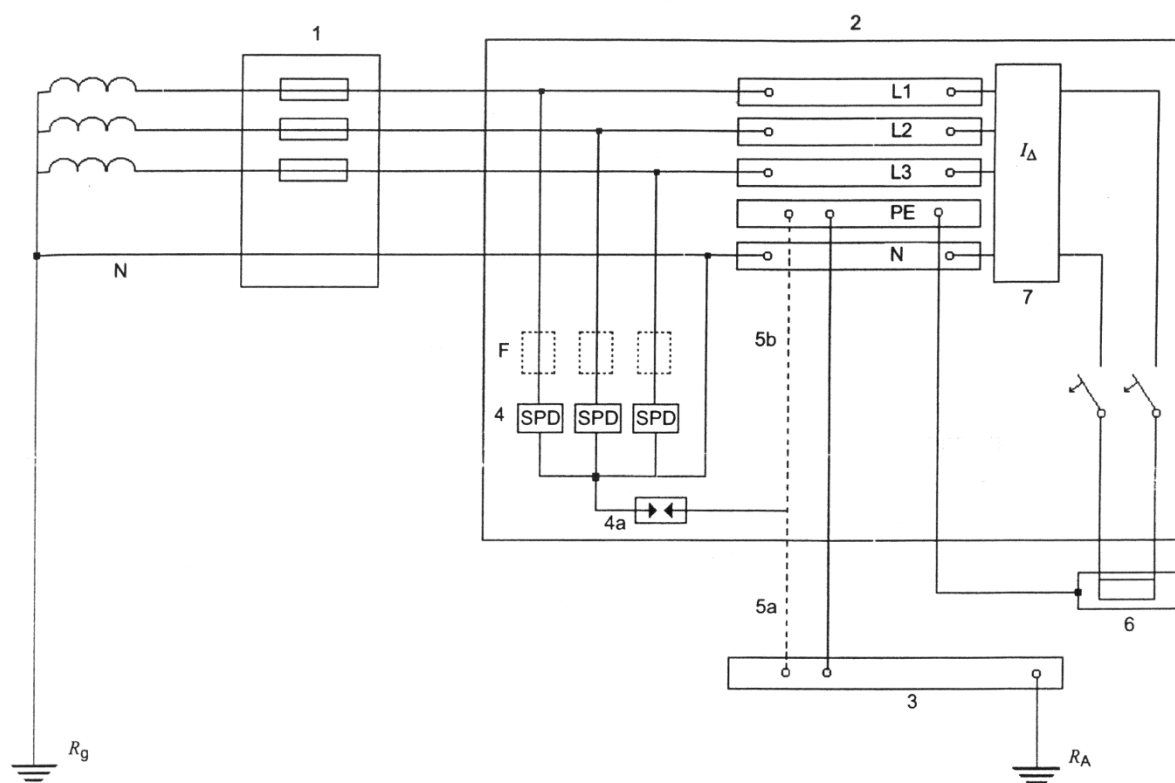
7 剩余电流动作保护器 (RCD);

F SPD 制造商要求装设的后备保护器 (例如: 熔断器、断路器、RCD);

$R_A$  装置的接地极 (接地电阻);

$R_g$  电源系统的接地极 (接地电阻)。





标引序号说明：

1 建筑进线口；

2 配电盘；

3 总接地端子或母排；

4 电涌保护器；

4a 依照 GB 16895.22-2004 所述的 SPD 或火花间隙；

5 SPD 的接地连接, 可为 5a 或 5b；

6 被保护设备；

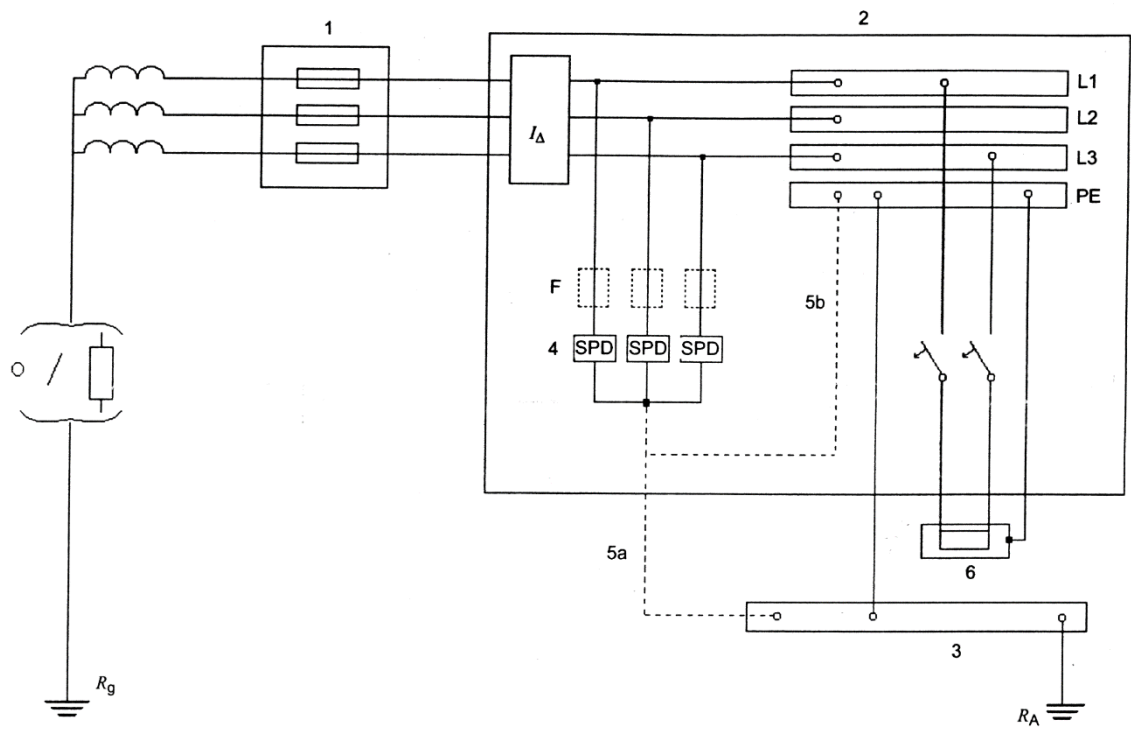
7 剩余电流动作保护器(RCD)；

F SPD 制造商要求装设的后备保护器(例如:熔断器、断路器、RCD)；

$R_A$  装置的接地极(接地电阻)；

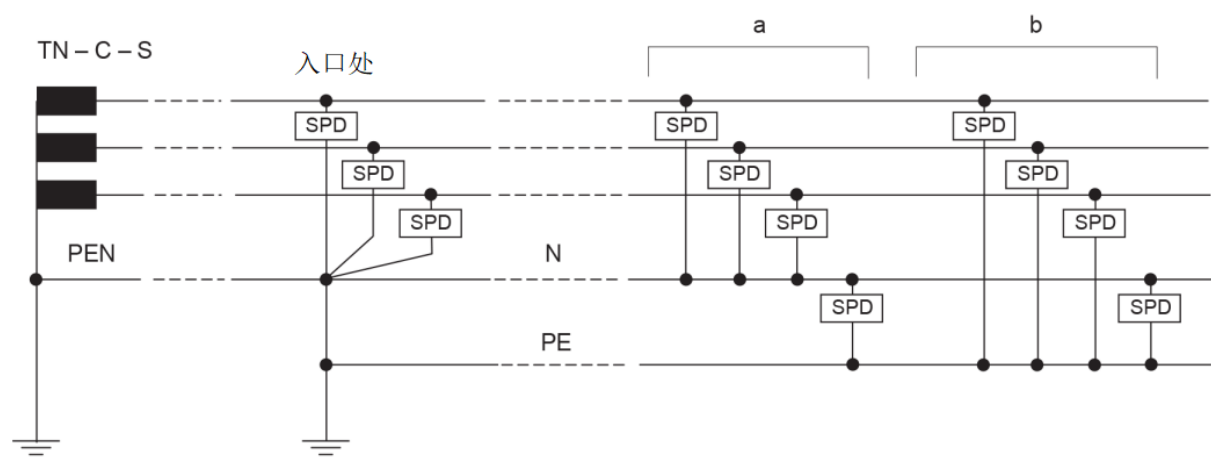
$R_g$  电源系统的接地极(接地电阻)。

图J.3 SPD 在 TT 系统中的安装(SPD 装在 RCD 的电源侧)



- 标引序号说明：
- 1 建筑进线口；
  - 2 配电盘；
  - 3 总接地端子或母排；
  - 4 电涌保护器；
  - 5 SPD 的接地连接, 可为 5a 或 5b；
  - 6 被保护设备；
  - 7 剩余电流动作保护器(RCD)；
  - F SPD 制造商要求装设的后备保护器(例如：熔断器、断路器、RCD)；
  - $R_g$  装置的接地极（接地电阻）；
  - $R_A$  电源系统的接地极（接地电阻）；
  - 0/ 开路或高阻抗。

图J. 4 SPD 在没有中性线的 IT 系统中的安装



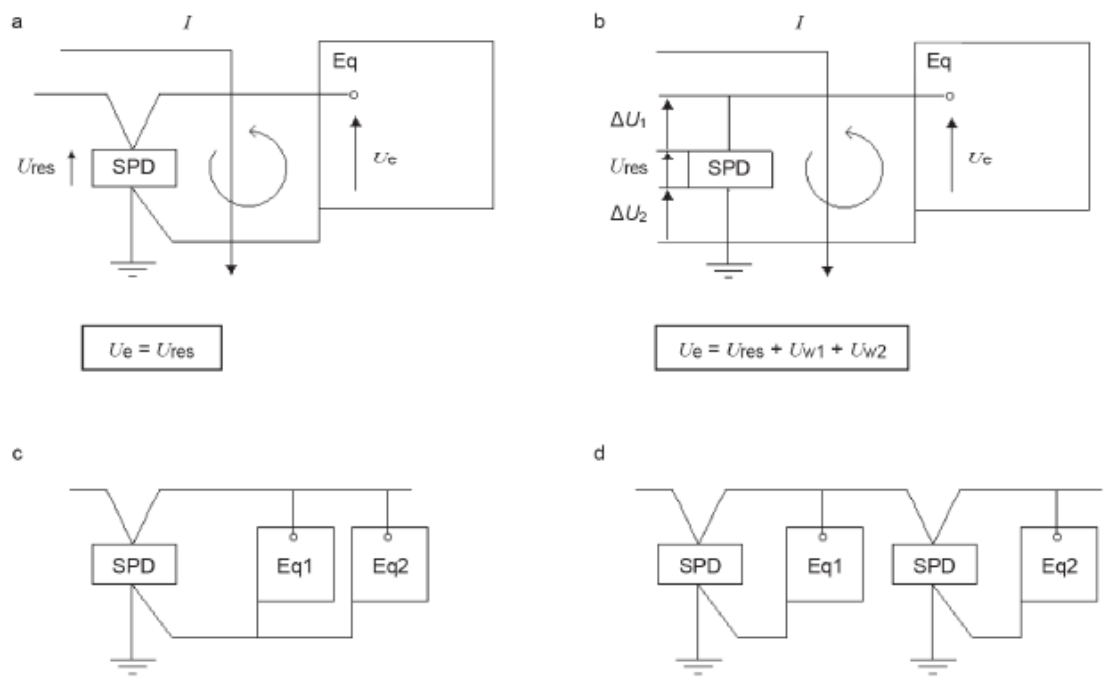
标引序号说明：

如果被保护设备与建筑入口处 SPD 之间的距离较大（见 7.4.1），可能需要安装额外的 SPD。

a 连接在 L-N 和 N-PE 之间的 SPD。

b 连接在 L-PE 和 N-PE 之间的 SPD

图J.5 在 TN C-S 系统中装置电源入口处 SPD 的典型安装模式



标引序号说明：

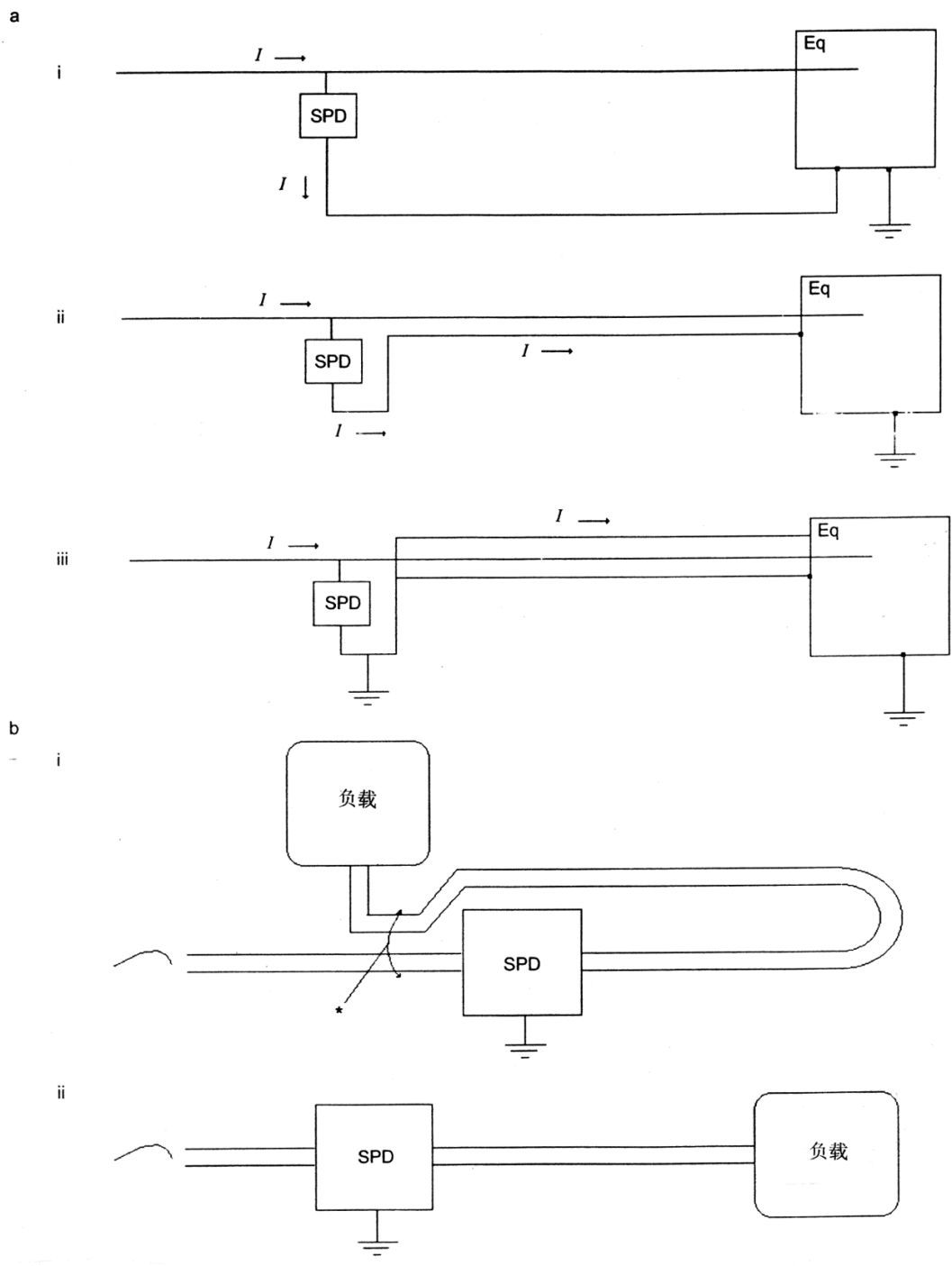
Eq 设备；

a. c. d 接线图是可接受的；

如果  $\Delta U_1$  和  $\Delta U_2$  电压足够低，则 b 接线图也是可以接受的。

注：流经 SPD 的电流  $I$  会产生磁场，施加在引至设备端子的导线形成的回路中，从而将会叠加感应电压到 SPD 残压上。这个复合电压将会出现在设备端子上。

