



# 光伏发电系统直流拉弧智能检测 (AFCI)

## 技术白皮书

北京鉴衡认证中心、华为技术有限公司联合发布

2020年8月





## 前言

面向分布式（含户用）光伏发电系统，华为技术有限公司推出带直流拉弧智能检测与快速关断（AFCI）功能的逆变器。截止 2020 年 5 月份，该型逆变器已在 54 个国家应用，全球总出货量达到 25000 台。

为全面证实 APCI 性能及可用性水平，受华为技术有限公司（以下称“华为”）委托，北京鉴衡认证中心（以下称“鉴衡”）对该技术进行了全面的技术评估和性能验证。结果表明：**华为带 APCI 功能的逆变器满足 UL 1699B-2018《光伏直流电弧故障电路保护安全标准》标准要求，在检测范围、检测精度和关断响应时间等方面均达到 CGC/GF 175: 2020《电弧检测及快速关断性能等级评价技术规范》“L4”等级水平。**

为使业界全面了解 APCI 技术，鉴衡和华为联合发布“光伏发电系统直流拉弧智能检测与快速关断（AFCI）技术白皮书”，较为详尽地介绍了 APCI 技术的开发背景、技术原理、技术难点和特点、现有技术的验证和评估结果及应用前景，旨在：

- 1) 为电站开发企业及其他相关方准确地了解和使用带 APCI 功能的产品提供参考；
- 2) 基于现状及不断变化的应用需求，为技术开发和推广企业持续改进其产品提供依据。



# 01

## 技术开发背景

根据国际可再生能源机构（IRENA）的统计，截至 2019 年底，全球累计光伏装机量达到 580.1GW，其中，中国累计光伏装机量为 204.3GW。

各类发电形式中，分布式光伏以其独特优势，最适合分布式电源建设，我国也比较重视，近些年，国家和地方出台了許多特殊政策，有力地促进了分布式光伏在我国的发展。

图 1-1 为 2016 年~2019 年分布式光伏在我国光伏装机占比中的变化情况。从图中可以看出，分布式光伏在我国光伏装机中的占比呈增长态势。另外，近几年，我国的分布式光伏中，户用光伏最为抢眼，根据中国光伏协会给出的数据，截至 2019 年底，我国户用光伏的累计装机量已达到 10.1GW，安装户数达到 108.5 万户，较 2015 年底，安装户数增加近 50 倍。

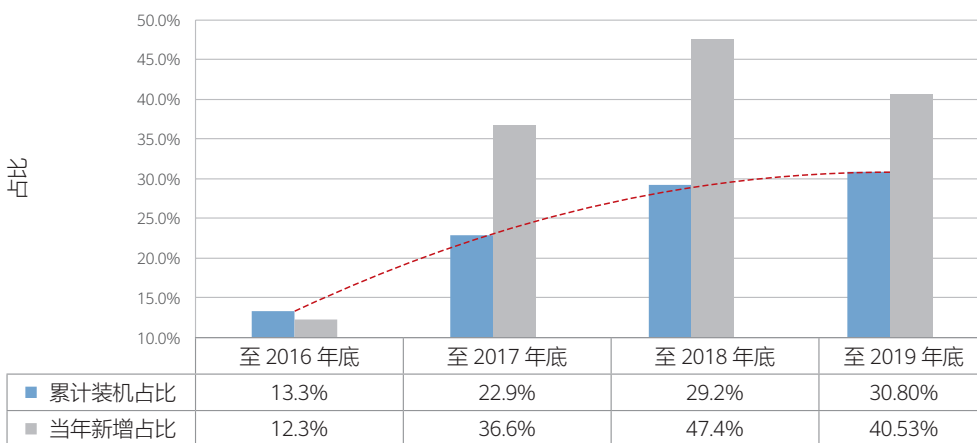


图 1-1. 中国分布式光伏在光伏总装机中占比

图 1-2 为分布式光伏应用场景和系统形式框图。单体容量小、站址分散、应用场景和系统形式复杂、可控程度差、运维难度大是分布式光伏的显著特点。另外，分布式光伏建于电力用户侧，大多处于工业或居民区，对安全方面的要求较高。分布式光伏特点所决定，利用智能化手段，提高电站本质安全度，避免各类财产损失和人身伤害事故的发生，是实现分布式光伏可持续发展的基础保障。另外，分布式光伏中，建于各类建筑上的光伏为主流形式，包括

BAPV、BIPV，从安全角度，电气安全事故为此类发电形式的防范重点。图 1-3 为典型小型分布式光伏发电系统电气结构图。在图中所示电气结构中，从电气安全角度，交流部分的防控重点为供电质量和安全，直流部分的防控重点是电气火灾、电击和雷击事故。从标准和技术现状看，交流部分的标准比较健全，安全防范技术也比较成熟；直流部分还有较大的改进和提高空间，近几年，IEC 和欧美国家也将标准研制的重点放在这方面。

