第12章 电化学储能系统常规保护装置配置与应用

12

12.1 电化学储能用低压熔断器

在电化学储能系统中，电池包、电池簇和 PCS（储能变流器）是核心电能存储与转换单元，其运行环境涉及高电压、大电流、高密度能量，一旦发生电流异常（过电流、短路等），易引发热失控、设备烧毁甚至火灾爆炸。熔断器作为“被动式过电流保护器件”，通过熔体过热熔化快速切断故障电流，本质是为了遏制故障蔓延、保护核心部件、保障系统安全。

电化学储能系统中的熔断器分级短路保护架构如图 12-1 所示。

12.1.1 低压熔断器定义

低压熔断器，俗称电力熔断器。在 IEC 60269-1 和 GB/T 13539.1—2015 标准中对熔断器的定义为：当电流超过规定值足够长的时间，通过熔断一个或多个成比例的特殊设计的熔体分断此电流，由此断开其所接入的电路的装置。熔断器由形成完整装置的所有部件组成。其对应的额定分断能力不小于 6kA，作为保护的标称电压不超过 1000V 的工频电路或标称电压不超过 1500V 的直流电路用。

12.1.2 电化学储能用低压熔断器的结构

适用于电池储能系统用的低压熔断器一般是带有填料的封闭式熔断器。其结构主要由触刀（端电极）、壳体、变截面熔体和填料等组成，根据需求的不同，部分熔断器还配有指示装置和信号反馈用的微动开关。

图 12-2 为几种行业内常见的熔断器结构，以本体形状和材质进行命名。

熔断器的各个组成部件及其作用如下：

1）触刀（端电极）：一般为紫铜或铜合金表面镀锡/镍/银，用于熔断器与电气设备连接。

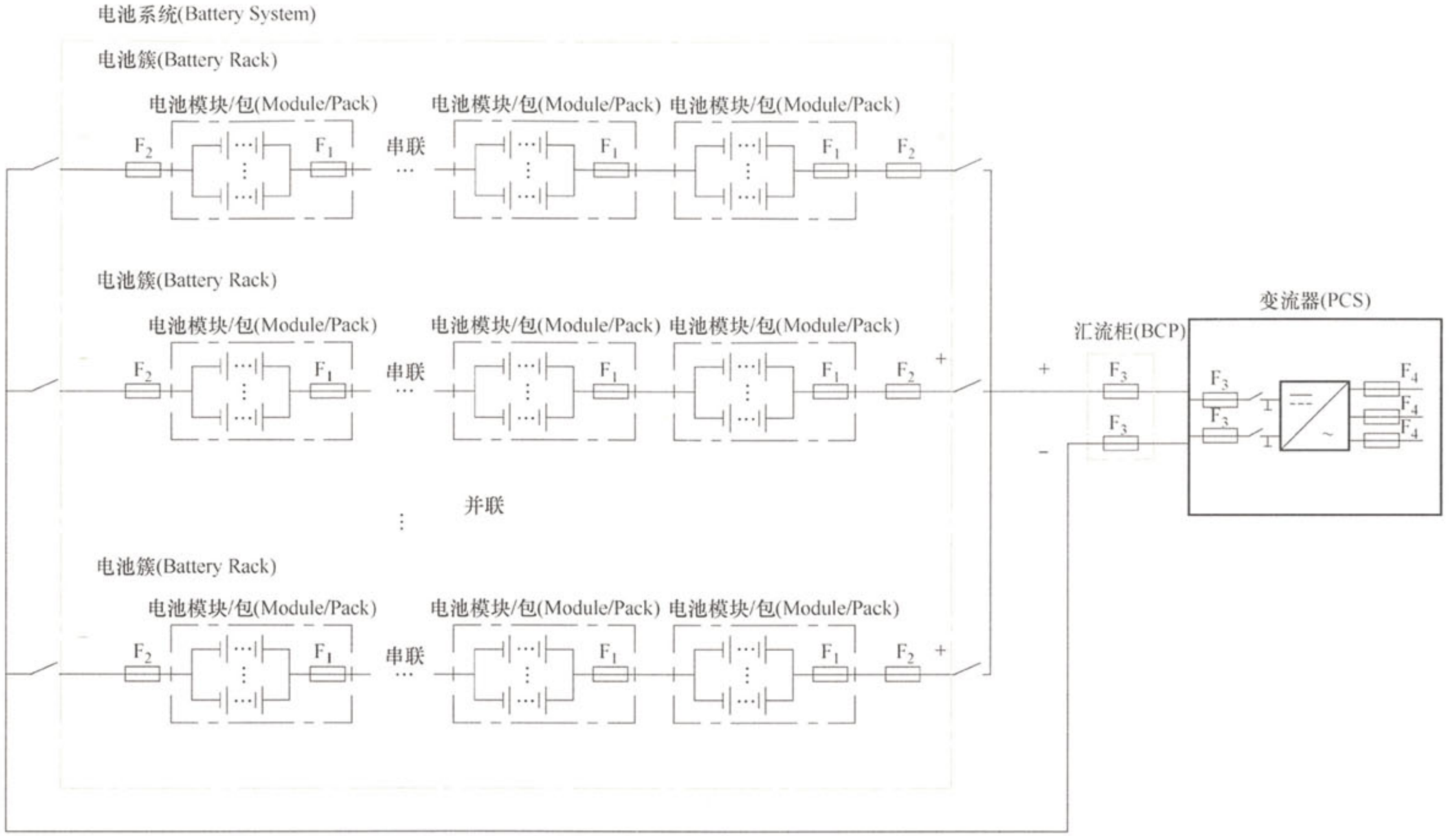


图 12-1　电化学储能系统的熔断器分级短路保护架构图

电池包保护用熔断器（F_1）主要用于“阻断电芯级故障扩散”，切断因电池包内线束老化、连接器松动、异物入侵等产生的故障电流，避免单个电芯故障蔓延至整个电池包（防止“多米诺骨牌式”热失控）

电池簇保护用熔断器（F_2）的保护核心是“阻断簇内联锁故障”，用于快速切断因线束破损、金属异物掉落、连接器松动等导致的短路电流，防止单个连接点故障烧毁整簇的高压线路，避免故障从单一电池簇扩散到其他电池簇

PCS 保护用熔断器（直流侧 F_3/直流侧 F_4）在 PCS 中的保护核心是“保护功率器件+隔离交直流侧故障”，直流侧熔断器用于阻断电池侧故障向 PCS 及电网传递，交流侧熔断器用于阻断电网侧故障向 PCS 及电池侧传递，实现“故障隔离”，保障电网与电池系统的独立安全

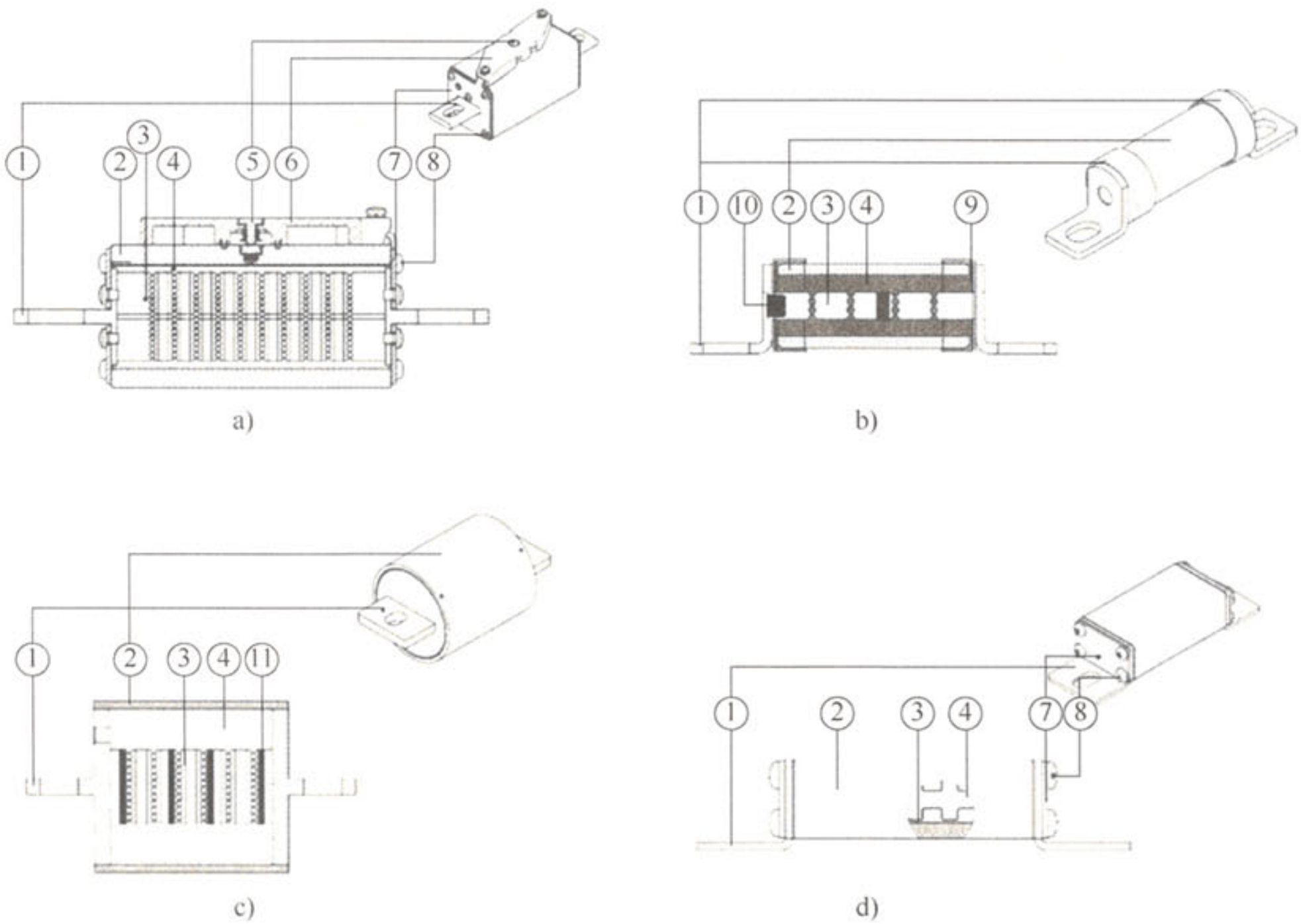


图 12-2　行业内常见的熔断器结构

a）陶瓷方管　b）陶瓷圆管　c）玻纤圆管　d）陶瓷矩形管

2）管体：防止熔断体分断时产生的热的气体和液化的金属喷到周围的环境中。一般使用陶瓷、玻璃纤维布作为管体材料。

3）熔体：熔断器核心零件，一般为银、铜等高导电金属。用于储能系统的熔断器一般要求具备较高的分断能力，其熔体结构一般采用变截面设计。熔体对熔断体的时间-电流特性起决定性作用，并决定了熔断体的温升。对于全范围保护熔断器，通常在熔体上焊接低熔点金属作为“M”效应点。

4）填料：一般采用高纯度石英砂，填充于管体内部和熔体的周围，用于传热和熔断体分断时做灭弧介质。当熔体熔化蒸发时，形成炽热的游离金属蒸气和质点，并迅速地扩散到石英砂填料的间隙中，与石英砂颗粒表面接触，使得炽热的金属蒸气迅速凝结，游离质点和金属蒸气急剧减少，于是加速了电弧的熄灭。

5）指示器：一般由指示零件、弹簧和金属丝组成。初始状态为弹簧处于压缩状态，并被金属丝绑住固定，金属丝两端分别与熔断器的两个触刀相连并固定。当熔断器因过载或短路熔断时，金属丝也会在电流作用下熔化断开，此时弹簧弹力得到释放，将指示零件顶起，起到熔断器断开指示的作用。此类型指示器主要用于陶瓷方管产品上。

6）支撑架：通过紧固螺钉固定于管体表面，用于安置微动开关。微动开关主要用于熔断器断开后的远程信号通信。

7）盖板：常用的有不锈钢、铝制金属盖板，也有少部分采用绝缘材料作为盖板，用于密封管体两端和固定触刀。

8）螺钉：用于连接固定盖板和管体，也用于连接固定触刀和盖板。

9）内端盖：一般用于陶瓷圆管结构的熔断器，紧固于陶瓷管两端，用于熔断器熔体和端电极的过渡连接。

10）塞子：多为金属塞，用于熔断器灌砂后的管体密封。熔断器一般在两端或其中一端的盖板和触刀上设置有灌砂孔，当灌砂完成后使用塞子进行密封。

11）灭弧胶：部分熔断器为了提高熔断器的分断能力、缩短飞弧时间，会在熔断器熔体的两侧或单侧设置灭弧胶，用于熔断器分断过程中的产气灭弧。

12.1.3　电化学储能用低压熔断器标准

12.1.3.1　低压熔断器分类概述

熔断器根据其产品结构、外形、管体材质、分断能力的保护范围和被保护对象等，具有多种分类方式。由于被保护对象的性能要求差异性，在 IEC 60269 系列标准中，多按被保护对象进行分类，如半导体设备保护用熔断体、太阳能光伏系统保护用熔断体、电池和电池系统保护用熔断体等。近几年，电化学储能系统保护用的熔断器选择均借鉴半导体设备保护用熔断体，产品安规认证也基本参照 GB/T 13539.4—2015《低压熔断器　第 4 部分：半导体设备保护用熔断体的补充要求》进行认证。

12.1.3.2　电化学储能用低压熔断器标准概述

实际上，电化学储能系统的保护特性与半导体设备的保护特性存在一定的差异，完全借鉴半导体设备保护用熔断体的要求并不合理。因此，IEC SC32B 组织 IEC 各成员国专家起草编制了 IEC 60269-7 *Low-voltage fuses-Part 7: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of batteries and battery systems*，并于 2021 年 12 月 15 日发布。全国熔断器标准化技术委员会（SAC/TC 340）也结合我国产业情况，组织了国内标委会专家对 IEC 60269-7:2021 进行了研究，并于 2024-04-25 发布了 GB/T 13539.7—2024《低压熔断器　第 7 部分：电池和电池系统保护用熔断体的补充要求》，进一步规范了保护电池能源系统的熔断体的特性及试验的补充要求。

GB/T 13539.7—2024 标准规定了电池和电池系统保护用熔断体的各项参数要求，如额定电压、额定电流、额定耗散功率、时间-电流特性、分断范围和使用类别、标识要求和型式试验要求等。其中需注意的是，标准不仅适用于标称电压不超过直流 1500V 的电路中的储电设备用熔断体，也适用于额定电压高于直流 1500V 的场景。目前大规模应用的储能系统常用电压为直流 1500V，亦有多家电池储能领域的厂商也在研发直流 2000V 的系统，标准的此规定为熔断器在更高电压的电池储能系统中的应用创造了标准基础。

对于电池和电池系统的过电流保护，UL 也于 2025 年 10 月 1 日颁布了第一

版关于电池和电池系统保护用熔断器的标准（UL 248-21 *Low-Voltage Fuses-Part 21: Fuses for the Protection of Batteries and Battery Systems*），标准针对熔断器额定电压、分断能力、标志、熔断特性等做了明确要求。

适用于电池储能系统用熔断器的安规认证标准 GB/T 13539.4—2016 标准与 GB/T 13539.7—2024 标准，UL 248-21 标准主要差异见表 12-1。

表 12-1　GB/T 13539.4—2016 标准、GB/T 13539.7—2024 标准和 UL 248-21 标准的主要差异

项目	GB/T 13539.4—2016	GB/T 13539.7—2024	UL 248-21
额定电压	≤AC 1000V ≤DC 1500V，允许更高的额定电压，但未明确电压限值	≤DC 1500V，允许更高的额定电压，但未明确电压限值	≤DC 2000V，明确限定最高电压为 DC 2000V
产品使用类别	gR，aR，gS	gBat，aBat	gBat，aBat
本体标识要求			
	IEC 60417 中所示的熔断器（5016）和整流器（5186）标志的组合	IEC 60417 中所示的熔断器（5016）和电池（5001A）标志的组合	标志是否在产品本体上体现为可选
温升与载流测试	不超过制造厂规定的值	不超过制造厂规定的值	触刀温升不超过 130℃
过载测试	针对 gR： 当 $I_n \leqslant 4A$ 时，$I_{nf} = 1.1I_n$，$I_f = 2.1I_n$ 当 $4A < I_n \leqslant 16A$ 时，$I_{nf} = 1.1I_n$，$I_f = 1.9I_n$ 当 $I_n > 16A$ 时，$I_{nf} = 1.1I_n$，$I_f = 1.6I_n$ 其中，I_{nf} 为约定不熔断电流符号，I_f 为约定熔断电流符号	针对 gBat： 所有熔断器规格的约定不熔断电流 I_{nf} 为 $1.13I_n$，约定熔断电流 I_f 为 $1.6I_n$	针对 gBat： 测试 1：当 $I_n \leqslant 600A$ 时，需测试 $1.35I_n$ 测试 2：当 $I_n \geqslant 600A$ 时，需测试 $1.5I_n$ 测试 3：当 $I_n \leqslant 600A$ 时，需测试 $2I_n$
分断能力要求	额定分断能力： 直流：≥20kA 交流：≥50kA 直流对应时间常数： 预期试验电流超过 20kA：10~15ms 预期试验电流 I 不超过 20kA：$0.5(I)^{0.3}$ms，允差 $^{+20}_{0}$%（I 以 A 为单位）	额定分断能力： 直流：≥30kA 交流：不涉及 直流对应时间常数：1~3ms 最小分断能力： gBat：$2I_n$ aBat：由制造规定的值或 $10I_n$ 中的小者	额定分断能力： 直流：≥10kA（≤DC 250V 时），≥30kA（>DC 250V 时） 直流对应时间常数： 1~3ms，当测试电流≤100kA ≥3ms，当测试电流>100kA 最小分断能力： gBat：$2I_n$，时间常数≤1ms； aBat：$\leqslant 4I_n$（≤DC 250V 时） $\leqslant 10I_n$（>DC 250V 时）

12.1.3.3　低压熔断器的一些重要术语

为便于熔断器选型与理解，从 GB/T 13539.1—2015（等同采用 IEC 60269-1）标准中摘录如下重要术语：

额定电压（Rated Voltage，U_n）：熔断器可以使用的最大安全开断电压（允许的最大工作电压）；

额定电流（Rated Current，I_n）：标准规定的条件下能长时间承载而不使性能降低的电流。

弧前时间（熔化时间）（Pre-arcing Time(Melting Time)）：从一个足够分断熔体的电流出现至电弧产生的瞬间之间的时间间隔。

燃弧时间（Arcing Time）：熔断器中电弧产生的瞬间至电弧最终熄灭之间的时间间隔。

熔断时间（Operating Time）：弧前时间和燃弧时间之和。

分断能力（Breaking Capacity/Interrupting Capacity）：在规定的使用和性能条件下，熔断器在规定电压下能够分断的预期电流值。

焦耳积分（Joule Integral）：在给定时间间隔内电流平方的积分：$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 \mathrm{d}t$。弧前 I^2t 是熔断器弧前时间内的 I^2t 积分，熔断 I^2t 是熔断器熔断时间内的 I^2t 积分。

12.1.4　电池储能系统用低压熔断器的核心参数选型

电池储能系统用低压熔断器的核心参数选型如下：

12.1.4.1　额定电压选型

需确保熔断器的额定电压不低于被保护的电池储能系统各级设备的系统电压，如电池包保护用熔断器额定电压高于电池包的系统电压，高压盒（电池簇）保护用的熔断器额定电压要高于高压盒的系统电压。如果熔断器的额定电压低于电池储能系统的电压，则在电池储能系统出现短路故障时，熔断器可能出现无法安全分断的现象。

需注意的是，针对北美市场的应用，其要求与中国、欧盟等的要求不一样。美规 UL 1973:2022 STANDARD FOR SAFETY，*Batteries for Use in Stationary and Motive Auxiliary Power Applications* 第 7.9.11 条款规定“用于在电池系统中进行串联连接的电池模组的保护元件，其额定电压应与目标电池系统的最大电压相匹配”，即电池包保护用熔断器的额定电压应不低于高压盒的系统电压。

12.1.4.2　额定电流选型

熔断器的额定电流是指它的标称电流，即在标准环境条件下，熔断器能够长期稳定工作而不发生熔断的最大电流值。但为避免熔断器在高于 25℃ 等条件

下运行时出现误熔断情况，其额定电流通常需要降额使用。熔断器额定电流的选定可参考如下公式：

$$I_n \geqslant k_0 I_{rms} / (k_1 k_2 k_3 k_4 k_5)$$

式中，I_{rms}为系统经过熔断器的稳态工作电流；k_0 为可靠系数（此系数在不同熔断器制造商间的叫法存在差异），为保证可长期工作，该系数是考虑到储能工况存在脉动循环等电流波动负载的修正系数，实际应用时，流过熔断器的工作电流幅值通常都是变化的，常常伴有过载、浪涌冲击或是负荷电流中断等周期性负载的影响，通称此类工况为“循环负载”（储能系统一般推荐取值1.2）；k_1 为环境温度降额系数；k_2 为连接导体降额系数；k_3 为风冷修正系数，风速为0时取1；k_4 为海拔降额系数；k_5 为封闭环境修正系数，对于散热条件较好的箱体取0.9 ~ 0.95，对于较差的取0.8，如果实测得到熔断器周边微环境长期工作期间的最高温度，并引用该温度按环境温度降额系数修正的，则该系数可取1。

1. 环境温度降额系数 k_1

它的值随环境温度升高而下降，对应的曲线与熔断器类型、熔体材质等相关，各个制造商的环境温度降额系数可能存在差异，故具体需以制造商提供的曲线为准。环境温度降额系数曲线如图12-3所示。

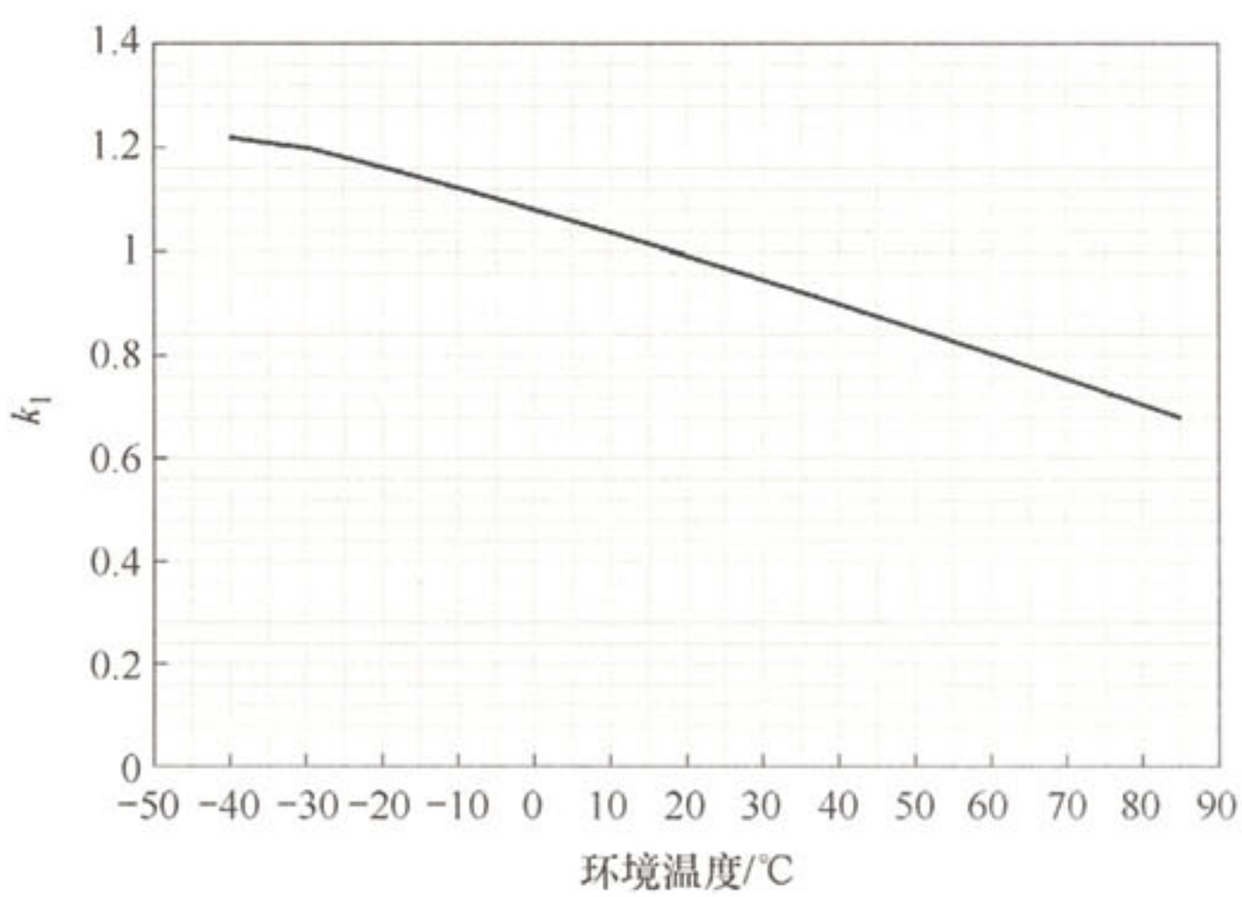


图 12-3　环境温度降额系数曲线

2. 连接导体降额系数 k_2

安装熔断器的铜排电流密度建议按1.3A/mm^2 设计，如果铜排的承载电流密度>1.3A/mm^2 数值，则建议熔断器适当降低额定电流。

电气设计中，箱体内的导体电流密度一般推荐设计为≤2.5A/mm^2，否则容易出现温度偏高、绝缘老化等问题。连接导体降额系数曲线如图12-4所示。

3. 海拔降额系数 k_4

高海拔地区的环境条件，如气压低、空气密度小、温度变化大等，会对熔断器的性能产生一定影响。因此，熔断器在高海拔地区的使用必须遵循一定的降额规则，以确保其正常工作并避免潜在的安全隐患。IEEE C37.41—2016 高压熔断器和开关针对海拔降额系数的规定如下，储能系统用熔断器可借鉴参考，见表 12-2。