图J.6 安装一端口 SPD 的通用方法



标引序号说明:

a 电磁耦合:

- i 不好的做法 -  $dI/dt$  在较大回路面积上会使  $d\phi/dt$  增高;
- ii 较好的做法 - 较小的回路面积,  $d\phi/dt$  较低;
- iii 最好的做法 - 电缆的屏蔽使屏蔽层内的  $d\phi/dt \approx 0$ ;

b 电感耦合:

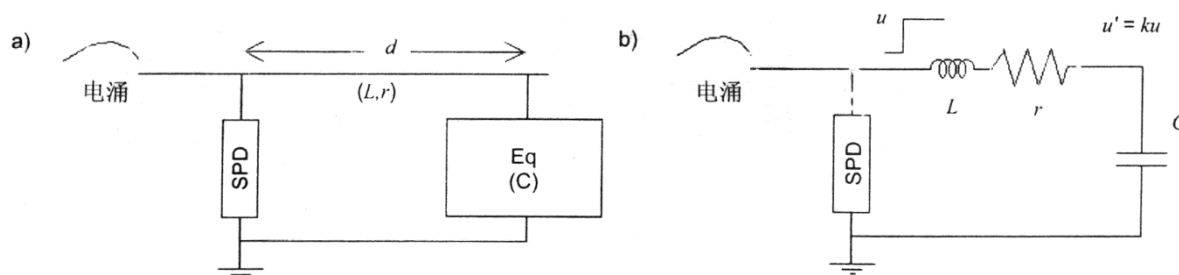
- i 不好的安装模式 - 感应耦合将发生在\*处;
- ii 好的安装模式 - SPD 的上、下游电缆良好隔离。

图J.7 考量 EMC 方面时 SPD 可接受的和不可接受的安装示例

## J.1.2 振荡现象对保护距离的影响[7.4.2]

通常, 仅在被保护设备附近安装 SPD 是不够的。由于 EMC 原因, SPD 最好安装在装置电源入口处(它可以较好的在入口处转移电流, 以避免由于电涌电流引起电磁干扰), 以保护装置(避免导体间闪络等)。若设备不在入口处安装的 SPD 的保护距离之内, 如有必要则应在设备附近安装另一个 SPD, 且需研究两个 SPD 之间的协调配合(见 7.5.7)。

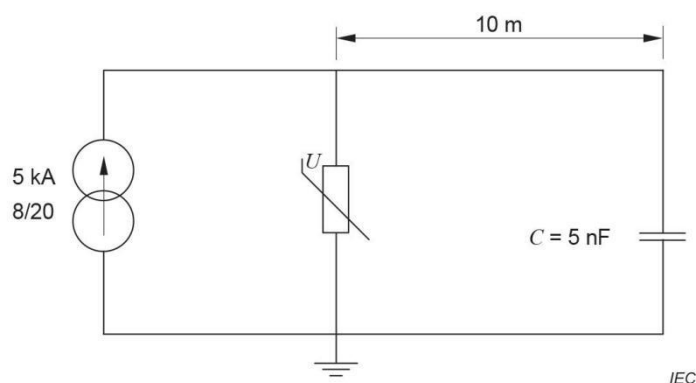
由电涌冲击引起的振荡或行波可能会导致被保护设备上的电压高于预期电压, 因此需要安装额外的 SPD。图 J.8 给出了这种系统物理学和电气学的表述示例。



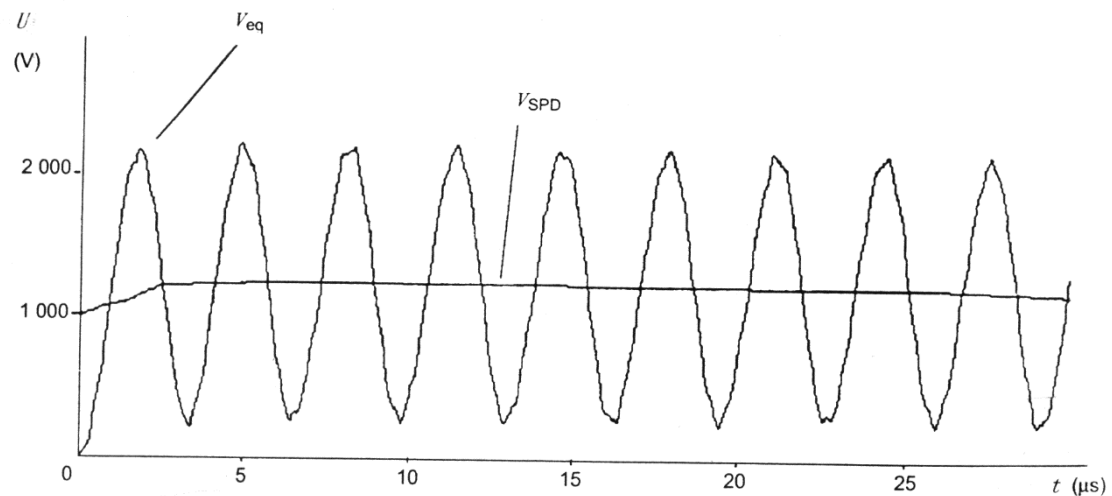
图J.8 SPD 与被保护设备的物理和电气等效图

设备上出现的电压取决于电涌的频率和导线的长度。根据  $r$  的值,  $L$  和  $C$  之间的振荡可以将设备端电压从  $u'$  提升到  $ku$ 。  $k$  值取决于许多参数, 当设备呈现为高阻抗负载时, 则  $k$  实际上小于 2。

图 J.9 中给出的电路对应于运用一个 5 kA 8/20 的冲击电流施加在金属氧化物压敏电阻 (MOV) 型 SPD 上, 该 SPD 与一个负载电容为 5 nF 的设备间的保护距离为 10 m。对这个电路进行模拟, 产生的响应见图 J.10。它表明了受保护设备两端的电压如何达到 SPD 两端电压的两倍。



图J.9 金属氧化物压敏电阻 (MOV) 型 SPD 和被保护设备之间可能的振荡

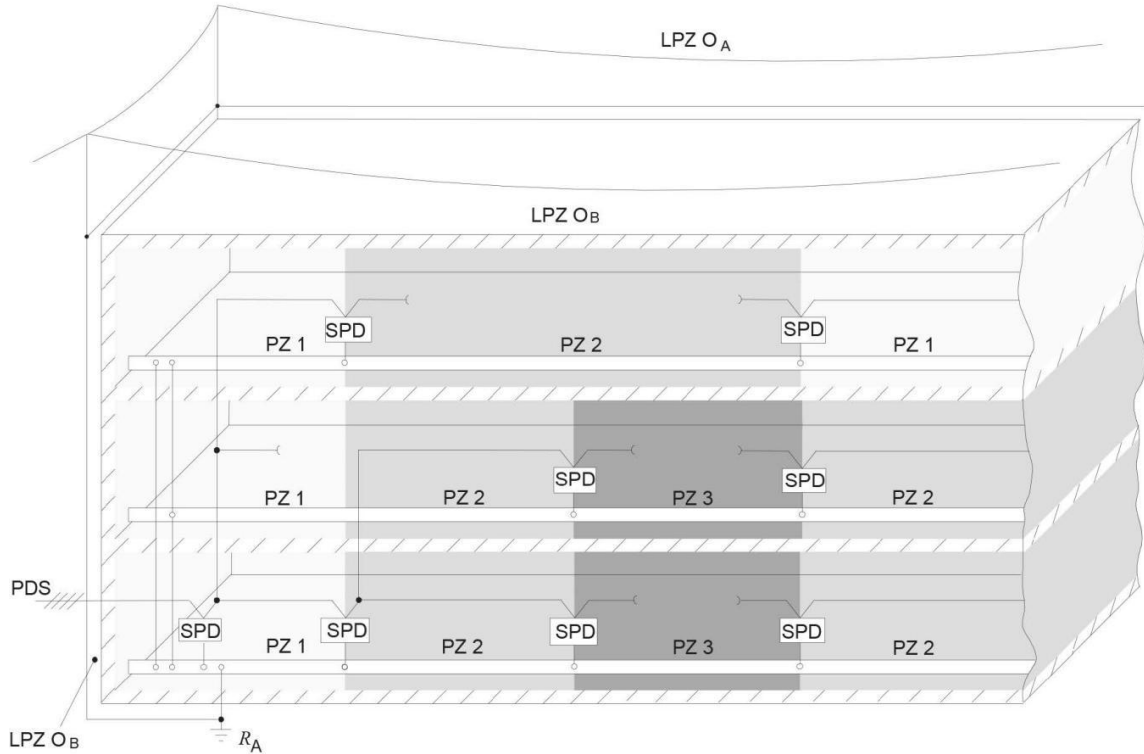


标引序号说明：  
 $V_{SPD}$ ：SPD 两端电压；  
 $V_{eq}$ ：设备两端电压。

图J.10 两倍电压的示例

J.1.3 雷电防护区概念[7.1.4.6]

根据 GB/T 21714.4 直击雷防护要求，图 J.11 展示了一个建筑配电系统雷电防护区划分和电涌保护器配置的示例。



标引序号说明：  
LPZ：雷电防护区  
PZ：防护区；



PDS: 电源配电系统

SPD: 电涌保护器

图J.11 建筑物内部保护分区的细分

雷电防护区 (LPZ) 定义如下:

——雷电防护区  $0$  (LPZ  $0$ , GB/T 21714-4)

遭受直击雷的区域, 因此可能会承担全部雷电流。未衰减的电磁场出现在此区域;

——雷电防护区  $0$  (LPZ  $0$ , GB/T 21714-4)

不会遭受直击雷的区域, 但会出现未衰减的电磁场。传导未衰减的雷电流和操作电涌;

——雷电防护区 1 (LPZ 1)

遭受到部分直击雷的区域。与雷电防护区  $0$  或  $0$  相比, 传导的雷电流和/或操作电涌减小;

——雷电防护区 2 (LPZ 2)

与雷电防护区 1 相比, 残余雷电流和/或操作电涌减小;

——雷电防护区 3 (LPZ 3)

与雷电防护区 2 相比, 由振荡效应、磁场耦合引起的电涌和内部操作电涌减小。

通过在防护区分界面安装 SPD 来降低传导的威胁的参数。这些 SPD 之间的配合按 7.5.7 进行。这些 SPD 的性能参数应和安装点处传导的威胁的参数相匹配 (见 7.1 和 7.2)。

注: 如根据 GB/T 21714-4 应使用经 I 类试验的 SPD, 则应将其安装在 LPZ 1 和 LPZ  $0$  分界面处。

每根据 7.4 的规定安装一个 SPD, 都会创建一个新的雷电防护区。

## J.2 SPD 的选择

### J.2.1 $U_c$ 的选择 [7.2.2.1]

对大多数 SPD 来说, 当暂时过电压持续时间超过 5 s 时, 则应当视为永久性电压。因此,  $U_c$  的选择应根据正常条件和超过 5 s 的故障条件 (暂时过电压) 来确定。

#### a) 正常条件

##### 1) 相线和中性线之间

在相线和中性线之间 SPD 的  $U_c$  应大于等于  $U_{cs}$  (通常为  $1.10U_0$ , 即 10% 的电压调整率, 假如考虑 SPD 的老化和其它非正常状况, 再增加 5% 的系数, 则应取  $1.15U_0$ )。

##### 2) 相线和相线之间

相线间 SPD 的  $U_c$  应大于等于  $U_{cs}$  (即通常为  $1.10 \times U_0 \times \sqrt{3}$ )。

注1: 在某些情况下,  $U_c$  取决于电压调整限值 (例如在巨大建筑物中, 电压调整限制以计量表界定),  $U_{cs}$  会超过上述限值 10% (相应于  $10\% \times \sqrt{3}$ );

有时电压调整限值更小 (如 5%)。在这种情况下,  $U_c$  取较低的值就足够了 (例如:  $U_c$  可取高于  $1.05 U_0$  (相应于  $1.05 \times \sqrt{3} \times U_0$ ))。

##### 3) 相线或中性线与地之间

- 对于 TT 和 TN 系统, 位于相线和地或中性线和地之间 SPD 的  $U_c$  大于等于  $U_{cs}$  (通常为  $1.10 U_0$ );
- 对于 IT 系统, 见下述异常情况:

注2: 如果装置由一个二次侧带中间抽头的变压器来供电, 则  $U_c$  有两个值, 一个  $U_c$  为  $1.0U_{cs}$ , 另一个为  $(\sqrt{3})/2 \times U_{cs}$ 。

谐波的存在会使装置的工作电压峰值升高, 因此有必要提高在有谐波存在状况下的  $U_c$  取值, 使其

比没有谐波时的  $U_c$  值高。

b) 异常情况（故障条件）

有时，在选择位于相线和地之间 SPD 的  $U_c$  时，需要考虑到特定故障条件，这样可以避免系统发生故障时损坏过多的 SPD。对于 IT 系统，必须注意到此类故障情况。

TT 和 TN 系统在发生接地故障时，相线和地间的电压可能会超过  $U_{cs}$ 。这是由于高压系统或低压系统上的故障条件造成的，并取决于地电压最大值，详见 5.2.4.2。 $U_c$  的选择取决于此类故障条件下给出的实际电压值。不能通过设置一个很高的  $U_c$  来确保系统中的故障不会损坏 SPD，否则 SPD 的防护水平会很差。通常，与系统拓扑结构无关的合适值是  $U_c$  高于  $1.5 \times U_0$ 。

在 IT 系统接地故障条件下，相线和地之间的电压一般为  $\sqrt{3} \times U_0$ 。这种故障在低压系统中由于持续时间较长，可以被当做一个永久状况考虑这种状况下，强烈建议  $U_c$  高于相间电压。

