

分布式光伏并网对电能质量的影响和解决方案

摘要：分布式光伏并网后会，经常发生开关跳闸、电压跌落、功率因数低被罚款等现象。本文分析了产生这些问题的原因，介绍并点评了光伏逆变器厂家提供的解决方案。最后，结合海德莱电力多年治理电能质量的经验给出了实施简单、高性价比的解决方案。

1 引言

全球光伏累计装机容量逐年加速增加。分布式光伏并网后，在为业主提供可再生能源的同时，经常发生主回路开关跳闸、电压跌落，甚至因为功率因数降低而被电网公司罚款等现象，严重影响业主的正常用电，并导致投资回报率降低。

本文就分布式光伏并网对电能质量造成的影响、原因和常见的解决方案进行了分析和探讨，并结合海德多年治理电能质量的经验给出了实施简单、高性价比的解决方案。

2 分布式光伏对电能质量的影响

2.1 分布式光伏的工作原理

分布式光伏系统，由产生直流电力的太阳能电池板和连续将直流电力转换为交流电力的太阳能逆变器组成，逆变器直接并网连接到电网。

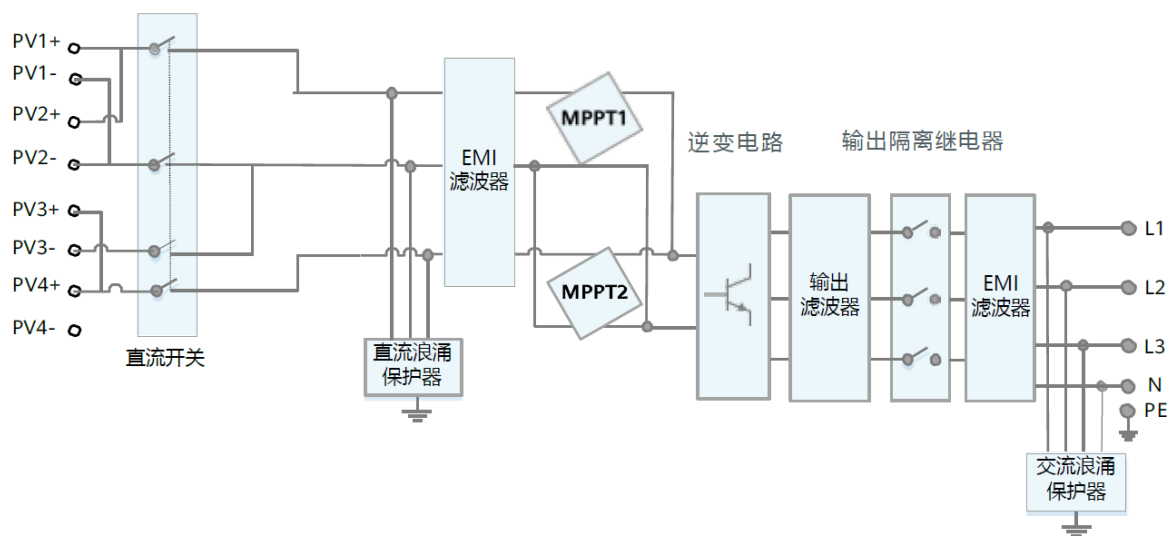


图 1 光伏逆变器的电路图

2.2 分布式光伏系统常见的电能质量问题

由于光伏逆变器是一种将直流电转换为交流电的电力电子设备，它会引起一些电能质量问题，如残余直流电流和谐波。如果光伏逆变器没有正确集成到电气系统中，还会导致三相不平衡或功率因数下降。

2.2.1 谐波问题

光伏逆变器一般使用 PWM 电路，将太阳能电池板产生的直流电转换为受控的交流电，这种电路会控制逆变器输出的幅值和频率，消除低次谐波，但会产生高频谐波。如果高频谐波和负载产生的谐波相结合，

可能会产生谐振的现象，导致电气系统的整体 THDi 升高，使电容补偿柜内的熔断器熔断，甚至使主断路器开关频繁跳闸，严重影响业主的正常用电。

2.2.2 三相不平衡问题

大量单相光伏逆变器没有统一接入三相电气系统，会导致三相不平衡的问题。

在有些场景，即使单相光伏逆变器在三相之间均匀连接，由于光伏板的方向不平衡，或者某个逆变器的光伏板被树荫遮挡等原因，单相光伏逆变器的输出功率不均匀也会导致三相不平衡。