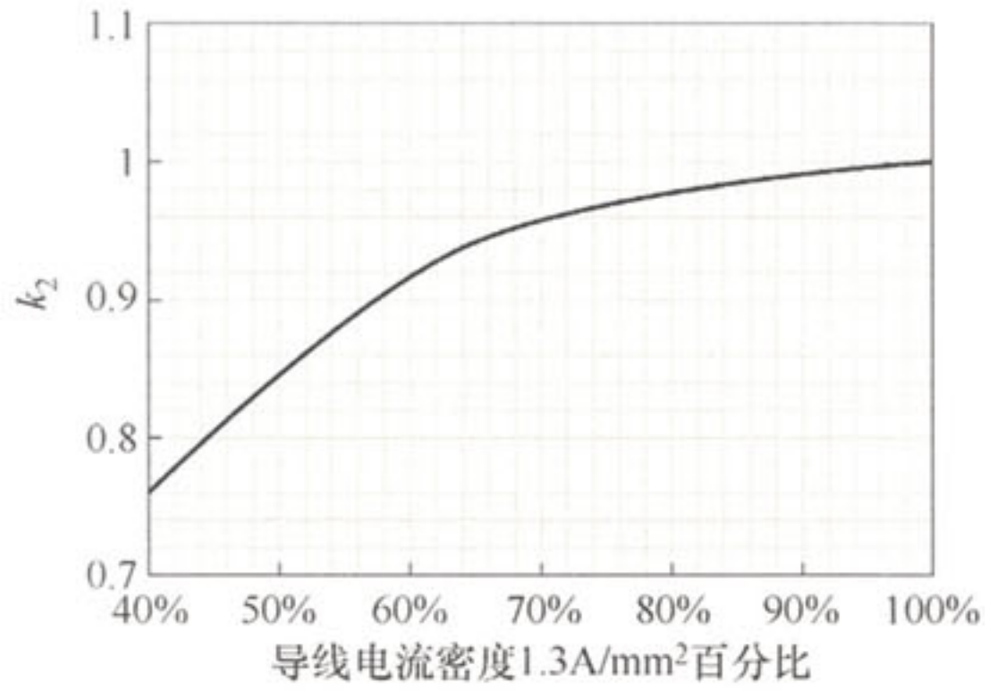


图 12-4　连接导体降额系数曲线

表 12-2　海拔降额系数

海拔/m	额定电流修正系数	海拔/m	额定电流修正系数
1000	1.00	3000	0.96
1500	0.99	3600	0.95
2100	0.98	4300	0.93
2400	0.97	4900	0.92
2700	0.96		

12.1.4.3　故障电流选型

熔断时间曲线（时间/电流特性）是熔断器最主要的电性能指标，表明熔断器在不同过载电流负载下熔断的时间范围。该曲线很好地描述了熔断器的过载能力。

判定熔断器在故障电流下的保护效果可通过如下两个步骤确认：

1）测定电路中流经熔断器的故障电流大小。

2）比较故障电流状态和熔断器的时间电流特性曲线，根据断开时间要求，选择合适的熔断器额定电流规格（见图 12-5）。

在熔断器故障保护时效满足的情况下，可适当选较大电流规格的熔断器，提升熔断器的使用寿命。

需注意的是，熔断器的熔断特性有两类，即全范围保护熔断器（g 型）和部分范围保护熔断器（a 型），在使用时需注意如下问题：

1）“g”的含义为“全范围”，意味着熔断器可以分断从最小熔化电流直至其分断能力的所有过电流。全范围熔断器可作为单独的保护器件。

2）“a”的含义为“局部范围”或“后备型”，意味着该熔断器只能够分断其额定电流数倍的高电流，部分范围分断能力熔断体设计成只能用于短路保护，因此可与其他提供过电流保护的器件的组合使用，也常用作其他有较低分断能力的开关器件，如接触器、断路器和融合开关等。

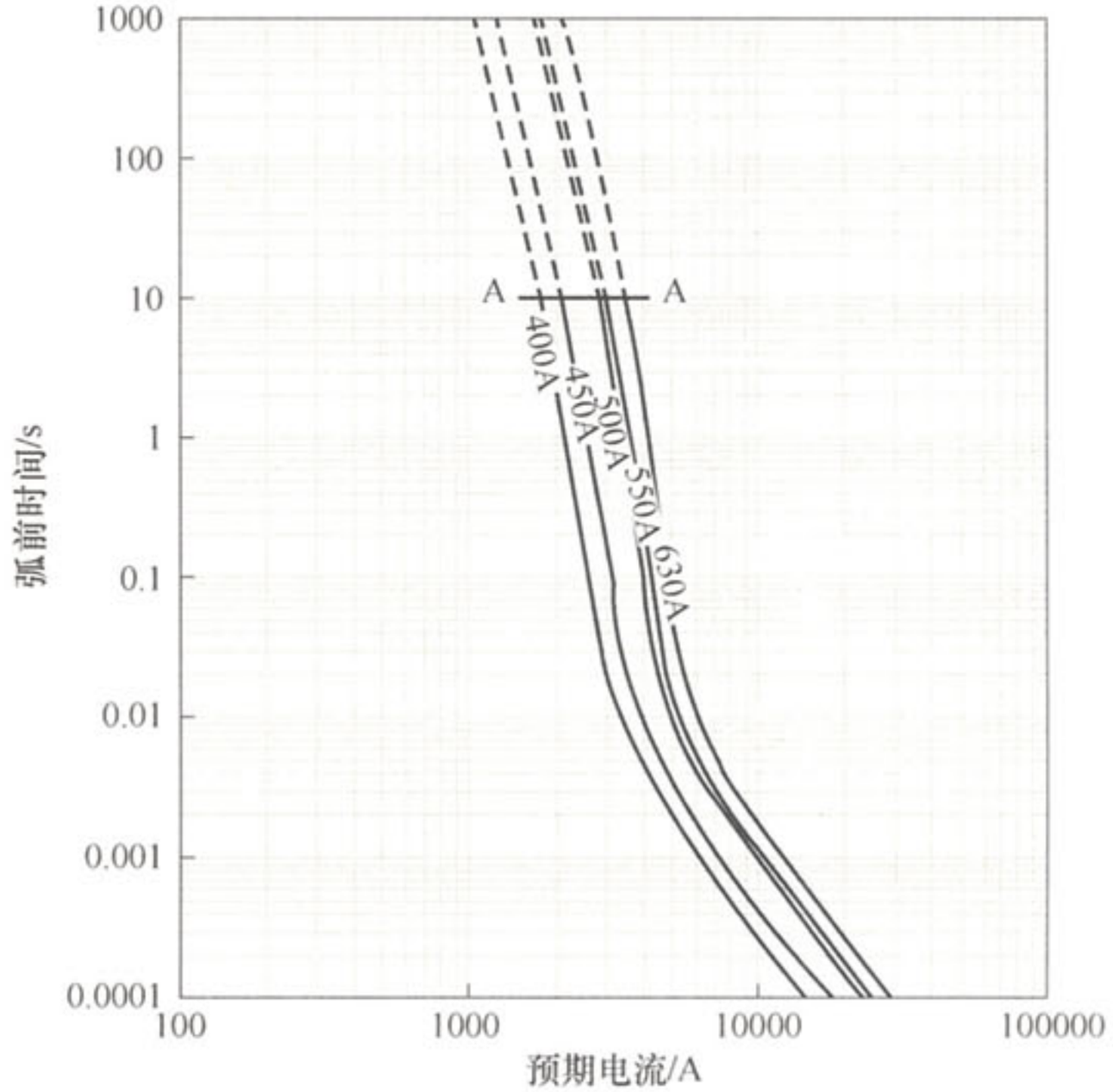


图 12-5　时间电流特性曲线示例

12.1.4.4　分断能力选型

分断能力是熔断器最主要的安全指标之一，表明在规定的电压下，熔断器能安全切断的最大电流。

安全分断的条件如下：

1）标称分断电压≥被保护系统单元的工作电压。

2）标称额定分断电流≥被保护系统单元可能出现的故障电流≥标称最小分断电流。

当实际分断能量大于熔断器的安全分断能力时，可能出现熔断器炸开、壳体飞溅、持续燃弧等不安全现象。

熔断器的分断能力还需注意以下问题：

1）对于直流系统而言，时间常数对熔断器分断能力也有一定的影响，需确保直流系统的时间常数与熔断器的时间常数匹配，即电池储能系统的时间常数≤熔断器的时间常数。

2）对于交流系统而言，功率因数对熔断器分断能力也有一定的影响，需确保交流系统的功率因数与熔断器的功率因数匹配，即系统功率因数≥熔断器的功率因数。

3）对于 GB/T 13539 系列标准对应熔断器，aR/gR 类半导体熔断器，其直流分断的时间常数一般在 10～15ms；aBat/gBat 类的电池储能熔断器，其直流分断的时间常数在 1～3ms。

4）对于并联的系统而言，汇流处的熔断器的额定分断能力需要大于并联系统并联后形成的最大分断电流。

12.1.4.5　上下级熔断器的 I^2t 匹配问题

为确保储能系统维修的便捷性，一般会要求短路故障时，高压盒保护用的熔断器优先于电池包保护用熔断器断开，即高压盒保护用熔断器的总熔断 I^2t 小于电池包保护用熔断器的弧前 I^2t。进一步优化要求为：高压盒保护用熔断器的总熔断 1.1 倍 I^2t 小于电池包保护用熔断器的弧前 I^2t，表示高压盒保护用熔断器断开后，电池包保护用的熔断器的熔体尚未出现明显的损伤。必要时，需将高压盒保护用熔断器与多个电池包保护用的熔断器串联后在系统电压下做短路测试，电池包保护用熔断器串联的数量取决于电池簇内的电池包数量，要求测试后高压盒保护用熔断器能够安全分断，而电池包保护用熔断器不发生熔断，电阻变化率不超过 10%。随后对剩余串联的电池包保护用熔断器进行系统电压下的短路测试，要求串联的所有电池包用熔断器均能安全分断。高压盒（电池簇）和电池包保护用熔断器的电路连接示意图如图 12-6 所示。

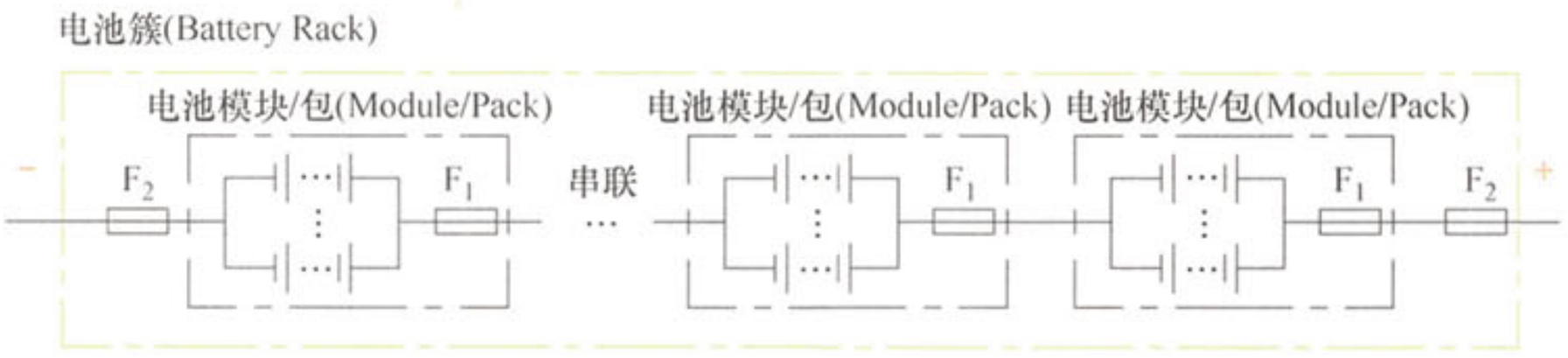


图 12-6　高压盒和电池包保护用熔断器的电路连接示意图

需特别注意的是：除储能系统内熔断器之间需做相互匹配外，还需考虑熔断器与接触器、开关之间的匹配关系。

12.1.5　电化学储能系统中低压熔断器的应用

12.1.5.1　电化学储能系统中低压熔断器的应用案例

以某厂商的 215kWh 工商业液冷储能电池一体柜为例，其系统参数见表 12-3。

表 12-3　某厂商的 215kWh 工商业液冷储能电池一体柜系统参数

项目	参数信息	备注
电池类型	磷酸铁锂	
辅助电源	AC 220V，50Hz	
电芯规格	3.2V/280Ah	
最大充放电功率	0.5P	P 为额定充放电功率
额定能量	215kWh	

（续）

项目	参数信息	备注
额定电压	768V	
电压范围	DC 672~864V	
冷却方式	液冷	
交流侧参数		
额定交流功率	100kW	
额定电压	AC 400V	
交流侧接线方式	三相三线	
额定频率	50Hz	
总电流波形畸变率	< 3%	
冷却方式	智能强制风冷	
系统参数		
环境温度	-20~50℃	
环境湿度	≤95%RH	无凝露
海拔	≤2000m	
防护等级	IP54	

根据 12.1.4 节的说明，此液冷储能系统保护用熔断器选型关键参数可按如下步骤确认：

1）高压盒保护用熔断器额定电压的确定。

高压盒的额定电压范围为 DC 672~864V，其对应熔断器额定电压应大于 DC 864V，按电压等级，可选 DC 1000V 的熔断器；

2）高压盒保护用熔断器额定电流的确定。

$$I_n \geqslant k_0 I_{rms} / (k_1 k_2 k_3 k_4 k_5)$$

$$I_n \geqslant 1.2 \times 140\text{A} \div (0.84 \times 0.92 \times 1 \times 0.98 \times 0.92) \approx 241.1\text{A}$$

式中，$k_0 = 1.2$；$I_{rms} = 280\text{A} \times 0.5 = 140\text{A}$；$k_1$ 取 0.84，为 50℃ 环境温度对应的降额系数；k_2 取 0.92，基于高压盒内熔断器连接铜排电流密度为 2.17A/mm^2 确定；k_3 取 1；k_4 取 0.98，为海拔 2000m 对应的降额系数；k_5 取 0.92，为安装条件对熔断器散热影响的降额系数。

综上，熔断器的额定电流应≥241A，查询某熔断器制造商储能系统用 DC 1000V 熔断器的技术参数，见表 12-4，根据熔断器额定电流的常用规格可知，此时高压盒保护用熔断器的额定电流可优先选 250A 规格或 315A 规格。

表 12-4　某熔断器制造商储能系统用 DC 1000V 熔断器的技术参数表

型号	额定电流 I_n/A	额定电压 U_n/V	分断能力 I_1/kA	弧前 I^2t/ $A^2 \cdot s$	熔断 I^2t/ $A^2 \cdot s$	功耗/W	CCC	TUV	CE	RoHS REACH 无铅
LFR01-50A10-BB/FB/BT/FE	50	1000	50	350	1650	14	·	·	·	·
LFR01-63A10-BB/FB/BT/FE	63	1000	50	968	4550	15	·	·	·	·
LFR01-80A10-BB/FB/BT/FE	80	1000	50	1400	6549	24	·	·	·	·
LFR01-100A10-BB/FB/BT/FE	100	1000	50	1900	8900	25	·	·	·	·
LFR01-125A10-BB/FB/BT/FE	125	1000	50	3850	18200	32	·	·	·	·
LFR01-160A10-BB/FB/BT/FE	160	1000	50	5550	26200	40	·	·	·	·
LFR01-200A10-BB/FB/BT/FE	200	1000	50	9900	46600	52	·	·	·	·
LFR01-250A10-BB/FB/BT/FE	250	1000	50	15400	72800	70	·	·	·	·
LFR01-315A10-BB/FB/BT/FE	315	1000	50	31100	146400	80	·	·	·	·
LFR01-350A10-BB/FB/BT/FE	350	1000	50	41500	195000	90	·	·	·	·
LFR01-400A10-BB/FB/BT/FE	400	1000	50	56000	165000	95	·	·	·	·
LFR01-450A08-BB/FB/BT/FE	450	800	50	75500	295000	100	·	·	·	·

注：“·”表示已取得认证或 RoHS、REACH、无铅符合要求。

已知该储能系统由 4 个电池包串联而成，每个电池包的电压范围为 DC 168~216V。此时，电池包内的熔断器额定电压应>DC 216V，可选 DC 250V 的规格。结合 12.1.4.5 节上下级熔断器的 I^2t 匹配问题可知，当高压盒保护用熔断器选用 DC 1000V，250A 规格时，其对应的熔断 $I^2t=72800A^2 \cdot s$，相应的电池包保护用熔断器的弧前 I^2t 应大于 $80080A^2 \cdot s$。查看某熔断器制造商的 DC 250V 储能系统用熔断器的技术参数可知（见表 12-5），此时电池包保护用的熔断器的额定电流应选 315A 或 350A 规格。相应地，当高压盒选用的是 DC 1000V，315A 的规格时，电池包保护用熔断器应选用 DC 250V，400A 的规格。

需注意的是，不同熔断器制造商在熔断器的设计和制造上均会有一定的差异，即不同制造商生产的相同额定电压和额定电流的熔断器，其尺寸、材料和 I^2t 特性等方面可能存在差异，在技术参数选型时，需具体结合制造商提供的技术参数表进行选型匹配。

表 12-5　某熔断器制造商储能系统用 DC 250V 熔断器的技术参数表

型号	额定电流 I_n/A	额定电压 U_n/V	分断能力 I_1/kA	弧前 I^2t/ $A^2 \cdot s$	熔断 I^2t/ $A^2 \cdot s$	功耗/W	TUV	RoHS REACH 无铅
LFR1-200A02-BB	200	250	50	28000	64000	25	·	·
LFR1-250A02-BB	250	250	50	43500	100000	30	·	·

（续）

型号	额定电流 I_n/A	额定电压 U_n/V	分断能力 I_1/kA	弧前 I^2t/ $A^2 \cdot s$	熔断 I^2t/ $A^2 \cdot s$	功耗/W	TUV	RoHS REACH 无铅
LFR1-315A02-BB	315	250	50	98000	225000	32	·	·
LFR1-350A02-BB	350	250	50	141000	324000	35	·	·
LFR1-400A02-BB	400	250	50	175000	400000	38	·	·
LFR1-450A02-BB	450	250	50	252000	576000	40	·	·
LFR1-500A02-BB	500	250	50	273000	625000	45	·	·
LFR1-550A02-BB	550	250	50	393700	900000	50	·	·
LFR1-630A02-BB	630	250	50	535900	1225000	55	·	·
LFR1-800A02-BB	800	250	50	567000	1296000	95	·	·

注：1. “·”表示已取得认证或 RoHS、REACH、无铅符合要求。

2. 推荐安装方式：采用 M10 螺栓、螺母安装，推荐扭矩为 21N·m。

12.1.5.2 低压熔断器用于电化学储能系统直流侧保护策略设计

长期以来，“接触器+熔断器”是电池储能系统用于故障隔离的主流保护方案：接触器作为主保护、熔断器作为后备保护，但接触器带载分断能力弱、不能频繁带载分合，运行中容易产生电弧、发生触头粘连，且动作响应速度慢；带载分断时产生的电弧及过电压将严重影响接触器的寿命。作为后备保护的熔断器，属于被动保护，保护动作存在滞后。2025 年，施耐德和海博思创两大公司联合发布的《全域保护——消除电池储能系统直流保护盲区》白皮书指出：“接触器+熔断器”方案存在保护盲区，导致熔断器可能出现因长时间燃弧但无法熄弧导致烧毁、干烧过热炸裂，甚至导致高压箱箱体损坏严重的现象。即使进一步融入高倍率短路保护开关组成多级保护回路，也仍存在保护盲区。白皮书进一步给出了能够实现全域保护，系统性地消除电池直流保护的盲区的两种方案，如表 12-6 和图 12-7 所示。

表 12-6 元器件保护范围总结

元器件	方案一	方案二	方案三	方案四
	接触器+熔断器	接触器+高倍率短路保护开关+熔断器	接触器+融合开关+熔断器	接触器+低倍率短路保护开关+熔断器
接触器	√	√	√	√
熔断器	√	√	√	√
高倍率短路保护开关	×	√	×	×
融合开关	×	×	√	×

（续）

元器件		方案一	方案二	方案三	方案四
		接触器+熔断器	接触器+高倍率短路保护开关+熔断器	接触器+融合开关+熔断器	接触器+低倍率短路保护开关+熔断器
低倍率短路保护开关		×	×	×	√
保护实现	主动保护	BMS+接触器	BMS+接触器	BMS+接触器+融合开关	BMS+接触器 BMS+MX（分励脱扣器）
	被动保护	熔断器	倍率短路保护开关+熔断器	熔断器	低倍率短路保护开关+熔断器
保护盲区		大	小	无	无