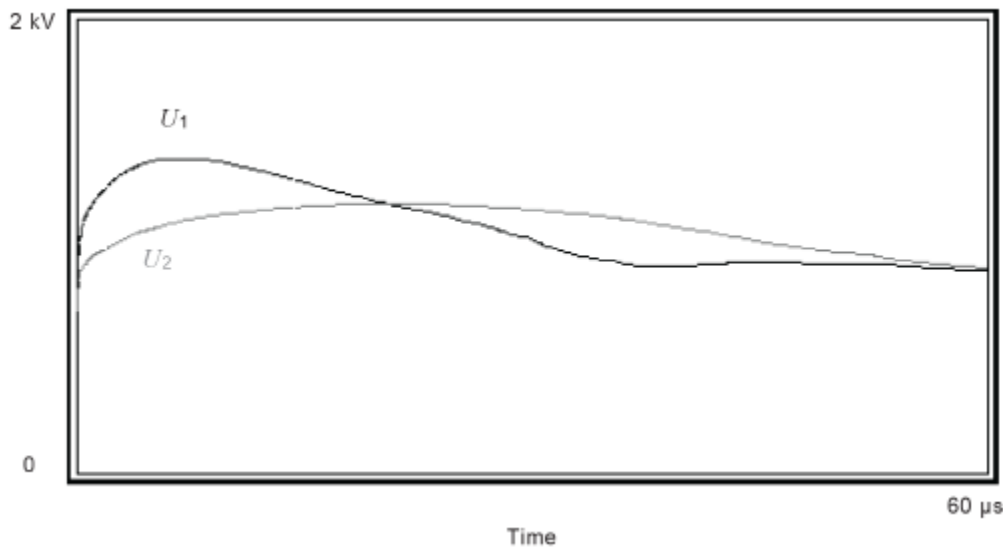
SPD 的  $U_c$  和电源系统标称电压之间的关系示例见附录 B。

J.2.2 配合问题[7.3.7.2]

为了较好的解释这个问题，图 J.12 提供了一个通过电感隔离实现两个金属氧化物压敏电阻（MOV）能量协调的典型示例。其中，SPD2 具有较低的  $U_c$  和  $I_n$  值。由于电涌波前放电的电感效应，大部分电涌电流流经 SPD1，且流经 SPD2 的电流将随着电感给定的时间常数和 SPD2 特性逐渐增加。这样，随着时间的推移，越来越多的电流将流经 SPD2。

图 J.12 中展示了总放电电流、流经 SPD1 和 SPD2 的电流，以及该过程中 SPD1 和 SPD2 两端的电压。

- 在这个应用指南中最大能量耐受  $E_{max}$  是指 SPD 能够承受而不劣化的最大能量。可从试验结果（I 类试验  $I_{imp}$  或 II 类试验  $I_n$  的动作负载实验中测得的能量）中获得，或根据制造商资料如  $I_n$ （II 类试验）或  $I_{imp}$ （I 类试验）或  $U_{max}$  计算得出。

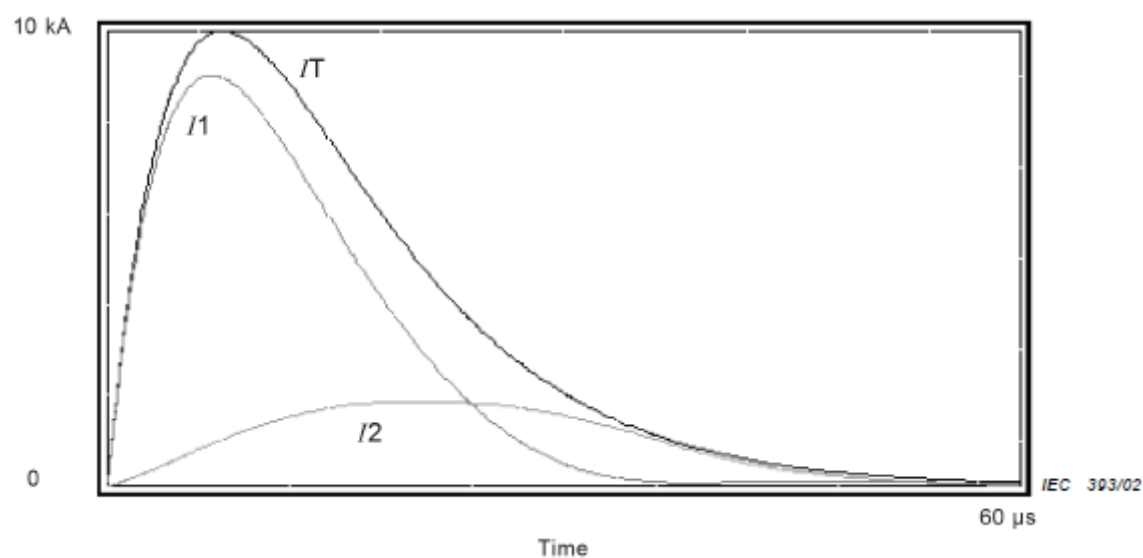


标引序号说明：

$U_1$  SPD1 两端残压

$U_2$  SPD2 两端残压

(a) 压敏电阻的残压



标引序号说明:

- $I_T$  总放电电流
- $I_1$  流经 SPD1 的电流
- $I_2$  流经 SPD2 的电流

(b) 两个压敏电阻间的电流分配

图J.12 两个金属氧化物压敏电阻的配合

两个 SPD 之间长度为  $d$  的导线, 其相对应的阻抗  $Z$  可以当作一个解耦元件。

- 对于限压型 SPD, 该解耦电阻通常仅对短波电涌 (如 8/20) 有效。这种由于线路形成的解耦电阻对长波电涌 (如 10/350) 解耦几乎没有影响, 可能需要额外的解耦元件来实现协调配合;
- 如果前级 SPD 是开关型, 则必须考虑下列两种特性;
  - 可能存在一个盲点, 当在该处施加的电流低于  $I_{imp}$ , 由于间隙端子间电压很低, 以至于间隙不放电, 因此它就不能保护第二级 SPD。间隙在电涌的波前阶段放电是协调配合的关键;
  - 对长波前时间的波形, 解耦元件所起作用不如在 8/20 或 10/350 波形下有效, 目前 IEC 正在研究长波前时间情况。

通常有必要处理两种电涌的配合问题:

- 长波电涌的配合 (例如对 I 类试验);
- 短波电涌的配合 (例如对 II 类试验)。

注: 需要强调的是, 两个配合的 SPD 最大能量耐受值应至少等于两个 SPD 较低的能量耐受值。当一个新 SPD (SPD2) 连接到一个已有 SPD (SPD1) 的系统时, 必须保障两者正确配合。

J.2.3 应用情况 [7.5.7.3]

在实际安装中, 整体的配合总是比上述简单示例更复杂, 事实上:

- 导线长度或像隔离开关这样的附加器件的存在可能会在方案中增加电感。多个 SPD 之间的分流也需要进一步研究实际安装方案需求;
- SPD 中元件特性的差异可导致在特定电流下实际的残压值不确定。另外, 通常制造商提供的电压保护水平  $U_p$  值, 是一个考虑裕度的值, 实际电压可比声明值低约 25 %;
- 对长波和短波, SPD 的能量耐受  $E_{max}$  可能不同。通常, 这个值仅由一类试验测试给出 (I 级长

波，Ⅱ级短波）。当没有明确给出能量耐受时，则需要计算。

### J.3 受 LPS 保护的建筑物中Ⅰ类 SPD 的 $I_{imp}$ 的简单计算

如果在装有电气装置的建筑物上安装了 LPS，则需要参考 IEC 62305 系列中给出的规则，根据雷电流分流来计算位于入口处 SPD 承受的  $I_{imp}$ 。

根据 IEC 62305 系列的规定，一旦建筑物装有 LPS，就需要在建筑物入口处安装 SPD 实现等电位连接。该 SPD 需通过Ⅰ类试验测试，主要由耐受波形为 10/350 的冲击电流  $I_{imp}$  值决定。

根据 LPS 的雷电防护等级 (LPL)，从Ⅰ级到Ⅳ级，在仅安装一条电源线路，且所有其他线路和管路不存在或被忽略(最理想的情况)的简单情况下，可通过以下公式计算电流值。

上述方法实际上假设了只有一条管线设施进入该建筑物。一般情况下，可能会有更多的管线设施(如金属管道)将部分雷电流从建筑物中分流，这将导致  $I_{imp}$  的值减小。在下表中， $I_{imp}$  的值是最大值。有关雷电流分流的更多信息，请参阅 GB/T 21714.1。

在这种情况下，将 LPS 的 LPL 对应的最大放电电流平均除以线路中的导线数，再除以 2(假设 50% 的电流通过接地系统泄放)。

因此，SPD 在每种保护模式下应能承受的冲击电流  $I_{imp}$  可以用以下公式计算出来：

$$I_{imp} = \text{LPL 对应的最大电流} / (2n)$$

当 CT1 和 CT2 连接方式均可用时，可参考下面表格列出的在 CT1 和 CT2 不同连接方式下的  $I_{imp}$  值。如果是旧的设备或在电气承包商不知道设备细节的情况下，则应根据可能的最坏情况 (LPLⅠ级)。

表 J.1 适用于最常见的低压电源系统。这些值直接取决于低压电源系统的配置，然而在某些国家配置可能非常独特。表 J.2 给出了日本其他常用低压电源系统的示例，连接方式如表 J.4 所示。

表J.1  $I_{imp}$  值的计算

			低压电源系统（单相和三相系统）									
LPL	LPL 对 应 的 最 大 电 流	导 体 数 量	TT			TN-C	TN-S			IT 无 中 性 线	IT 带中性线	
			连接类型				连接类型			连接类型		
			CT1	CT2			CT1	CT2		CT1	CT2	
			L-PE N-PE	L-N	N-PE	L-PEN	L-PE N-PE	L-N	N-PE	L-PE	L-N	N-PE
I 或 未知 <sup>a</sup>	200 kA		$I_{\text{imp}}$ [kA]									
		5	NA	NA	NA	NA	20	20	80	NA	NA	NA
		4	25	25	100	25	NA	NA	NA	NA	25	100
		3	NA	NA	NA	NA	33.3	33.3	66.7	33.3	NA	NA
		2	50	50	100	50	NA	NA	NA	NA	50	100
II	150 kA		$I_{\text{imp}}$ [kA]									
		5	NA	NA	NA	NA	20	20	80	NA	NA	NA
		4	18.8	18.8	75.0	18.8	NA	NA	NA	NA	18.8	75
		3	NA	NA	NA	NA	25	25	50	25	NA	NA
		2	37.5	37.5	75	37.5	NA	NA	NA	NA	37.5	75
III 或 IV	100 kA		$I_{\text{imp}}$ [kA]									
		5	NA	NA	NA	NA	10	10	40	NA	NA	NA
		4	12.5	12.5	50	12.5	NA	NA	NA	NA	12.5	50
		3	NA	NA	NA	NA	16.7	16.7	33.3	16.7	NA	NA
		2	25	25	50	25	NA	NA	NA	NA	25	50

<sup>a</sup> 当 LPL 未知时，应假定最坏的情况。

说明：

LPL 雷电防护等级（风险等级）

n 电网导体的数量。对于 TN 系统(TN-C 和 TN-S)，n 还包括 PE(PEN) 导体，其流经的电流与带电导体相同。

n=5 对应三相+N 系统（例如 TN-S 系统）

n=4 对应三相+N 系统（例如 TT、TN-C 和 IT 系统）

n=3 对应单相+N 系统（例如 TN-S）或无中性线的三相 IT 系统

n=2 对应单相+N 系统（例如 TT、TN-C 和 IT 系统）

CT1、CT2 符合 IEC 61643-12 的 SPD 的连接方式(根据 IEC 60364-5-534, CT1 对应于连接类型 A 和 B，而 CT2 对应于连接类型 C)

对于 CT2 模式下由 SPD 保护的 IT 系统，连接在中性线和 PE 导线之间的 SPD 的额定断开续流值应与连接在相线和中性线之间的 SPD 相同。该值应大于等于安装点相线至中性线的预期短路电流(IEC 60364-5-534)

表J.2 日本其他常用低压电源系统的  $I_{imp}$  值的计算

			低压 TT 系统		
LPL	LPL 对应的 最大电流	导体数量(n)	连接方式		
			CT1	CT2	
			L-PE N-PE (如果有中性线)	L-N	N-PE
I 或未知 <sup>a</sup>	200 kA		$I_{imp}$ [kA]		
		3(三相-星型中性点接地, 无 中性线)	33.3	NA	NA
		3(带中性线的单相-分相和 三相-Δ型角接地)	33.3	33.3	100
		2(无中性线的单相-分相)	50	–	–
II	150 kA		$I_{imp}$ [kA]		
		3(三相-星型中性点接地, 无 中性线)	25	NA	NA
		3(带中性线的单相-分相和 三相-Δ型角接地)	25	25	75
		2(无中性线的单相-分相)	37.5	–	–
III或IV	100 kA		$I_{imp}$ [kA]		
		3(三相-星型中性点接地, 无 中性线)	16.7	NA	NA
		3(带中性线的单相-分相和 三相-Δ型角接地)	16.7	16.7	50
		2(无中性线的单相-分相)	25	–	–

<sup>a</sup> 当 LPL 未知时，应假定最坏的情况。

说明：

LPL 雷电防护等级（风险等级）

n 电网导体的数量

n=3 对应无中性线的三相-星型(中性点接地) TT 系统


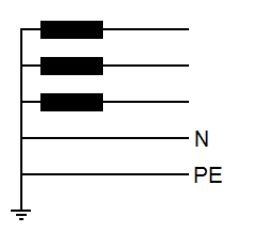
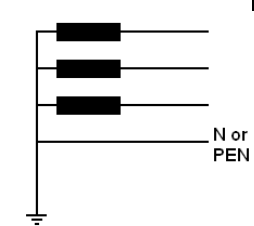
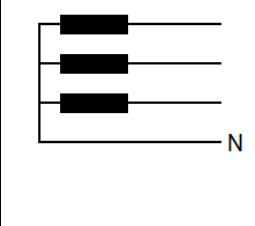
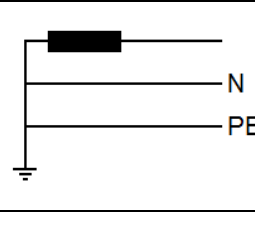
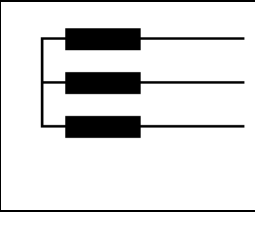
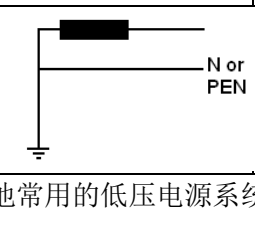
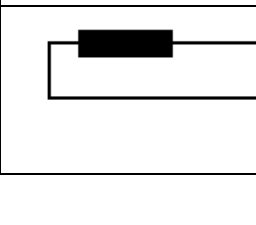
n=3 对应单相(两个导体)+N 系统（例如分相系统）或三角型（Δ型不对称接地）系统，其接地相线可以定义为中性线。

n=2 对应单相(两个导体)，例如无中性线的分相系统

CT1、CT2 符合 IEC 61643-12 的 SPD 的连接方式（根据 IEC 60364-5-534，CT1 对应于连接类型 A 和 B，而 CT2 对应于连接类型 C）。

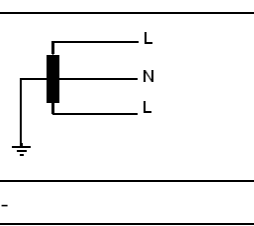
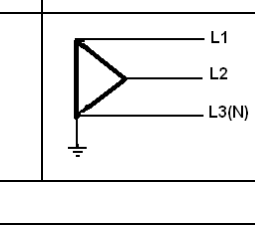
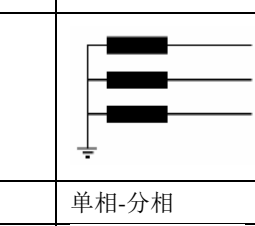
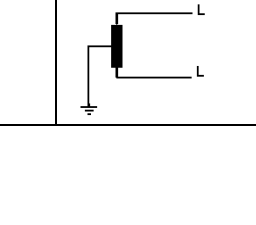
表 J.3 给出了低压电源系统的最常见的 TT、TN 和 IT 系统配置方式。