如下图，如果左边 L1 连接的太阳能板刚好被云层遮挡，逆变器的输出功率小于 L2 和 L3，就会造成三相不平衡的电能质量问题。

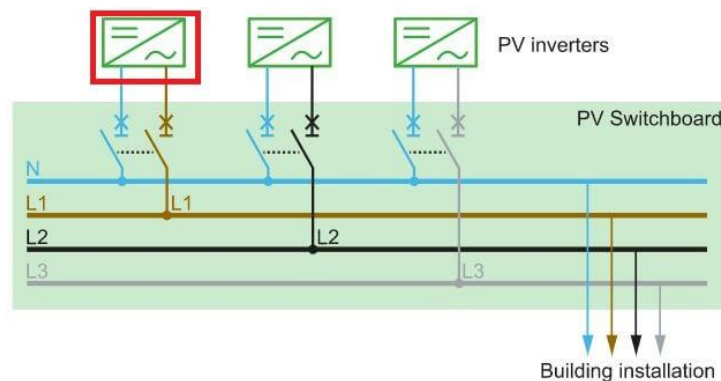


图 2 单相光伏逆变器接入三相电气系统导致的三相不平衡问题

2.2.3 功率因数降低的问题

分布式光伏系统会对电气系统的整体功率因数造成很大影响。如果处理不当，不仅会影响业主正常用电，还可能会面临罚款，降低光伏系统的投资回报率。

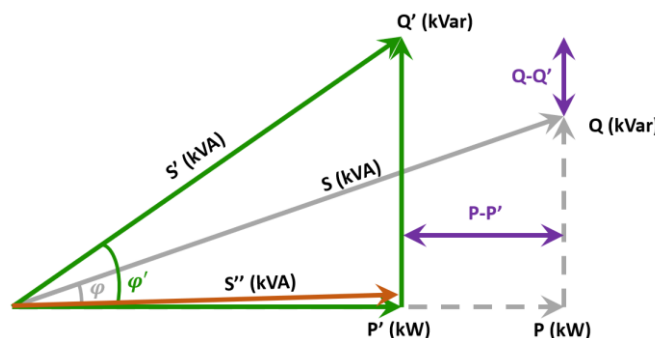


图 3 光伏系统对功率因数的影响示意图

如图 3 所示，业主在安装分布式光伏系统之前，系统的有功功率是 P ，无功功率是 Q ，视在功率是 S ，系统功率因数是 $\cos\varphi$ 。安装分布式光伏系统后：

- ◆ 光伏系统主要提供有功功率 ($P-P'$)，使业主的有功功率降低至 P' ；
- ◆ 如果无功补偿控制器受到谐波影响，或无法正常识别逆流情况，导致无功补偿柜无法正确投切，使得从电网获取的无功功率从 Q 增加到 Q' ；

在这些综合因素的影响下，功率因数从 $\cos\varphi$ 降低至 $\cos\varphi'$ 。功率因数降低，不仅会使变压器带载能力变弱，甚至会产生电压跌落等现象，影响业主正常用电，并会使业主面临罚款。

2.3 解决分布式光伏电能质量问题的价值

2.3.1 改善电能质量，确保电气系统安全，降低用电设备故障率，提高工作效率

2.3.2 减轻变压器负载率，减少变压器和线路中的损耗，减少变压器等电气设备的投入

2.3.3 避免低功率因数造成的罚款，保证光伏系统的效益

光伏系统投入使用后，需要将功率因数尽可能补偿到 1，使 S' 尽可能接近 P' 。这样不仅使业主免于罚款，还能因为功率因数高而受到奖励。如图 4 所示，业主因为功率因数高获得了 716 元的奖励。

供电部(所): 开发园区供电中心本部	合计电量: 140280	抄表日期: 2022-01-01
银行帐号:	合计金额: 156620.99	结算月份: 202112
力率标准: 考核标准0.85	实际力率: 0.93	力调电费: -716.79
其中 重大水利基金: 276.07	农网还贷: 0.00	城市附加: 0.00