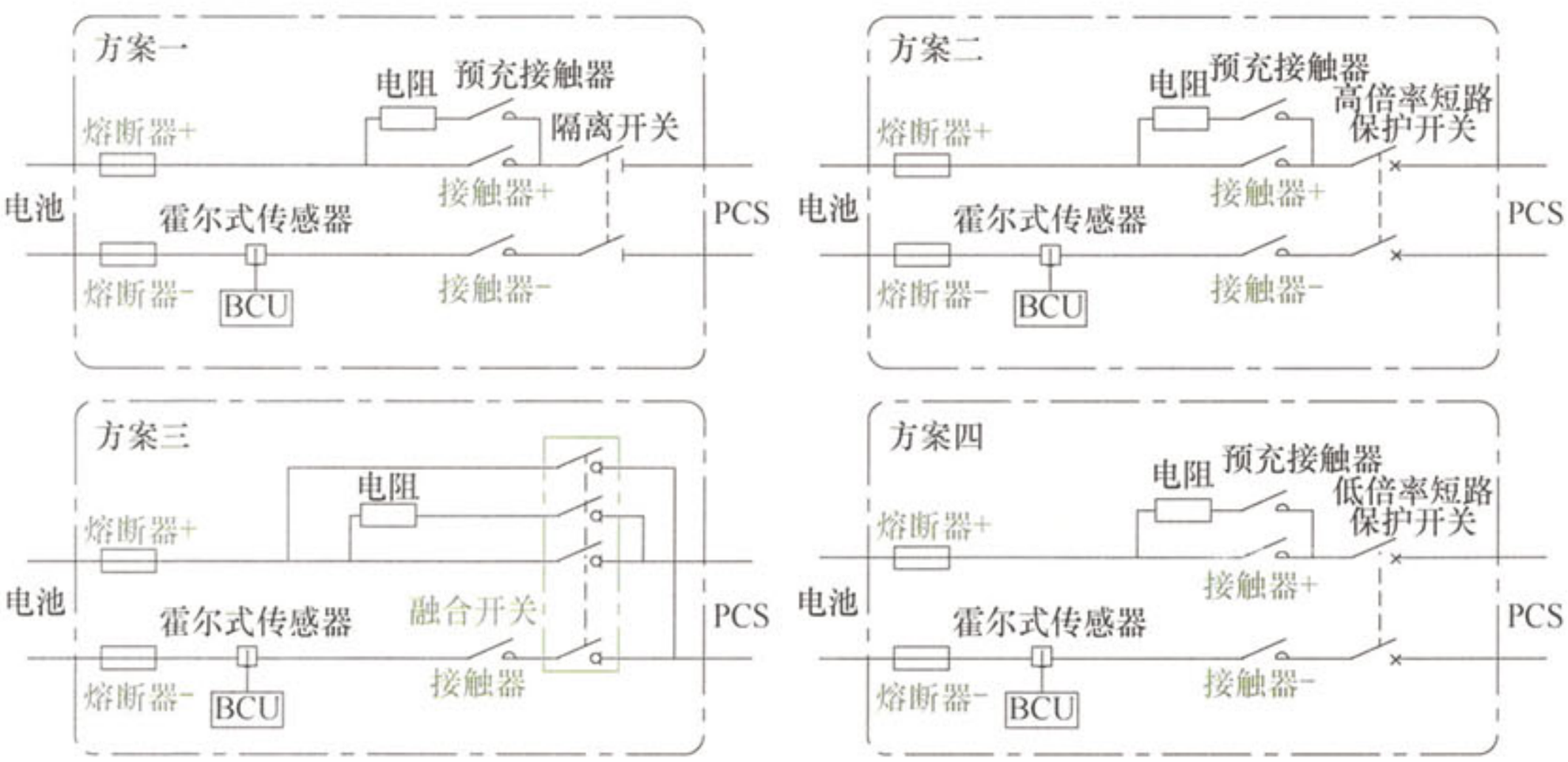


图 12-7　表 12-6 中四种方案的电池柜高压箱电气拓扑图

白皮书还以 314Ah 电芯、0.5C 充放电倍率、额定电流 157A 的电池回路为例，对方案三和方案四的元器件在不同工况下的保护区域范围进行了验证（见图 12-8），证明方案可满足系统正常运行的需求。但随着电池的电芯容量升高，面对逐渐走向市场的 600Ah 甚至更大容量电芯，原有方案的保护盲区进一步放大，对保护方案提出了更为严苛的要求，上述推荐方案仍面临挑战：

1）在更大容量的电池发生短路故障时，故障能量会随电流的二次方迅速增大。根据焦耳定律，在电阻一定的情况下，故障产生的热量（可近似看作能量）与电流的二次方成正比。因此，故障瞬间迅速切断电路、限制故障电流持续时间、降低电芯能量冲击，成为保护方案的关键考量。

2）传统高倍率短路保护开关的热保护功能不足，其阻抗大会使自身发热加剧，可能会因为自身温升与环境温度叠加，导致内部元器件性能发生变化，甚

至出现无动作的情况。此外，其保护时间较长，无法及时有效地对电芯故障做出响应，使得电芯在故障状态下长时间承受异常电流，增加了电芯损坏的风险。

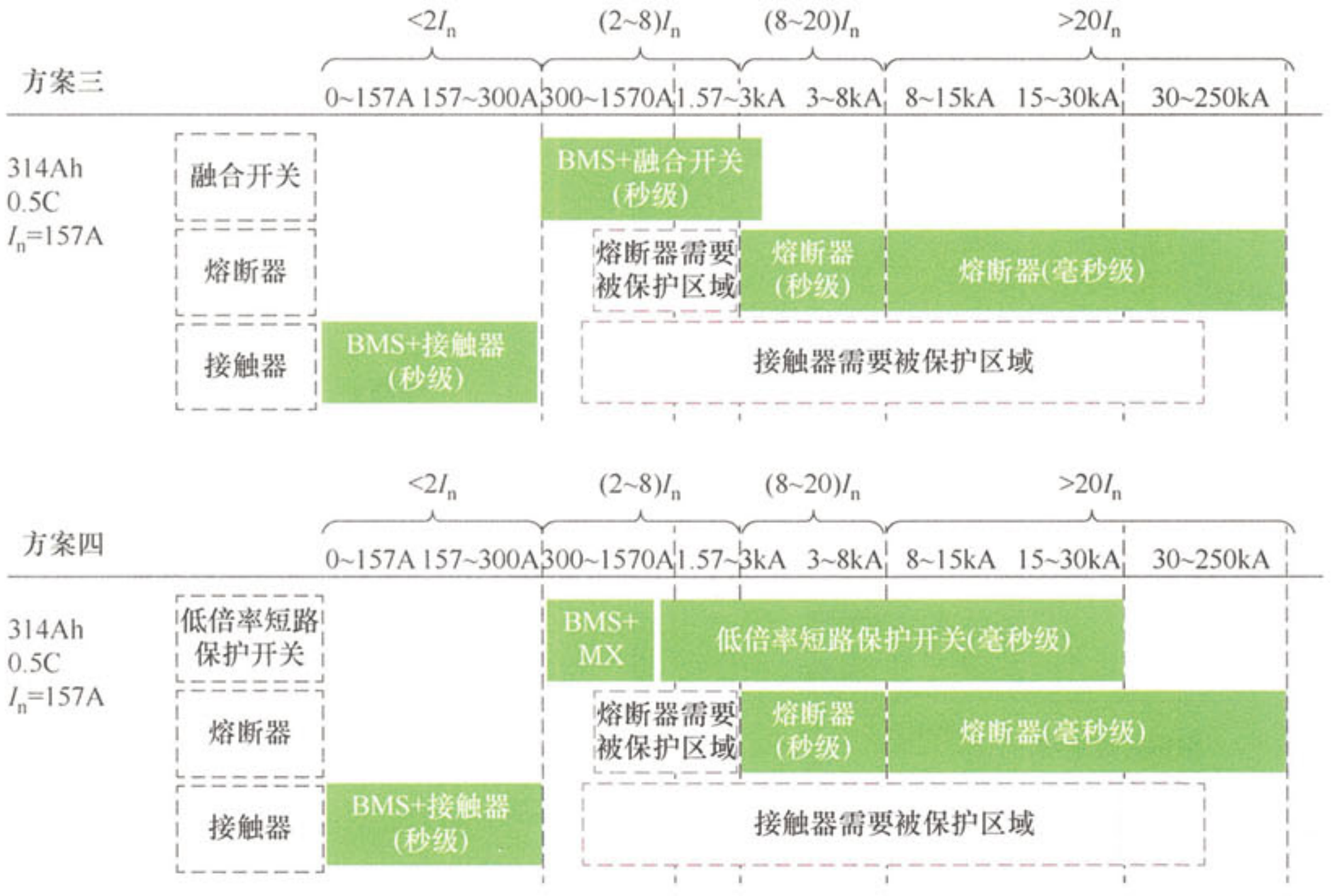


图 12-8　表 12-6 中方案三、四保护范围举例

12.1.6　储能系统用低压熔断器的发展趋势

电池储能系统一直往更低成本、更加安全和更加智能的方向发展。相应地，也对熔断器提出了类似的要求。

1. 趋势一：更高电压和更大容量的熔断器

为进一步突破光伏和储能行业降本增效的瓶颈，实现电站经济性大幅提升，从系统级创新来看，提高电池串接数量、提升系统电压是一种有效途径，如储能电站系统电压从现有的 1500V 向 2000V 发展。2000V 系统相比于传统 1500V 系统，在光伏发电效率上提升了 0.5%~1%，在储能系统效率上提升了 0.4%~0.7%，显著优化了能源利用率。储能系统电压平台的高压化，熔断器的耐压等级也需随之提升，向 2000V 甚至更高电压发展是一个必然趋势。目前已有多家熔断器制造商在跟进开发，已有业界领先的熔断器厂商开发了 2000V 系统用的储能熔断器。

系统降本的另外一种方式为并联更多电池簇或提升电芯容量，进一步提高系统的能量，5MWh 及以上储能系统的直流侧的工作电流和短路电流也进一步增大，现有单颗额定电流为 3000A 的熔断器已不能满足系统要求，需开发 4000A

甚至更大额定电流的熔断器。GB/T 42288—2022《电化学储能电站安全规程》也提到采用直流熔断器作为直流侧保护开断设备时，有必要提升其额定电流。

2. 趋势二：具有更低分断能力的熔断器

GB/T 13539.7—2024（等同采用 IEC 60269-7）《低压熔断器　第 7 部分：电池和电池系统保护用熔断体的补充要求》对 gBat 型的熔断器有明确的最小分断能力要求，即在额定电压下的最小分断能力需满足 $2I_n$（2 倍额定电流）下能安全分断。

电池储能场景的故障具有一定的特殊性。故障电流除了“极端短路”这一种形式，大量“低倍数过载或轻微短路”场景若无法被可靠分断，可能引发电池热失控、系统烧毁等严重风险。极端情况下，某些故障过载电流会低于 2 倍熔断器额定电流，此种情况下，熔断器可能会出现不安全分断的问题，因此部分储能系统制造商对熔断器的低倍分断能力有更高的要求，如在额定电压下，1.45 倍额定电流下也需能安全分断。这给传统低压熔断器带来更多挑战和机遇，需要更多的创新。

3. 趋势三：集成化和智能化

（1）熔断器和接触器的集成

在储能系统中，熔断器与接触器的集成是提升系统可靠性、紧凑性和保护协同性的重要方案。这种集成并非简单的物理组合，而是通过功能匹配、参数协同和结构优化，实现 控制-保护一体化，尤其适配储能系统高安全、高集成的需求。熔断器与接触器的集成后减少了独立安装的空间占用（比分离式节省 30%~50%安装体积），适配储能柜、电池包等紧凑场景；缩短两者间的连接导线，降低导线阻抗和温升风险（尤其大电流场景，如储能系统的电池簇主回路）。集成后通过参数匹配和动作配合实现接触器正常分断与熔断器故障分断的无冲突配合，避免保护误动作或控制失效。

（2）熔断器和手动维护开关（MSD）的集成

熔断器和 MSD 的集成通常将熔断器设置在 MSD 的内部容置腔内，使熔断器与 MSD 的导电件依次电连接。此集成不仅能够增强安全防护、提高空间利用率，还简化了电路设计。在一些设计中，熔断器电连接于 MSD 的两个第一导电件之间，通过手动将 MSD 的插头与插座相分离，能够在切断电路回路的同时暴露容置腔内的熔断器，便于操作人员在不拆解电池包的情况下对熔断器进行检修、更换。

（3）主动切断与被动熔断的集成

集主动切断与被动熔断为一体的熔断器，也称双触发激励熔断器（Pyro Fuse）。其被动熔断功能与传统熔断器相同，当电路出现过载或短路电流时，熔断器内部的熔体因大电流在熔体狭颈急剧发热达到熔体材料的熔点而熔断，从

而切断电路。而主动切断主要是通过内置的检测装置实时检测电路的运行状态，如电压、电流等参数。当检测到异常信号时，点火器在毫秒级内动作，在导体尚未熔断或在熔断过程中，提前切断电路，降低设备损坏风险，即使没有外部指令，也能自动切断回路。

此类 Pyro Fuse 最早为电动汽车（EV）电池包过载和短路保护而开发，目前其电压多为 1000V，随着电池储能系统安全性要求的提高，此类产品也渐渐获得储能系统制造商的关注，已有多家储能系统制造商正与熔断器制造商联合开发适用于 1500V 甚至更高电压的储能系统保护用的双触发 Pyro Fuse。

12.2 家庭储能系统二次保护用受控熔断器

12.2.1 家庭储能系统二次保护需求概述

家庭储能在充放电过程中可能因过充、短路、高温等故障引发热失控风险。美规 UL1973:2022 STANDARD FOR SAFETY, *Batteries for Use in Stationary and Motive Auxiliary Power Applications* 第 7.9.1 条款规定“关键安全防护不得依赖于主动保护装置，应符合以下条件（a）~（c）之一，（a）配置冗余的被动保护装置；（b）配置冗余的主动保护，当第一级主动保护断电或失效时，该保护仍能起作用；（c）主动电路断电或单一故障时，功能能够保持安全运行或失效安全。

IEC 62619:2022 *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications* 标准新增了系统锁功能要求：“当电池系统中的一个或多个电池在操作过程中偏离操作规格时，电池系统应具有停止操作的不可复位功能，此功能不允许用户重置或自动重置。”结合两标准内容，即锂电池的充放电回路中，需要配置二次保护，不可复位产品。

在家庭储能系统中，保护通常是分级的：

1）一级保护（主动保护）：由 BMS 控制主接触器（通常是继电器或 MOS）来断开电路。这是最先响应、可恢复的操作（如过充、过放、温和过电流）。

2）二级保护（被动/终极保护）：当一级保护控制主接触器失效或者 IC 失效，无法有效断开电路时，BMS 会触发受控熔断器，受控熔断器熔断电路，以绝对物理隔离能力，永久性地切断电路，防止灾难性事故。

受控熔断器不同于传统的被动式热熔断器或机械断路器，其核心特点在于可以通过电信号主动触发，快速、可靠地切断故障电路，从而在潜在的热失控发生前彻底隔离故障电池包或模块，防止灾难性事故的发生。由于受控熔断器采用对温度敏感的合金材料，在极端情况下，温度达到合金熔点时，不依靠电

路控制，可物理熔断电路，彻底切断电路，防止火灾。采用受控熔断器设计是实现家庭储能系统二次保护的常用手段。

12.2.2　受控熔断器的解决方案及功能介绍

受控熔断器是一种利用低熔点合金（ATC01）作为主电路的电气连接点，内置加热器（FH）作为控制电路，实现受控熔断功能的熔断器，主要应用在新能源锂电池的安全保护，进行充放电回路的二级保护。受控熔断器主要利用两电极片连接包裹着助熔断剂的热元件作为电气连接，具有被动感温熔断功能。同时内置带自主过热保护（ATC02）的加热器，为低熔点合金加热，提供熔断热量，同时切断主电路并断开控制电路。

受控熔断器是一种基于热熔断器的过热保护的原理，内置加热器实现受控功能的产品，同时具有过温度保护功能及主动受控熔断功能，受控熔断器结构组成如图 12-9 所示。当环境温度超过设定值时，内部的低熔点合金熔化，切断电路，防止设备过热引发火灾或损坏；同时可配合 BMS 的二次 IC 检测判断，执行充放电回路的切断功能，增加冗余保护，主要是防护一次 IC 或充放电回路 MOS 或继电器的潜在失效风险，导致充放电回路断不开。BMS 触发执行导通受控熔断器控制电路前端的 MOS，MOS 导通受控熔断器的控制电路，内部加热器（FH）迅速启动加热，热量传递给低熔点合金（ATC01），热量达到低熔点合金（ATC01）的熔点时，低熔点合金（ATC01）收缩、熔断，切断充放电回路，同时温度持续升高，控制电路的低熔点合金热熔断器（ATC02）熔断，加热器（FH）停止工作。防止家庭储能电池系统暴露在持续充电的环境下，减少由于过充电带来的安全风险。

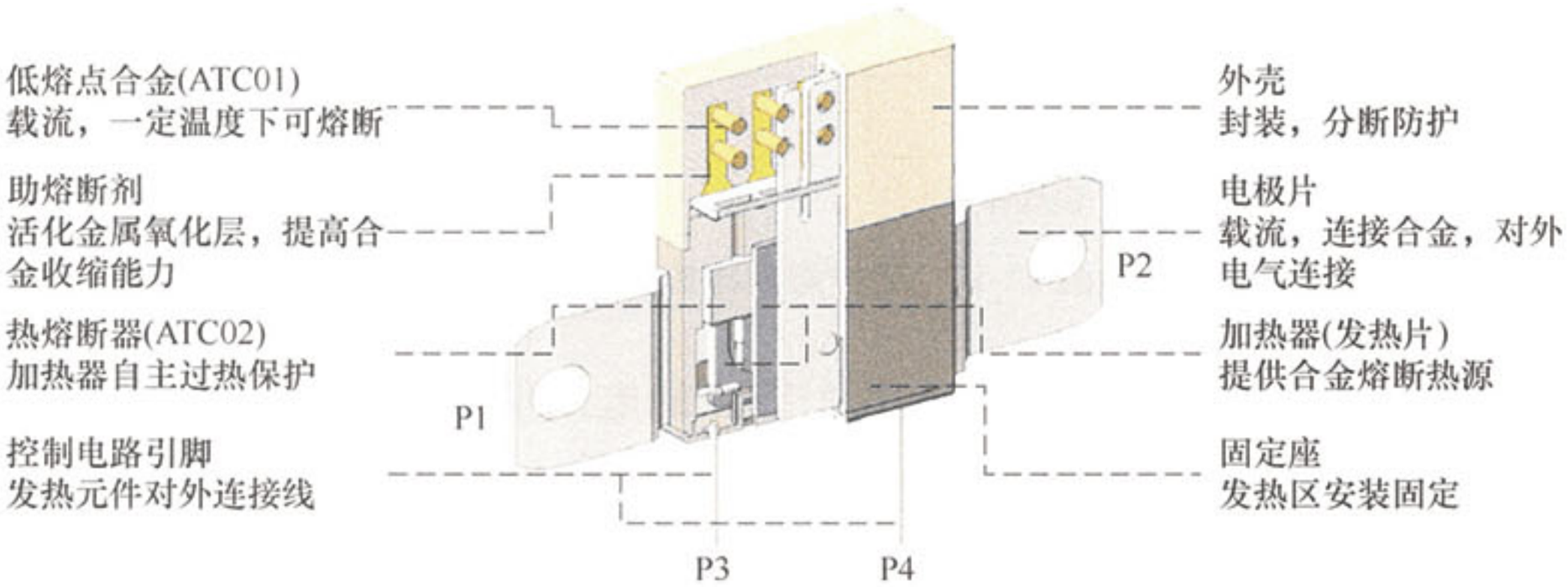


图 12-9　受控熔断器结构图

低熔点合金一般是指低于锡熔点（232℃）的合金，通常由铟（In）、锡（Sn）、铋（Bi）等环保金属组成，具有独特的高精准熔点、快速响应及高稳定性的性能特点，常态下为固态金属，内阻低，达到熔点时，合金液化，收缩、断开电路，

实现物理熔断，动作后不可复位。

加热器一般采用高温共烧陶瓷发热片（MCH），其主材料为钨、钼、钼/锰等高熔点金属发热电阻浆料，按照发热电路设计的要求印刷于92%~96%的氧化铝流延陶瓷生坯上，4%~8%的烧结助剂，然后多层叠合，在1500~1600℃高温下共烧成一体，从而具有耐腐蚀、耐高温、寿命长、高效节能、温度均匀、导热性能良好、热补偿速度快等优点。高温共烧陶瓷发热片（MCH）升温迅速，在通电工作时，10s内发热片表面即可由室温上升到200℃，30s内可上升到800℃。由于采用陶瓷封装，介电能力强，紧贴于低熔点合金（ATC01）的引出端，可迅速将热量传递给低熔点合金（ATC01）。

如图12-10所示，电池组、检测电阻、放电MOS管（G2）、充电MOS管（G3）依次串联，充电MOS管（G3）连接充电器的一个输入，充电器的另一输入经受控熔断器连接电池组正极。放电MOS管（G2）的漏极连接负载的一端，负载的另一端经受控熔断器器连接电池组的正极。

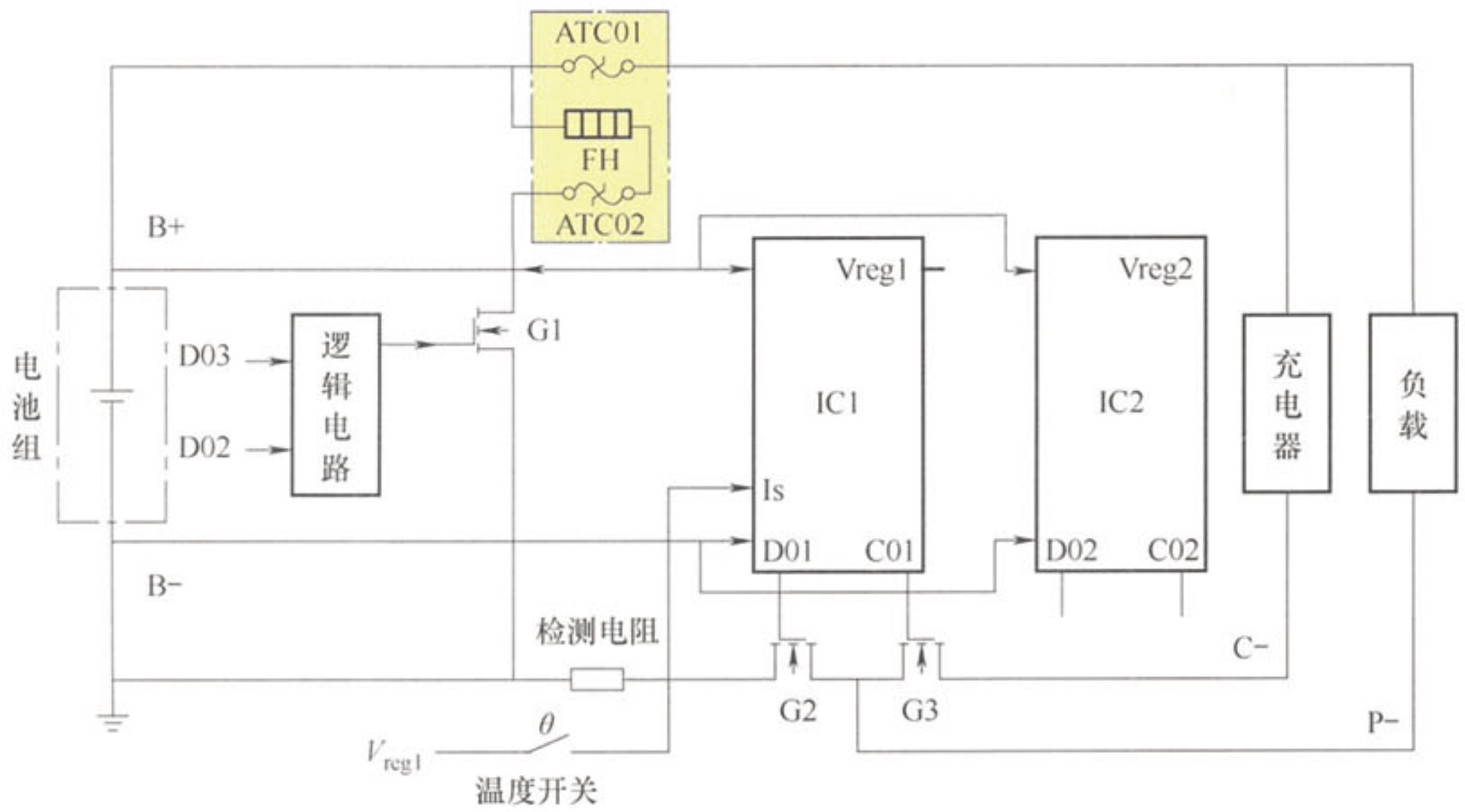


图 12-10　受控熔断器应用原理图

锂电池采集IC1接收来自电池各个节点的电压信号，IC1输出两路驱动信号：放电驱动信号D01和充电驱动信号C01，二者分别控制放电MOS管（G2）、充电MOS管（G3），电池组正常工作时，放电MOS管（G2）与充电MOS管（G3）常通。

IC2设置两个单体充放电保护电压阈值范围，IC2输出信号控制熔断开关（G1），当IC2读取到充放电电压达到其设定的异常充放电电压值时，IC2输出高电平，熔断开关（G1）导通，加热器（FH）发热，热量传递至低熔点合金（ATC01），低熔点合金（ATC01）熔断，切断充放电回路，电池组停止充放电。

12.2.3　受控熔断器用于家庭储能系统二次保护典型案例及选型指南

图 12-11 为受控熔断器应用示意图，该案例设计的应用目标为 48V，200Ah 磷酸铁锂家庭储能系统，运行电压范围为 DC（43.2~58.4）V，倍率为 1C，组合方式为 2P16S（2 并 16 串），设计二次保护，防止电池组过充电及过热。