表J.3 常见低压电源系统的导体数量

导体数量(n)	TT 或 TN-C 系统	TN-S 系统	带中性线的 IT 系统	无中性线的 IT 系统
5	—	三相	—	—
				
4	三相	—	三相	—
				
3	—	单相	—	三相
				
2	单相	—	单相	
				

日本其他常用的低压电源系统。

表J.4 日本其他常用低压电源系统的导体数量

导体数量(n)	带中性线的其他 TT 系统		无中性线的 TT 系统
3	单相-分相	三相-Δ 型（角接地）	三相-星型（中性点接地）
			
2	—		单相-分相
			

附 录 K

(资料性)

抗扰度与额定冲击电压耐受能力

应该注意的是，尽管 IEC 60664-1 描述了如何获得 $U_w$ ，但在实践中可能很难获得装置中各类型设备的 $U_w$ 值。

技术委员会应以下列基本说明为基础来确定过电压类别：

——过电压类别Ⅳ的设备是使用在配电装置电源端的设备。

注1：此类设备包含如电能表和一次侧过电流保护设备。

——过电压类别Ⅲ的设备是固定式配电装置中的设备，对可靠性有较高的要求。

注2：此类设备包含如安装在固定式配电装置中的开关器件和永久连接至固定式配电装置的工业设备。

——过电压类别Ⅱ的设备是由固定式配电装置供电的用电设备。

注3：此类设备包含如器具、可移动式工具及其他家用和类似用途负载。

如果此类设备的在可靠性和适用性方面有特殊要求，则采用过电压类别Ⅲ。

注4：选择SPD的电压保护水平时，应使其不超过表K.1中给出的各过电压类别的额定冲击电压。

——过电压类别Ⅰ的设备是指连接至采取限制瞬态过电压措施实现合适的低电压水平的电路的设备。

这些措施应确保能够充分限制所产生的瞬态过电压，使其峰值不能超过表 K.1 中的相关额定冲击电压。

注5：此类设备是指具有达到此水平保护功能的电子电路的设备。

表K.1 典型额定冲击电压（源自 IEC60664-1）



交流相电压或线电压（采用相接地或角接地时）的额定值 <sup>6)</sup> （小于或等于）	目前世界上使用的额定电压 基于 IEC60038 <sup>4)</sup> 的电源系统额定电压					额定冲击电压 <sup>1)</sup> V			
	三相不接地 <sup>6)</sup> 或中性点接地系统（星形） 	三相相接地系统（角接地） 	三相相接地系统（高脚Δ形） 	单相两线接地或不接地系统 	单相三线接地系统（分相） 	过电压类别 <sup>5)</sup>			
V	V	V	V	V	V	I	II	III	IV
50	—	—	—	12.5; 24; 25; 30; 42; 48	30-60 <sup>7)</sup>	330	500	800	1 500
100	66/115	66	—	60	—	500	800	1 500	2 500
150	120/208 <sup>2)</sup> ; 127/220	115; 120; 127	—	100 <sup>3)</sup> ; 110; 120 <sup>2)</sup>	100-200 <sup>3) 7)</sup> ; 110-220 <sup>7)</sup> ; 120-240 <sup>2) 7)</sup>	800	1 500	2 500	4 000
300	220/380; 230/400; 240/415; 260/440; 277/480 <sup>2)</sup>	200 <sup>3)</sup> ; 220; 230; 240; 260; 277 <sup>2)</sup>	120/208 /240 <sup>10)</sup>	220	220-440 <sup>7)</sup>	1 500	2 500	4 000	6 000
600	347/600 <sup>2)</sup> ; 380/660; 400/690; 415/720; 480/830	347; 380; 400; 415; 440; 480; 500; 557; 600	240/415 /480 <sup>10)</sup>	480	480-960 <sup>7)</sup>	2 500	4 000	6 000	8 000
1 000	—	660; 690; 720; 830; 1 000	—	>601 ≤1 250 <sup>9)</sup>	>601 ≤2 500 <sup>8) 9)</sup>	4 000	6 000	8 000	12 000
1 500	—	—	—	>1 250 ≤1 500 <sup>9)</sup>	>1 250 ≤3 000 <sup>8) 9)</sup>	6 000	8 000	10 000	15 000

<sup>1)</sup> 具有此额定冲击耐受电压的设备可以用在符合 IEC60364-4-44 的装置。

<sup>2)</sup> 在美国和加拿大使用。

<sup>3)</sup> 在日本使用。

<sup>4)</sup> 该“/”符号表示三相四线制配电系统。较低的值是相电压，而较高的值是线电压。仅标出一个值时，它指三相三线系统，并特指线电压值。

<sup>5)</sup> 请参阅表格上方的文本以了解过电压类别。

<sup>6)</sup> 在三相 IT 系统中，该额定电压是相与星形连接的分布式中性点或非分布式中性点，或“Δ”系统中的虚拟中性点之间的电压：对于大多数系统，此电压等于线电压除以  $\sqrt{3}$ （请参阅 IEC 62477-1:2012）。

本栏中提供的电压仅适用于选择相应的过电压类别，不适用于除过电压类别以外的其他参数的绝缘设计（例如，对地或可接触表面的爬电距离，在三相 IT 系统的首次故障的条件下必须考虑线电压）。

<sup>7)</sup> 该“-”符号将线到中间点电压和相间电压分开。

<sup>8)</sup> 第一个值是线到中间点电压的最小值，第二个值是相间电压的最大值。

<sup>9)</sup> 由于在 IEC 60038 中没有定义超过 1000V 的额定系统电压，因此此处提供了电压范围。

<sup>10)</sup> 该“/”符号表示高脚  $\Delta$  形三相配电系统的电压。上面显示的电压是 L-N / HL-N / L-L 电压。

IEC 61000-4-5 说明了电子设备和系统对电涌电压和电流的抗扰度的试验。这些被试验的设备或系统被当作是一个黑盒子，试验结果由以下标准进行判定：

- a) 工作正常。
- b) 功能或性能暂时丧失或降低，不需要操作者干预。
- c) 功能或性能暂时丧失或降低，但需要操作者干预才能恢复。
- d) 设备有永久性损伤的功能丧失（意味着试验不合格）。

IEC 61000-4-5 的内容研究了相对较低的电涌电流对电子设备和系统可能产生的所有影响，包括对设备和系统永久性的损害和破坏。其他相关的测试标准，相对于功能暂时降低，更加关注的是设备的实际损坏或破坏程度。IEC 60664-1 针对低电源系统内设备的绝缘配合。它测量线对线和线对地，但在此试验期间不测量设备的输出特性。IEC 61643-11 则是针对连接到低压电源系统的电涌保护器的测试标准。并且，这两个标准都还考虑了暂态过电压对设备产生的影响。IEC 61000-4-5 和 IEC 61000 系列中的其他标准没有考虑暂态过电压对设备或系统的影响。

永久性的损坏是不能接受的，这将导致系统无法工作，产生维修或更换零件的费用。这类失效通常是因为电涌保护不够或者缺失造成的，使得高电压和过多的电涌电流进入设备内部电路，引起工作中断、元件故障、永久的绝缘击穿和火灾、冒烟或电击。设备或系统的功能丧失、性能下降等也是不希望看到的，尤其是关键性的设备或系统在电涌作用期间宜保持工作正常。

对于 IEC 61000-4-5 中说明的试验，施加电压的试验等级（安装类别）和由此产生的电涌电流的大小对设备的响应有直接影响。简而言之，电涌电压等级越高，性能丧失或降级的可能性就越大，除非在设计设备时采取了适当的电涌抑制措施。

为了测试用于低压电源系统中的电涌保护装置（SPD），IEC 61643-11 的试验等级 III，规定用一台有效输出阻抗  $2\ \Omega$  的复合波发生器，该发生器能够产生 8/20 短路电流波形和 1.2/50 开路电压波形。IEC 61000-4-5 使用相同的复合波发生器对通电设备和系统进行电涌抗扰度试验，只是耦合元件不同，有时还有附加的串联阻抗。此外，在 ITU-T 中采用 10/700 的较长测试波形用于设施内产生的瞬态电压测试。本标准的试验电压等级（安装类别）的含义与 IEC 61643-11 的开路电压的峰值  $U_{oc}$  相同。该电压值决定了发生器端子处的短路电流峰值的大小。由于试验方法不同，因此不能将试验结果进行比较。

设备或系统的电涌抗扰度可以通过内置电涌保护元件（SPC）或 SPD，或外置 SPD 来获得。选择 SPD 最重要的参数之一是 IEC 61643-11 中定义和说明的电压保护水平  $U_p$ ，它是指在规定条件下进行试验时，在 SPD 端子上预计达到的最大电压。该参数宜和 IEC 60664-1 规定的设备耐压  $U_w$  相配合。在本文件中  $U_p$  只是用来与设备耐压  $U_w$  配合。在可比的应力条件下，电压保护水平值应低于 IEC 61000-4-5 试验的设备抗扰度等级，但在目前并没有对此进行规定，主要原因是这两个标准之间的波形并不具有可比性。

通常，IEC 61000-4-5 的设备的电涌抗扰度等级低于 IEC 60664-1 规定的绝缘额定冲击耐压等级，然而，要注意 IEC 60364-4-44 中的暂时过电压对具有明显低保护水平的 SPD（或内置电涌保护器件）的影响。完全可以选择到满足以下条件的 SPD，它既能保护设备，防止设备失效，在电涌作用期间正常工作，又能承受大多数的暂时过电压。

表 K.2 给出了敏感性（抗扰度）等级。

除非另有说明，否则设备的敏感性等级（ $U_i$ ）设定为线间 1 kV 和线对地 2 kV。

表 K.2 抗扰度试验等级的选择（取决于安装情况）

安装类别	试验等级 (kV)											
	交流电源和直接连至电网的交流 I/O 耦合方式		交流电源和不直接连至电网的交流 I/O 耦合方式		直流电源和直接与其连接的直流 I/O 耦合方式		非对称工作的电路/线路 <sup>d, f</sup> 耦合方式		对称工作的电路/线路 <sup>d, f</sup> 耦合方式		屏蔽的 I/O 和通信线 <sup>f</sup> 耦合方式	
	线-线	线-地	线-线	线-地	线-线	线-地	线-线	线-地	线-线	所有线-地	线-线	线-地
0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1	NA	0.5	NA	NA	NA	NA	NA	0.5	NA	0.5	NA	NA
2	0.5	1.0	NA	NA	NA	NA	0.5	1.0	NA	1.0	NA	0.5
3	1.0	2.0	1.0 <sup>e</sup>	2.0 <sup>bc</sup>	1.0 <sup>e</sup>	2.0 <sup>bc</sup>	1.0 <sup>c</sup>	2.0 <sup>bc</sup>	NA	2.0 <sup>bc</sup>	NA	2.0 <sup>c</sup>
4	2.0	4.0 <sup>b</sup>	2.0 <sup>e</sup>	4.0 <sup>bc</sup>	2.0 <sup>e</sup>	4.0 <sup>bc</sup>	2.0 <sup>c</sup>	4.0 <sup>bc</sup>	NA	2.0 <sup>bc</sup>	NA	4.0 <sup>c</sup>
5	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	2.0	4.0 <sup>b</sup>	2.0	4.0 <sup>b</sup>	2.0	4.0 <sup>b</sup>	NA	4.0 <sup>b</sup>	NA	4.0 <sup>c</sup>
<sup>a</sup> 取决于当地电力系统的等级。 <sup>b</sup> 通常带一次保护进行测试。 <sup>c</sup> 如果电缆长度小于等于 10 m, 试验等级可以降低一级。 <sup>d</sup> 不建议对实际使用长度短于 10 m 的数据电缆进行试验。 <sup>e</sup> 如果规定的保护装置放在 EUT 的上游电路, 则试验等级应该与未安装保护装置时的保护等级一致。 <sup>f</sup> 高速通信线可以是非对称线、对称线、屏蔽的 I/O 和通信线。												

通用设备抗扰度等级的其他注意事项:

根据 IEC 61000-3-15 和 IEC 61000-2-14, 建议额定冲击电压比带电导体之间的额定电压高 5 倍, 以避免故障。

电涌抗扰度低于冲击耐受水平, 见表格 K.3。

表K.3 交流输入的抗扰度水平

设备额定电压	设备所需的电涌抗扰度 电压 kV	IEC61000-4-5 中的相关试验等级(示例)	
		电压	电流
120/240	0.6/1.2	0.5 kV (1 级)	0.25 kA
230/400	1.2/2.0	1.0 kV (2 级)	0.5 kA
277/480	1.4/2.4	2.0 kV (3 级)	1.0 kA
400/690	2.0/3.5	4.0 kV (4 级)	2.0 kA

对于敏感设备, 如计算机或高级处理单元, 可能需要额外的电涌抗扰度保护。该设备使用开关电源 (SMPS) 提供的低压直流电。虽然 SMPS 的输入电路具有较强的冲击耐压能力, 但其输出电压会因电涌而变化。因此, 在 SMPS 的输出直流电路上可能需要采用额外的保护方法, 如一个小的特定 ABD 或晶闸管。在进行抗扰度试验时, 应事先测量输出直流电压, 以选用适当的保护元件。

根据 IEC 61000-4-5 和 IEC 60050-161:1990、161-01-20, 抗扰度是指装置、设备或系统在电磁干扰的情况下不降低性能的能力。

如上所述, 可以根据其参数选择 SPD, 从而实现对设备的过电压保护。这可确保设备不受有源导体与接地体之间闪络(即绝缘配合)的影响。如 7.1.4.5 条款所述, 这是基于和设备的额定冲击耐受电压  $U_w$  相关的 SPD 电压保护水平  $U_p$  去选择 SPD。

注: 这些原则也在 IEC 62305-4、IEC 60664-1 和 IEC 60364 系列等标准中提到。

上述措施并不一定保证设备的完全抗扰度,因为 SPD 的选择不能简单地基于其参数与设备的抗扰度的匹配。例如,根据 IEC 61000-4-5 具有 2 kV 抗扰度的设备,即使在电压保护水平 $U_P$ 小于 2 kV 的 SPD 的保护下,也不一定能免受更高应力的损坏或故障的影响。

SPD 与设备在抗扰度方面的配合取决于多种参数,包括:

- SPD 的类型(开关型、限压型、复合型)和它的特性;
- 在设备内部的 SPC 类型和特性;
- 设备的过电流保护;
- 设备的电容和滤波元件;
- SPD 与设备之间互连导线的阻抗和电阻;
- 受到(电流,频率,波形等)的应力。