图 4 功率因数高获取的奖励

3 主流光伏逆变器厂家提供的解决方案

光伏现场会普遍面临电能质量问题，所以主流的光伏逆变器厂家纷纷推出了各自的解决方案，以确保业主正常用电，避免业主因功率因数低产生罚款。

3.1 施耐德

施耐德提供的控制器对光伏装置和电网连接点实现功率测量，计算出逆变器需要提供的无功功率，并将指令下发至光伏逆变器，从而将电气系统的全局功率因数提高到预期值。

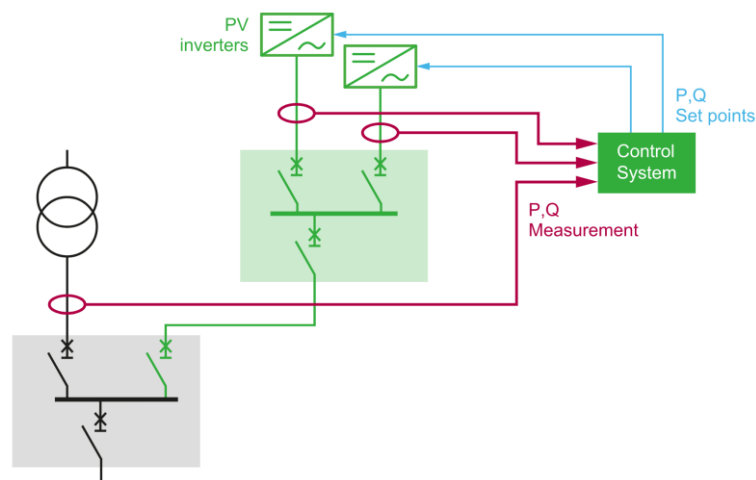


图 5 施耐德光伏系统的功率因数调节方案示意图

施耐德对这种方案有一个很中肯的评价：这种方法非常适合补偿光伏系统本身产生的功率因数下降，并且精度很高。然而，补偿由于负载引起的功率因数下降是无效的，原因有两个：首先，因为太阳能生产只在白天可用，其次，因为逆变器所能提供的无功电能是有限的。

除此之外，施耐德的解决方案无法充分利用业主原有的无功补偿系统，无法解决因逆流带来的无功补偿系统退出等问题。而且光伏逆变器提供无功功率是以降低一部分有功功率为前提的，这会影响逆变器的产生有功功率的价值。

3.2 古瑞瓦特

古瑞瓦特为了解决功率因数调节，[提供了智慧能源管理器](#)，它搭配 CT 使用，为多台逆变器构成的光伏并网系统提供防逆流和无功调度。

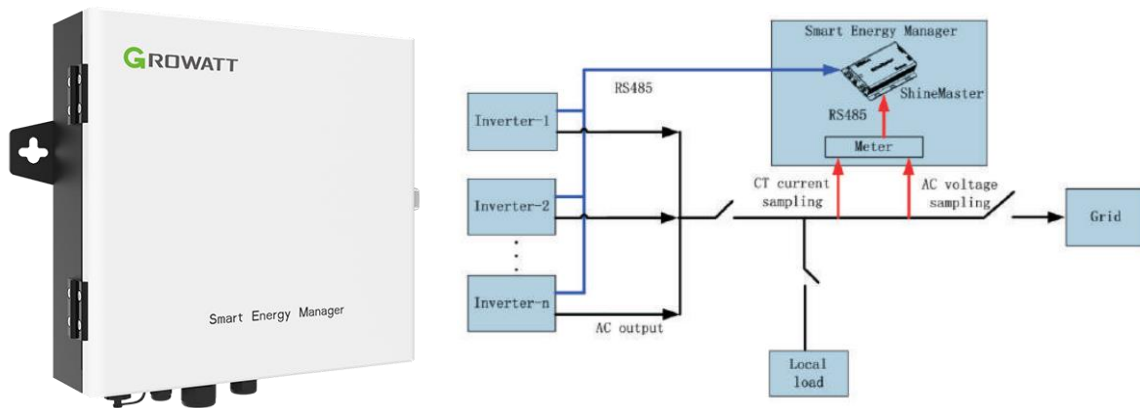


图 6 古瑞瓦特光伏系统的功率因数调节方案示意图

古瑞瓦特智慧能源管理器的工作原理和施耐德如出一辙，通过对功率因数考核点的电压、电流采集，计算整个电气系统需要的无功补偿功率，然后下发指令到逆变器提供合适的无功功率，从而将功率因数调节到目标值。

