

浅谈组串式逆变器的历史及认识的误区

一、组串式逆变器的定义

早期的光伏电池板价格很高，光伏电站的功率都不大，几块电池板组成一个组串，功率为几百瓦到上千瓦，接入小功率单相逆变器，这种逆变器称为组串式逆变器。

经过多年的发展，现在的组串型逆变器指的是能够直接跟组串连接，用于室外挂式安装的单相或者三相输出逆变器，功率为几千瓦到几十千瓦。它形成了一些固定的特性：防护等级高，多为 IP65，能够直接在室外安装；直流输入为光伏专用的 MC4防水端子，能够直接与电池板相连，不需要经过直流汇流箱；输出电压范围宽，输出交流相电压多为180~280V 之间，能够直接接入本地单相或者三相电网；MPPT 路数通常为2个或者3个，MPPT 控制更精细，效率高，设计灵活，能够适应各种不同应用场景如地面电站，山地，楼面等环境的需求。

二、并网光伏逆变器的发展历程

并网光伏逆变器的发展是和光伏电池板及光伏电站的发展紧密相连的，逆变器的功率完全是由光伏电站设计的需求决定的。德国的 SMA 是逆变器的代表公司，从它的产品发展历史可以反映出光伏逆变器发展历程：

1991年，推出第一台光伏逆变器产品，室内安装，有 LCD 显示，能与计算机通信；

1995年，推出组串式逆变器 Sunny Boy 产品，室外安装；

2002年，推出集中式逆变器 Sunny Central 产品，功率100kW；

2006年，推出组串式逆变器 Sunny Mini Central 系列产品，效率达到98%，广泛用于欧洲的地面电站；

2009年，推出大功率集中式逆变器 Sunny Central 系列产品，功率达到500kW；

2010年，推出三相组串式逆变器 Tripower 系列产品，最大功率17Kw，

从 SMA 的产品发展历史我们可以看到光伏逆变器发展的几个阶段：

1) 组串式逆变器是最早出现的逆变器，几乎是伴随着光伏电站发展的历史发展起来的。SMA 的组串式产品从1995年开始面世，当时的光伏电站容量很小，多为1~2kW 左右；

2) 随着光伏电池板的发展，光伏电站容量越来越大，2002年 SMA 推出了集中式逆变器，但功率并不大，仅为100kW 左右；

3) 2006年，电站容量进一步变大，SMA 推出的 SMC (Sunny Mini Central) 系列产品由于效率高，室外防护，安装方便，在屋顶电站及地面电站中都占据了相当大的市场份额。2008年随着德国的并网法规越来越完善，欧洲各国的补贴政策陆续出台，光伏电站在欧洲蓬勃发展，此时由于大功率的集中式逆变器不多，SMC 系列产品用三台单相机外加控制器组成的三相系统成为地面电站配置的主流，组串式逆变器开始广泛应用于大型的地面电站；

4) 由于组串式逆变器价格较高，SMA 2009年推出大功率的集中式逆变器产品，满足大型的地面电站的要求。但同样是2009年，Danfoss 推出了10~15kW 三相组串式系列产品，由于 MPPT 数量多，防护等级高，设计更加灵活，安装维护方便，受到市场追捧，广泛用于大型地面电站中。2010年 SMA 推出的三相组串式产品 STP 系列迅速成为其主力发货产品，在欧洲广受欢迎。此后在欧洲的大型地面电站中，集中式逆变器由于成本上占有优势而应用较多，但组串式逆变器也占有一定的市场份额；

5) 自2013年以来，组串式逆变器由于竞争激烈，价格下降很快，采用组串式逆变器方案的地面电站系统成本正在逐步接近采用集中式逆变器方案的电站。国际咨询公司 IHS 在2014年4月发布了一个重要的调查结果：通过对300家太阳能安装商、经销商及设计、采购和施工 (EPC) 公司调查的结果表明，在规模超过 1MW 的大型光伏电站中，组串式逆变器 <<http://guangfu.bjx.com.cn/zt.asp?topic=组串式逆变器>> 的接受程度越来越高。根据 IHS 调查，40%的逆变器买家目前考虑组串式逆变器而非集中式逆变器，由于它们可以提供更好的灵活性，并减少电力损失。IHS 资深光伏市场分析师科马克·吉利根 (Cormac Gilligan) 表示：“该调查证实，过去一年大型系统对组串式逆变器的接受不断增加，反映出 IHS 预期的这些产品将

在几个关键光伏市场获得份额。大型系统中太阳能买家越来越偏爱组串式逆变器而非中央逆变器最常见的原因是，更好的系统设计灵活性、故障情况下最小的损失以及较低的系统成本。”