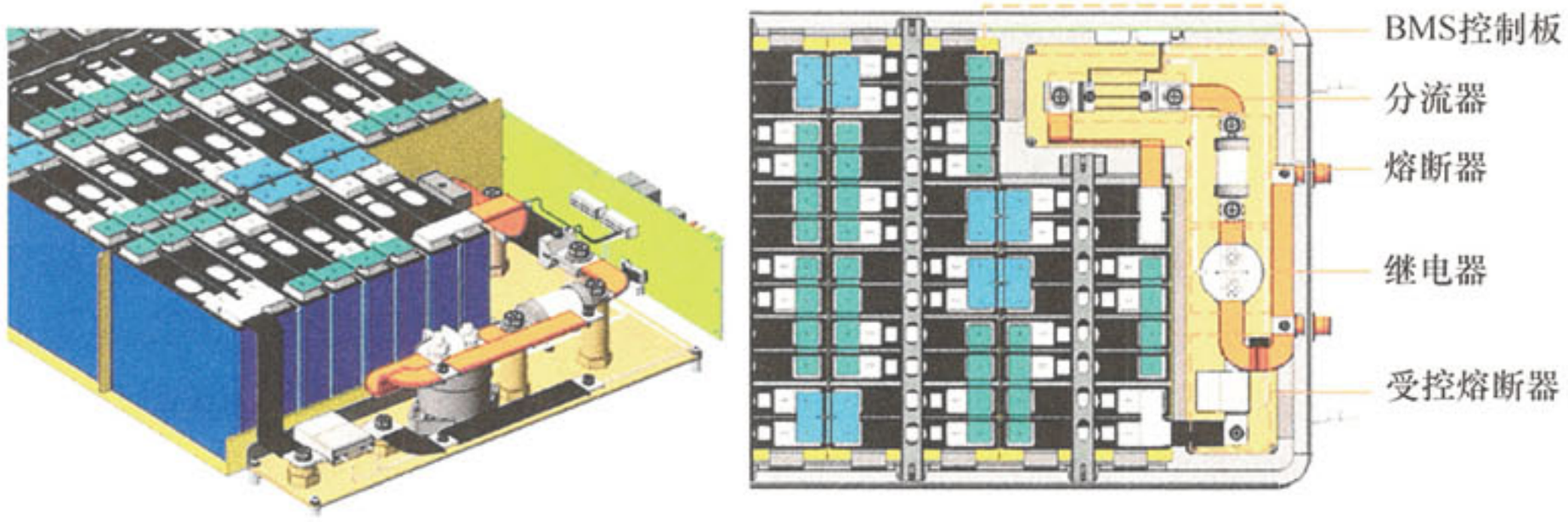


图 12-11　受控熔断器应用示意图

（1）一级保护（BMS）

功能：实时监测电压、电流、温度，触发预警或切断 MOSFET。

局限：若 BMS 失效或响应延迟，电池可能持续升温。

（2）二次保护

位置：串联在电池主回路正极，靠近电芯热源。

低熔点合金选型：

1）合金类型：无铅铋-锡合金。

2）熔点：145℃（高于正常工作温度，设计带载 200A，测试在 55℃环境下运行时温升为 20K，低于电池热失控临界点 150℃）。

3）额定电流：200A（匹配系统最大放电电流）。

4）额定电流选型：按 80%安全冗余设计，可选择（250~300）A 以上电流规格。

5）动作电压范围选型：运行电压范围为（43.2~58.4）V，其加热器的电压范围必须覆盖，可选择 DC（40~60）V 的范围。

触发机制：

1）过温度保护机制：当温度累计（环境温度+温升）≥145℃时，合金熔化，永久断开电路。

2）过充电保护机制：一次保护为软件关断，由 MOS/继电器执行关断，可设定单体电芯电压阈值超过 3.60V（3.60V×16=57.6V）进行关断；二次保护为硬件保护，可设定单体电芯电压阈值超过 3.65V（3.65V×16=58.4V）进行关断。

12.8 雷电对电化学储能电站的危害

雷电一直是影响电力设备安全稳定运行的重要原因，2023 年巴西美丽山特

高压输电工程因雷击导致的年损失高达 2.3 亿美元。电化学储能电站特别是大型储能电站大多置于户外，极易遭受雷电浪涌侵袭（雷电浪涌是电气工程领域常见的瞬态过电压现象，主要表现为雷击引起的电路中出现持续时间微秒至毫秒级、幅值超过正常工作电压的高频电流脉冲）。随着电化学储能应用规模的扩大，储能装置遭受雷击的概率越来越大，这对储能设备的耐用性和稳定性构成了严重威胁。例如，2023 年 6 月，发生在英国 1 号县道 Convergent 工地和教堂街 Warwick 村附近的两起连续储能事故，据分析可能都是由风暴期间的闪电或电涌引起的。电化学储能电站的电芯、BMS、PCS、EMS 等核心器件本身耐压能力弱，一旦遭受雷击，轻则导致设备损坏，重则造成火灾甚至人员伤亡。

12.8.1　雷电对电化学储能装置的威胁

雷击按作用形式主要分为：

1）直击雷（Direct Lightning Flash）：闪击直接击于建（构）筑物、其他物体、大地或外部防雷装置上，产生电效应、热效应和机械力者。

2）雷电电磁脉冲（Lightning ElectroMagnetic Pulse，LEMP），是指雷电流通过电阻性、电感性和电容性耦合产生的各种电磁效应，包括浪涌和辐射电磁场。有些场合下，雷电电磁脉冲又俗称感应雷。

雷电对储能系统的威胁主要体现在以下几个方面：

1）直接雷击：储能系统如果安装在开阔地区或建筑物的顶部，可能会成为直接雷击的对象。直接雷击可能导致电池损坏、火灾甚至爆炸，对人员安全和设备运行构成严重威胁。

2）雷电感应：即使没有直接雷击，雷电感应也能在储能系统的电路中产生过电压，这种过电压可能超出设备的耐压水平，导致设备损坏。感应雷击对微电子设备，特别是通信设备、自动传输系统、电子计算机网络系统和监控设备的危害最大，据资料显示微电子设备遭雷击损坏，80%以上是由感应雷引起。

3）雷电冲击波：雷电放电时产生的冲击波可能引起电磁干扰，影响储能系统的正常运行，甚至导致数据丢失或系统崩溃。

4）电涌和瞬态过电压：雷电可能会通过电源线或通信线引入电涌，造成储能系统内部的电气设备损坏。

5）火灾风险：雷电击中储能系统可能会引发火灾，尤其是锂离子电池等储能设备在火灾中可能释放有毒气体，增加救援难度。

12.8.2　雷电入侵电化学储能装置的途径

雷电入侵电化学储能装置的四种典型途径如图 12-12 所示，其中的 S1～S4

分别代表：直击雷击电化学储能装置本身或电化学储能装置的防雷系统（LPS）、雷击电化学储能装置周边、雷击接入电化学储能装置的线路、雷击电化学储能装置进线附近（这会在电力、数据线路上感应出过电压）。

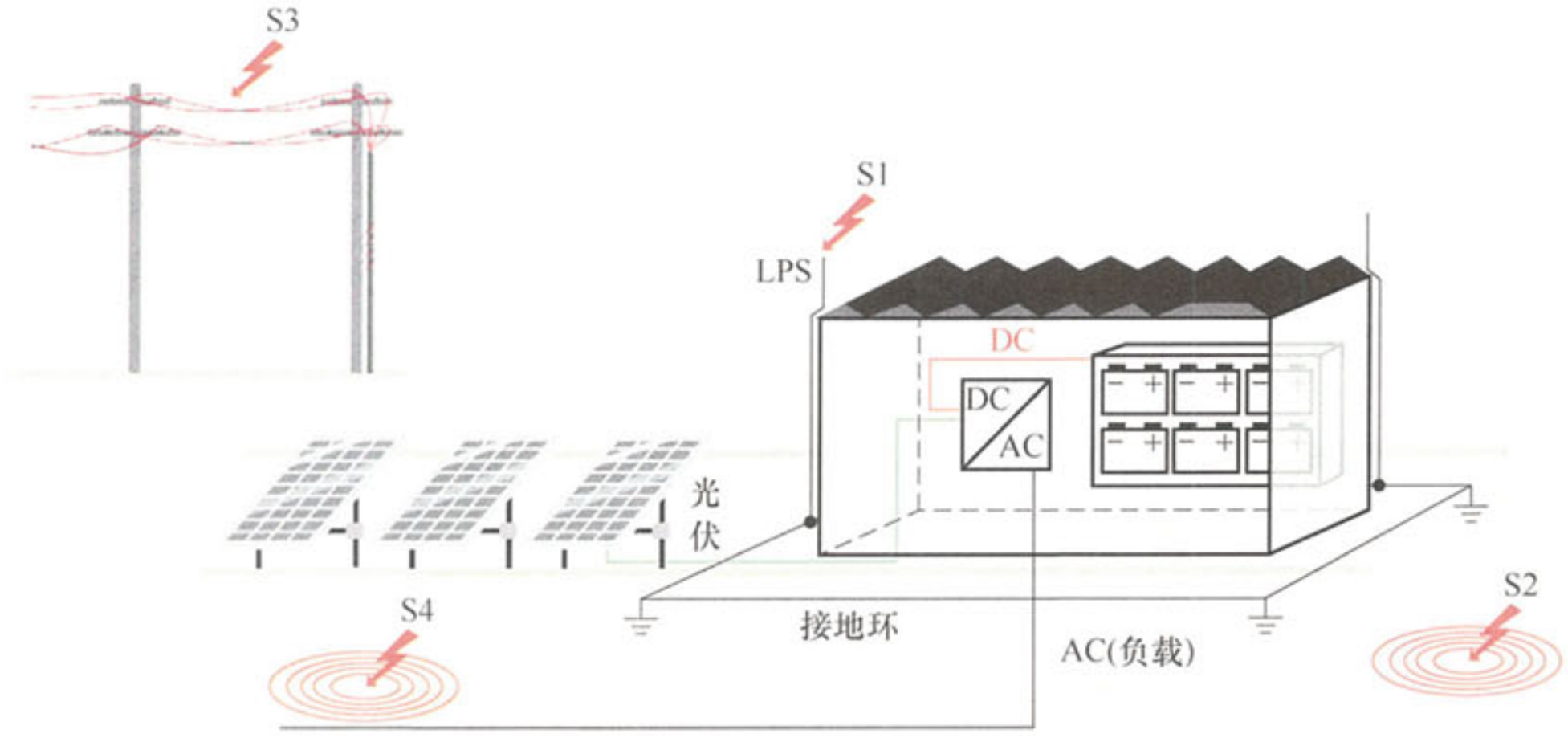


图 12-12　雷电入侵电化学储能装置的四种典型途径

S1～S4 相关的具体入侵方式及危害如下：

1）在 S1 情形中，雷电流通过接闪器、引下线和接地系统，入侵储能装置内部。这部分雷击通常模拟雷电流波形为 10/350μs 的直击雷，带有非常高的能量，造成储能 PCS 等设备损坏，严重时可能会引起功率模块、电池等设备的起火和爆炸。

2）在 S2 情形中，雷电电磁脉冲与储能装置的接地系统耦合，在接地回路中产生感应过电压和感应雷电流，或者雷电电磁脉冲直接作用在附近储能装置的电子设备上。这部分雷击通常模拟雷电流波形为 8/20μs 的雷电电磁脉冲或者感应雷电流，能量相比模拟雷电流波形为 10/350μs 的值略低，其产生的损害效应一般为导致储能电子器件、传感器、数据通信等设备的失效。

3）在 S3 情形中，雷电流以传导的形式，通过供配电线路或者信号线路进入到储能装置内。这部分雷击通常模拟雷电流波形为 10/350μs 的直击雷，带有非常高的能量，对储能 PCS 等设备进线开关、控制模块电源造成损坏，严重时也可能会引起起火和爆炸。

4）在 S4 情形中，雷电电磁脉冲的作用与供配电线路或信号线路耦合，产生感应过电压和感应过电流，之后进入到储能装置内的电子设备上。这部分雷击通常模拟雷电流波形为 8/20μs 的雷电电磁脉冲或者感应雷电流，能量相比模拟雷电流波形为 10/350μs 的值略低，其产生的损害效应一般为导致储能电子器件、传感器、数据通信等设备的失效。

12.9 电化学储能电站防雷技术概况

12.9.1 电化学储能电站现有防雷设计概述

目前大多数的户外储能系统的防雷设计主要搭载在储能变流器（Power Conversion System，PCS）交流端，而无论是水冷户外储能系统还是风冷集装箱户外储能系统（纯电池簇集装箱），单独的 PCS 交流侧浪涌无法保护整个储能系统，而 PCS 与户外储能系统尚有一定距离，故户外储能系统中的各个模块仍会遭受雷击的影响，无法实现有效防雷。现有常规的防雷设计，无法有效地防范雷击对户外储能系统的影响，无法保证户外储能系统各个模块能够对雷击起到有效的防范，无法保护户外储能系统中的电池模块，也无法保证系统稳定运行和人身安全。究其原因，电化学储能电站的雷电防护是一个综合性的系统工程，也是一个全新的命题，技术发展趋势是整合外部防护（直击雷防护）和内部防护（雷电感应、操作过电压等防护）。外部防护最常用的措施是安装接闪针；内部防护需要避雷器、电涌保护器（Surge Protective Device，SPD，是用于限制瞬态过电压和分泄电涌电流的器件，它至少含有一个非线性元器件）等设备和一系列保护措施配合实现，一次设备和二次设备的防护要求有所不同。

12.9.2 储能装置接闪防护方法概述

接闪针通常为金属制成、比被保护物高的装置，通过将雷引到自己身上并安全导入地下，从而避免被保护物遭受雷击。据此，接闪针应该安装在储能舱顶部，但对于整站接闪避雷还是各设备自行避雷的设计可行性及实际效果行业内存在争议。在实际工程建设中，可参考国网湖南省电力有限公司电力科学研究院牵头组编的《电池储能电站设计实用技术》中推荐的接闪针安装设计原则：

1）独立接闪针宜设计独立的接地装置。在非高土壤电阻率地区，接闪针接地电阻不宜超过 10Ω。当接闪针与主接地网连接时，为防止雷击经过接地网反击电化学电池储能电站内的设备，需保证接闪针与主接地网的地下连接点至电池储能电站设备与主接地网的地下连接点之间的接地体长度不得小于 15m。需要注意的是，独立接闪针不应设置在人通行的地方，接闪针及其接地装置与道路或出入口等的距离不宜小于 3m，否则应采取均压措施，或铺设沥青地面。

2）电池储能电站内电压 110kV 及以上的电力设备，一般将接闪针装在配电装置的架构或屋顶上，但在土壤电阻率大于 1000Ω · m 的地区，宜装设独立接闪针。否则，应通过验算，采取降低接地电阻或加强绝缘等措施，防止造成反

击事故。

3）对于电池储能电站内电压 63kV 的电力设备，允许将接闪针装在配电装置的架构或屋顶上，但在土壤电阻率大于 500Ω·m 的地区，宜装设独立接闪针。

4）对于电池储能电站内电压 35kV 及以下的电力设备，不宜将接闪针装在配电装置的架构或屋顶上，防止雷电的反击对设备造成损坏。

5）装在架构上的接闪针应与接地网连接，并应在其附近装设集中接地装置。装有接闪针的架构上，接地部分与带电部分间的空气距离不得小于绝缘子串的长度。

6）接闪针与主接地网的地下连接点至变压器接地线与主接地网的地下连接点间的接地体长度不得小于 15m；在电池储能电站主变压器的门型架构上，不应装设接闪针（线）。

12.9.3 储能装置内部雷电过电压的防护方法概述

对于雷电电磁脉冲（LEMP）或雷电过电压的防护，主要采用 GB/T 21714.4—2015《雷电防护　第 4 部分：建筑物内电气和电子系统》中规定的电涌防护措施（SPM）。电涌防护措施基于雷电防护区（LPZ）的概念，可将被保护的系统空间划分为若干 LPZ。某个空间 LEMP 的严重程度和该控件的内部系统耐受水平相匹配。根据 LEMP 强度的变化划分区域，LPZ 的边界对应相应的防护措施。

基本的 SPM 对 LEMP 的基本防护措施包括：

1）接地和等电位联结网络：接地装置将雷电流传导并泄放到大地，等电位联结网络则最大限度地降低电位差，减少磁场。

2）磁屏蔽和布线：空间屏蔽衰减了雷闪直击建筑物或其附近而在 LPZ 内部产生的磁场，减少了内部浪涌。使用屏蔽电缆或屏蔽管道的内部线路屏蔽能使内部感应浪涌减至最小。内部线路合理布线能够最大限度地减少感应回路所包围的面积，从而减少内部浪涌。空间屏蔽、内部线路屏蔽和合理布线可同时使用或单独使用。

3）协调配合的 SPD 系统：该系统限制来源于外部和内部产生的浪涌。

4）隔离界面：隔离界面限制了线路中的传导浪涌进入 LPZ。应始终确保良好接地，特别是在进入建筑物或构筑物的入口处，将每个导电装置直接或通过适合的 SPD 进行等电位联结。

12.9.4 电化学储能电站防雷及接地设计原则概述

1. 电化学储能电站一次设备防雷及接地设计原则

1）电池储能高压配电设备电浪涌保护器的设计。电池储能电站的高压配电

设备包括进线开关柜、母线设备、主变压器等，为防止这些高压设备因雷电过电压而造成损毁，需在设备端口并联对应的避雷器装置。选用避雷器（Surge Arrester，用于保护电气设备免受高瞬态过电压危害并限制续流时间也常限制续流幅值的一种电器）时，其额定运行电压需与该避雷器所安装位置的系统电压保持一致；并且避雷器的灭弧电压要大于安装处工作母线上可能出现的最高工频电压。避雷器的灭弧电压指保证避雷器能够在工频续流第一次经过零值时，灭弧条件下允许加在避雷器上的最高工频电压。若避雷器动作时系统处于正常运行状态下，则避雷器将在正常相电压下灭弧；若避雷器工作时系统内同时有不对称短路，则加在全相避雷器上恢复电压将有可能高于相电压，此时避雷器就必须在高于相电压的情况下灭弧。

2）电池储能单元电浪涌保护器的设计。电池储能单元由储能电池组、直流汇流箱、储能变流器、机端变压器与高压环网柜等设备构成，是电池储能电站内重要的电能存储单元。为防止雷电造成电池储能单元内设备过电压而损坏，需在其一次接线结构中安装电涌保护器。

2. 电化学储能电站二次设备防雷及接地设计原则

电池储能电站二次电缆数量众多并且敷设线路错综复杂，一旦发生雷电感应，二次设备极易受到干扰甚至永久性毁坏。电化学电池储能电站信号线路主要由以下几部分构成：电池管理系统信号线、储能变流器的数据处理与监控线路、保护及自动化装置二次回路、安防系统、环境监测子系统等。在工程建设前期，需考虑通过对全站二次系统的接地设计，以达到降低雷电感应对二次设备的危害。

12.10　储能系统电涌保护器

12.10.1　电涌保护器概述

12.10.1.1　电涌保护器分类

电涌保护器的分类方法众多。按被保护的类型、用途和功能分为电源电涌保护器、电信和信号网络电涌保护器。其中：

1）电源电涌保护器分为直流电源电涌保护器和交流电源电涌保护器。

2）电信和网络信号电涌保护器又分为电信（天馈线）电涌保护器和网络信号电涌保护器。

12.10.1.2　电涌保护器试验规范

1. 试验规范介绍

根据不同类型的电涌保护器，其测试方法也不相同。常用设计规范如下：

1）电源电涌保护器依据 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》进行测试。

2）电信与信号网络电涌保护器依据 GB/T 18802.21—2016《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》进行测试。

3）光伏系统专用电涌保护器依据 GB/T 18802.31—2021《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》进行测试。

2. 试验类型介绍

电涌保护器的试验类型可以分为型式试验、例行试验和验收试验。

12.10.1.3　电涌保护器的使用条件

1. 大气压力和海拔

大气压力 80~106kPa。与之对应的海拔为 2000~-500m。

2. 环境温度

正常范围：-5~+40℃（户内型）。

扩展范围：-40~+70℃（无防护的户外型）。

存储温度范围：-40~+70℃。

3. 相对湿度

正常范围：5%~95%（户内型）。

扩展范围：5%~100%（无防护的户外型）。

4. 工作频率

交流频率在 47~63Hz 之间。

5. 防护等级

依据 GB/T 4208 的 IP 代码。

12.10.2　电源电涌保护器

12.10.2.1　电源电涌保护器主要参数与特征

1. 冲击放电电流 I_{imp}（10/350μs）

Ⅰ类试验的冲击放电电流（Impulse Discharge Current for Class Ⅰ Test）指流过 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。

当没有计算电流分配的特殊方法时，一般假定：雷电流的 50%传导入建筑物接地系统，其余 50%通过 SPD 回流，如图 12-13 所示。对于Ⅰ类雷电防护等级（Lightning Protection Level，LPL，与一组雷电流参数值有关的序数，该组参

数值与在自然界发生雷电时最大和最小设计值不被超出的概率有关），意味着初始 I_{imp}的 200kA 的部分通过每个 SPD 放电，对于一个三相四线制（三相线加中性线）电力配电系统，每相为 25kA。

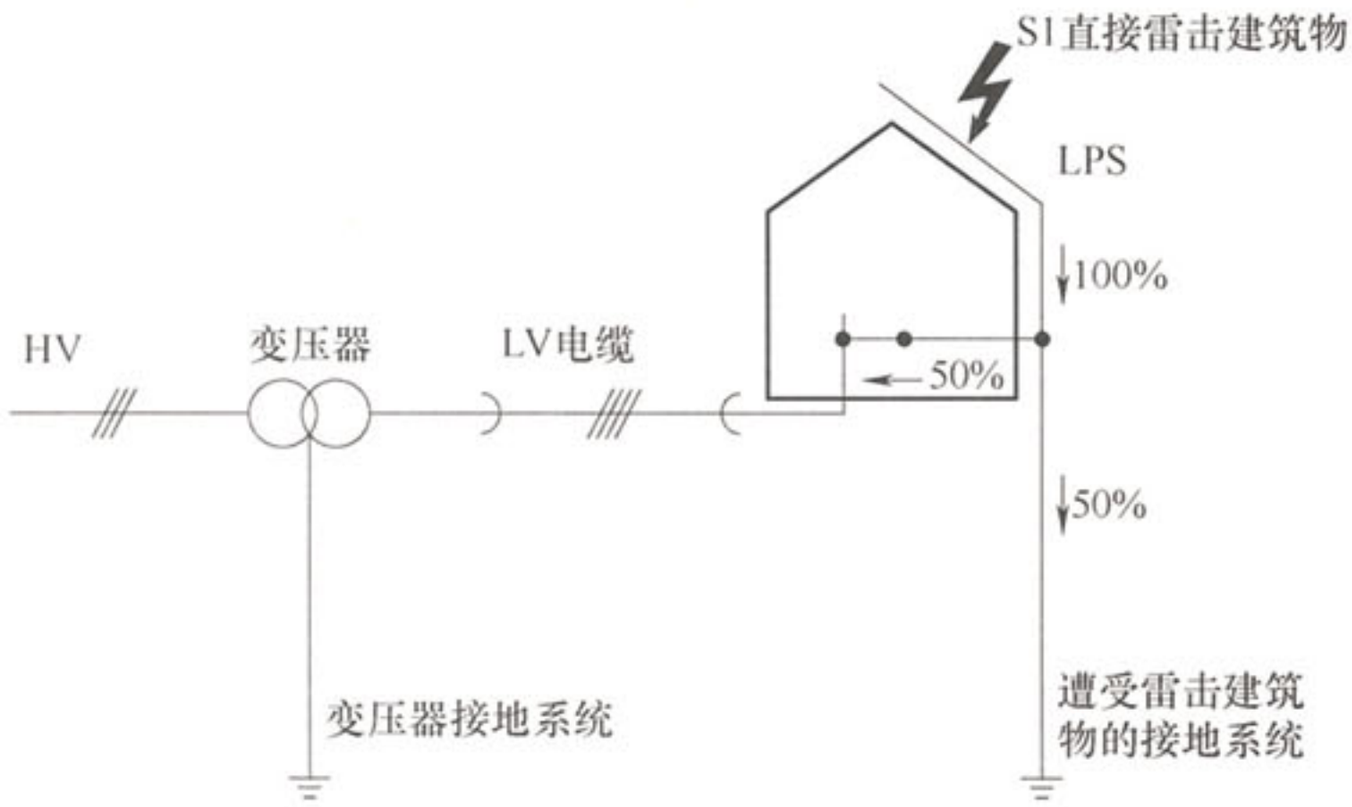


图 12-13　雷电流分流示意图

对于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放电电流值相关。

波形为 8/20μs、峰值为 I_{imp}的冲击用于确定限制电压（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）和动作负载试验（施加 15 次）。