3.3 华为

华为为了解决分布式光伏系统的功率因数调节，提供了 [Smartlogger3000A](#)。它在功率因数考核点增加了电表实时监控功率因数，并通过计算下发指令到光伏逆变器，让光伏逆变器提供合适的无功功率，从而达到功率因数调节的目的。它的系统无功响应时间<10S。

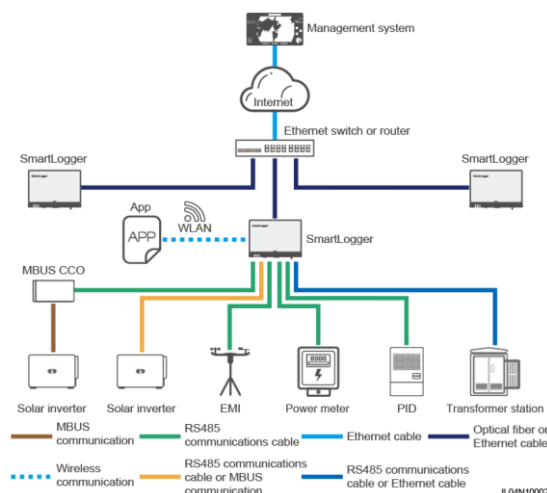


图 7 华为光伏系统的功率因数调节方案示意图

3.4 阳光

阳光为了解决分布式光伏系统的功率因数调节，提供了 [COM100D/COM100E](#)。它在功率因数考核点增加了电表实时监控功率因数，并通过计算下发指令到光伏逆变器，让光伏逆变器提供合适的无功功率，从而达到功率因数调节的目的。

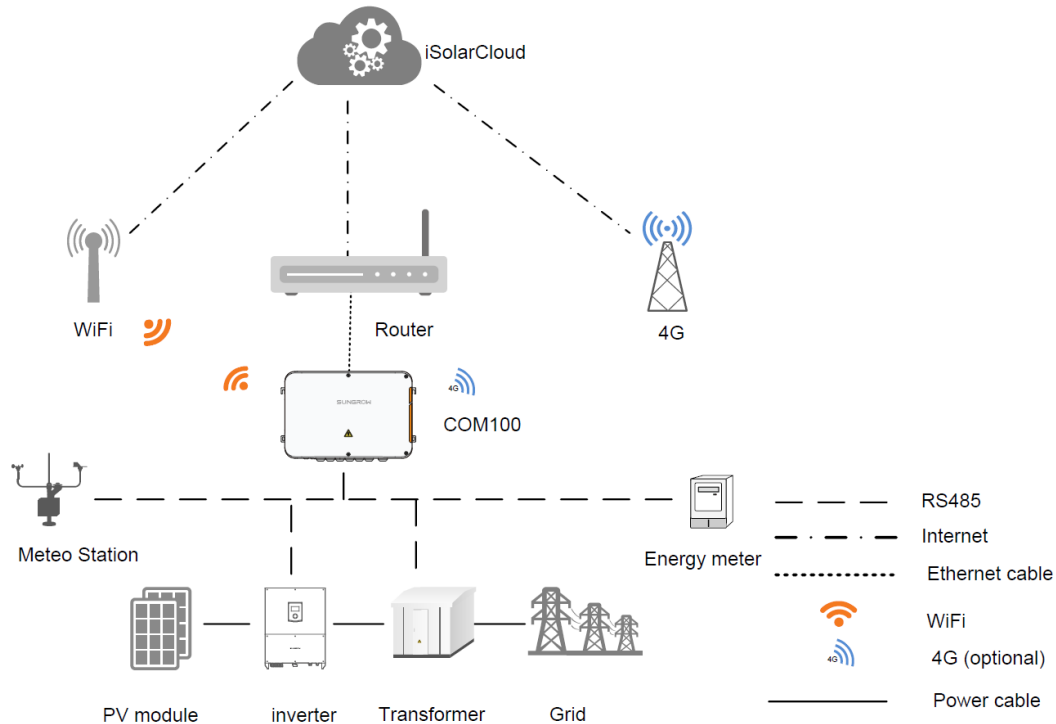


图 8 阳光光伏系统的功率因数调节方案示意图

3.5 SMA

SMA 在 2018 年提供了一个过时的解决方案，即加大太阳能逆变器的容量，让逆变器在输出有功功率的同时增加无功功率的输出，从而达到校正功率因数、避免惩罚的目的。