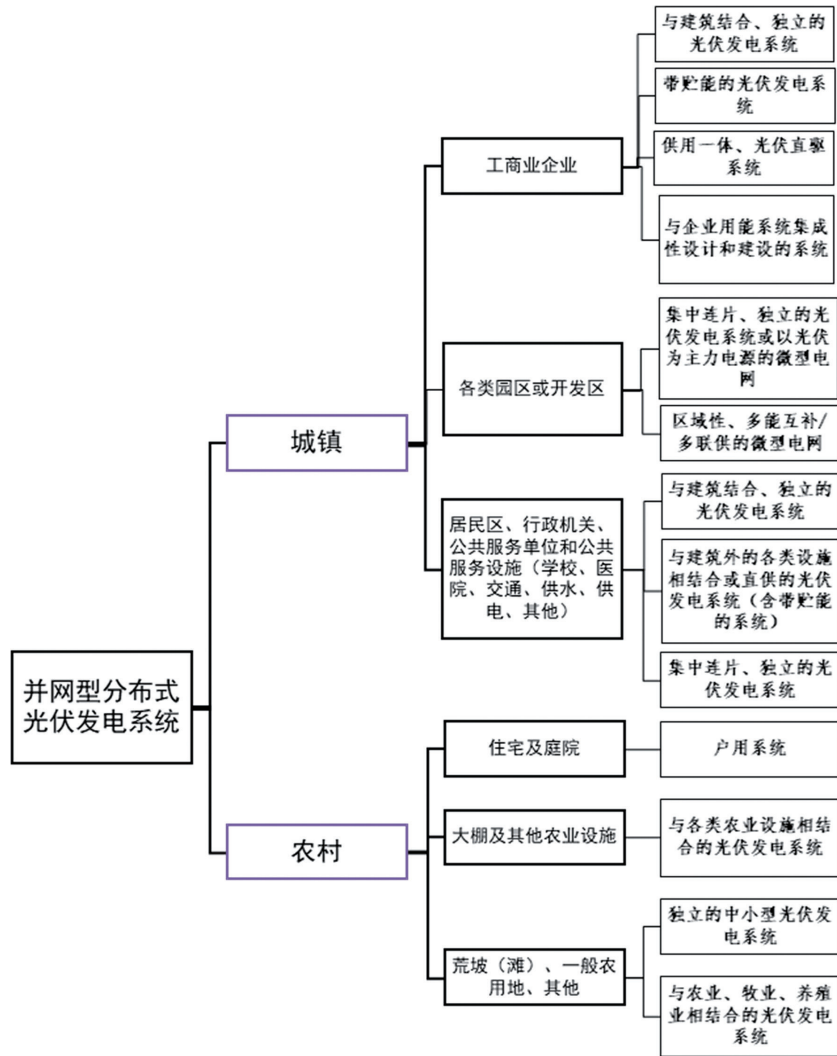


图 1-2. 分布式光伏应用场景和系统形式框图

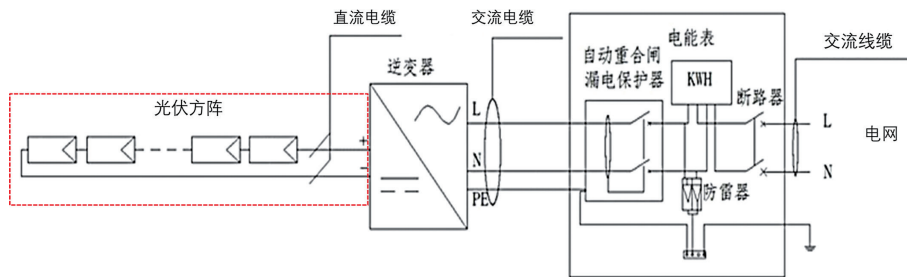


图 1-3. 小型分布式光伏电气结构示例

目前，光伏方阵电气安全设计主要依从 IEC 62548《光伏方阵设计要求》及相关标准。该标准主要从电击保护、过电流保护、方阵接地绝缘电阻及残余电流监测和响应、雷

击和过电压保护、电气装置选择和安装等方面规定了设计要求。透过事故案例，分析现行标准，总体看还不够完善，例如：上述标准中对直流电缆载流量设计影响因素的考虑

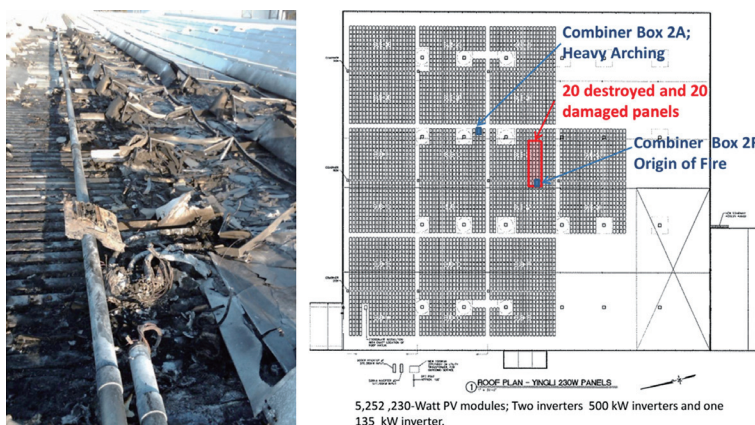


过于笼统；按标准要求选配过流保护装置在实际的事故防范中作用有限；受技术条件限制，在拉弧检测和故障响应方面，仅以参考性附录形式给出说明，并未提出明确的设计要求。

全球范围内，光伏发电各类安全事故中，电气火灾发生的频次最高，造成的损失也最大。以荷兰为例，户用光伏领域，2018 年共发生 23 起火灾事故，占其安装总数的 0.14%，下图为所发生的火灾事故图例。我国的分布式光伏，也已经发生过数十次较大的火灾事故。



光伏电站火灾事故大多为直流拉弧引起。下图为美国某光伏电站火灾事故图片。事后调查，主要是由于 2 次电弧引起部件过热，导致汇流箱黏连后起火。