I_{imp}的优选值（单位为 kA）：1.0、2.0、5.0、10、12.5、20、25。

Q 的优选值（单位为 C）：0.5、1、2.5、5、6.25、10、12.5。

W/R 的优选值（单位为 kJ/Ω）：0.25、1、6.25、25、39、100、156。

2. 标称放电电流 I_n（8/20μs）

Ⅱ类试验的标称放电电流（Nominal Discharge Current for Class Ⅱ Test）指流过 SPD 具有 8/20μs 波形电流的峰值。

对于满足Ⅱ类试验的 SPD，标称放电电流作为一个试验参数，用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）。该电流也用于动作负载试验（施加 15 次）。

I_n 的选取应参照预期在现场频繁出现的电流。

I_n 的优选值（单位为 kA）：0.05、0.1、0.25、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、5.0、10、15 和 20。

3. 最大持续工作电压 U_c（Maximum Continuous Operating Voltage）

U_c 为可持续加于电气系统电涌保护器保护模式的最大均方根电压或直流电压；可持续加于电子系统电涌保护器端子上，且不致引起电涌保护器传输特性减低的最大均方根电压或直流电压。

最大持续工作电压根据系统标称工作电压 U_n 确定，一般情况下不超过 U_n 的 1.15 倍，具体情况参考表 12-7。

表 12-7　电涌保护器取决于系统特征所要求的最大持续运行电压最小值

电涌保护器接于	TT 系统	TN-C 系统	TN-S 系统	引出中性线的 IT 系统	无中性线引出的 IT 系统
每一相线与中性线间	$1.15U_0$	不适用	$1.15U_0$	$1.15U_0$	不适用
每一相线与 PE 线间	$1.15U_0$	不适用	$1.15U_0$①	$\sqrt{3}U_0$①	相间电压①
中性线与 PE 线间	$U_0$①	不适用	$U_0$①	$U_0$①	不适用
每一相线与 PEN 线间	不适用	$1.15U_0$	不适用	不适用	不适用

注：U_0 是低压系统相线对中性线的标称电压，即相电压 220V。

① 故障下最坏的情况，所以不需计及 15% 的允许误差。

4. 电压保护水平 U_p（Voltage Protection Level）

电压保护水平 U_p 表征电涌保护器限制接线端子间电压的性能参数，其值可以从优选值的列表中选择。电压保护水平值应大于所测量的限制电压的最高值。

在实际设计中，电涌保护器的电压保护水平 U_p 是根据被保护设备额定耐受冲击电压 U_w 来确定选择的，详细参考表 12-8。额定冲击耐受电压 U_w（Rated Impulse Voltage）指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（本小节仅考虑带电导体和大地之间的耐压）。

表 12-8　直接由电网电源供电的设备额定冲击耐受电压

供电系统标称电压/V（三相系统）	供电系统标称电压/V（单相系统）	相对中性线交流或直流标称电压上限/V	设备额定冲击耐受电压 U_w/kV			
			过电压类别Ⅰ（设备有较低额定冲击电压）①	过电压类别Ⅱ（设备有常规额定冲击电压）②	过电压类别Ⅲ（设备有较高额定冲击电压）③	过电压类别Ⅳ（设备有很高额定冲击电压）④
		50	0.33	0.5	0.8	1.5
		100	0.5	0.8	1.5	2.5
	120/240	150	0.8	1.5	2.5	4
230/400 277/480		300	1.5	2.5	4	6
400/690		600	2.5	4	6	8
1000		1000	4	6	8	12

（续）

供电系统标称电压/V（三相系统）	供电系统标称电压/V（单相系统）	相对中性线交流或直流标称电压上限/V	设备额定冲击耐受电压 U_w/kV			
			过电压类别Ⅰ（设备有较低额定冲击电压）①	过电压类别Ⅱ（设备有常规额定冲击电压）②	过电压类别Ⅲ（设备有较高额定冲击电压）③	过电压类别Ⅳ（设备有很高额定冲击电压）④
	>1000，≤1250	1250	4	6	8	12
	>1250，≤1500	1500	6	8	10	15

① Ⅰ类：含有电子电路的设备，如计算机、有电子程序控制的设备。
② Ⅱ类：如家用电器和类似负荷。
③ Ⅲ类：如配电盘、断路器，包括线路、母线、分线盒、开关、插座等固定装置的布线系统，以及应用于工业的设备和永久接至固定装置的固定安装的电动机等一些其他设备。
④ Ⅳ类：如电气计量仪表、一次线过电流保护设备、滤波器。

有效电压保护水平 $U_{p/f}$（Effective Voltage Protection Level）是电涌保护器连接导体和外置脱离器（如有）感应电压降 ΔU 与电涌保护器电压保护水平 U_p 的矢量和。

需要注意的是，对于限压型 SPD，$U_{p/f}=U_p+\Delta U$；对于开关型 SPD，$U_{p/f}$ 为 U_p 和 ΔU 中较高值。

SPD 的电压保护水平 U_p 应按表 12-8 中过电压类别Ⅱ要求的额定冲击电压来选择。为了对设备提供足够的保护，带电导体与 PE 线之间的电压保护水平在任何情况下都不应超过表 12-8 所要求的设备额定冲击电压。

若相线与 PE 线之间采用串联 SPD 保护方式（如单模 SPD、L-N 和 N-PE，按 CT2），则其应满足上述电压保护水平要求。

如果制造商的数据中没有提供相线和 PE 之间的组合电压保护水平，则应将串联的各个 SPD 保护模式的电压保护水平叠加计算来确定。

5. 保护模式（Modes of Protection）

电气系统电涌保护器的保护部件可连接在相对相、相对地、相对中性线、中性线对地及其组合，以及电子系统电涌保护器的保护部件连接在线对线、线对地及其组合。不同系统中电涌保护器的接线方式见表 12-9。

表 12-9　电涌保护器接于不同系统的接线方式

电涌保护器接于	TT 系统		TN-C 系统	TN-S 系统		引出中性线的 IT 系统		不引出中性线的 IT 系统
接线方式	CT1	CT2	—	CT1	CT2	CT1	CT2	—
每一相线和中性线间	+	●	NA	+	●	+	●	NA

（续）

电涌保护器接于	TT 系统		TN-C 系统	TN-S 系统		引出中性线的 IT 系统		不引出中性线的 IT 系统
每一相线和 PE 线间	●	NA	NA	●	NA	●	NA	●
中性线和 PE 线间	●	●	NA	●	●	●	●	NA
每一相线和 PEN 线间	NA	NA	●	NA	NA	NA	NA	NA
相线间	+	+	+	+	+	+	+	+

注：●表示强制规定装设 SPD；NA 表示不适用；+表示需要时可增设 SPD。

电涌保护器的接线方式如下：

1）CT1 型连接（如 3+0 或 4+0 配置）：组合式 SPD 提供了每一个带电导体（包括相线和中性线）和 PE 导体之间或每一个相线和 PEN 之间的保护。图 12-14和图 12-15 分别给出了应用于三相系统的 CT1 型连接的两个示例。

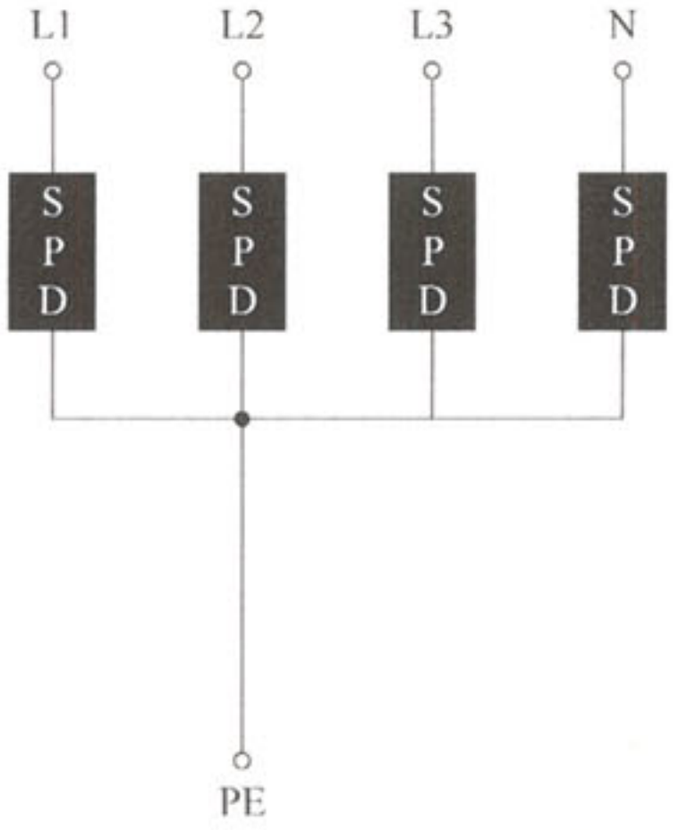


图 12-14　带中性线三相系统的 CT1 型连接（4+0）

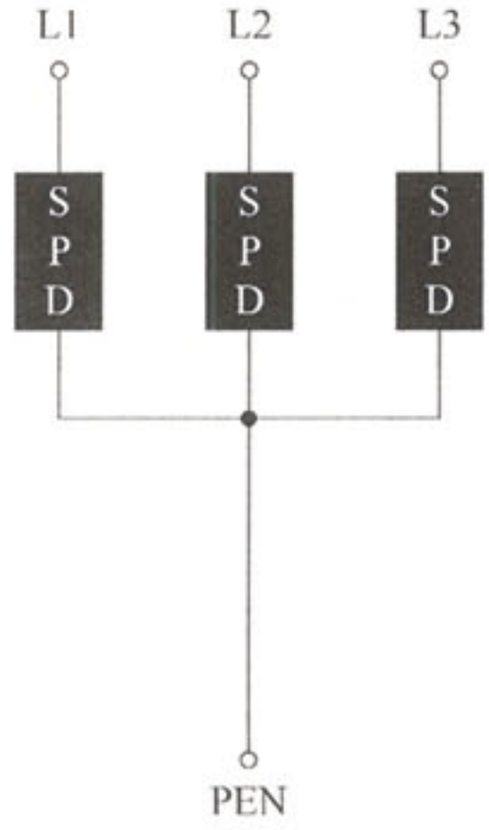


图 12-15　三相系统的 CT1 型连接（3+0）

2）CT2 型连接（如 3+1 配置）：组合式 SPD 提供了每一个相线与中性线之间、中性线与 PE 之间的保护。图 12-16 给出了应用于三相系统的 CT2 型连接的示例。

当安装 SPD 时，应根据接线方式，注意连接在 N-PE 间的 SPD 参数的选择。

TN-S 或 TN-C-S 系统中，当 N 线、PE 线分离点与 SPD 间的距离小于 0.5m 时或在同一配电板上，N-PE 间的 SPD 可省略。

如果相线导体接地，则在本条中技术上可视为中性线导体，此时需特别考

虑选择正确的 SPD 参数。

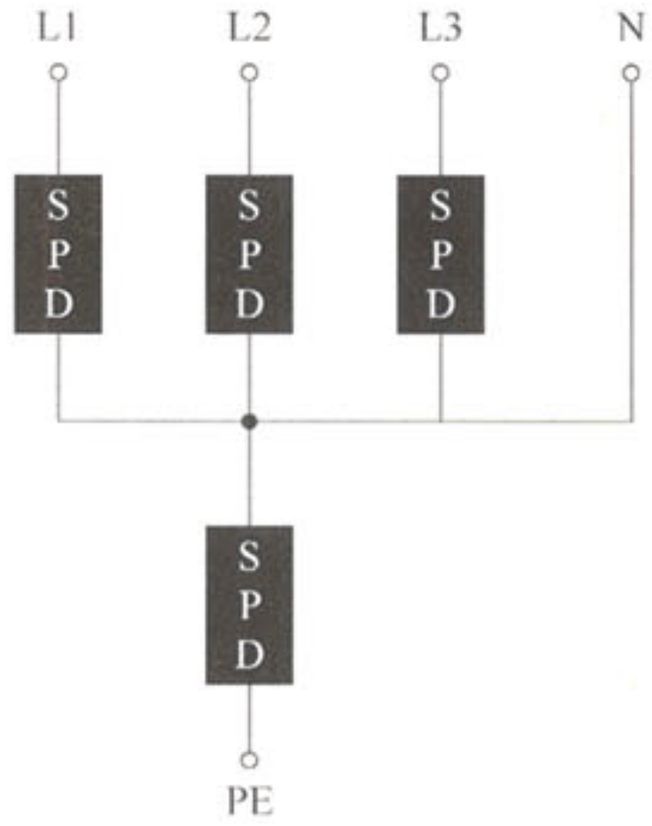


图 12-16　带中性线三相系统的 CT2 型连接（3+1）

6. 最大放电电流 I_{max}（Maximum Discharge Current）

I_{max}为具有 8/20μs 波形和制造商声明幅值的流过 SPD 电流的峰值。

7. 总放电电流 I_{total}（Total Discharge Current）

I_{total}为在总放电电流试验中，流过多级 SPD 的 PE 或 PEN 导线的电流。该试验是用来检查多级 SPD 的多种保护模式同时作用时发生的累积效应。I_{total}与根据 GB/T 21714 系列标准用作雷电保护等电位连接的 I 类试验 SPD 特别有关。

8. 额定短路电流 I_{SCCR}（Short-Circuit Current Rating）

I_{SCCR}为用于评定 SPD 和所连接的指定脱离器的电源系统的最大预期短路电流额定值。

9. 额定断开续流值 I_{fi}（Follow Current Interrupt Rating）

I_{fi}为 SPD 能不依靠脱离器动作而断开的预期短路电流。I_{fi}不小于 I_{SCCR}（除限压型 SPD 外）。

10. 限制电压 U_{lim}（Limiting Voltage）

U_{lim}为施加规定波形和幅值的冲击时，在 SPD 接线端子间测得的最大电压峰值。

11. 残压 U_{res}（Residual Voltage）

U_{res}为放电电流流过 SPD 时，在其端子间产生的电压峰值。

12. 开路电压 U_{oc}（Open Circuit Voltage）

U_{oc}为在复合波发生器连接试品端口处的电压。

13. 剩余电流（残流）I_{PE}（Residual Current）

SPD 按制造商的说明连接，施加参考电压（U_{REF}）时，流过 PE 接线端子的电流。

12.10.2.2 电源电涌保护器分类试验

电源电涌保护器冲击试验分类（Impulse Test Classification）如下：

1）Ⅰ类试验（Class Ⅰ Test）：按冲击放电电流 I_{imp} 值、峰值等于冲击放电电流 I_{imp} 的 8/20μs 冲击电流和 1.2/50μs 冲击电压（如适用）进行的试验。

2）Ⅱ类试验（Class Ⅱ Test）：按 8/20μs 标称放电电流 I_n 和 1.2/50μs 冲击电压（如适用）进行的试验。

3）Ⅲ类试验（Class Ⅲ Test）：按 1.2/50μs 电压波形和 8/20μs 电流波形的复合波发生器进行的试验。

12.10.2.3 电源电涌保护器的使用指南

1. 电源电涌保护器的安装位置

雷电防护措施（如 LPS、屏蔽线、磁屏蔽和 SPD 等）决定了雷电防护区（LPZ）。

根据雷电威胁的不同，定义以下的 LPZ：

$LPZ0_A$：受直接雷击和全部雷电电磁场威胁的区域。该区域的内部系统可能受到全部或部分雷电浪涌电流的影响。

$LPZ0_B$：直接雷击的防护区域，但该区域的威胁仍是全部雷电电磁场。该区域的内部系统可能受到部分雷电浪涌电流的影响。

LPZ1：由于分流和边界处设置隔离界面和/或 SPD 使浪涌电流受到限制的区域。该区域的空间屏蔽可能衰减雷电电磁场。

LPZ2～n：由于分流和边界处设置隔离界面和/或 SPD 使浪涌电流受到进一步限制的区域。该区域的附加空间屏蔽可能进一步衰减雷电电磁场。

电涌保护器 SPD 是根据雷电防护区的设定来安装，例如：

从 $LPZ0_B$～LPZ1 区，一般是入户总进线电源处，此处安装 T1 类电源电涌保护器。

从 LPZ1～LPZ2 区，一般是楼层配电或重要机房配电，此处安装 T2 类电源电涌保护器。

从 LPZ2～LPZ3 区，一般是精细的敏感设备，此处安装 T3 类电源电涌保护器。

电源电涌保护器的安装位置示例如图 12-17 和图 12-18 所示。

2. 电涌保护器的多级能量配合

图 12-19 中以两级 SPD 为例说明 SPD 配合的原理。配电系统中两级 SPD 配合方式如下：

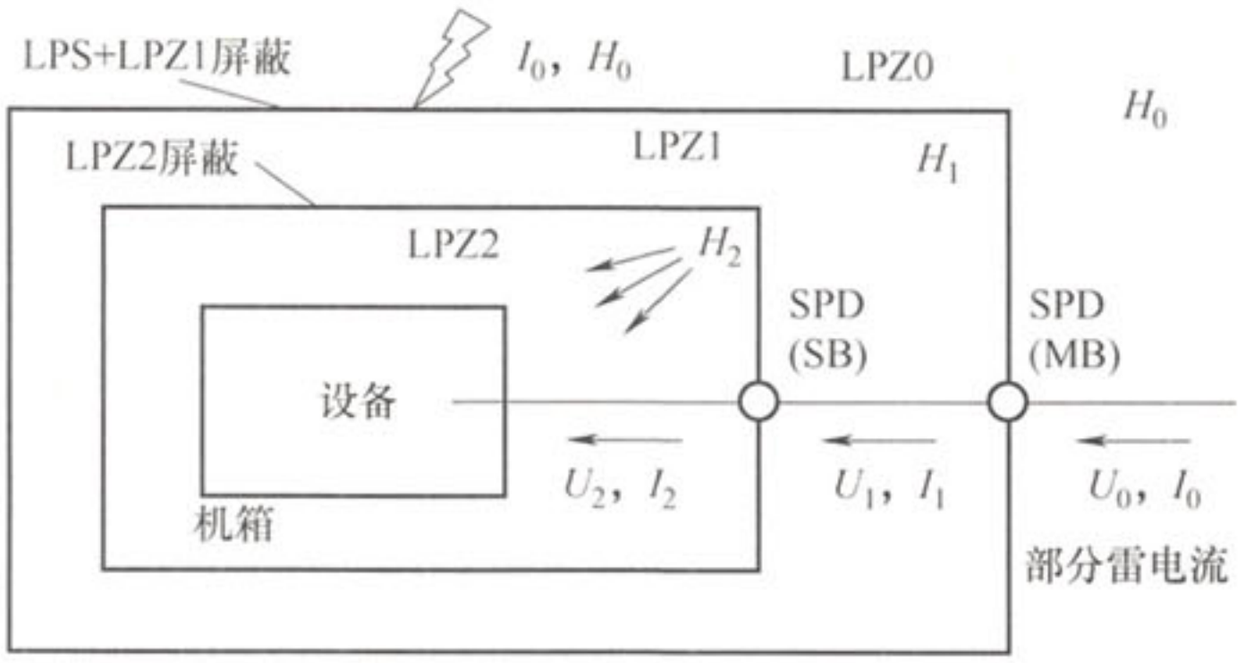


图 12-17　多层屏蔽与电涌保护器协调配合防护

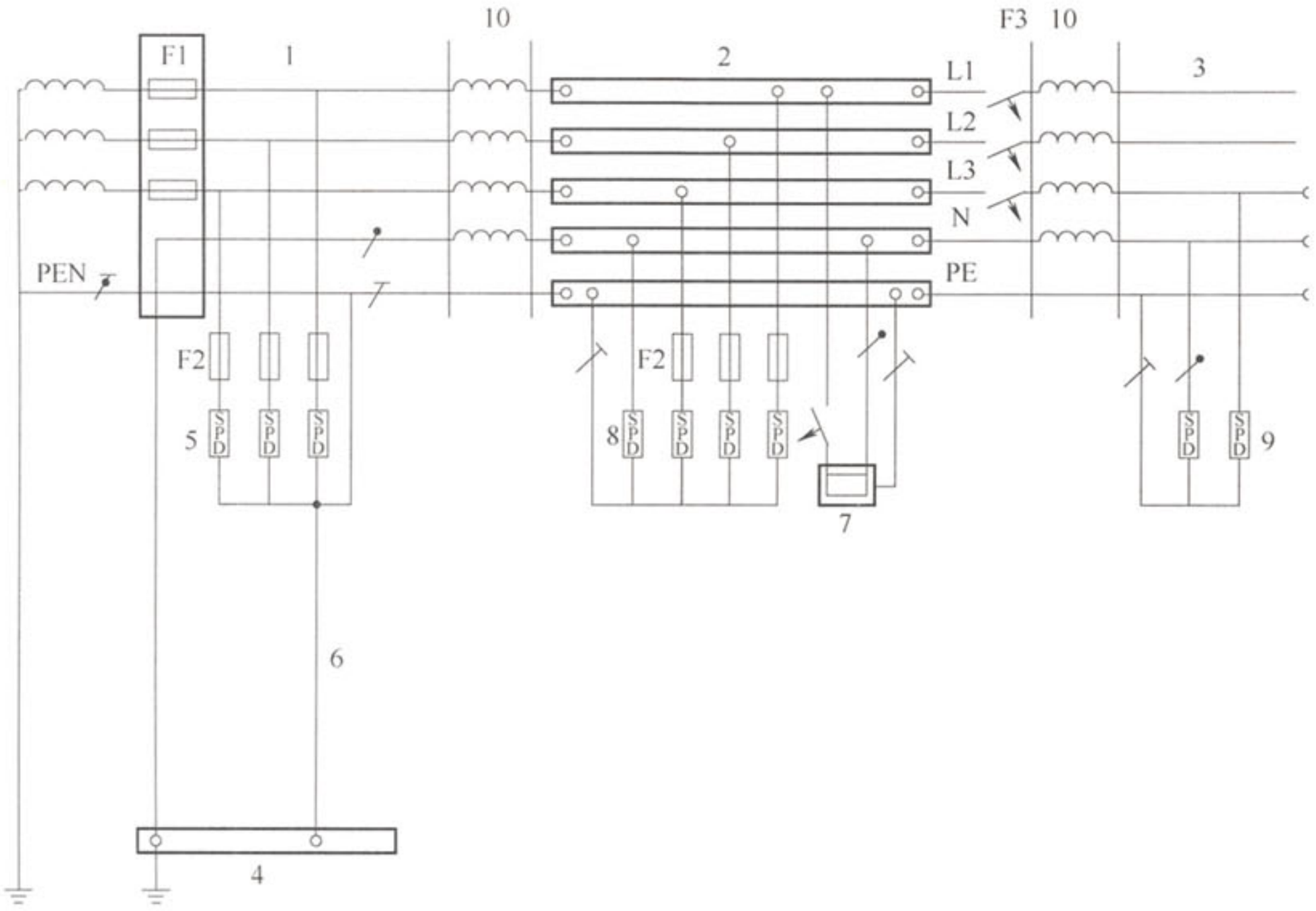


图 12-18　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类试验的 SPD 设置

1—安装点　2—配电盘　3—配电引出线　4—主要接地端子或接地排　5—Ⅰ、Ⅱ类试验的电涌保护器
6—SPD 的接地连接（接地导体）　7—需要保护的固定设备　8—Ⅱ类试验的 SPD　9—Ⅱ或Ⅲ类试验的 SPD
10—去耦元件或线路长度　F1、F2、F3—过电流保护器（外部脱离器）

1）两个电压限制型（以下简称限压型）SPD 的配合。限压型电涌保护器（SPD）在无电涌出现时为高阻抗，随着电涌电流和电压的增加，阻抗连续变小。通常采用压敏电阻、抑制二极管作为限压型电涌保护器的组件。