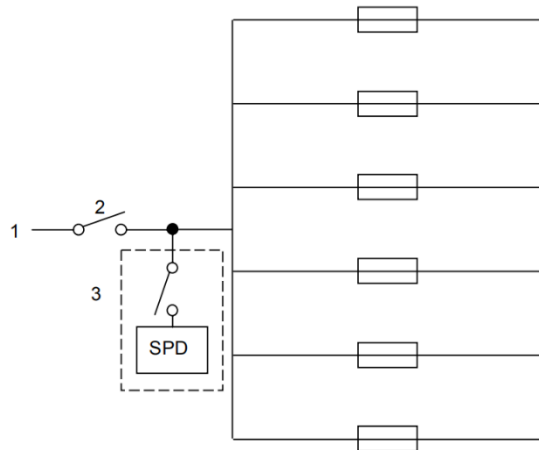
这些参数通常是未知的,或者未明确定义。这意味着,尽管 SPD 在许多情况下提供设备抗扰度(基于设备额定冲击耐受电压进行选择)方面的保护,但为了确保系统对 LEMP 的完全抗扰度,需要通过系统级别的测试或模拟进行额外评估,见附录 0。

## 附录 L

(资料性)

### 在一些地区中配电盘上安装 SPD 的示例

图 L.1~图 L.5 描述了一些国家配电盘上 SPD 的典型安装。正如本文件中已经讨论过的,重要的是要确保导线最短,并且 SPD 的短路耐受电流额定值要与配电盘位置的预期短路电流  $I_{SC}$  相适应。

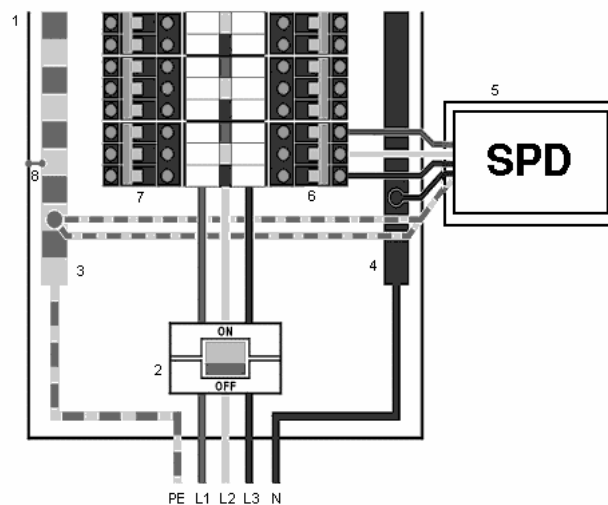


标引序号说明:

- 1 供电进线
- 2 主开关（在某些国家叫隔离开关）
- 3 SPD 及其脱离器（可能安装在 SPD 内部）

图L.1 SPD 通过单独隔离开关（可安装在 SPD 壳体内）连接至总开关负载侧的电路图

在 SPD 上使用这样的—个脱离器是很实用的,因为它允许在不断开主隔离开关的情况下断开单元电路,例如 SPD 需要断开以进行安装的介电强度试验(在一些国家称作高压绝缘测试)。



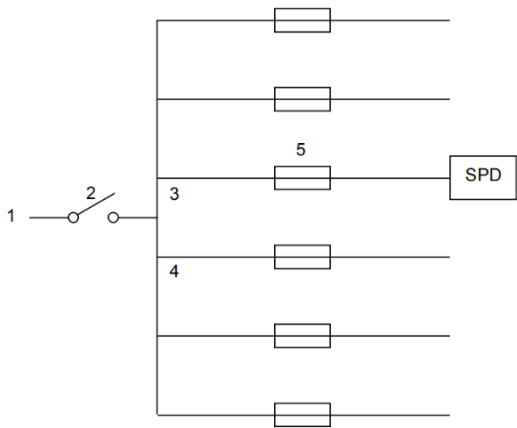
标引序号说明:

- 1 配电盘

- 2 主开关（主隔离开关或主断路器（MCB））
- 3 主接地端
- 4 中性点端子
- 5 SPD 壳体
- 6 下游第一个熔断器盒
- 7 可选的下游第一个熔断器盒
- 8 配电箱底座的交联。

图L. 2 SPD 与最近的可用 MCB 相连接后连接至输入电源(在英国常见的典型 TNS 装置)

MCB 还提供了一种方便的方法来熔断 SPD 并提供一种隔离方法。由于配电盘内部空间不足，SPD 安装在一个单独的外壳内以保证电气安全。该外壳直接安装在配电盘旁边，以确保连接引线尽可能短。附加的接地导线可以进一步减小导线上的电压降。

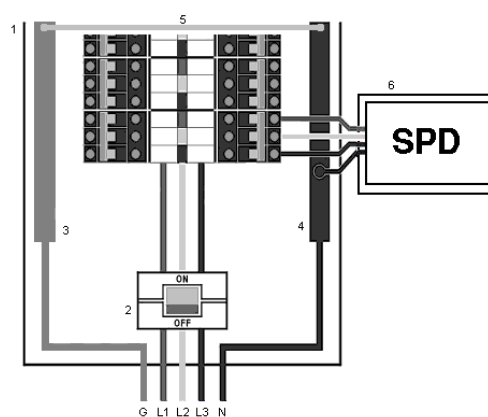


标引序号说明：

- 1 输入电源
- 2 主开关(主隔离或主断路器(MCB))
- 3 下游第一个熔断器盒
- 4 可选的下游熔断器盒
- 5 熔断器(或 MCB)

图L. 3 在单相电路中 SPD 通过熔断器（或 MCB）并联在配电盘的第一条外接电路上的接线图

使用合适的熔断器(或 MCB)可以方便地安装 SPD，并有良好的使用效果，因为它允许在不断开主开关的情况下断开单元电路，例如，在安装过程中的高压绝缘测试时需要断开 SPD 以不削弱 SPD 的冲击电流处理能力和输入电源熔断器允许的配合参数对该保险丝的大小进行选择。

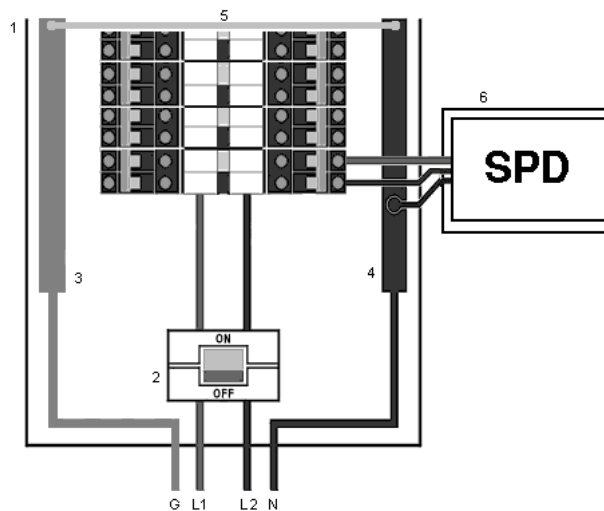


标引序号说明：

- 1 主配电盘
- 2 主电路断路器
- 3 主接地排
- 4 中性线排
- 5 G-N (PE-N) 连接点
- 6 SPD 壳体

图L.4 SPD 与输入电源上最近的可用断路器相连接（美国三相 4W+G, TN-C-S 装置）

MCB 的负载侧也提供了一个方便的点，通过电流限制型熔断器来连接 SPD。这种安排提供了维护期间的隔离措施。由于配电盘内部空间不足，SPD 安装在一个独立的壳体内，以保证电气安全。该外壳直接安装在配电盘旁边，以确保连接引线尽可能短。



标引序号说明：

- 1 主配电箱
- 2 主电路断路器
- 3 主接地排
- 4 中性线排
- 5 G-N (PE-N) 连接点
- 6 SPD 壳体

图L.5 SPD 与输入电源上最近的可用断路器相连接（美国 单相（分离的）3W+G, 120/240 V 系统——居民住宅和小型办公室的典型应用）

MCB 的负载端也提供了一个方便连接点，可以通过电流限制型熔断器来连接 SPD。这种布置提供了维护期间的隔离措施。由于配电盘内部空间不足，为了确保电气安全，可以将 SPD 安装在一个独立的箱体内部。该外壳直接安装在配电盘旁边，以确保连接引线尽可能短。

注：在美国，根据国家电气规程（NEC）的规定，NEC 定义的 SPD 的额定短路电流必须与在安装处预期故障电流相配合。



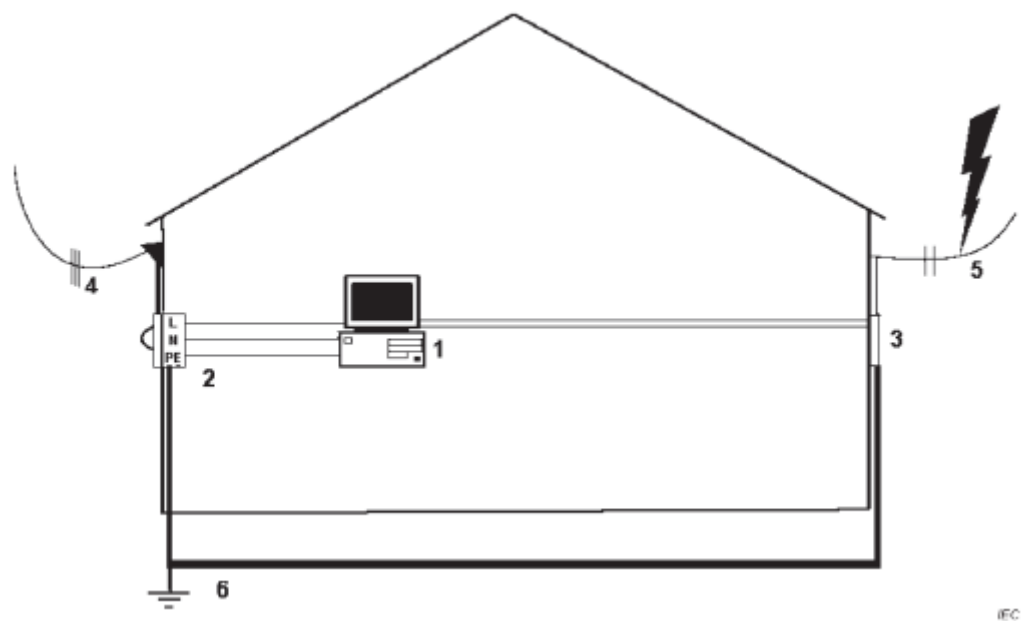
附录 M  
(资料性)  
当设备同时具有信号端口和电源端口时的配合

以一个装有调制解调器的计算机(PC)为例,描述设备的两个端口由无协调配合的 SPD 保护时可能出现的问题。

一个典型的系统可能由未实现协调配合的子系统组合而成,并且承受未进行协调电涌保护可能存在的风险。尽管每个电源和通信系统都可能包括电涌保护,但在电涌保护系统之间流动的电涌电流会在 PC 机的电源和通信端口之间产生电位差。基于 PC/调制解调器的性质和抗扰度水平,该电位差可能会导致 PC/调制解调器的损坏或设备操作失败。

第一个例子基于一个电源和通信系统说明了这个问题是如何发生的。

在图 M.1 中,一台 PC 机配备了一台调制解调器,该调制解调器由包括接地导体的三线电缆的支路供电,接地导体在主配电盘建立了 PC 机箱的稳态基准电位。调制解调器的通信端口与位于墙上的金属通信插座相连,此插座连接到一个通信接口板。该通信接口板通常位于建筑物的入口,装配有信号 SPD。

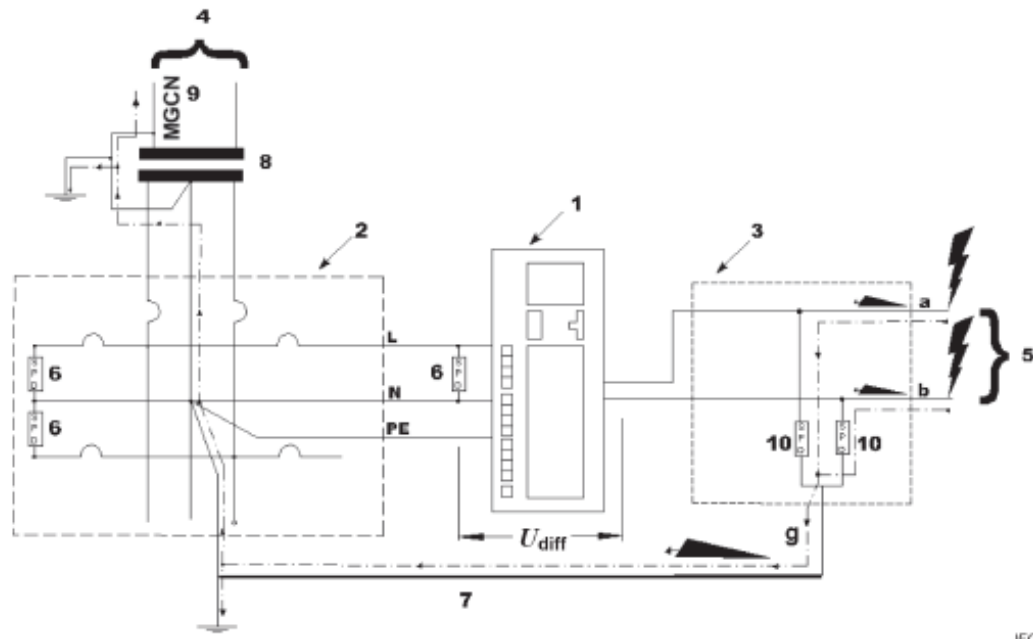


标引序号说明:

- 1 具有分立电源和通信端口,带调制解调器或类似电子设备的计算机。
- 2 主配电盘,包括断路器和电源 SPD
- 3 包括信号 SPD 的通信接口板
- 4 单相,三相电源线
- 5 架空通信线路
- 6 等电位连接系统

图M.1 美国电源和通信系统中带有调制解调器的 PC 机示例

为验证电涌防护无协调配合时的效果和由建议解决方案带来的优势，在房屋布线系统的全尺寸复制品上进行了测量，包括如图 M.2 所示的电源、通信，以及等电位连接系统。通信线是以典型的方式布置的，与等电位连接系统保持一段距离。