直流拉弧有 3 种类型，包括串联电弧、并联电弧和对地电弧，见图 1-4。在 3 种类型的电弧中，电气结构和光伏发电特点所决定，串联电弧发生的可能性和频次最高，概率统计在 80% 左右；并联电弧（含对地电弧）发生的可能性较小，但危害较大。图 1-5 为我国某分布式电站火灾图例及根据事后调查还原的事故致因及发生过程。

综上所述，分布式为光伏发电的主力形式之一，应用前景广阔。电气火灾为分布式光伏需要防范的首要风险。电气火灾主要由直流拉弧引起，采用综合性措施，特别是智能电弧检测和快速关断技术，“防消”结合，提高电站的安全防控水平，势在必行。

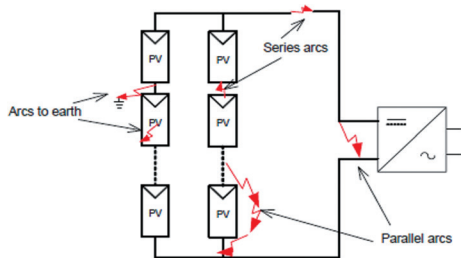


图 1-4. 光伏方阵中电弧类型

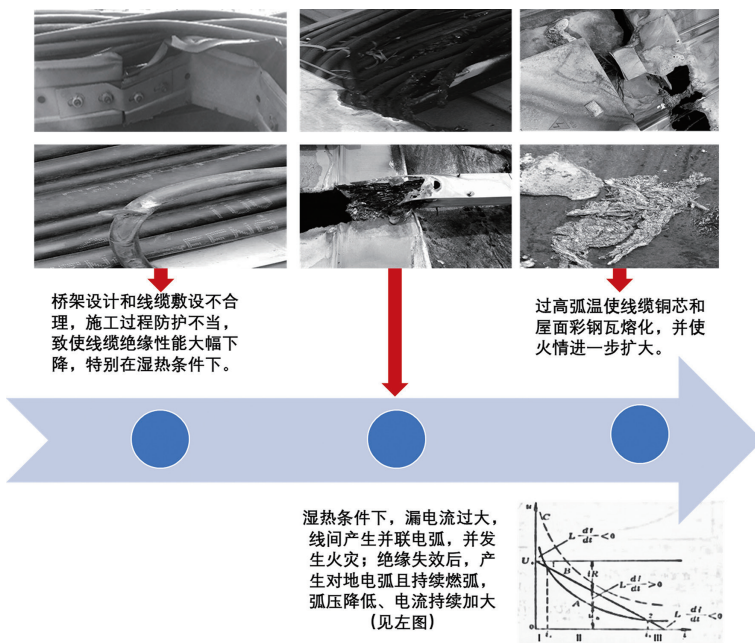


图 1-5. 火灾致因及发生过程图示



# 02

## 技术说明

### 2.1 AFCl 技术原理

电弧是在带电导体与导体（或地）距离较近时，导体间电压击穿空气，使空气电离而产生的一种辉光现象。

电弧产生高温，强烈时可以产生明火。在电气系统中，电弧不仅会造成周遭的绝缘物质分解或碳化而失去绝缘的功效，同时也容易导致邻近的物质达到燃点而被点燃起火。

在光伏系统中，接点松脱、接触不良、接线断裂、绝缘材料老化、碳化、电线受潮、腐蚀、绝缘材料破损等原因都可能产生电弧。由于光伏系统直流侧接线端子很多，发生电弧危害的可能性较高。