2）电压开关型（以下简称开关型）SPD 和电压限制型 SPD 的配合。开

关型电涌保护器（SPD），在无电涌出现时为高阻抗，当出现电压电涌时突变为低阻抗。通常采用放电间隙、充气放电管等作为开关型电涌保护器的组件。

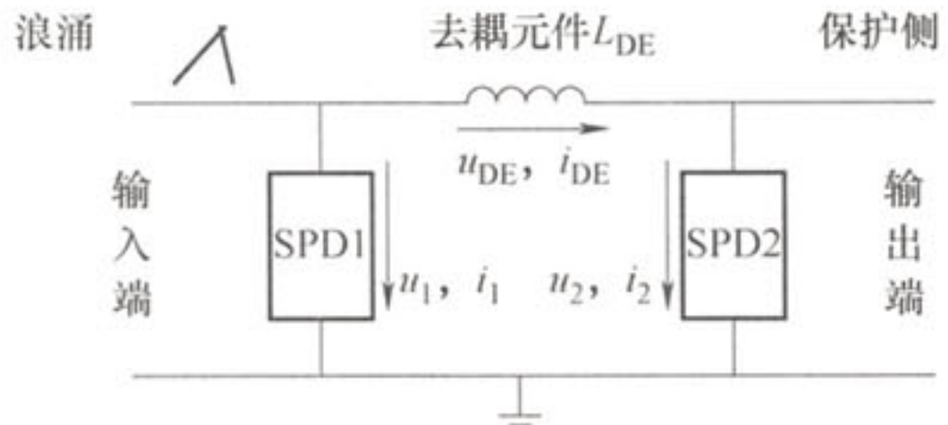


图 12-19　SPD 能量配合电路模型

以上两种配合的共同点如下：

1）前级 SPD1 的泄流能力应比后级 SPD2 的大得多，即通流量大得多，比如 SPD1 应泄放 80%以上的雷电流。

2）去耦元件可采用几种元件，也可以利用两级 SPD 之间连接导线的分布电感（该分布电感值应足够大）。

3）最后一级 SPD 的限压小于被保护设备的耐受电压。

以上两种配合的区别如下：

1）两个限压型 SPD 的伏安特性都是连续的（如压敏电阻（MOV）或抑制二极管（TVS））。当两个限压型 SPD 标称导通电压（U_n）相同且能量配合正确时，由于线路自身电感或串联去耦元件 L_{DE}的阻流作用，输入的浪涌上升达到 SPD1 启动电压并使之导通时，SPD2 不可能同时导通。只有当浪涌电压继续上升，流过 SPD1 的电流增大，使 SPD1 的残压上升，SPD2 两端电压随之上升达到 SPD2 的启动电压时，SPD2 才导通。只要通过各 SPD 的浪涌能量都不超过各自的耐受能力，就实现了能量配合。

2）开关型 SPD1 和限压型 SPD2 配合时，SPD1 的伏安特性不连续（例如火花间隙（ISG）、气体放电管（GDT）、半导体闸流管、晶闸管整流器、三端双向晶闸管开关器件等），后续 SPD2 的伏安特性连续。当浪涌输入时，由于 SPD1（ISG）的触发电压较高，SPD2 将首先达到启动电压而导通。随着浪涌电压继续上升，流过 SPD2 的电流增大，使 SPD2 的两端电压 u_2（残压）上升，当 SPD1 的两端电压 u_1（等于 SPD2 两端的残压 u_2 与去耦元件两端电压之和）超过 ISG 的动态火花放电电压 u_{SPARK}时，ISG 点火导通。

只要通过 SPD2 的浪涌电流能量未超出其耐受能力前，ISG 触发导通，即实现了能量配合。否则，未实现能量配合。这取决于压敏电阻（MOV）的特性和浪涌电流的陡度、幅度及去耦元件大小。

通过 SPD1 开关特性，能缩短 10/350μs 初始冲击电流的半值时间，从而大

大减小后续 SPD 的负荷。在 SPD1 点火导通前，SPD2 将承受全部雷电流。

12.10.3　电信和信号网络电涌保护器

12.10.3.1　电信和信号网络电涌保护器的主要参数与特征

1. 冲击放电电流 I_{imp}（10/350μs）

I_{imp}为流过 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。

2. 标称放电电流 I_n（8/20μs）

I_n为流过 SPD 具有 8/20μs 波形电流的峰值。

3. 最大持续工作电压 U_c

U_c 为可持续加于电气系统电涌保护器保护模式的最大均方根电压或直流电压；可持续加于电子系统电涌保护器端子上，且不致引起电涌保护器传输特性减低的最大均方根电压或直流电压。

4. 电压保护水平 U_p

电压保护水平 U_p 表征电涌保护器限制接线端子间电压的性能参数，其值可以从优选值的列表中选择。电压保护水平值应大于所测量的限制电压的最高值。

5. 最大放电电流 I_{max}

I_{max}为具有 8/20μs 波形和制造商声明幅值的流过 SPD 电流的峰值。

6. 总放电电流 I_{total}

I_{total}为在总放电电流试验中，流过多级 SPD 的 PE 或 PEN 导线的电流。

7. 接口方式

电信与信号网络电涌保护器应满足系统接口的要求。

8. 插入损耗 $A(\lambda)$（Insertion Loss）

插入损耗是由于在传输系统中插入一个 SPD 所引起的损耗。它是 SPD 插入前传递到后面的系统部分的功率与 SPD 插入后传递到同一部分的功率之比。插入损耗的单位为分贝（dB）。

9. 回波损耗 A_R（Return Loss）

回波损耗是反射系数倒数的模，单位为分贝（dB）。

当阻抗可以确定时，回波损耗由公式给出：

$$A_R = 20\lg\left|\left[(Z_1+Z_2)/(Z_1-Z_2)\right]\right|$$

式中，Z_1 为不连续处之前的传输线的特性阻抗或源的阻抗；Z_2 为不连续处之后

的阻抗或从源和负荷之间的结合处看进去的负荷阻抗。

10. 近端串扰（NEXT）（Near-End Crosstalk）

串扰在被干扰的通道中传输，其方向与该通道中电流传输的方向相反。被干扰通道的端部基本上靠近产生干扰的通道的激励端，或与之重合。

11. 绝缘电阻 R_{ins}（Insulation Resistance）

SPD 指定的端子之间施加最大持续运行电压 U_c 时呈现的电阻。

12. 电压驻波比 s

电压驻波比指驻波波腹电压与波节电压幅度之比，又称为驻波系数、驻波比。驻波比等于 1 时，表示馈线和天线的阻抗完全匹配，此时高频能量全部被天线辐射出去，没有能量的反射损耗；驻波比为无穷大时，表示全反射，能量完全没有辐射出去。

12.10.3.2 电信和信号网络电涌保护器的分类试验

电信和信号网络电涌保护器冲击试验的分类见表 12-10。

表 12-10 电信和信号网络电涌保护器冲击试验分类及冲击电流和冲击电压波形

类别①	试验类型	开路电压	短路电流
A1	很慢的上升率	≥1kV，上升率 0.1kV/μs~100kV/s	10A，≥1000μs（持续时间）
A2	AC（工频试验）	1.0kV（rms）	100A（rms），0.5s
B1	慢的上升率	1kV，10/1000μs	100A，10/1000μs
B2		1~4kV，10/700μs	25~100A，5/320μs
B3		≥1kV，100V/μs	10~100A，10/1000μs
C1	快的上升率	0.5~2kV，1.2/50μs	0.25kA~<1kA，8/20μs
C2		2~10kV，1.2/50μs	1kA~<5kA，8/20μs
C3		≥1kV，1kV/μs	10~100A，10/1000μs
D1	高能量	≥1kV	0.5~2.5kA，10/350μs
D2		≥1kV	0.6~2.0kA，10/350μs

① 按上升率从慢到快、能量从低到高排列。

12.10.3.3 电信与信号网络电涌保护器的使用指南

对电信和信号系统构成主要威胁的瞬态源来自雷电和电源系统。耦合的方式包括雷击建筑物本体和直接接触电源系统，以及与两个瞬态源的电容耦合、电感耦合和辐射耦合。

保护措施应与被保护系统相配合。一栋建筑物中任何需要保护的地方，都应安装等电位联结带（EBB）。更重要的措施是将所有从设备至建筑物 EBB 的等电位联结导体阻抗减至最小。电缆的金属屏蔽层应保持连续连接。电缆终端的

屏蔽层也应与 EBB 直接相连或通过 SPD 相连（以避免腐蚀问题）。

另一种保护措施是在入户设施内采用合适的 SPD，以减小瞬态过电压和过电流至系统兼容水平。SPD 应尽可能靠近建筑物公共入口，例如所有入户线缆通过的进户入口箱。如果被保护设备和电缆入口之间要求有一定的距离，应特别注意把设备和 SPD 的等电位联结导体阻抗减至最小。

图 12-20 描述了雷电和交流电源的能量耦合至装有暴露设备的建筑物的方式。图中展示了一个典型建筑物，它具有雷电保护系统（包含接闪器、等电位联结网络和接地系统），入户服务设施［可能是电话或另一种电信连接（h）和电源（g）］及安装的设备。包括有单点雷电保护等电位联结体（d）。由推荐的设置可见，所有入户服务设施在建筑物入口处与单独的公共接地点（主 EBB）相连接。该公共接地点与雷电引下线单点相连，并且应有一处符合国家相关要求的独立接地。所有进入建筑物的服务设施均应与该接地点相连，以满足所有建筑物系统的等电位要求。

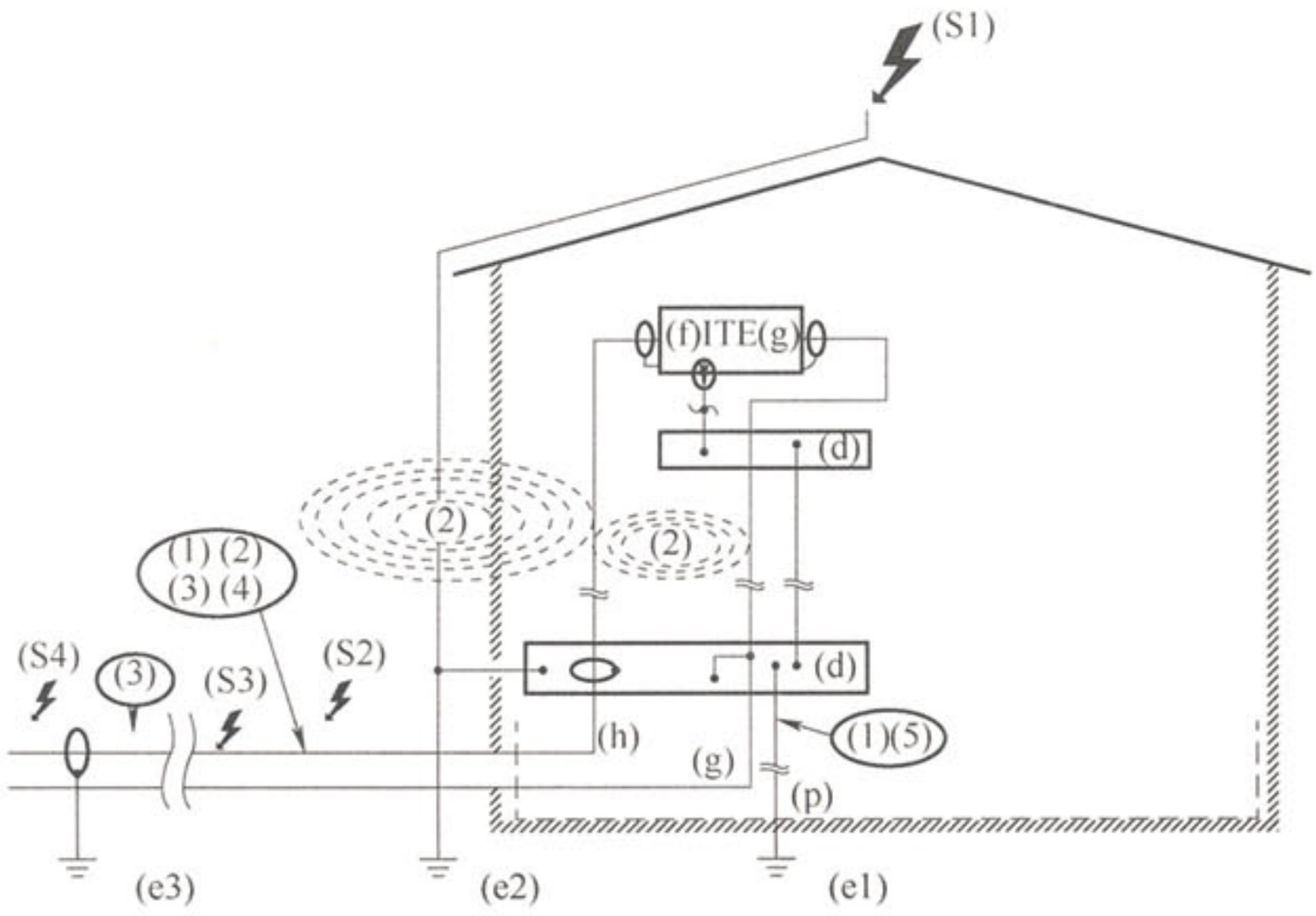


图 12-20　电信与信号网络雷电浪涌的耦合机理

d—等电位联结带（EBB）　e1—建筑物接地　e2—雷电保护接地系统　e3—电缆屏蔽接地
f—信息技术/电信的接口　g—电源接口　h—信息技术/电信的线路或网络　p—接地电极
S1—雷电直击建筑物　S2—雷击建筑物附近　S3—雷电直击电信/电源线路
S4—雷击电信/电源线路附近　1~5—耦合机理（见表 12-11）

图 12-23 也显示了在建筑物设备位置或其附近区域内的等电位联结（楼层 EBB）的布置。在该布置中，通过电缆入口处的公共接地基准点，使每个楼层、设备室且甚至可能是设备架等产生等电位环境。所有进入该区域的服务设施均由此基准点接地（通过 SPD 或直接连接）。该区域等电位联结点与主建筑物等电

位体单独相连并且不再独立接地相连。

电信与信号网络雷电浪涌波形与电涌保护器优选试验类别见表 12-11。

表 12-11　电信与信号网络雷电浪涌波形与电涌保护器优选试验类别

电涌源	雷电直击建筑物（S1）		雷击建筑物的附近（S2）	雷电直击线路（S3）	雷击线路的附近（S4）	交流电源影响
耦合方式	阻性（1）	感应（2）	感应（2）	阻性（1、5）	感应（3）	阻性（4）
电压波形/μs	—	1.2/50	1.2/50	—	10/700	50/60Hz
电流波形/μs	10/350	8/20	8/20	10/350、10/250	5/320	—
优选的试验类别	D1	C2	C2	D1，D2	B2	A2

注：（1）~（5）见图 12-23。

12.11　储能系统的低压电涌保护器设备选型及应用方案设计

12.11.1　储能系统中低压电涌保护器选型设计参考依据

12.11.1.1　储能系统中电涌保护器选型依据标准和规范

规范及引用文件如下：GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》、GB/T 16895.22—2022《低压电气装置　第 5-53 部分：电气设备的选择和安装　用于安全防护、隔离、通断、控制和监测的电器》、GB/T 18802.12—2024《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》、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》、GB/T 21714.4—2015《雷电防护　第 4 部分：建筑物内电气和电子系统》、GB/T 34120—2023《电化学储能系统储能变流器技术要求》。

12.11.1.2　储能系统中电涌保护器选型涉及的功能和参数的确定

1. 电涌保护器试验等级以及对应的 I_{imp} 和 I_n 要求

根据 GB 50057 和 GB/T 21714 系列等标准的规定，电源电涌保护器、电信与信号网络电涌保护器的冲击放电电流 I_{imp} 或标称放电电流 I_n 的要求见表 12-12。

表 12-12　防雷分区与电涌保护器的试验等级、I_{imp}和 I_n 参数规定

防雷分区	电源电涌保护器			电信与信号网络电涌保护器		
LPZ0～LPZ1	T1 或 T2	I_{imp}≥25kA（10/350μs）	I_n≥80kA（8/20μs）	D1，B2	I_{imp}≥0.5～2.5kA（10/350μs）	U_{oc}≥4kV（10/700μs），I_{sc}≥100A（5/300μs）
LPZ1～LPZ2	T2	—	I_n≥20kA（8/20μs）	C2，B2	—	U_{oc}≥0.5～10kV（1.2/50μs），I_{sc}≥0.25～5kA（8/20μs）或 U_{oc}≥0.5～4kV（10/700μs），I_{sc}≥25～100A（5/300μs）
LPZ2～LPZ3	T3	—	I_n≥5kA（8/20μs）或 U_{oc}≥10kV（1.2/50μs），I_{sc}≥5kA（8/20μs）	C1	—	U_{oc}≥0.5～1kV（1.2/50μs），I_{sc}≥0.25～0.5kA（8/20μs）

2. 储能系统用电涌保护器的 U_c 的选择

除了根据前面提到的不同供电制式的系统按照表 12-7 选择电涌保护器的最大持续工作电压 U_c，按其相电压（或相线与 PE 线、PEN 线间电压差）的 1.15 倍选择外，还需要考虑当储能系统参与并网时，其电压要满足电网并网的高电压穿越要求，即：储能变流器交流端口电压在图 12-21 所示的电压轮廓线及以下的区域内时，储能变流器应不脱网连续运行。储能变流器高电压穿越应满足下列要求：

1）交流端口电压升高至 1.3 倍额定电压时，储能变流器不脱网连续运行 0.5s。

2）交流端口电压升高至 1.25 倍额定电压时，储能变流器不脱网连续运行 1s。

3）交流端口电压升高至 1.2 倍额定电压时，储能变流器不脱网连续运行 10s。

4）交流端口电压高出电压轮廓线时，储能变流器与电网断开。

3. 储能系统用电涌保护器的 U_p 的选择

根据表 12-8 中对储能系统的设备额定冲击耐压值 U_w 的规定，根据 GB 50057 和 GB/T 18802.32 的规定："电压保护水平 U_p 应低于被保护设备的耐冲击电压额定值 U_w。通常，在没有明确给出数值时，宜保持设备耐冲击电压额定值 U_w 与

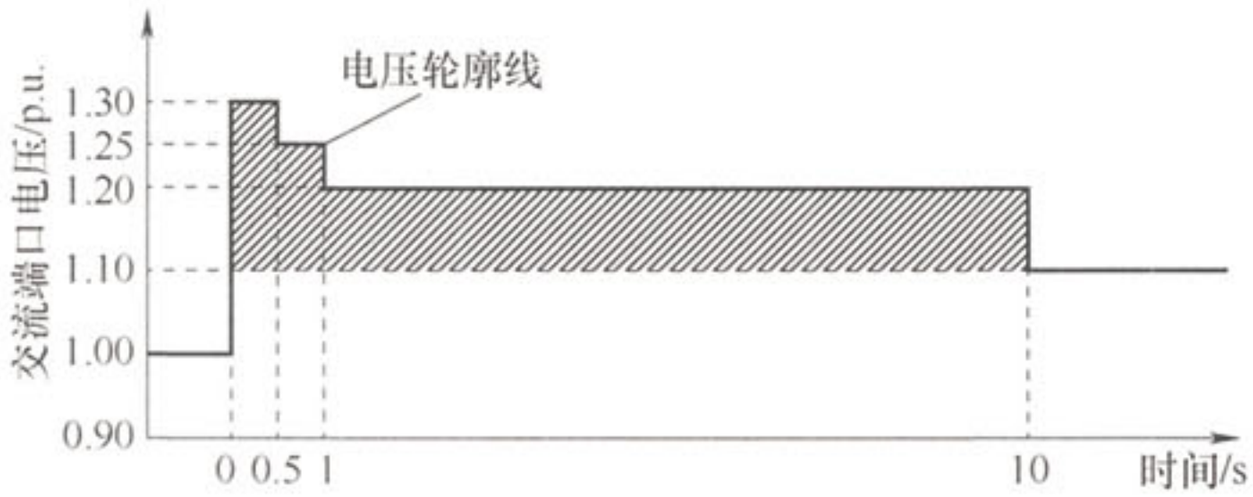


图 12-21　储能变流器高电压穿越能力要求

U_p 之间至少 20%的安全裕度，即 $U_p \leqslant 0.8U_w$。

4. 储能系统用电涌保护器的保护模式

除了根据表 12-9 中规定的对交流系统采用接线形式 1（CT1）和接线形式 2（CT2）的要求外，对于涉及与光伏系统配合的储能系统或光储系统，其直流侧用的电涌保护器的保护模式一般为 U 形、Y 形和 Δ 形接线方式，如图 12-22 所示。

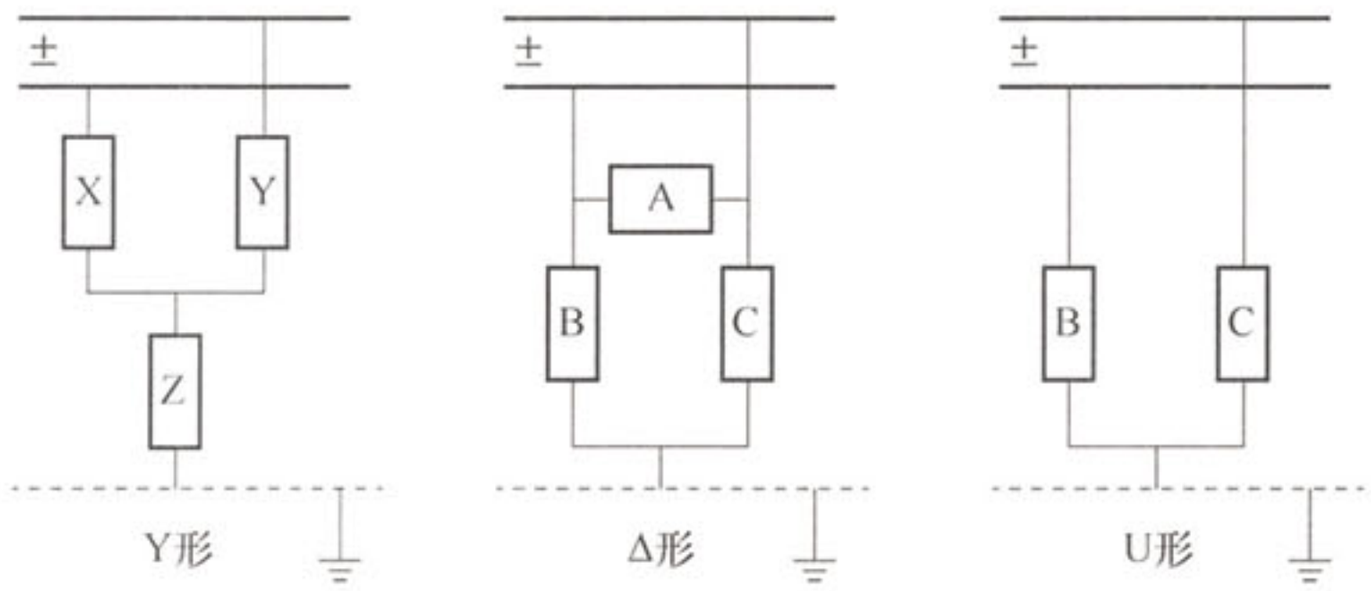


图 12-22　光储系统中直流侧用电涌保护器的接线方式

12.11.2　储能系统用电涌保护器典型应用方案

12.11.2.1　户用储能电涌保护器应用方案

家庭户用小型光储变流器由于体积小的特点，可以配置板载式电涌保护器件。

1. 家庭户用光储电涌保护应用方案

家庭户用小型光储变流器直流侧连接了户外的光伏系统，交流侧与电网连接，如图 12-23 所示。

小型光储变流器直流侧可以使用具有 T1 试验类别的板载电涌保护器件 TF-MOV25M，如图 12-24 所示，其单体模块 I_{imp}（10/350μs）= 6~7.5kA，I_n（8/20μs）= 20kA，也可根据用户自己的需要进行并联匹配以提升 I_{imp} 和 I_n。其最大持续工作

电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC500~900V，同时也可根据用户使用需求将模块进行串联，以适应系统标称电压。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形组合，对变流器直流侧进行保护。