标引序号说明：

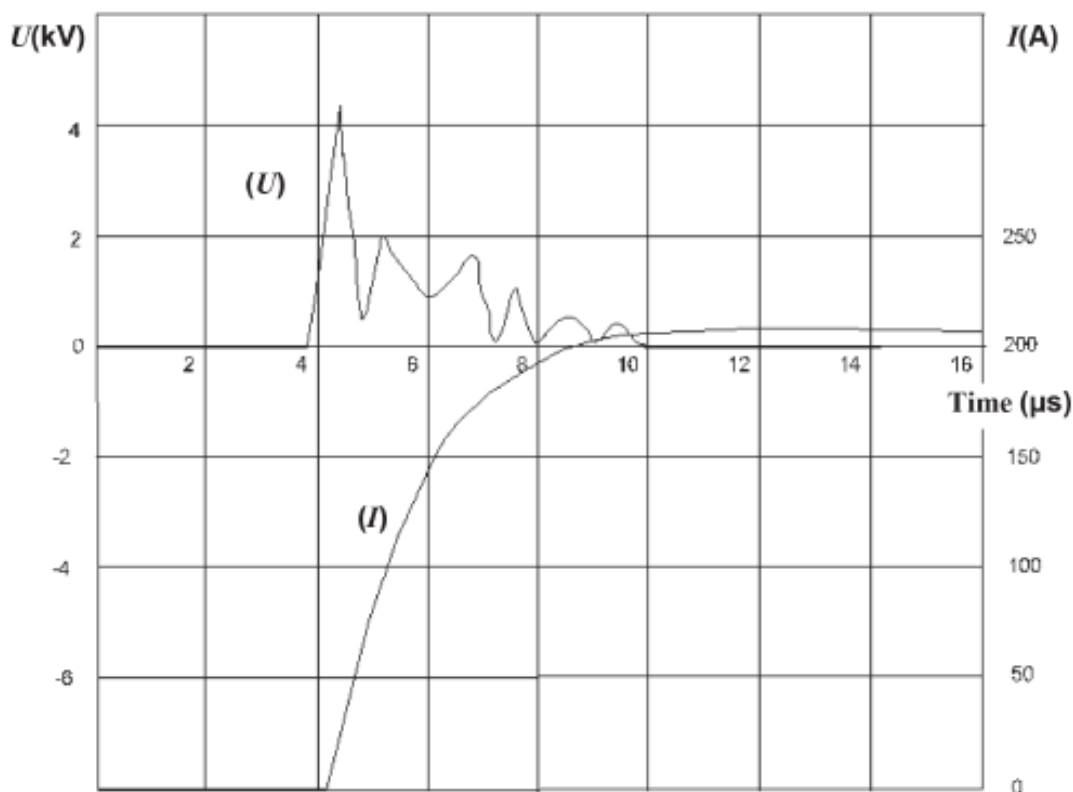
- 1 具有分立电源和通信端口，带调制解调器或类似电子设备的计算机。
- 2 主配电盘，包括断路器和电源 SPD
- 3 信号 SPD
- 4 单相三线电源线
- 5 架空通信线路
- 6 电源 SPD(基于压敏电阻型)
- 7 等电位连接系统
- 8 配电变压器
- 9 MGCN: 多点接地的公共中性点
- 10 信号 SPD(基于 GDT 型)

图M.2 用于试验的电路原理图

图 M.2 展示了由于通信接口板中的气体放电管的动作，电信电路上发生的电涌如何产生整个施加在 PC 上的电压（电位差） $U_{diff}$ 。可以看出，当通信接口板上的气体放电管动作时，在等电位系统中流过的电涌电流会导致通信端口和 PC 电源端口之间的电位差。这是由于电涌电流“ $I_{surge}$ ”通过电感“ $L$ ”在线路中传输。线路上的电压降用公式  $U = R \times I_{surge} + L \frac{dI_{surge}}{dt}$  表示，其中  $\frac{dI_{surge}}{dt}$  是电涌电流的时间变化率。 $L$  是通信接口板与等电位系统之间的线路和接地电缆的电感。

图 M.3 显示了从通信接口面板进线侧注入通信行业标准规定的电涌电流时获得的记录。当电涌电流的变化速率为  $75 \text{ A}/\mu\text{s}$  时，回路中会产生峰值为  $4.3 \text{ kV}$  的电压。这个电压将出现在 PC 的两个端口之间（当然试验过程未连接 PC。试验时断开了 PC 设备回路，没必要将 PC 置于实验的危险中。）

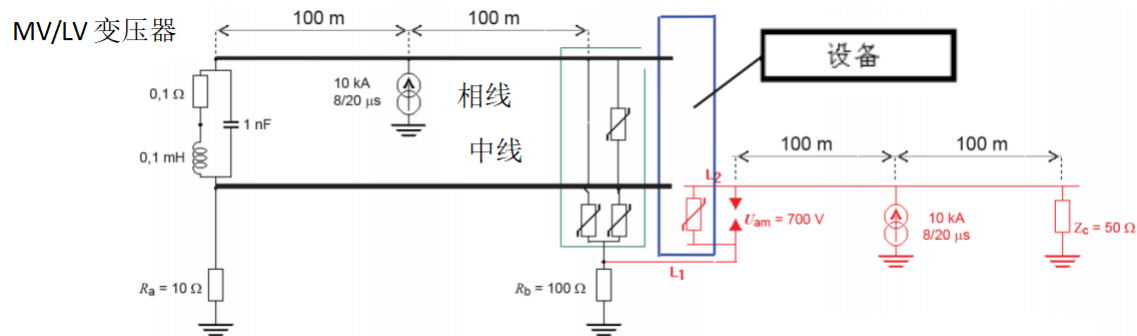
注：8/20并不是通讯行业使用的唯一标准放电电流波形。ITU使用10/700（冲击电压）和5/300（冲击电流）复合波形。IEC 61643-21也使用了许多不同的测试波形。



标引序号说明：  
I 通过信号 SPD 的电流：50 A/div- $di/dt = 75 \text{ A}/\mu\text{s}$   
U 通信接口与保护导体 (PE) 之间的电压：2 kV/div，最大值 4.3 kV  
水平扫描：2  $\mu\text{s}/\text{div}$

图M.3 施加电涌电流时在 PC/调制解调器参考点之间记录到的电压 (电压和电流 vs. 时间,  $\mu\text{s}$ )

图 M.4 描述了用于说明该问题的第二种示例。此模型基于为建筑物供电的电源系统 (TT 制式，相线与中性线)，该建筑物也有电话线接入。为了实现这两个网络与地网的等电位连接，在电源线和电话线的入户端口安装了 SPD。为了研究这个案例，我们模拟了一个实际的情形，两个接地点是不同的，然后用电感隔离 (等效于这两点之间的距离)，在设备通信端口处的通信线上也增加了一个 SPD。L2 是气体放电管 (GDT) 和压敏电阻 (MOV) 之间的距离，L1 是通信线路等电位点和电源线路等电位点之间的距离。



图M.4 用于仿真的典型 TT 系统

对图 M.2 的电信电路施加的电涌电流的影响也已通过计算机仿真进行了分析，并得出了与实际试验相同的结果。采用了变压器的高频模型和线路的传输效应模型(两线路均为 200 m)。电源 SPD 采用的是压敏电阻 MOV(限制元件)，信号 SPD 采用的是气体放电管 GDT(开关元件)。

接地电阻  $R_0$  和 GDT 冲击放电电压都是本次研究的参数。电源 SPD(三种保护模式)的标称放电电流为 10 kA，电压保护水平为 1.5 kV。

当  $L1=L2=10\text{ m}$  时，得到以下结果。引出线长度为  $L1$  时，雷击电网产生的电压降为 12.5 kV，雷击电信网络时产生的电压降为 23 kV。这个过电压级别足以在设备内部产生闪络。

因此，即使两个网络都有 SPD 保护，并且两个网络连接在同一个接地系统上，内部闪络仍然可能发生。

为了验证这些结论的普遍性，我们还对两个网络上的一些负载进行了仿真，结果是相同的。此外，还对其他类型的电源网络(TN 和 IT)和不同的电涌波形进行了仿真计算。

结果如表 M.1 所示。

表M.1 模拟结果

TN 系统	在供电线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$	在信号线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$
L1 电压降	12 kV	35 kV
IT 系统, 中性点阻抗=1000 $\Omega$	在供电线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$	在信号线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$
L1 电压降	8 kV	35 kV
TT 系统	在供电线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$	在信号线上施加 10 kA, 8/20 $\mu\text{s}$
L1 电压降	8 kV	23 kV

可以看出，设备的闪络风险在各种配电制式系统中都是相同的。设备的最大绝缘耐受能力在大多数情况下是在 2.5 kV，因此由轻微的电涌(仅 10 kA)产生的过电压(从 8 kV 到 35 kV)很容易超过设备的绝缘耐受能力。

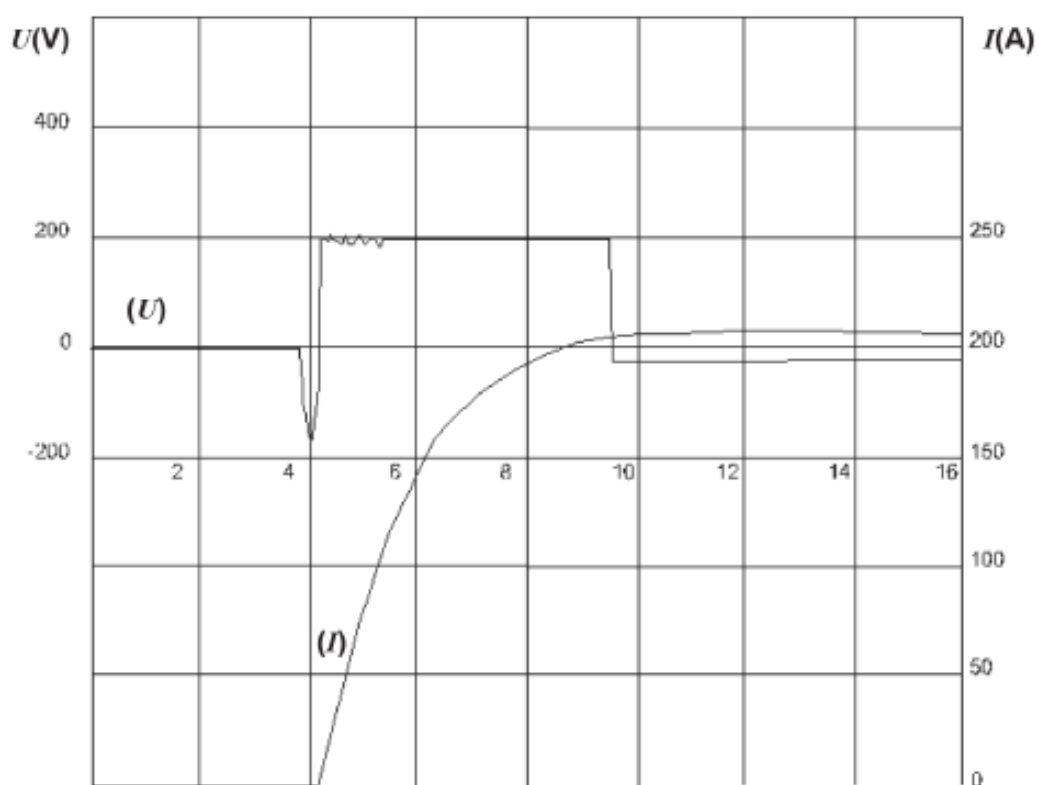
注：电话线上一般不会出现 10 kA 10/350，电话线在大约 2kA 电流下就会熔断，且在电话线上的实际监测值大概在 100 A 左右，此值仅用于电源端和电信端之间的比较。

### 合理的解决方案

有两种可选择的方法用于避免上述问题：

- 为电缆寻找另一种布线方式，以减小各种线路(在上述例子中是通信线路和电源线路)之间的回路面积的大小，从而降低电感  $L$ 。但这对现有的建筑物来说不是一件容易的事情。对于新建建筑来说，单一的入口等电位连接点当然是最好的解决方案。
- 在靠近设备端安装一个并联于电源线和公共等电位连接点之间的 SPD，在其他系统(以通信为例)的终端和这个公共等电位连接点之间也可以这样做。一般来说，一个 SPD 中集成有电源 SPD 和信号 SPD，有时称为“多用途 SPD”。这种多用途 SPD 包含对所有设备端口的电涌保护，由非常短的引线连接到公共等电位连接点，且要求这个公共等电位连接点连接到 PE 上。如果被保护设备外壳是接到 PE 的，这个公共等电位连接点可以是被保护设备的外壳。

图 M.5 显示了多用途 SPD 在图 M.1 所述实验中的效果。图 M.5 应与图 M.3 进行比较。



标引序号说明:

$I$  施加于通信信号 SPD 电涌电流  $-di/dt = 75 \text{ A}/\mu\text{s}$

$U$  电话线接口与保护接地导体(PE)之间的电压:  $200 \text{ V/div} \sim 200 \text{ V}_{\text{max}}$

水平扫描:  $2 \mu\text{s/div}$

图M.5 对图 M.1 所示建筑物安装了多用途 SPD 后施加电涌时测量的电压和电流波形

## 附录 N

(资料性)

## 短路后备保护和电涌耐受

## N.1 通则

电涌电流不仅会流过 SPD, 还会流过其他设备, 而这些设备最初并不是为 SPD 专门设计的。过电流保护和上游安装的各种故障电流保护设备都是这种情况, 因此可能会发生不希望的跳闸或熔断。了解这些设备的电涌耐受能力对于 SPD 正常发挥防护能力大有益处。

当电涌电流流经过电流保护装置时, 会产生额外的电压降。此压降的大小取决于过电流保护装置的类型及其额定电流。

在本附录中, 条款 N.2、N.3、N.4 和 N.5 根据 SPD<sub>s</sub> 制造商和熔断器制造商进行的型式试验获得的实验数据, 给出了熔断器电涌耐受能力的清晰的计算公式和信息。对于其他过电流保护装置 (OCPD), 电涌耐受能力可能在很大程度上取决于该装置的类型和设计。第 N.6 条提供了一些信息来比较不同 SPD 过电流保护装置设计的优缺点。SPD 专用过电流保护装置可能还有其他特性。

需要时, 制造商应提供 SPD 与其过电流保护装置 (如断路器) 配合的信息。(MCB、MCCB、RCD 等)。建议参考制造商提供的文档。

第 N.7 条提供了一些国家使用的 SPD 过电流保护装置的附加试验值。

用户在考虑 SPD 短路失效时的安全性以及电涌耐受能力时可选择不同的过电流保护装置, 用户应恪守这些要求, 并参照 SPD 制造商说明。

## N.2 单次 8/20 和 10/350 熔断器电涌耐受能力的信息

用  $I^2t$  进行波形计算并且与熔断器生产厂提供的  $I^2t$  (1 ms) 比较, 是推测熔断器单次电涌耐受能力的一种可能的方法。

通过使用以下公式, 可以根据冲击电流的峰值及其标准的波形来估计冲击电流的  $I^2t$  值:

——波形 10/350 (另见 IEC 61643-11: 8.1.1):

$$I^2t[A^2s] = 2.5 \times 10^{-4} \times I_{crest}^2[A^2] \dots\dots\dots (N.1)$$

——对于波形 8/20:

$$I^2t[A^2s] = 0.14 \times 10^{-4} \times I_{crest}^2[A^2] \dots\dots\dots (N.2)$$

注: 这基于标准的放电电流波形 (上升时间和半值时间), 不包括允许的最大试验允差。

示例:

——要承受幅值为 9 kA 的单次 8/20 放电电流, 作为后备保护的熔断器必须大于以下最小弧前值:

$$I^2t[A^2s] = 0.14 \times 10^{-4} \times 9^2 = 1\,134[A^2s]$$

——要承受幅值为 5 kA 的单次 10/350 冲击电流, 过电流保护装置熔断器必须大于以下最小弧前值:

$$I^2t[A^2s] = 2.5 \times 10^{-4} \times 5^2 = 6\,250[A^2s]$$

未使用过的 gG 100 A 熔断器的弧前值为 21 200 A<sup>2</sup>s, 可承受单次 8/20 放电电流:

$$I_{crest}[A] = \sqrt{21\,200 / (0.14 \times 10^{-4})} = 38\,914[A]$$

不同的  $I^2t$  可以在熔断器技术规格书中找到, 它取决于熔断器的特性、尺寸和制造商。

## N.3 预处理和动作负载试验中影响熔断器的因素 (性能下降)

在 IEC 61643-11 规定的试验程序中,熔断器不仅要承受单次冲击,还要承受完整的冲击序列(预处理试验和动作负载试验)。与单次冲击相比,这些冲击序列会使熔断器的性能劣化,从而降低其电涌耐受能力(见 N.2)。