光伏方阵可能产生的电弧种类见图 1-4。原理上讲，电弧可以近似等效为一个可变阻抗与电压源串联（见图 2-1），电弧电压随电流、间距增大而增大。

电弧模型是一个时变非线性模型，电弧信号类似于白噪声信号，其能量在所有频谱上几乎都有分布，表现为不同频段能量的抬升，见图 2-2。图中可以看出，有无电弧的系统，频谱存在明显差异，意味着**可通过监测系统**中的电学参数及其频谱变化判断电路中是否有电弧产生。

电弧特征信号能量随输入线缆长度及电弧电流的增加显著减小，见图 2-3。对电弧检测，即要防止误报，又要防止漏报，使事故扩大。通常，将**保护前电弧能量积累值作为关键参数**，并围绕此参数设定衡量 AFCl 精度的考量指标。

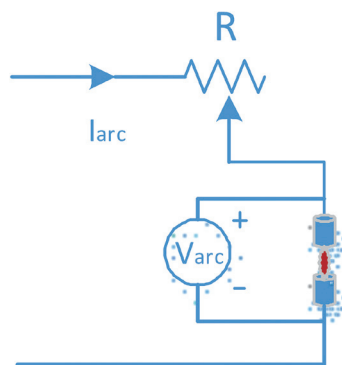


图 2-1. 电弧近似等效电路

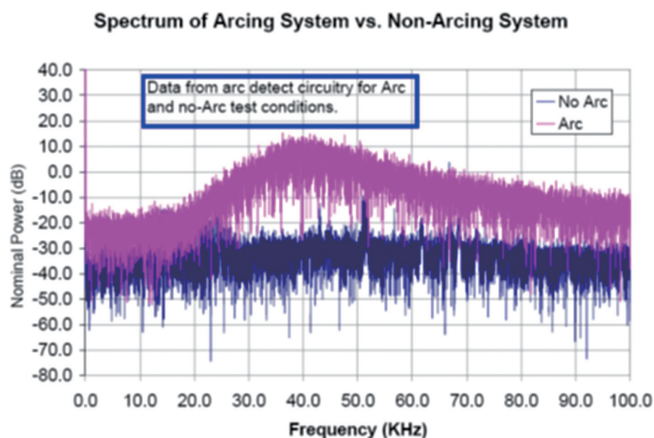


图 2-2. 存在电弧系统频谱变化



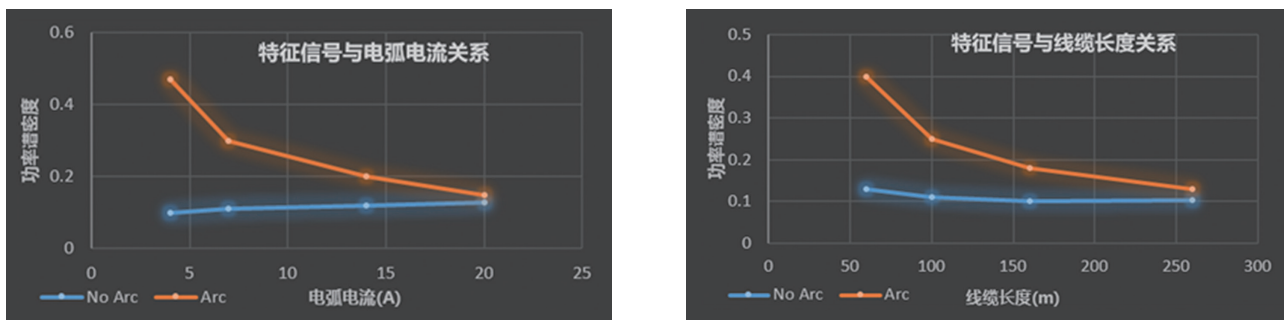


图 2-3. 电弧特征信号能量与电弧电流和长度关系

图 2-4、图 2-5 为 AFCI 功能检测的模拟等效网络要求。

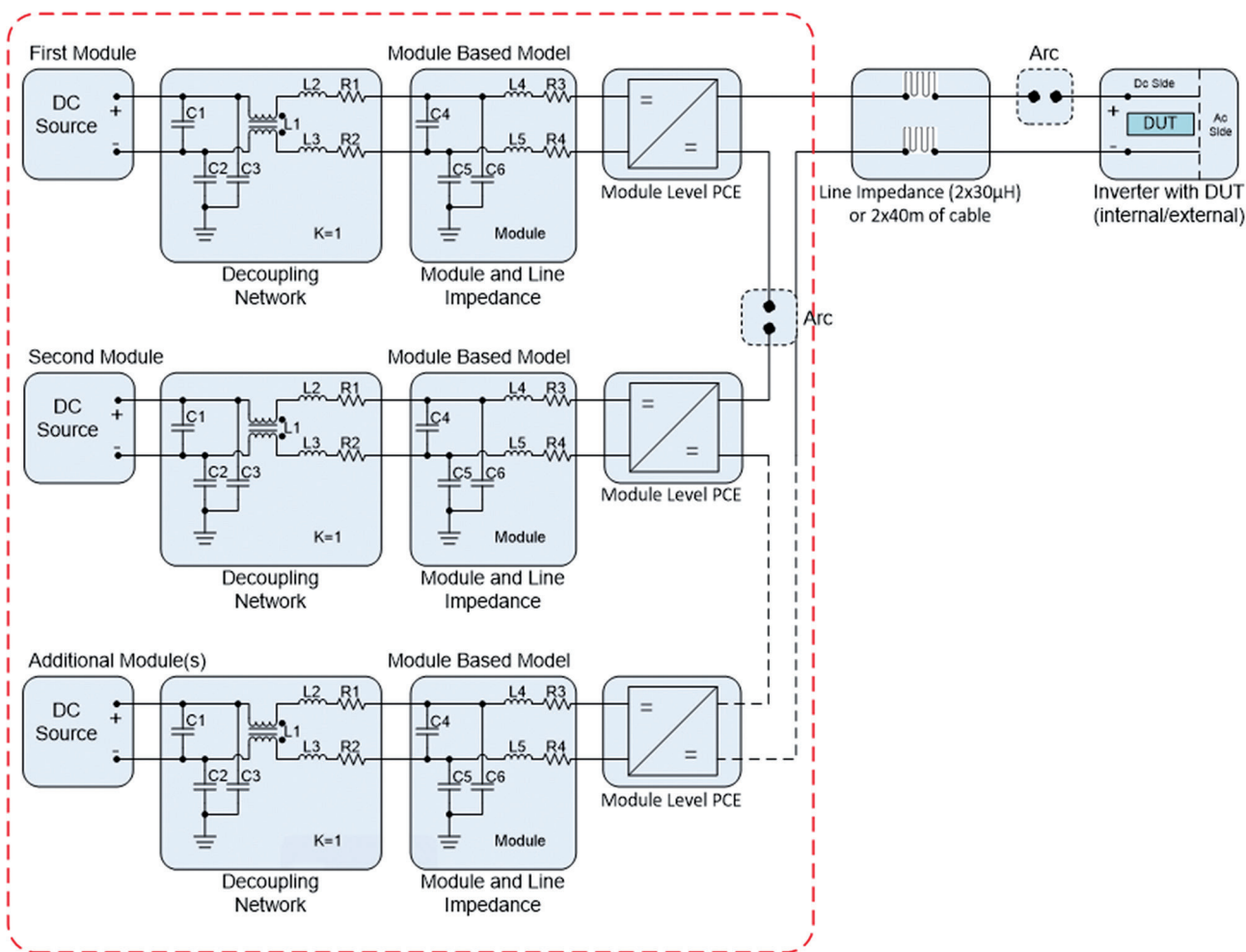


图 2-4. AFCI 模拟阻抗网络 (带优化器)