图 9 SMA 解决功率因数调节的解决方案

这种解决方案无疑是昂贵的。因为视在功率 $S = \text{有功功率 } P + jQ \text{ 无功功率}$ ，为了达到功率因数校正的目的，只需要增加 Q 的输出即可，但是 SMA 增加了整个 S 的容量，导致逆变器的成本增加太多。

3.6 锦浪 Solis

针对功率因数的校正，锦浪的光伏逆变器推出的解决方案是最具代表性的，大多数光伏逆变器厂家几乎都是这样提供的解决方案：在光伏逆变器的设置中，设置功率因数，俗称“静态补偿方案”。

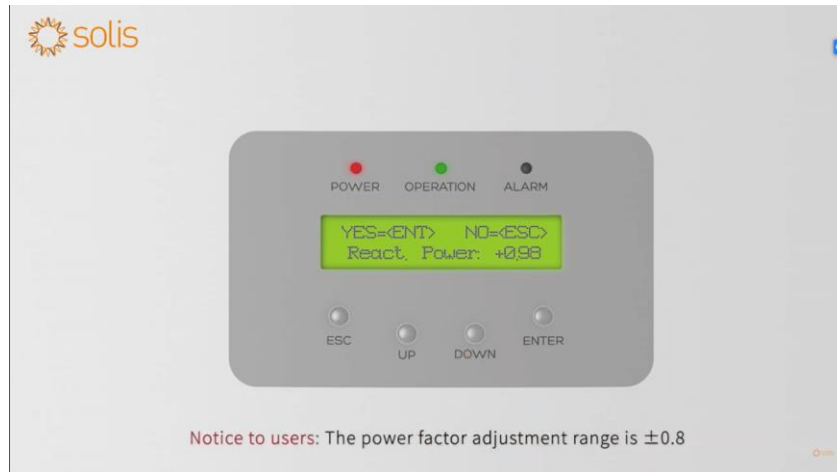


图 10 锦浪 Solis 设置功率因数的界面

这种解决方案在功率因数调节中，实际效果非常有限。因为每时每刻需要的无功补偿容量是动态的，需要实时刷新、快速响应，这种手动设置方式无法满足实时刷新的要求。

3.7 对主流光伏逆变器功率因数补偿方案的总结

所有光伏逆变器的厂家都提出了各自的无功补偿解决方案，说明光伏逆变器在为业主提供绿色能源的同时，需要面临分布式光伏带来的无功补偿的问题。

综合所有主流光伏逆变器厂家的解决方案，主要存在以下问题：

- ◆ 无法同时解决谐波、三相不平衡、功率因数调节的问题
- ◆ 光伏逆变器提供的无功补偿功率容量有限，无法解决负载的功率因数低的问题
- ◆ 光伏逆变器提供有限的无功补偿，均需增加各种 CT、电表或控制器，需要额外设备和安装成本
- ◆ 光伏的接入会影响原有无功补偿系统的工作，所有光伏逆变器的解决方案均忽视了对他的升级或控制，无法充分利用原有无功补偿系统

4 分布式光伏并网系统需要什么样的电能质量解决方案

通过对大量分布式光伏现场的案例，以及大量光伏逆变器厂家的解决方案，我们不难得出分布式光伏并网系统到底需要什么样的电能质量解决方案：

- ✓ 需要综合解决谐波、三相不平衡、无功补偿的电能质量问题
- ✓ 要充分发挥原有无功补偿系统的作用，降低投资成本
- ✓ 让光伏逆变器效益最大化，尽可能多的发有功功率

- ✓ 精准补偿功率因数，在避免被罚款的同时，还可以获取奖励
- ✓ 现场安装、接线和调试尽可能简单

5 海德莱电力为分布式光伏提供的电能质量解决方案

针对分布式光伏系统对电能质量的要求，海德莱电力提供的解决方案是将 SVG 和原有无功补偿系统组合成混合补偿方案，为整个电气系统提供谐波消除、三相不平衡调节和功率因数校正。