试验规格书表明,为了通过完整的预处理试验和动作负载试验,必须对熔断器单次冲击耐受值乘以 0.5 到 0.9 的降容系数。

应主要考虑以下因素:

—— $I_n$  和  $I_{imp}$  之间的比例

预处理试验首先在  $I_n$  下施加 15 次放电电流冲击,最终动作负载试验施加 0.1、0.25、0.5、0.75 和 1 倍  $I_{imp}$  冲击。如果  $I_n$  的峰值低于  $I_{imp}$ ,则与  $I_{imp}$  应力相比,预处理试验引起的劣化可以忽略不计。相反,如果  $I_n$  的峰值接近甚至高于  $I_{imp}$ ,则预处理试验所产生的应力是不容忽视的。

——与熔断器单次冲击耐受能力相比的绝对值

当  $I_n$  或  $I_{imp}$  值接近熔断器可以承受的最大放电电流的峰值时,熔断器的额定电流值将随着施加的每次冲击而降低,而如果它们远远低于该最大峰值,则可以忽略该影响。

——熔断器  $I^2t$  值偏差

在大多数情况下,熔断器制造商根据熔断器标准为其器件提供容差,但该容差与实际电涌承受能力无关,不能用于计算。

N.4 基于实验数据,并通过基于 IEC 60269 系列规定的参数和极限的计算来确认的熔断器的动作负载承受能力

单次冲击耐受试验和完整预处理/动作负载试验之间的比率示例如表 N.1 所示。

表N.1 单次冲击耐受试验与完整预处理/动作负载试验之间的比率示例

gG 熔断器对操作和附加负载试验的承受能力					
熔断器额定 电流 (A)	最小弧前值 $I^2t$ (国 际电工委员会 60269-2 表 113)	评估的最小绝 热值 $I^2t$ (A <sup>2</sup> s)	安全系数 (基于电流 值)	最大 $I_n$ (kA) (8/20 μs)	最大 $I_{imp}$ (kA) (10/350 μs)
8	40	24	0.85	1.2	0.3
10	68	41		1.5	0.3
12	130	78		2.1	0.5
16	291	175		3.1	0.7
20	640	394		4.6	1.0
25	1 210	726		6.4	1.4
32	2 500	1 750		9.9	2.2
40	4 000	2 800		12.5	2.8
50	5 750	4 025		15	3.4
63	9 000	6 300		19	4.2
80	13 700	10 960		25	5.6
100	21 200	19 080		33	7.3
125	36 000	32 400		42	9.6
160	64 000	57 600		57	13
200	104 000	93 600		72	16
224	139 000	125 100		83	19

250	185 000	166 500		96	22
315	302 000	271 800		123	28
400	557 000	445 600		157	35
500	900 000	720 000		200	45
630	1 600 000	1 280 000		267	60

表 N.1 数据解释:

第二列: 这些最小的弧前值  $I^2t$  从 IEC 60269-2 的表 113 中提取。它们指的是 4 ms 弧前时间, 最初由 SC32B 确定为参考值。

第三列: 这些值是根据材料常数和熔片的形状计算的, 它们指的是大约 3 ms 的燃弧时间, 并得到了经验的证实。

第四列: 这是考虑不同熔断器尺寸的安全系数。

第五、六列: 这些值是根据第三列的计算得出, 并由动作负载试验的实验数据验证。

表 N.1 中包含的值应适用于所有类型的 gG 熔断器 (无论其尺寸如何), 但不适用于其他类型熔断器特性。

当然, 这些基于这些对比数据进行相关的估算。

其他类型熔断器特性需要通过应用 IEC 61643-11 中描述的完整的动作负载试验程序进行单独检查。

注: 表 N.1 是基于大量的实验数据, 同时 10/350 冲击电流的相应计算都是基于 NH 型熔断器。然而, 从一些圆柱形熔断器上已经进行的试验, 验证了该尺寸熔断器的耐受能力。

## N.5 外部脱离器技术的性能

以下断路器和熔断器的性能表现 (见表 N.2) 是基于过去 3 年的调查, 该表同时简要概述了目前的情况。需要说明的是, 以下总结与目前的断路器和熔断器技术和尺寸有关 (试验是在 230/400 V 下进行的), 如果未来这些条件发生变化, 也可能对所给结果产生重大影响。

表 N.2 外部脱离器技术的性能

额定电流（以 A 为单位）	0-80	80-...
电涌电流耐受能力(8/20)	一般来说,断路器的耐受能力明显高于熔断器(高出 2 倍)。	一般来说, 断路器仍然比熔断器表现出更高的耐受能力(比熔断器高 30 % 到 50 %)。
雷击电流耐受能力(10/350)	没有明确的结论,也许与断路器的额定电流无关而更多地与它们采用的技术有关,可能比熔断器低或高。	
当脱离器没有动作时,其在 SPD 分支中增加在残压上的电压降(VD)	一般情况下,断路器比熔断器具有更高的电压降。差值随着额定电流的增大而降低,直至无差值。	一般来说, 断路器的电压降与熔断器相当,甚至更低。差值随着额定电流的增加而加剧。
当脱离器动作时,其在 SPD 分支中增加在残压上的电压降(VD) *	熔断器熔断时的电压降高于断路器的动作压降,但断路器的时间特性取决于限压型或电压开关型 SPD 的使用以及续流的幅值。	
*当脱离器的额定值小于制造商在其规格书中推荐的最大脱离器额定值时,可能会发生这种情况。		

SPD 上游的所有元件都可能影响 SPD 电涌泄放能力, 应了解其电涌耐受能力。

## N.6 在某些国家使用的 SPD 外部脱离器的附加要求和试验值

一些国家对 SPD 外部脱离器提出了附加的要求和测试值。

日本标准提出了 SPD 熔断脱离器 (SFD) 的要求。

注1: JEITA RC4501: 低压电涌保护器的脱离器 SPD 熔断脱离器的性能要求和试验方法。



注2：JEITA RC4502：低压电涌保护器的脱离器SPD熔断脱离器的选择和应用导则。  
中国能源行业和通信行业都针对 SPD 的专用脱离器制定了标准。  
注3：NB/T 42150-2021：低压电涌保护器专用保护装置；YD/T 3894-2021：通信局（站）用电源电涌保护器专用脱离器。

- 基本说来，SFD 和 SSD 的要求包括：
- a) 高冲击电流耐受能力。（参见表 N. 3）
  - b) 冲击电流下具有更低的限制电压
  - c) 低的额定电流或者动作电流，在 SPD 失效时能和内部脱离器相配合安全分断全范围的失效电流（见图 N. 1）。
  - d) 时间-电流特性可以和上游的 OCPD 形成过电流保护的配合（见图 N. 2）。

表N. 3 SFD 额定电流—电涌耐受能力示例

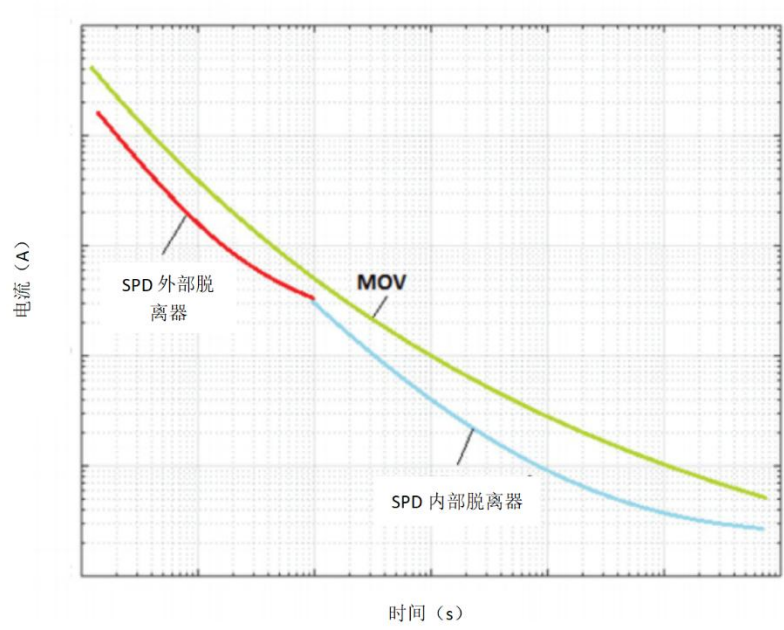
额定电流	电涌承受能力	电涌波形	分断能力
30 A	20 kA：15 次	8/20	AC 250 V 100 kA
28 A	15 kA：15 次		
23 A	10 kA：15 次		

表N. 4 SSD 动作电流示例

最小动作电流	电涌耐受能力	电涌波形	分断能力
3 A	25 kA：1 次	10/350	AC 250，100 kA
3 A	60 kA：15 次	8/20	AC 250，100 kA
3 A	10 kA：15 次	8/20	AC 250，25 kA

图 N. 1 展示了 SPD 内部脱离器和外部脱离器（SFD 或 SSD）的时间-电流特性曲线以及 SPD 内部 MOV 的时间-电流失效（燃烧）特性曲线。为了实现 SPD 内 MOV 和 SPD 的内部及外部脱离器（SFD 或 SSD）之间的良好配合，必须确保：

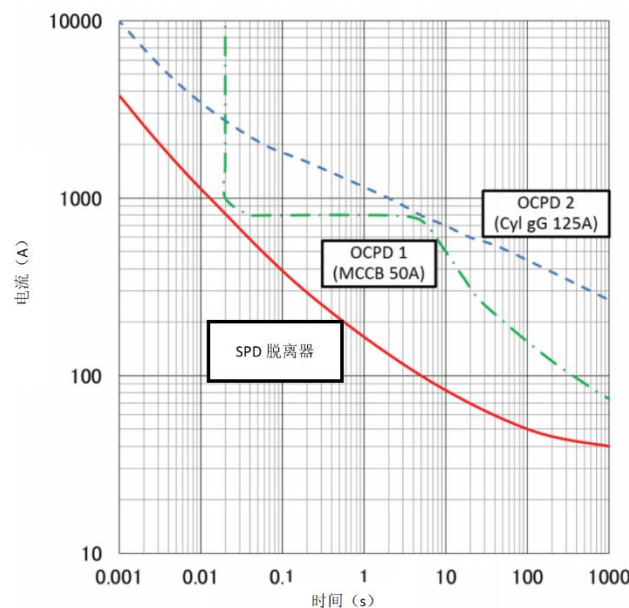
- 外部脱离器的特性曲线和内部脱离器的特性曲线应有交点，以覆盖整个失效电流范围；
- 外部脱离器和内部脱离器的特性曲线应位于 SPD 内部 MOV 的失效（燃烧）特性曲线的左下方，以保证在 MOV 失效（燃烧）之前脱离器已经动作。



说明：  
绿色：MOV 的失效（燃烧）曲线  
红色：SPD 外部脱离器的电流-时间特性曲线  
蓝色：SPD 内部脱离器的电流-时间特性曲线

图N.1 SPD 内部脱离器及外部脱离器与 MOV 配合示意图

图 N.2 展示了过流保护装置（OCPD）和 SPD 外部脱离器的时间-电流特性曲线示例。如果在图 18 中选择安装 50 A MCCB 或者 125 A gG 熔丝作为 OCPD，SPD 的外部脱离器应比 OCPD 更快动作，即 SPD 外部脱离器的时间-电流特性曲线应位于 OCPD 曲线的左下方。



说明：  
绿色：额定电流50 A的MCCB的电流-时间特性曲线

蓝色：额定电流125 A的圆柱形gG型熔断器的电流-时间特性曲线

红色：SPD 外部脱离器的电流-时间特性曲线

图N.2 SPD 外部脱离器时间-动作特性示例

## 附录 0

(资料性)

### 雷电放电条件下系统级抗扰度的实用试验方法

#### 0.1 概述

以下试验方法可用于评估整个系统的抗扰度水平。

#### 0.2 正常使用条件下的 SPD 放电电流试验

- a) 在系统级抗扰度试验之前：应确定被保护设备的抗扰度。连接到电力线路的设备应符合 GB/T 16935.1 和 GB/T 18802.12，连接到电信线路的设备应符合 GB/T 18802.22、ITU-T K.20 K.21 和 K.45。

SPD 的保护性能应根据标准 IEC 61643-11 或 IEC 61644-21 中的测试程序来确定。

- b) 被保护设备进行试验时应按照制造商的说明安装 SPD。设备应施加其额定电压，并依据 SPD 的标称放电电流参数施加冲击。

如适用，应连接附加电路，如通信线路、传感器、电动机。

- c) 图 0.1 提供了用于在正常使用条件下进行放电电流试验的电路示例。

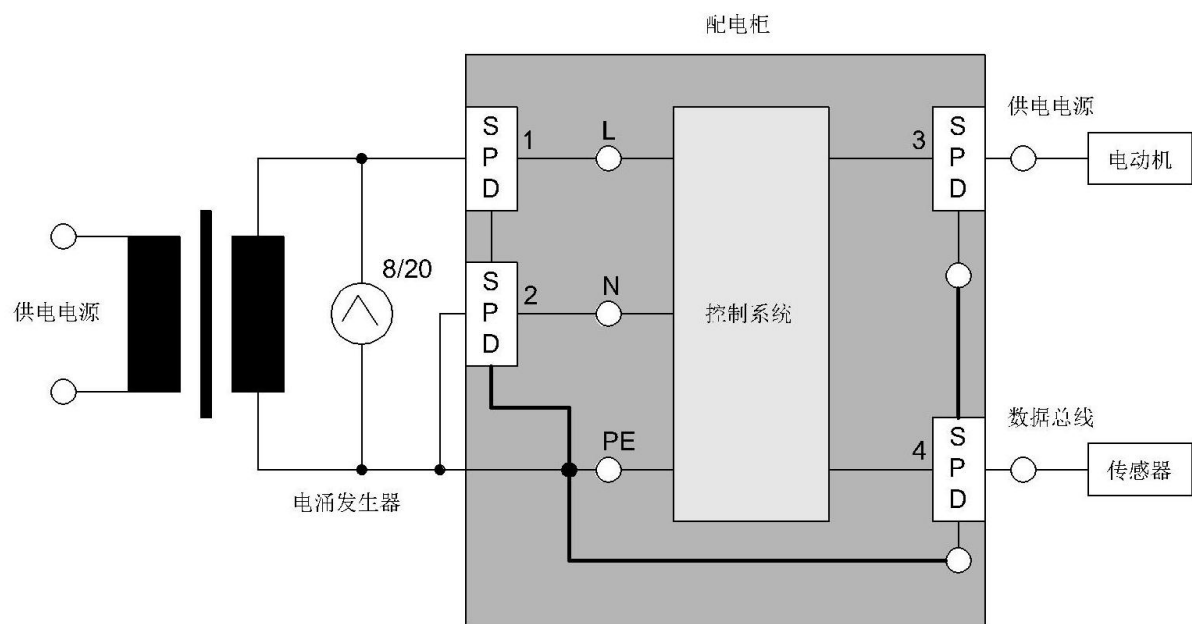
#### 0.3 雷电电流感应试验

- a) 应将冲击电流注入金属安装板，以检查模拟雷电放电产生的电磁场对整个系统的影响
- b) 被测系统必须尽可能按照实际工况安装。该模拟安装应包括被保护设备、已安装 SPD 以及互连线路的实际长度和类型。
- c) 应监测整个系统布线内产生的感应放电电流。
- d) 一次侧雷电电流放电的特性和适用值应符合 GB/T 21714.1-2015 表 C.3 的规定。
- e) 图 0.2 提供了在电源和控制系统上安装 II 类 SPD 时的感应电流试验示例。