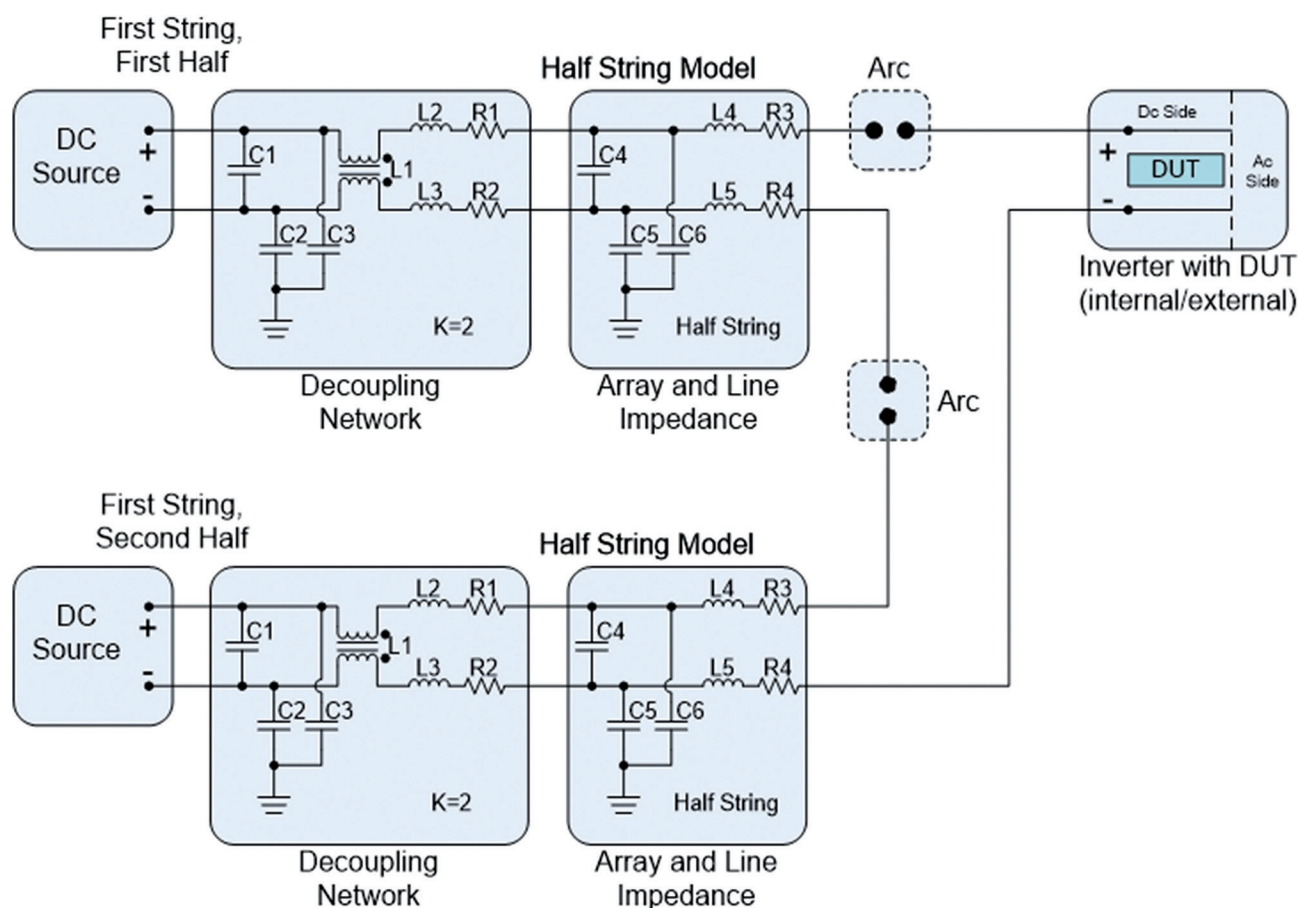


图 2-5. AFCE 模拟阻抗网络（不带优化器）

## 2.2 AFCE 技术开发的难点

目前，直流电弧检测主要是利用电弧电流 / 电压频域，包括（不限于）频点、能量、变化量等特征信息进行分析判断，有的厂家由供应商提供一体化算法包，再通过不同阈值参数进行调试。考虑电弧检测原理及现有检测方案和技术水平，以下两点为需要重点解决的难点问题。

### 1) 噪声适应性

设备现场运行环境复杂多变，传统方案中的电弧检测算法和阈值设定主要基于人的经验，在遇到环境噪声接近电弧频谱特征时，无法有效区分，容易导致误保护。另外，在并联和对地电弧检测中，由于底噪在不同环境中均会变化，

当前技术水平尚难于有效识别。

### 2) 场景适应性

随着光伏组件和光伏逆变器技术发展和产品演进，光伏组件电流和逆变器单机功率不断提升，对于实际使用场景，输入侧线缆长度和电弧最大电流均可能超过标准给定的测试工况，例如，对于 100kW 逆变器解决方案设计，输入线缆长度可能超过 200m，单路 MPPT 最大电流可能超过 26A。如图 2-3 所示，电弧的特征信号随电流和线缆长度增加，逐渐变弱，对检测仪表和算法的精度提出了更高要求。



## 2.3 华为 AFCI 解决方案的技术特点

针对上述难点问题，华为利用其自身优势及其他领域积累的经验，采用综合性解决方案，归纳起来，有以下两方面突出特点：

- 1) 利用 ICT 和人工智能领域积累技术经验，将 AFCI 与深度学习技术相结合，推出 AI BOOST AFCI 智能电弧检测方案。区别于人工归纳设计，AI 基于高度非线性模型，可同时对海量数据进行计算、迭代，寻找高维空间特征规律，有效区分下图所示形状接近的特征信号。
- 2) 通过 AI 和深度学习技术，使得检测模型具备不断学习未知频谱的能力，有效提升噪声适应性；同时通过提升模型泛化能力，使得模型能够有效识别不同场景的电弧特征，提升场景适应性。图 2-6 为华为解决方案的逻辑