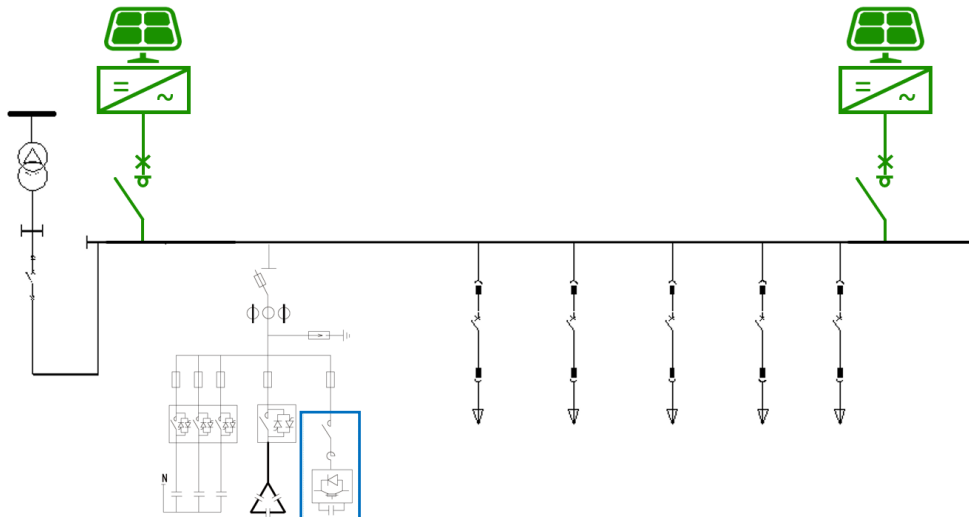


图 11 海德莱电力提供的混合补偿方案应用于光伏系统

SVG 容量的大小主要取决于负载对谐波消除、无功补偿的容量需求，和原有无功补偿系统的容量。

如果负载有谐波消除的要求，需要配置带有消谐电抗器的电容器，避免产生谐振。

混合补偿方案的设置，最重要的是将目标功率因数设置为 1，使 S'' 尽可能接近 P' 。

海德莱电力提供的混合补偿方案，具有以下特点：

- 一站式解决谐波、三相不平衡、功率因数校正的电能质量问题
- 无论光伏系统接入点在原有无功补偿系统的前端还是后端，SVG 均可充分利用原有无功补偿系统，尽可能将功率因数校正至 1
- SVG 可提供继电器开关或 RS485 接口直接控制电容器，实现精准补偿、快速响应

6 海德莱电力公司及产品和解决方案的介绍

6.1 关于海德莱

武汉海德莱电力科技有限公司致力于为工业和电力行业客户提供电能质量优化解决方案，通过向客户提供优质的产品和技术服务，帮助客户实现电力系统的安全、节能及环保。主要产品包括：高低压无功补偿元器件、智能滤波补偿模块、高低压滤波补偿装置、有源滤波装置、设备级滤波器等。