#### 0.4 系统级抗扰度试验推荐试验分类(遵循 GB/T 17626.5)

本文件定义了以下合格标准：

- a) 在制造商、委托方或采购方规定的限值内性能正常；
- b) 功能或性能暂时丧失或降低，但在干扰停止后能自行恢复，不需要操作者干预；
- c) 功能或性能暂时丧失或降低，但需操作者干预才能恢复；
- d) 因设备硬件或软件损坏，或数据丢失而造成不能恢复的功能丧失或性能降低。



标引序号说明：  
SPD1+SPD2+SPD3：供电线路电涌保护器  
SPD4：通信和信号网络电涌保护器

图0.1 用于在正常使用条件下进行放电电流试验的电路示例

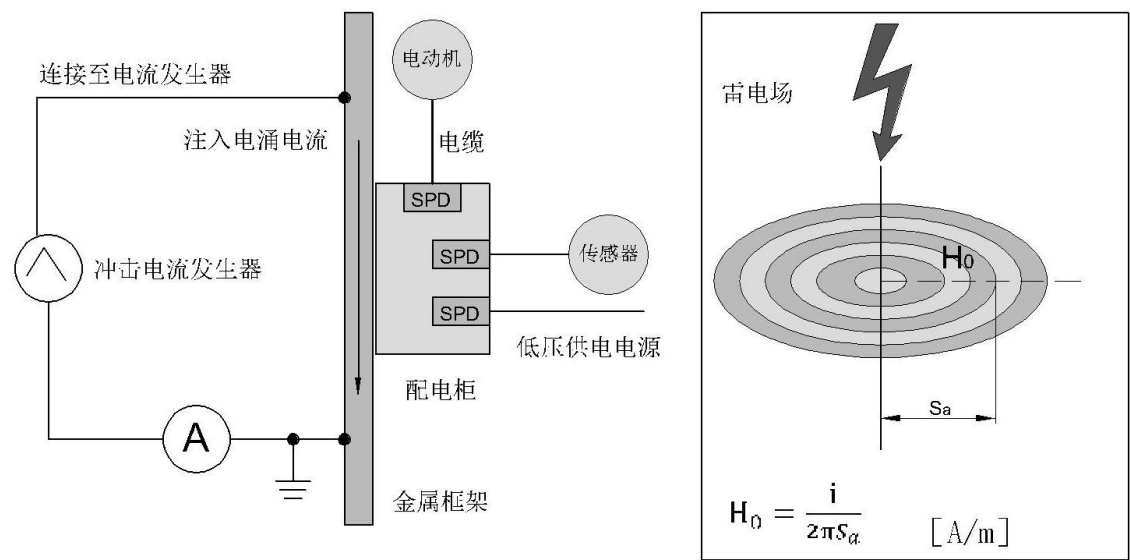


图0.2 雷电电流引起的感应电流试验电路示例

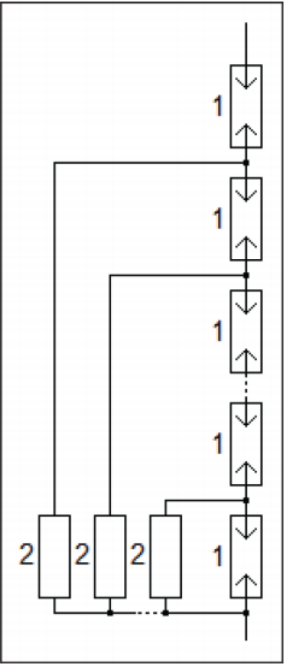
附 录 P  
(资料性)  
包含多个元件的 SPD 试验指南

P.1 概述

本附录提供了几个针对包含多个元件的 SPD 电流路径的测试示例。SPD 可能需要经过修改，才能进行这种选择性试验。样品制备要求是基于 SPD 内部关键元器件的配置方式制定的。目前，市场上出现的 SPD 电路越来越复杂，如何按照原始的需求正确地制备样品也成为了难题。由于本文件仅涉及非线性元件，未考虑此类元件是否会传导大部分的电涌电流，或者此类元件发生故障的情况，因此需要进一步的讨论。由于电路设计不断创新，导致很难以通用的方式提供指导。因此，下面的示例会指导制造商和试验工程师对样品制备做出最合适的决定。

P.2 具有电阻性/电容性触发控制电路的多个串联火花间隙的示例

图 P.1 为具有电阻性/电容性触发控制电路的多个串联火花间隙的示例。



标引序号说明：

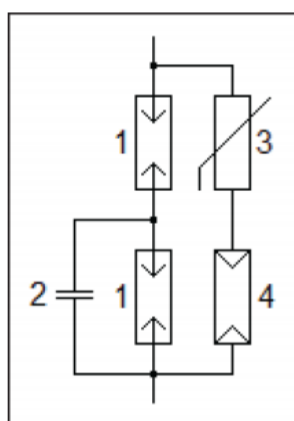
- 1：火花间隙
- 2：电阻性或电容性触发控制

图P.1 具有电阻性/电容性触发控制的多个串联火花间隙的示例

串联火花间隙是唯一需测试的电流路径。电阻性或电容性分压器/触发器控制电路在本文件意义上不构成单独的电流路径，因为它既不包含非线性元件，也不传导大部分电流。

P.3 具有并联有电容触发控制电路的 2 个串联火花间隙，再与串联 GDT+MOV 电路并联使用的示例

图 P.2 为将并联有电容触发控制电路的 2 个串联火花间隙，再与串联 GDT+MOV 电路并联使用的示例。



标引序号说明：

- 1：火花间隙
- 2：电阻性或电容性触发控制
- 3：MOV(s)
- 4：GDT

**图P.2 具有电容性触发控制的2个串联火花间隙**

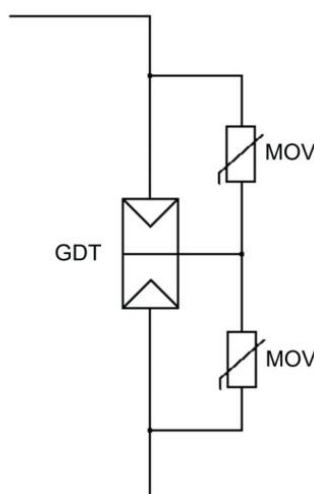
串联的两个火花间隙是试验时需要考虑的主要放电电流路径。

通过串联连接的 GDT 和 MOV 的并联电流路径需要单独进行试验，因为流过 GDT 和 MOV(s) 的串联连接电路的电流比例很难确定，即使可以确定，本文件也没有提供对这种电流比例的要求。

本文件描述的电容性触发控制电路不构成单独电流路径，因为它既不包含非线性元件，也不传导大部分的电流。

#### P.4 具有并联 MOV 旁路/触发控制的三极 GDT 示例

具有并联 MOV 旁路/触发控制的 3 电极 GDT 示例如图 P.3 所示。



标引序号说明：

- GDT：三极 GDT
- MOV：“高能”旁路

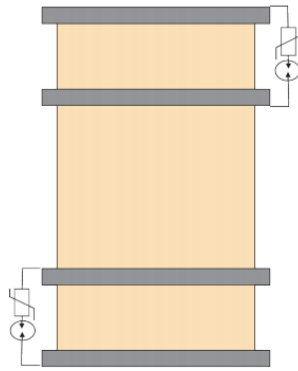
**图P.3 具有并联 MOV 旁路/触发控制的三极 GDT**

三极 GDT 是试验时需要考虑的一条电流路径。

需要对通过 MOV 串联连接的并联电流路径进行单独测试，因为在 GDT 动作之前，预计会有很大一部分电流流经该串联 MOV。

**P.5 具有 GDT+MOV 触发控制的 4 电极型间隙示例**

如图 P.4 为具有 GDT+MOV 触发控制的 4 电极型间隙示例。



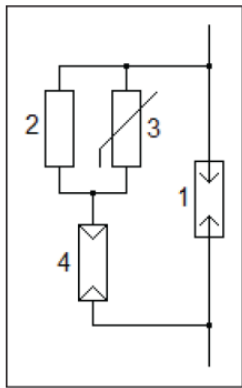
**图P.4 具有 GDT+MOV 触发控制的 4 电极放电间隙**

4 电极放电间隙构成了测试时需要考虑的主要电流路径。

与 4 电极间隙并联独立的支路可采用 GDT 和 MOV 串联，尽管该支路包含非线性组件，但不需要进行单独测试，因为它们并不作为 4 电极间隙主要的并行电流泄放路径。

**P.6 具有 GDT 串联 MOV 的并联支路的放电间隙的示例**

如图 5 为具有 GDT 串联 MOV 的并联支路的放电间隙的示例。



标引序号说明：

- 1：放电间隙
- 2：电阻
- 3：MOV
- 4：GDT

**图P.5 具有 GDT 串联 MOV 的并联支路的放电间隙**

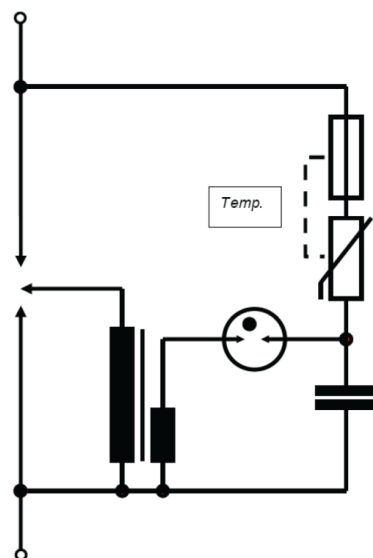
测试时需要考虑 GDT 构成的放电路径。



需要对通过 MOV+GDT 串联的并联放电路径进行单独测试，因为通过串联 MOV 的支路预计会通过较大一部分的放电电流。

#### P.7 具有触发变压器的 3 电极间隙示例

如图 P.6 为具有触发变压器的 3 电极放电间隙。



图P.6 具有触发变压器的三电极放电间隙

3 电极放电间隙是测试时需要考虑的主要电流路径。

通过 MOV 和触发变压器/电容器串联连接的并联电流路径会受到线性元件的电流限制，因此不需要进行单独测试，因为通过该电路的预期电流可以忽略不计。

## 附录 Q

(资料性)

### 与 I 类试验 SPD 相关的美国特殊情况

在美国，SPD 不需要进行 I 类试验，此特殊情况适用于整个文档。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 21714.3—2015 雷电防护 第3部分：建筑物的物理损坏和生命危险
- [2] IEC 60038 IEC standard voltages
- [3] IEC 60050-151: 2001 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 151: Electrical and magnetic devices
- [4] IEC 60050-442: 1998 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 442: Electrical accessories
- [5] IEC 60050-826: 2004 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 826: Electrical installations
- [6] IEC 60060-1 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements
- [7] IEC 60099-4:2014 Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems
- [8] IEC 60099-5 Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations
- [9] IEC 60269 series Low-voltage fuses
- [10] IEC 60364-4-42 Low-voltage electrical installations - Part 4-42: Protection for safety - Protection against thermal effects
- [11] IEC 60364-4-43 Low-voltage electrical installations - Part 4-43: Protection for safety - Protection against overcurrent
- [12] IEC 60898-1 Electrical accessories - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations - Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation
- [13] IEC 60947-2 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers
- [14] IEC TR 61000-5-6: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-6: Installation and mitigation guidelines - Mitigation of external EM influences
- [15] IEC 61008-1 Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCBs) - Part 1: General rules
- [16] IEC 61009-1 Residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection for household and similar uses (RCBOs) - Part 1: General rules
- [17] IEC 61643-21 Low voltage surge protective devices - Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks - Performance requirements and testing methods
- [18] IEC 61643-22 Low-voltage surge protective devices - Part 22: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks - Selection and application principles
- [19] IEC 61643-321 Components for low-voltage surge protective devices - Part 321: Specifications for avalanche breakdown diode (ABD)
- [20] IEC 61643-331 Components for low-voltage surge protective devices - Part 331: Performance requirements and test methods for metal oxide varistors (MOV)
- [21] IEC 61643-341 Components for low-voltage surge protective devices - Part 341: Specification for thyristor surge suppressors (TSS)

- [22] IEC 61936-1 Power installations exceeding 1 kV a.c. -Part 1: Common rules
- [23] IEC TR 62066:2002 Surge overvoltages and surge protection in low-voltage a.c. power systems - General basic information
- [24] IEC 62305-3 Protection against lightning -Part 3: Physical damage to structures and life hazard
- [25] IEC 62561-6 Lightning protection system components (LPSC) -Part 6: Requirements for lightning strike counters (LSC)
- [26] IEEE 1159—2009 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [27] IEEE C62.41.1—2002 IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits
- [28] IEEE C62.41.2 IEEE recommended practice on characterization of surges in low-voltage (1000 V and less) AC power circuits
- [29] IEEE C62.72—2016 IEEE Guide for the Application of Surge-Protective Devices for Use on the Load Side of Service Equipment in Low-Voltage (1000 V or Less, 50 Hz or 60 Hz) AC Power Circuits
- [30] A. ROUSSEAU, Choice of low voltage surge arresters based on risk analysis, Power Quality, 1995
- [31] A. ROUSSEAU, P. AURIOL, A. RAKOTOMALALA, Lightning distribution through earthing systems, Hobart Lightning Protection Workshop, 1992
- [32] A. ROUSSEAU, T. PERCHE, Coordination of surge arresters in the low voltage field, INTELEC, 1995
- [33] A. ROUSSEAU, V. CREVENAT, Protective levels at equipment terminals for various SPDs, GROUND, 2010
- [34] F. MARTZLOFF, J.S. LAI, Coordinating cascaded surge protective devices: high-low versus low-high, IEEE IAS, 1991
- [35] H. ALTMAIER, D. PELZ, K. SCHEIBE, Computer simulation of surge voltage protection in low voltage systems, ICLP, 1992
- [36] J. HUSE et al., Coordination of surge protective devices in power supply systems: need for a secondary protection, ICLP, 1992
- [37] J. SCHONAU, F. NOACK, R. BROCKE, Coordination of fuses and overvoltages protection devices in low voltage mains. Fifth International Conference on Electrical Fuses and their Applications, 1995
- [38] M. CLEMENT, J. MICHAUD, Overvoltages on the low voltage distribution networks, CIRED, 1993
- [39] P. HASSE, P. ZAHLMANN, J. WIESINGER, W. ZISCHANK, Principle for an advanced coordination of surge protective devices in low voltage systems, ICLP 1994