框图，表 2-1 为传统 AFCI 解决方案与华为智能解决方案性能对比。

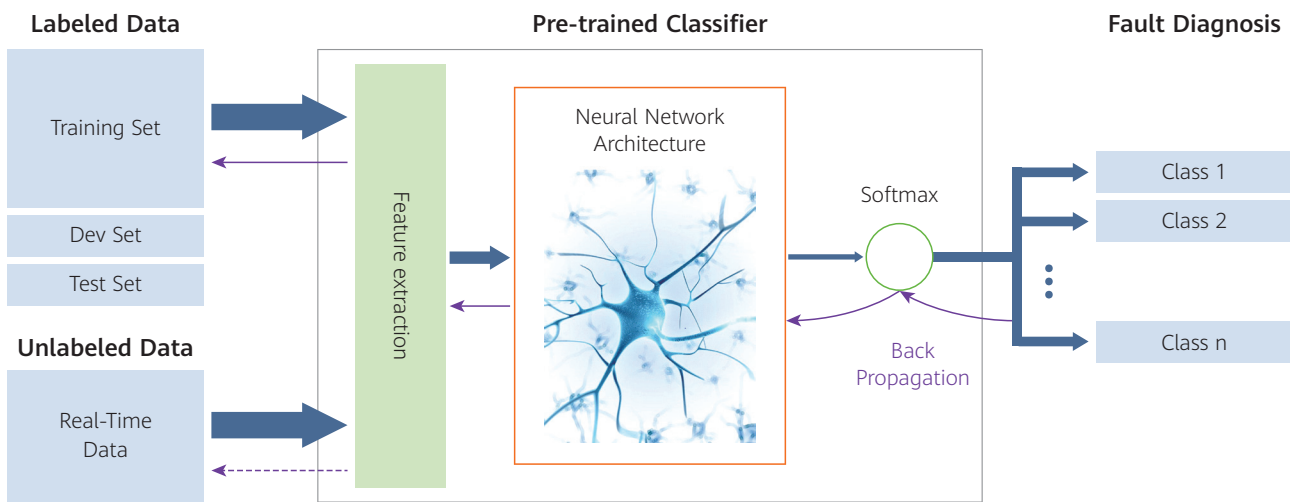
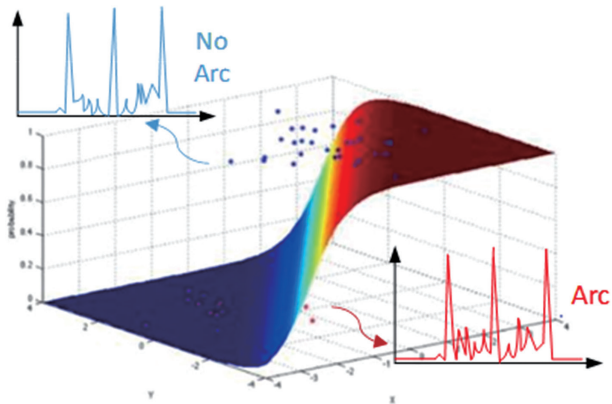


图 2-6. AI 方案逻辑框图

表 2-1. 传统电弧检测方案与 AI BOOST AFCI 智能电弧检测方案对比

	传统电弧检测方案	AI BOOST AFCI 智能电弧检测方案
噪声适应性	<ul style="list-style-type: none"> <li>相似特征信号易产生误报</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>能够有效区分噪声和电弧特征</li> <li>100% 避免误报以及漏报情况</li> </ul>
场景适应性	<ul style="list-style-type: none"> <li>仅支持认证要求输入线缆长度 <b>61m</b></li> <li>仅支持认证要求输入电流 <b>14A</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>能够支持最大输入线缆长度 <b>200m</b></li> <li>能够支持机型最大输入电流 <b>26A</b></li> <li><b>适配优化器，并可实现组件级的电弧故障位置定位</b></li> </ul>



# 03

## AFCI 技术验证和评估结果

为深入理解华为带 AFCI 功能逆变器的技术现状和性能水平，2020 年 2 月~5 月，受华为委托，鉴衡组成验证小组，

对华为采用的 AFCI 技术进行了全面验证和评估。图 3-1 为验证评估过程和内容框图。



图 3-1. 技术验证和评估过程和基本内容

### 3.1 应用需求和技术方案评审

在应用范围方面，华为：1）将 AFCI 应用的重点放在工商业分布式（含户用）光伏发电系统；2）对可能产生的 3 种直流电弧，根据电弧发生的概率、技术难度及国外应用情况，将第一步技术开发的重点放在串联电弧的检测。

针对所确定的应用范围，华为明确了 AFCI 的技术指标及系统解决方案，详见“二”。

通过评审，验证组认为：华为所采用的 AFCI 技术对接应用需求，所采用的技术原理、设计和系统配置方案能够实现预期的功能需求和设定指标。通过采用特有的 AI BOOST AFCI 智能电弧检测方案，有效地解决了噪声、环境适应性方面的难点问题。



### 3.2 性能验证

目前，许多国家和地区已制定或确定了屋面分布式光伏拉弧检测和关断方面的标准，如：美国和加拿大采用的 UL 1699B、NEC2017 690 标准，欧洲、IEC 主导的 IEC 63027 等。目前应用最为广泛的是 UL 1699B-2018《光伏直流电