目前，我们的服务客户包括中国石油、中航工业、西飞集团、东风汽车、国药集团、驰宏锌锗、鱼跃医疗、徐矿集团、宜宾纸业、中国铝业、大全集团等众多大型国企及上市公司。

公司始终秉承“以客户为中心，为客户创造价值”的经营理念，持续为客户提供更优质的产品和服务体验。

6.2 海德莱电力 SVG 产品的介绍

海德莱电力提供的静态无功发生器 SVG，采用三电平拓扑逆变结构，可一站式解决谐波消除、三相平衡和功率因数校正等电能质量问题。

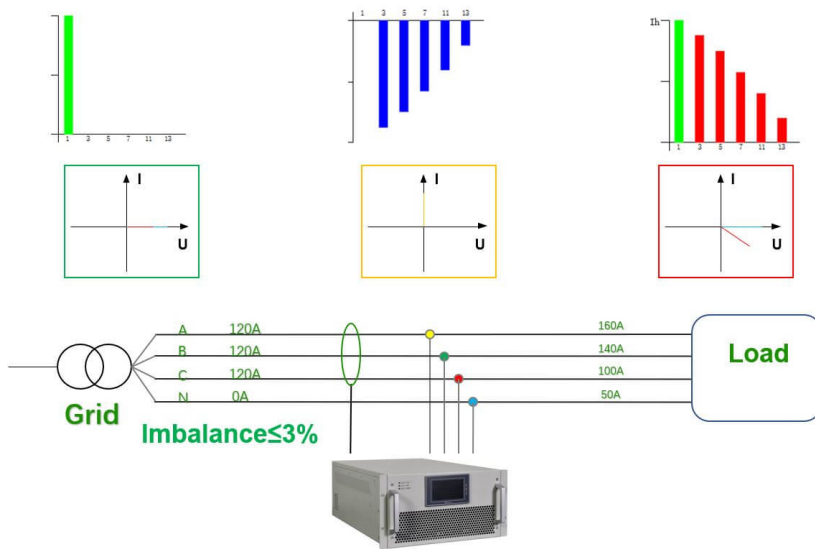


图 12 海德莱电力 SVG 产品的工作原理

根据安装位置的不同，海德莱电力可提供工业型、商业型和迷你民用型等不同种类的产品，单设备容量可以从 20kVar 到 150kVar，并可实现 ≥ 20 个模块的并机。

	工业级	商业级	民用级
		 	 
APF	690V: 100、150A 400V: 150、200A	690V: 75、100A 400V: 50、75、100、150、200A	400V: 30、50、75、100、150A
SVG	690V: 120、180kVar 400V: 100、150kVar	690V: 90、120kVar 400V: 35、50、75、100、150kVar	400V: 20、35、50、75、100kVar

图 13 海德莱电力 SVG 产品介绍

6.3 海德莱电力混合补偿方案 SVG 的介绍

海德莱电力的混合补偿方案 SVGC 是一种高性价比的补偿方案，既可满足无功补偿需求，又能大幅降低设备成本。海德莱电力推出的所有电能质量产品，均适用于混合补偿方案，可提供共补、分补和混补等多种补偿方式，具备快速响应、精准补偿、配置灵活、安全可靠等优点。

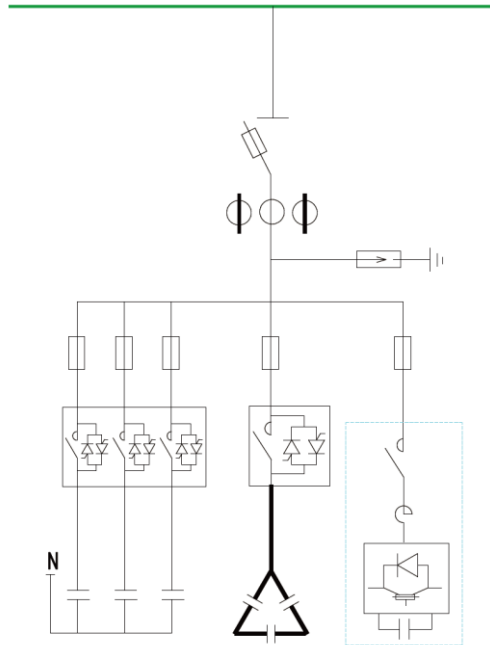


图 14 海德莱电力混合补偿方案示意图

海德莱电力的混合补偿方案中，SVG 可通过 RS485 或 DO 信号控制电容器，可实现快速响应，快速响应时间 $33\mu\text{s}$ ，全响应时间 $<5\text{ms}$ ，SVG 支持对电容器的循环投切，延长电容使用寿命。