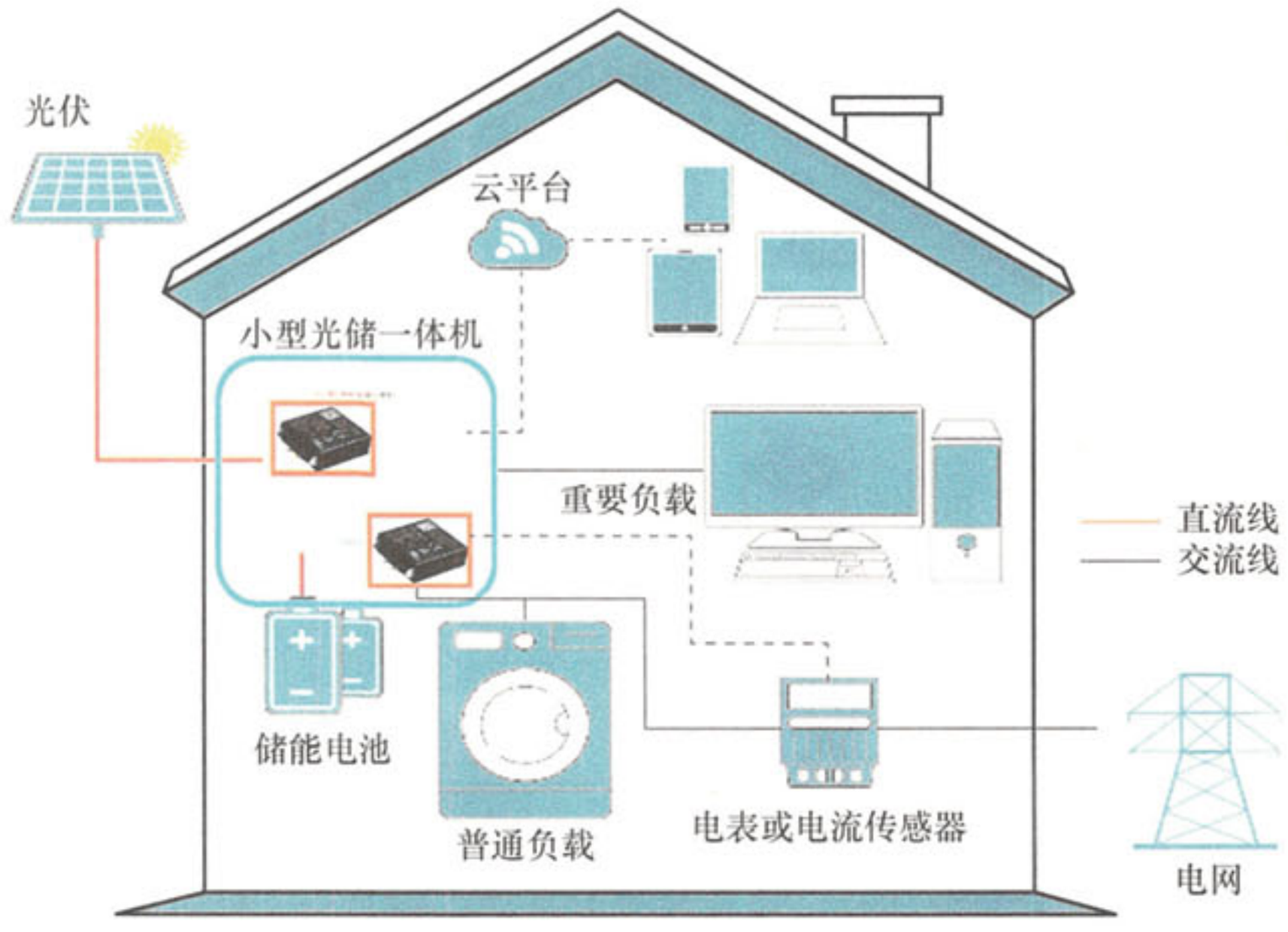


图 12-23　家庭户用光储系统电涌保护应用方案

小型光储变流器交流侧可以使用具有 T1 试验类别的板载电涌保护器件 TFMOV25M，其单体模块 I_{imp}(10/350μs)= 6~7.5kA，I_n(8/20μs)= 20kA，也可根据用户自己的需要进行并联匹配以提升 I_{imp} 和 I_n。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_c 可选 AC 385~680V，同时也可根据用户使用需求将模块进行串联，以适应系统标称电压。220V 单相系统中，该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 2+0 配置或 CT2 型 1+1 配置；220/380V 三相系统中，该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 4+0 配置或 CT2 型 3+1 配置对变流器交流侧进行保护。



图 12-24　TFMOV25M 板载系列电涌保护模块

2. 家庭户用交流耦合系统电涌保护器应用方案

家庭户用交流耦合系统小型光储变流器直流侧连接了电池组，交流侧与电网连接，如图 12-25 所示。

小型储能变流器直流侧可以使用具有 T2 试验类别的板载电涌保护器件 TFMOV20M，如图 12-26 所示，其单体模块 I_n(8/20μs)= 20kA，也可根据用户自己的需要进行并联匹配以提升 I_n。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等

级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC 500~1000V，同时也可根据用户使用需求将模块进行串联，以适应系统标称电压。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形组合，对变流器直流侧进行保护。

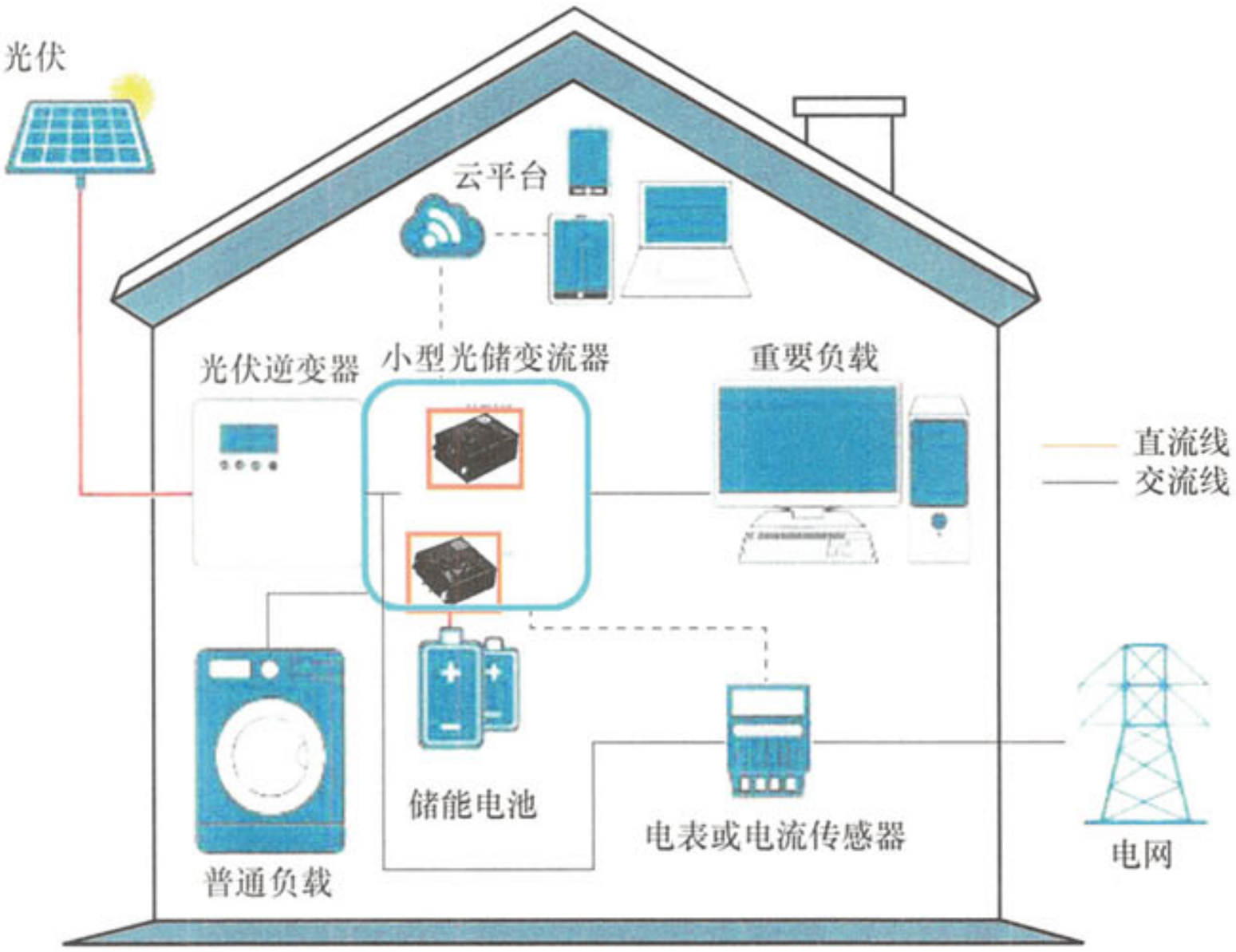


图 12-25　家庭户用交流耦合系统电涌保护器应用方案

小型储能变流器交流侧可以使用具有 T1 试验类别的板载电涌保护器件 TFMOV25M（见图 12-24），其单体模块 I_{imp}（10/350μs）= 6~7.5kA，I_n（8/20μs）= 20kA，也可根据用户自己的需要进行并联匹配以提升 I_{imp} 和 I_n。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_c 可选 AC 385~680V，同时也可根据用户使用需求将模块进行串联，以适应系统标称电压。220V 单相系统中，该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 2+0 配置或 CT2 型 1+1 配置；220/380V 三相系统中，该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 4+0 配置或 CT2 型 3+1 配置对变流器交流侧进行保护。



图 12-26　TFMOV20M 板载电涌保护模块

12.11.2.2　工商业储能电涌保护器应用方案

工商业储能变流器（PCS）直流侧与电池组连接，交流侧与电网连接，如图 12-27 所示。

工商业储能变流器（PCS）直流侧采用 T2 试验类别的电涌保护器 SD20R. PV 系列，如图 12-28 所示，其单极模块，I_n（8/20μs）= 20kA。其最大持

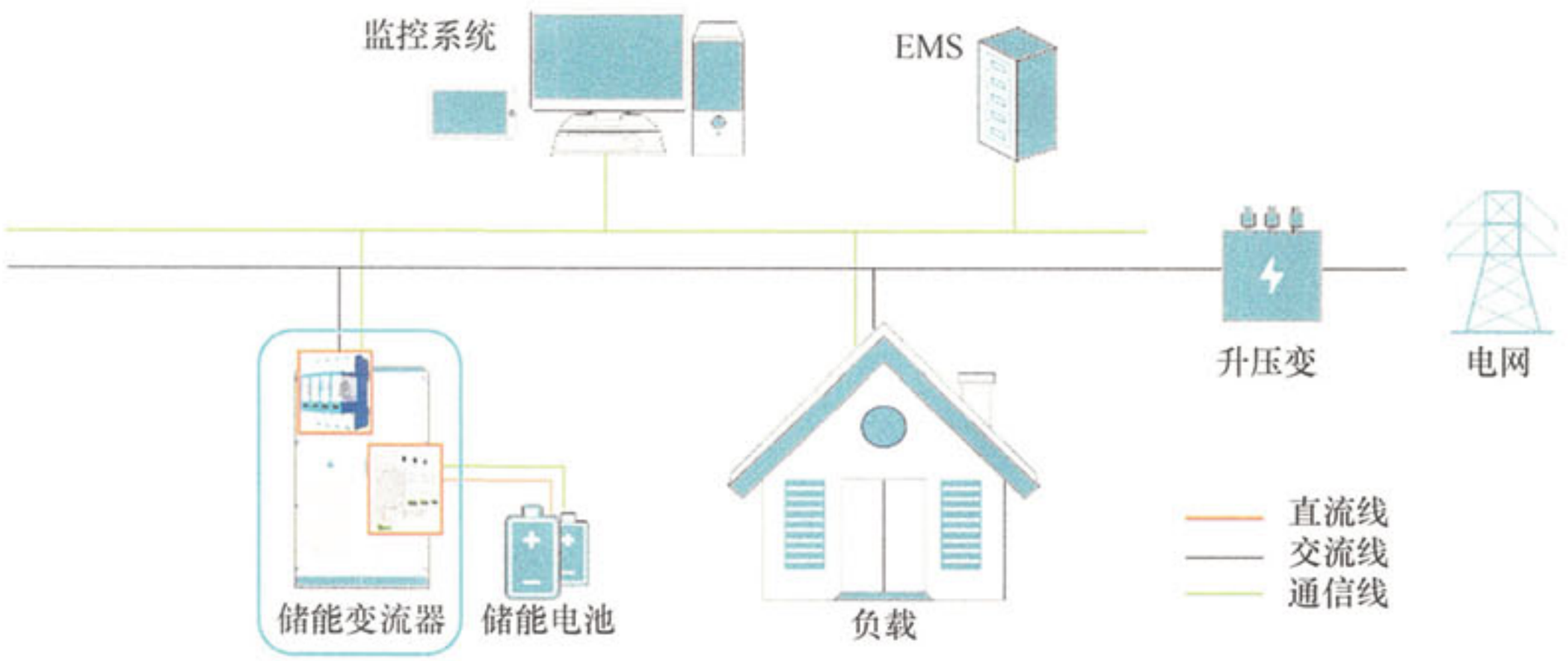


图 12-27　工商业储能电涌保护器应用方案

续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC 600～1500V。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形接线方式，对变流器直流侧进行保护。

工商业储能变流器（PCS）交流侧采用 T1 试验类别的电涌保护器 SD25T 系列，如图 12-29 所示，其单极模块 I_{imp}（10/350μs）= 5～12.5kA，I_n（8/20μs）= 25kA。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_c 可选 385～1300V。该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 4+0 配置或 CT2 型 3+1 配置对变流器交流侧进行保护。



图 12-28　SD20R. PV 光伏专用电涌保护器



图 12-29　SD25T 系列交流电涌保护器

12.11.2.3　大型储能电涌保护器应用方案

1. 光储系统电涌保护器应用方案

（1）直流母线方案

大型光储系统直流变换器（DC-DC）直流侧分别与电池组和直流母线相连，如图 12-30 所示。

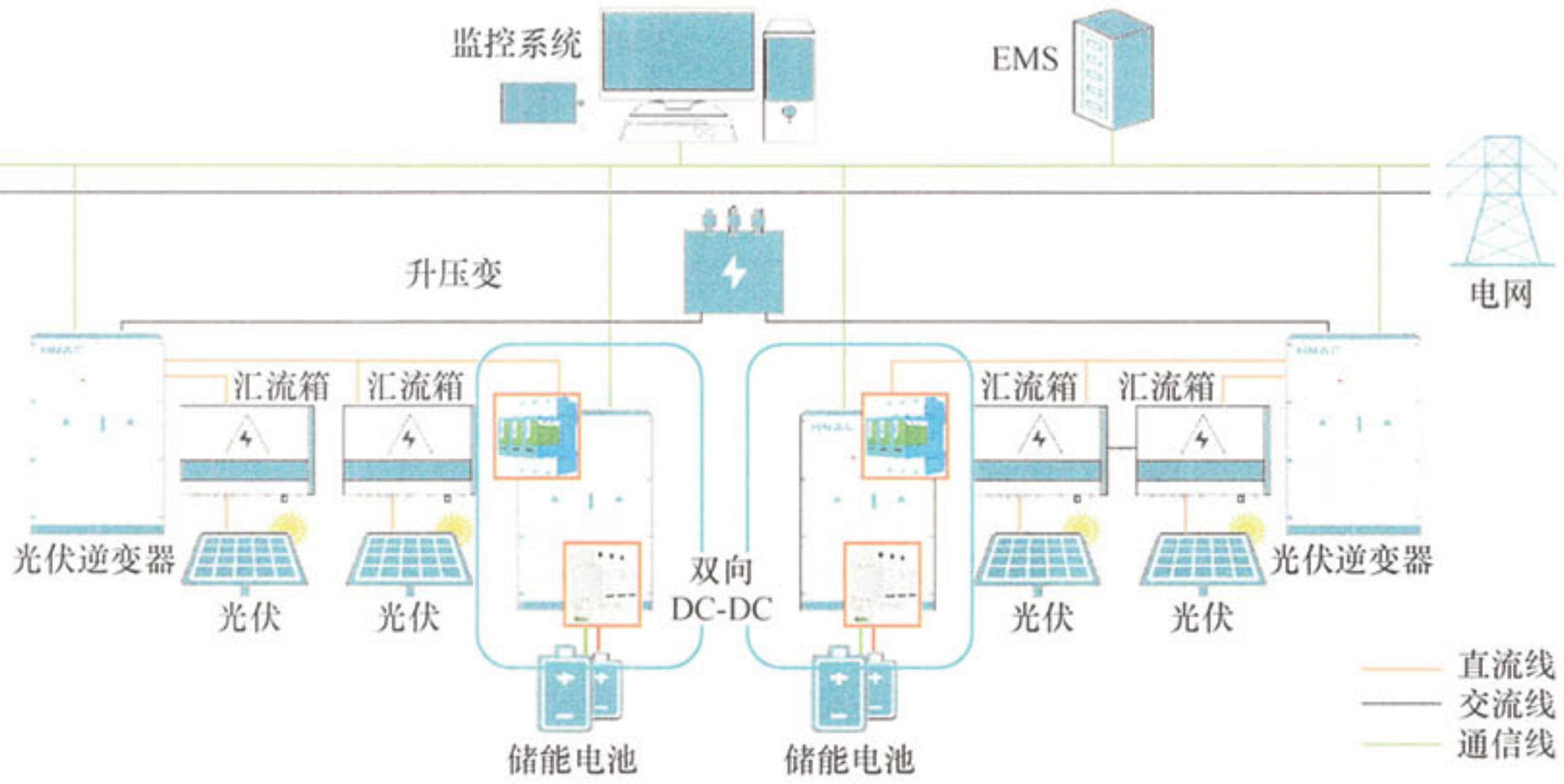


图 12-30　光储系统直流母线电涌保护方案

大型光储系统直流变换器（DC-DC）电池组侧采用 T2 试验类别的电涌保护器 SD20R. PV 系列（见图 12-28），其单极模块 I_n（8/20μs）= 20kA。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC 600～1500V。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形接线方式，对变流器直流侧进行保护。

大型光储系统直流变换器（DC-DC）直流母线侧采用 T1 试验类别的电涌保护器 SD25T. PV 系列，如图 12-31所示，其单极模块 I_{imp}（10/350μs）= 5～12. 5kA，I_n（8/20μs）= 25kA。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC 600～1500V。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形接线方式，对变流器直流侧进行保护。

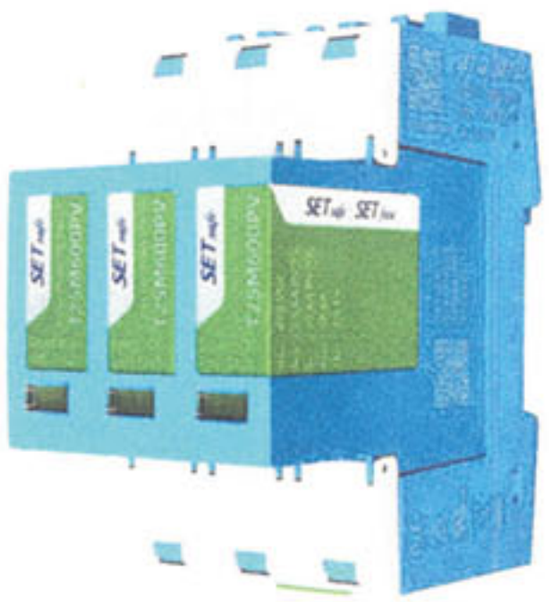


图 12-31　SD25T. PV 光伏专用电涌保护器

（2）交流母线方案

大型光储系统变流器（PCS）直流侧分别与电池组和直流母线相连，如图 12-32 所示。

大型光储系统变流器（PCS）直流侧采用 T2 试验类别的电涌保护 SD20R. PV 系列（见图 12-28），其单极模块 I_n（8/20μs）= 20kA。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_{cpv} 可选 DC 600～1500V。该系列电涌保护器器件可采用 U 形或 Y 形接线方式，对变流器直流侧进行保护。

大型光储系统变流器（PCS）交流侧采用 T1 试验类别的电涌保护器 SD25T. 系列（见图 12-29），其单极模块 I_{imp}（10/350μs）= 5～12. 5kA，I_n（8/20μs）= 25kA。其最大持续工作电压可根据用户设备的电压等级进行匹配，例如 U_c 可选

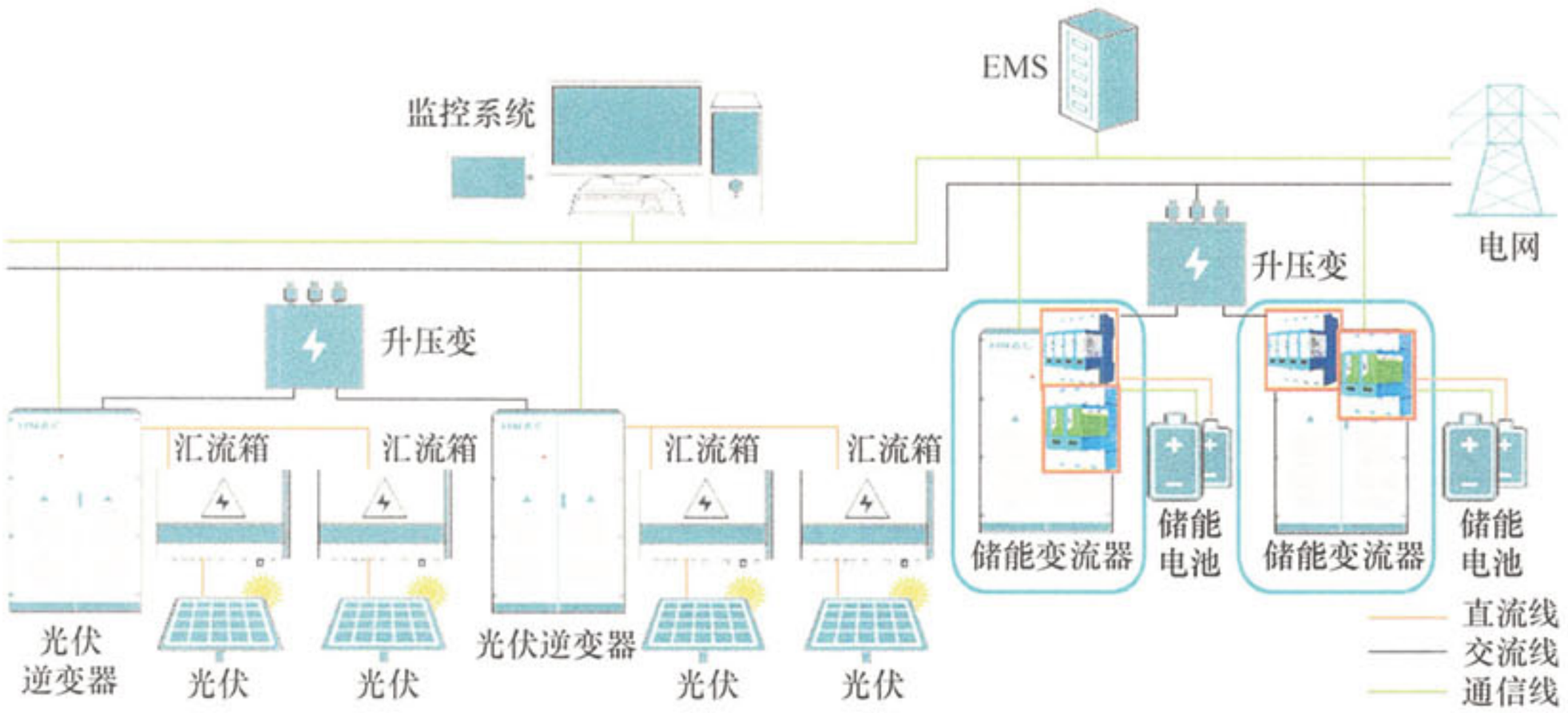


图 12-32　光储系统交流母线电涌保护方案

385~1300V。该系列电涌保护器器件可采用 CT1 型 4+0 配置或 CT2 型 3+1 配置对变流器交流侧进行保护。

2. 风储系统电涌保护器应用方案

如图 12-33 所示，风储系统变流器（PCS）直流侧与电池组相连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