弧故障电路保护安全标准》标准，标准规定的主要性参数见表 3-1；IEC 63027 尚处于草案阶段。草案中规定的主要性能参数见表 3-1。

表 3-1. UL 1699B- 及 IEC63027（草案）性能要求对照表

	UL 1699B-2011	UL 1699B-2018	IEC 63027
电弧类别	串弧或串并弧(无强制要求)	串弧	串弧
线缆长度	61m	50 uH +0.7 uH per meter above 80 meters	50uH
对地电容		正负 1nF	正负 1nF
保护阈值	电弧持续时间小于 2 秒，并且电弧能量小于 750 焦耳	电弧持续时间小于 2.5 秒，并且电弧能量小于 750 焦耳	电弧持续时间小于 2.5 秒，并且电弧能量小于 750 焦耳
故障清除	手动清除	1. 延时 5min 自动清除； 2. 手动清除； 3. 24 小时内发生 5 次故障，需手动清除	1. 保护装置应在动作 3 分钟后方可自动复位。 2. 当保护装置需要第二次复位时，自动复位等待时间应不少于 10 分钟。 3. 当保护装置在一天内自动复位 5 次后，第六次复位应采用手动复位方式。
故障位置	输入端	输入端、电池板之间	输入端、电池板之间

借鉴现有标准，鉴衡联合华为及其他相关方制定了 CGC/GF 175: 2020《电弧检测及快速关断性能等级评价技术规范》，该规范在覆盖 UL 1699B-2018 标准要求的基础上，针对分布式光伏的现状，充分考虑未来技术发展的需要，在更

宽范围内提出了更高要求，包括分级评价要求。表 3-2 为 CGC/GF 175: 2020《电弧检测及快速关断性能等级评价技术规范》对 AFCl 核心性能的分级评价要求。

表 3-2. AFCl 核心性能分级评价要求

要求 项目	等级				
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
可检出电弧种类	串联串弧	串联串弧	串联串弧	串联串弧	检测范围扩展 预留
全组串范围故障检测可 检出故障范围	输入端	输入端、组件 之间、输出端	输入端、组件 之间、输出端	输入端、组件 之间、输出端	
支持的系统形式	优化器可选	优化器可选	优化器可选	优化器可选	

要求 等级 项目	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
电弧故障点物理定位	不可定位	不可定位	不可定位	可定位	
可检出的线缆长度	61m	80m	80m（单相） 200m（三相）	80m（单相） 200m（三相）	
可适配的最大电弧电流	0.9*I <sub>max</sub>	0.9*I <sub>max</sub>	0.9*I <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>	
电弧产生能量	750J	600J	600J	500J	
关断时间	2.5S	1.5S	1.5S	0.5S	
电弧检测准确率	100%	100%	100%	100%	
技术要求	组串检测	支持优化器系统 +1% 高精度独立 CT	>200DMIPS (Dhrystone 2.1) 高性能 CPU+ 0.5% 独立 CT	>200DMIPS (Dhrystone 2.1) 高性能 CPU+ 0.5% 独立 CT	

依据 CGC/GF 175: 2020《电弧检测及快速关断性能等级评价技术规范》，验证组抽选华为带 AFCI 功能逆变器，进

行了表 3-2 所列内容的现场测试或验证。表 3-3 为各项内容的验证结果。

表 3-3. “华为” AFCI 性能测试和验证结果

项目	结果
可检出电弧种类	串联电弧
全组串范围故障检测可检出故障范围	输入端、组件之间、输出端均可实现
支持的系统形式	可匹配优化器
电弧故障点物理定位	支持定位
可检出的线缆长度	80m（单相） 200m（三相）
可适配的最大电弧电流	I <sub>max</sub>
电弧检测准确率	100%
电弧产生能量	< 500J
关断时间	0.5s
技术要求	>200DMIPS (Dhrystone 2.1) 高性能 CPU +0.5% 独立 CT+ 组件级电弧故障物理定位

依据测试和验证结果，华为带 AFCI 功能的逆变器，  
1) 符合 UL 1699B-2018 标准要求；

2) AFCI 核心性能达到 CGC/GF 175: 2020 中的“L4”水平等级。

### 3.3 综合评定

华为具备 AFCI 功能的逆变器已在中国、北美、欧洲、亚太、拉美、东南亚以及中东非等多个国家和地区成功应用。

基于技术评审和性能验证结果，华为植入逆变器的 AFCI 技术，

1) 符合 UL 1699B-2018 标准要求，性能等级达到 CGC/GF 175: 2020 中的“L4”等级。

2) 串联电弧检测和快速关断技术已比较成熟，在环境复杂的屋顶光伏系统中，可以有效防范电弧危害的发生。

3) 结合组件级电子产品在系统中的应用，可以实现精准电弧故障定位。

4) 在现有性能水平基础上，基于 AI BOOST AFCI 智能检测方案，还可实现更宽范围的高精度检测，如：超过 200m 线缆长度、超过系统  $I_{max}$  电流时。





#### 商标声明

 **HUAWEI, HUAWEI**,  是华为技术有限公司商标或者注册商标，在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其它商标，产品名称，服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

#### 免责声明

本手册可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本手册信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为不对您在本手册基础上做出的任何行为承担责任。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

版权所有 © 华为技术有限公司 2020。保留一切权利。  
非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

#### 华为技术有限公司

深圳龙岗区坂田华为基地  
电话：+86 755 28780808  
邮编：518129  
[www.huawei.com](http://www.huawei.com)