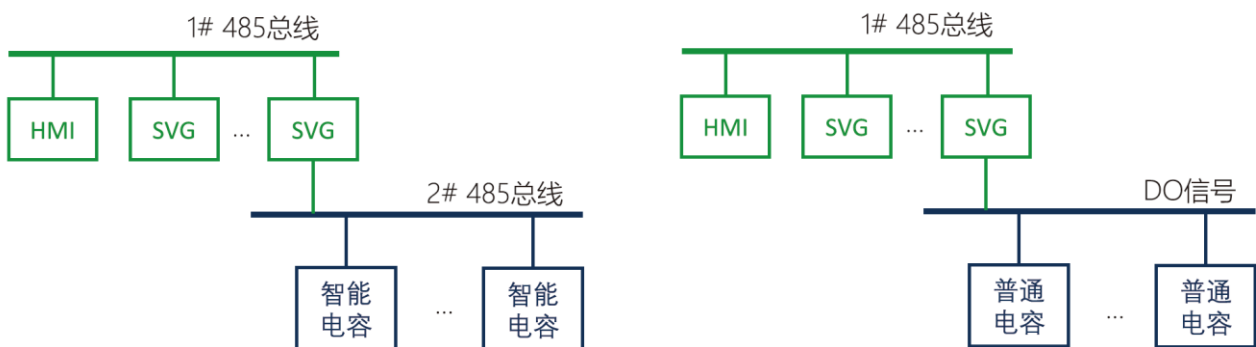


图 14 海德莱电力混合补偿方案控制原理图

海德莱电力的混合补偿方案中，可完全避免过补或欠补的问题，为系统提供精准的补偿。

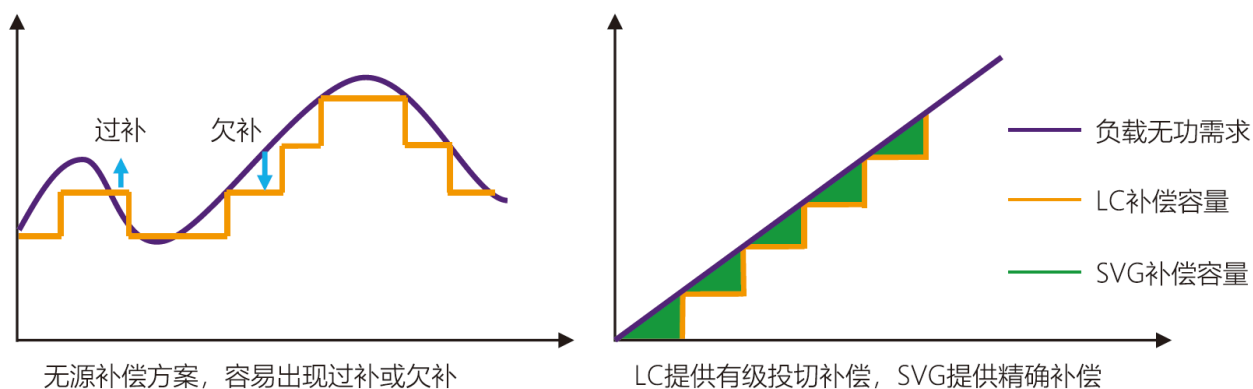


图 15 海德莱电力混合补偿方案精准补偿示意图

海德莱电力混合补偿方案中，SVG 和电容可以提供灵活的配置，为电气系统提供容性或感性的无功补偿。

变压器容量 (KVA)	无功需求量 (kVar)	SVGC方案 (kVar)		
		SVG	电容	合计补偿容量
250	75	35	40	-35~75
500	150	50	100	-50~150
1000	300	100	200	-100~300
1250	375	100	300	-100~400
2500	750	200	550	-200~750
3150	945	300	650	-300~950

备注：表格的合计补偿容量，负值为感性，正值为容性

图 16 海德莱电力混合补偿方案配置表

6.4 海德莱电力混合补偿方案在分布式光伏系统中的应用案例

6.4.1 项目背景

某金属加工厂有 1000kVA 变压器, 30%负载为高频加热设备, 用电负载有功功率 500-600kW, 有 300Kvar 无功补偿柜, 月平均功率因数以上 0.9, 系统运行正常。安装光伏后, 功率因数下降至 0.8, 无功补偿柜内的保险丝经常熔断, 电容器经常损坏, 主断路器经常跳闸。



图 17 金属加工厂案例光伏现场照片

6.4.2 项目分析

海德莱电力派工程师到现场考察后发现无功补偿柜为纯电容补偿, 电容器额定电流为 43A, 实际运行电流达到 86A。光伏系统接入后, 与高频加热设备系统发生谐振, 11、13 次谐波被严重放大, THDi 由原来的 18% 上升到 43%, 谐波电压高达 15%。运行几分钟后, 主短路开关有高温报警。

6.4.3 海德莱电力提供的解决方案和实施后的效果

海德莱电力提供的消谐和功率因数校正解决方案:

- 添加 200kVar 的 SVG, 使用带消谐电抗器的电容器, 组成一套容量为 530kVar 的混合补偿方案;
- 在高频加热设备前加装 200A 有源谐波滤波器。

方案实施后, 月平均功率因数达到 0.95 以上, 没有再出现开关跳闸的现象, 确保了客户的正常生产。