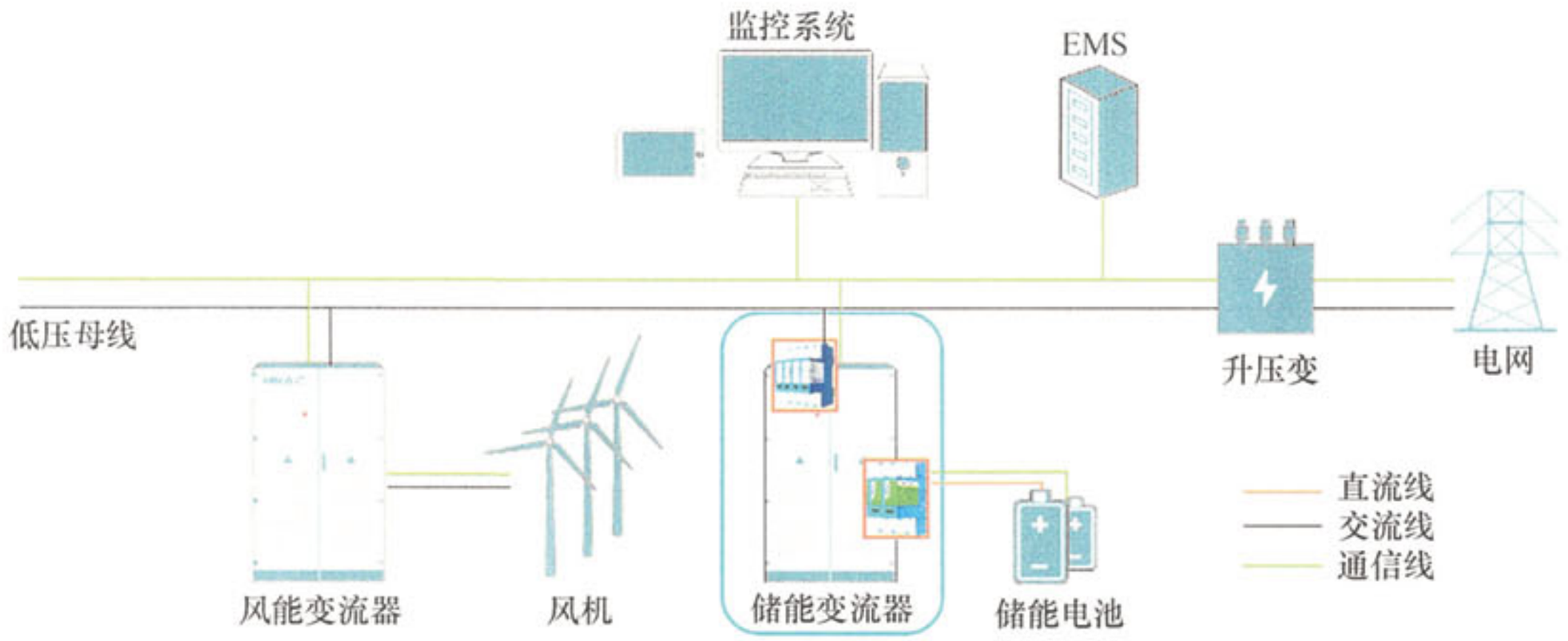


图 12-33　风储系统电涌保护方案

3. 火储系统电涌保护器应用方案

如图 12-34 所示，火储系统变流器（PCS）直流侧与电池组相连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

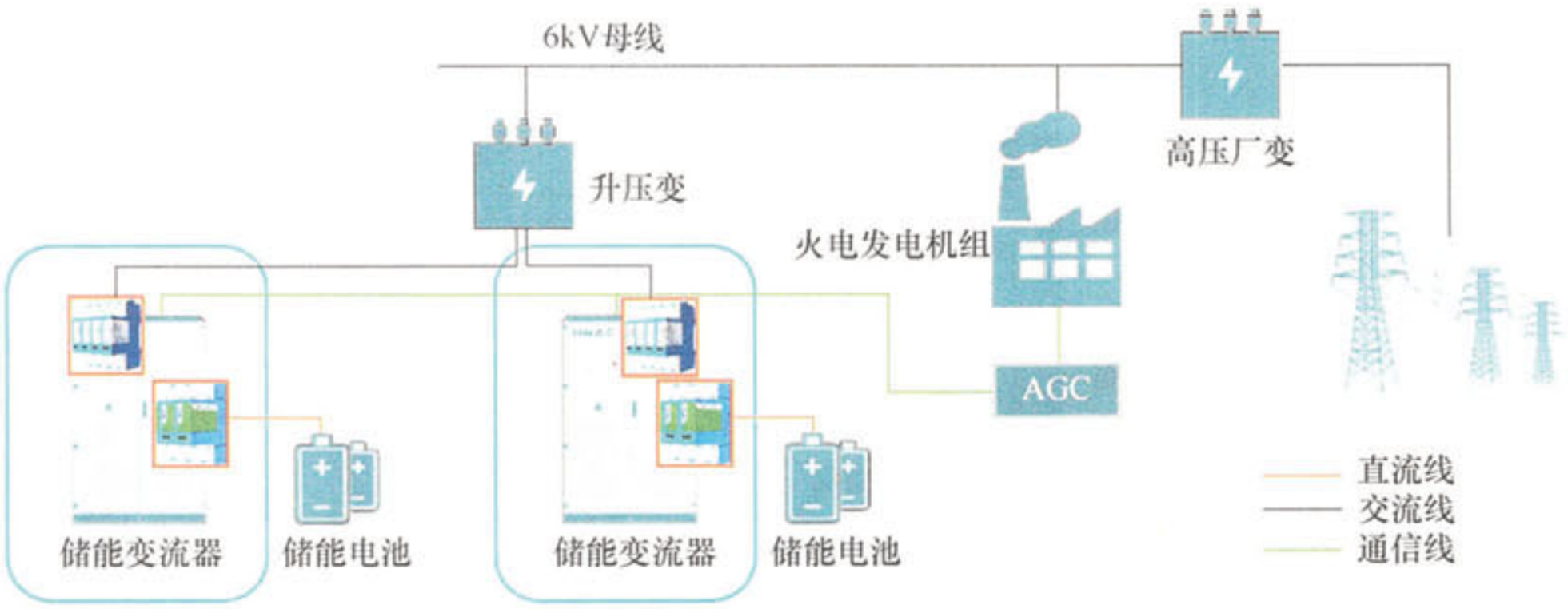


图 12-34　火储系统电涌保护器应用方案

4. 电网储能系统电涌保护器应用方案

如图 12-35 所示，电网储能系统变流器（PCS）直流侧与电池组相连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

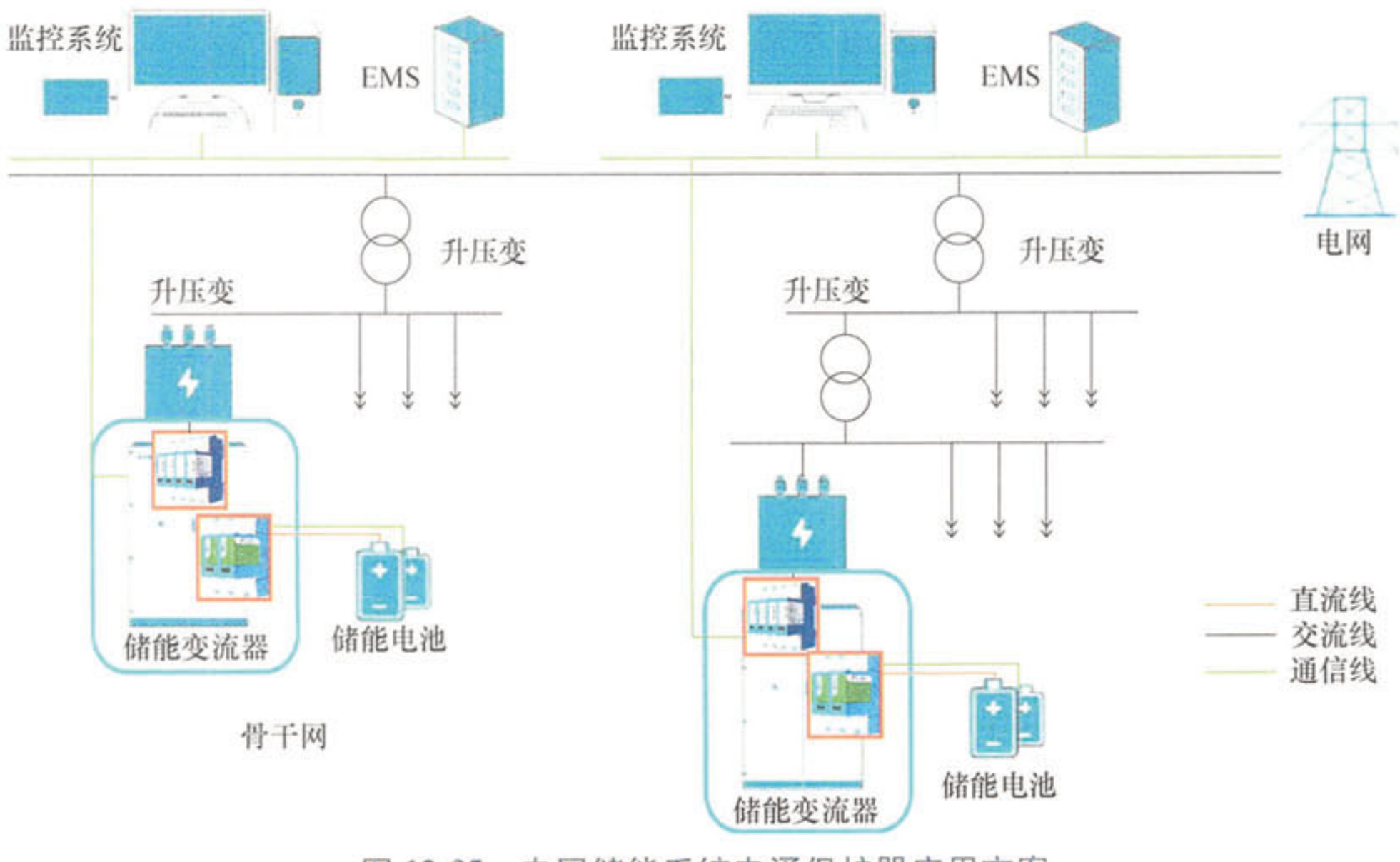


图 12-35　电网储能系统电涌保护器应用方案

12.11.3　其他储能系统电涌保护应用方案

12.11.3.1　微电网储能电涌保护应用方案

1. 并网型微电网储能电涌保护应用方案

如图 12-36 所示，并网型微电网储能系统变流器（PCS）直流侧与电池组相

连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

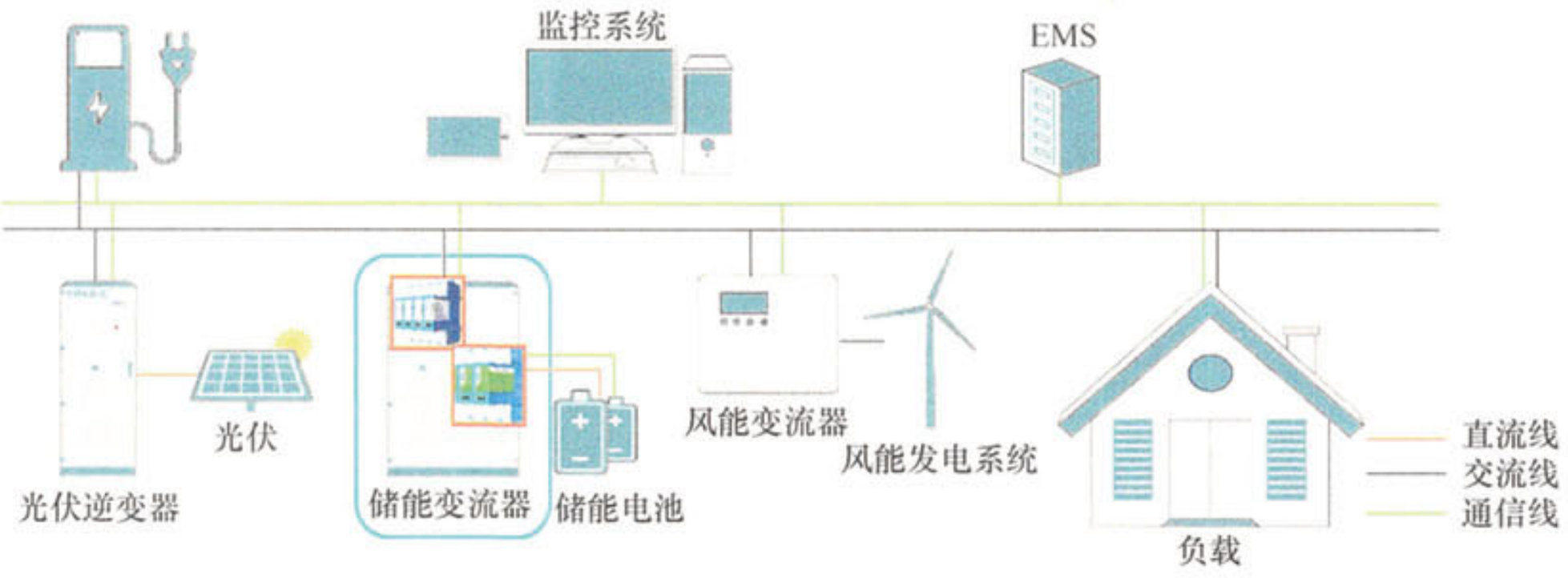


图 12-36　并网型微电网储能系统电涌保护器应用方案

2. 离网型微电网储能电涌保护应用方案

如图 12-37 所示，离网型微电网储能系统变流器（PCS）直流侧与电池组相连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

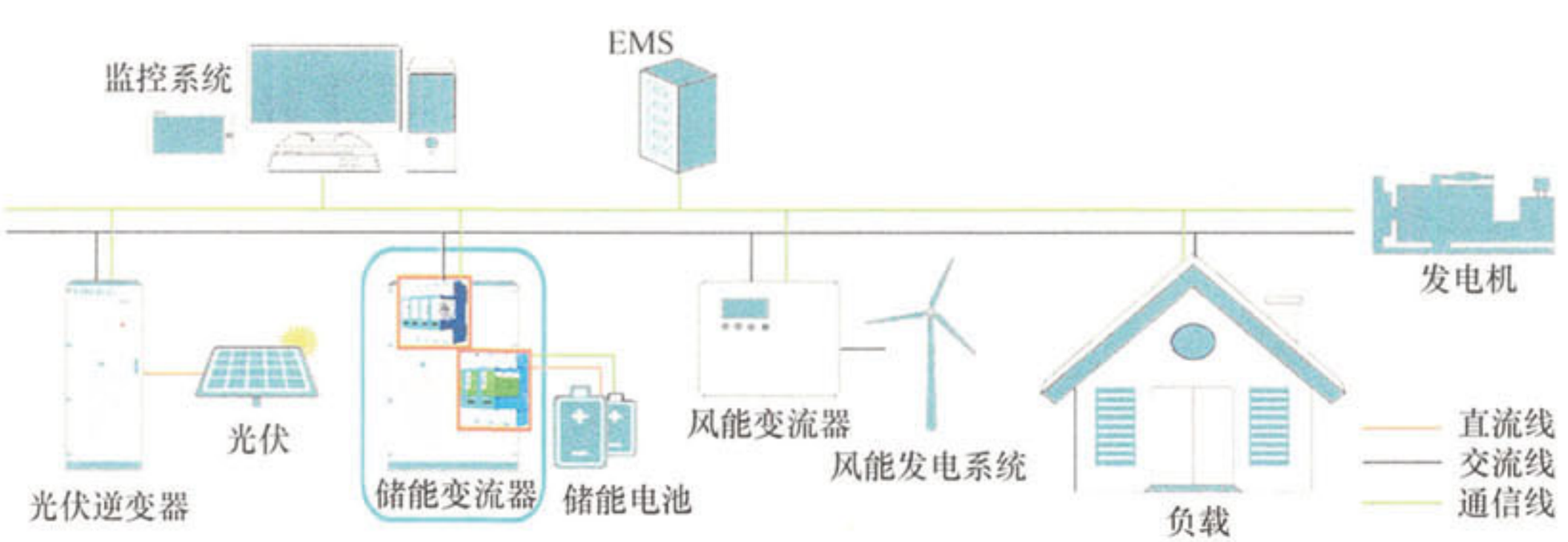


图 12-37　离网型微电网储能电涌保护器应用方案

12.11.3.2　光储充电涌保护应用方案

1. 直流母线接线方案

如图 12-38 所示，光储充直流母线接储能系统直流变换器（DC-DC）直流侧分别与电池组和直流母线相连，电池组侧采用 T2 试验类别的电涌保护器 SD20R. PV 系列（见图 12-28），直流母线侧采用 T1 试验类别的电涌保护器 SD25T. PV 系列（见图 12-31）。

2. 交流母线接线方案

如图 12-39 所示，光储充交流母线储能系统系统变流器（PCS）直流侧与电

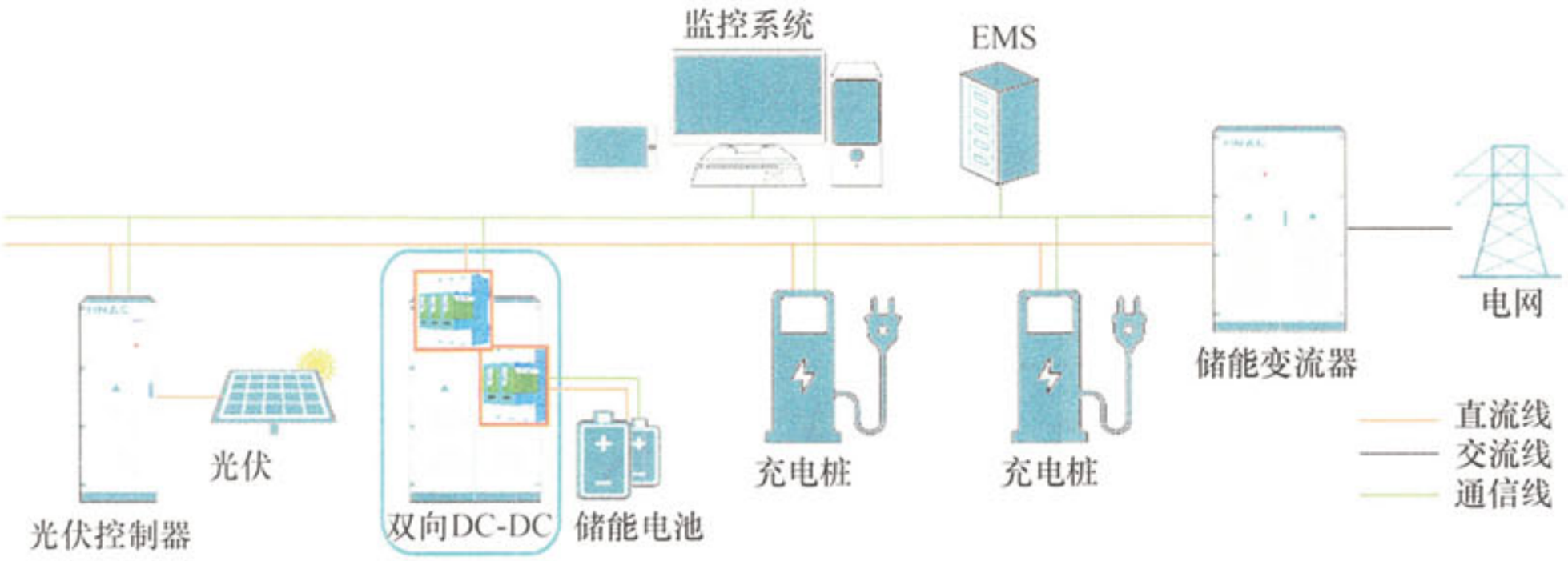


图 12-38　光储充直流母线系统电涌保护器应用方案

池组相连，选用 SD20R. PV 系列电涌保护器（见图 12-28），交流侧与电网相连，选用 SD25T 系列电涌保护器（见图 12-29）。

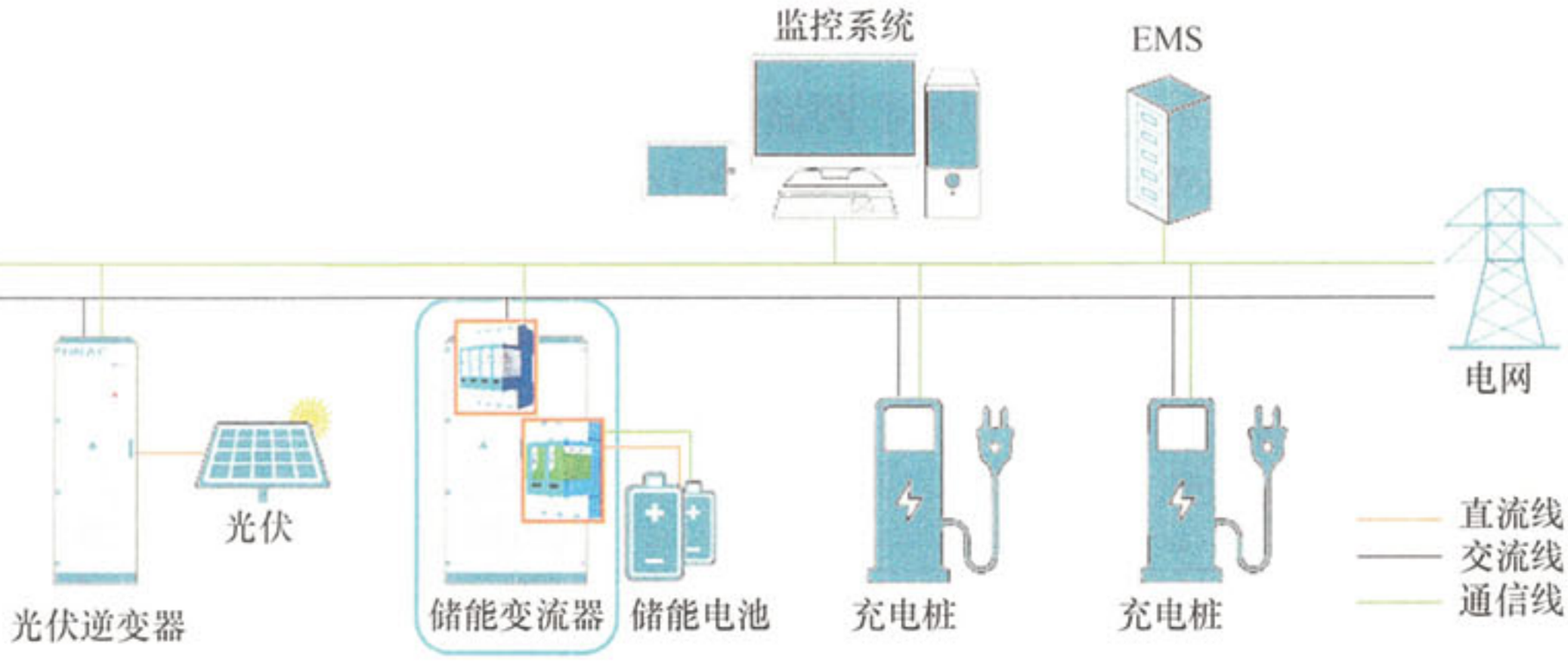


图 12-39　光储充交流母线系统电涌保护器应用方案

参 考 文 献

[1] 上海电器科学研究院，上海电科电器科技有限公司. 低压熔断器　第 1 部分：基本要求：GB/T 13539. 1—2015［S］. 北京：中国标准出版社，2016.

[2] 王季梅. 低压熔断器［M］. 北京：机械工业出版社，1979.

[3] ANSI. Standard for safety：batteries for use in stationary and motive auxiliary power applications：UL1973-2022［S］. ANSI，2022.

[4] IEEE Standard C37. 40-1993：High-Voltage Fuses & Switches［S］. IEEE，1993.

[5] 施耐德电气（中国）有限公司，北京海博思创科技股份有限公司. 全域保护——消除电池储能系统直流保护盲区［C］. 第十八届（2025）国际太阳能光伏与智慧能源大会暨展览会，2025.

[6] IEC. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries，for use in industrial applications：IEC