从逆变器发展的历史中可以看到，组串式逆变器在欧洲用于大型地面电站的历史比集中式逆变器更久，技术也非常成熟。国内的华为，阳光等逆变器厂商的组串式产品也已广泛用于国内外的地面电站中。在2014年的慕尼黑的 intersolar 论坛上，资深的光伏从业人士 Manfred Bachler（曾是全球最大的 EPC 厂商 Phoenix solar 的首席技术官）就提出了用组串式逆变器改造现存的集中式逆变器的方案，给出的结论是5~6年可以收回改造的成本，主要的原因是因为集中式逆变器维护麻烦，可用性差，仅仅在可用度方面就比组串式逆变器差6%。

三、关于组串式逆变器的认识误区

在我国，光伏电站从2010年开始批量建设，此时国内组串式逆变器供应商少且技术不成熟，而国外的产品价格很高，在大型地面电站中使用组串式逆变器方案系统成本远高于使用集中式逆变器的方案，这就使得集中式逆变器成为地面电站的首选，从而造成了集中式逆变器在我国的地面电站中占据了绝对的统治地位。广大的光伏从业者由于对组串式逆变器不熟悉，还存在着认识上的误区，主要有以下几点：

1) 误区一，地面电站中组串式逆变器机器数量多，维护比集中式更复杂更难

这种观点其实是对集中式和组串式维护方式不了解导致。组串式逆变器的维护一般是由电站运维人员直接整机更换，对技能要求低；而集中式的维护则是必须由厂家技术人员到现场，对技能要求非常高。组串式的这种维护方式优势非常明显，特别是在偏远的地区或者海外。一个明显的事实可以证明：负责逆变器的厂商，很少敢把集中式逆变器卖到国外，但几乎所有厂商，都敢把组串式逆变器卖到国外。原因很清楚，国外的维护成本太高，维护人员出去费用昂贵。备件也是一个问题，放在当地不好保管，随身携带也不可行，到了现场发现备件不合适还得从国内重新发，不仅耽误时间，还可能引发电站业主的索赔，这都将成为逆变器厂商的噩梦。如果客户要跟逆变器厂商签20年的维保合同，那对逆变器厂商而言恐怕不是什么好事：长达20年维保周期里集中式逆变器出问题的概率是100%，出了问题维护几次就把卖设备挣的钱给赔进去了。这也解释了为什么各国集中式逆变器的供应商几乎全是本土厂商的原因，一方面是本土厂商更熟悉本国的市场，另一方面就是国外厂商服务难以保证。

从故障对电站的影响看，组串式逆变器也占有明显优势：假设组串式逆变器和集中式逆变器的年故障率都是1%，1MW 电站有2台集中式逆变器，40台组串式逆变器，按照组串式逆变器平均修复时间为2小时，集中式为12小时计算（考虑到各厂家响应时间不一样，集中式的实际修复时间可能还要长很多），组串式逆变器故障造成的发电量损失只有集中式的1/6，如下表所示，这其中的根本原因还是维护方式的差异。

部件	设计使用寿命 (年)	年故障率 (%)	平均故障修复时间 (分钟)	单位功率 (W)	1MW数量 (台)	年故障导致的发电损失 (kWh)
组串式逆变器	20	1.00%	120	25000	40	20
集中式逆变器	20	1.00%	720	500000	2	 www.solarzoom.com

从长时间看，组串式逆变器的维护优势更加明显。举个例子，用现在的组串小机去替换 10 年前组串式小机，直流侧和交流侧线缆相差不大，通信协议稍有差异，如果端子线缆不匹配，完全可以通过外加线缆转接的方式实现，而现在的组串式逆变器远比 10 年前的产品便宜，替换起来更简单。如果用同一个厂家现在的集中式逆变器去替换 10 年前的机器，由于一般的产品生产时间不超过 5 年，会发现所有的电路板，电感等元器件均不匹配，而元器件的库存也不可能超过 5 年，器件替换就非常昂贵且难找。用组串式逆变器实现相互替换更加现实且成本更低，而集中式逆变器替换的就跟重新建设电站没有差别，费时费力。国内的集中式电站都是 2010 年以后才开始建设，维护问题还不突出，后续维护问题将会逐渐暴露。

2) 误区二，组串式逆变器机器数量多，电站谐波将会变大

谐波是指电中所含有的频率为基波的整数倍的电压或者电流分量，一般是指对周期性的非正弦电流进行傅立叶分解，扣除基波以外其他频率点的电流分量。谐波电流会在电网短路阻抗上产生谐波电压降，影响电压输出波形（用户端电压=电网稳定电压-谐波电压降）。

电网谐波的主要来源于三个方面：一是发电质量不高产生谐波；二是输配电系统产生谐波；三是用电设备产生的谐波，其中用电设备产生的谐波最多。在用电设备中，由整流装置产生的谐波占有所有谐波的近40%，这是最大的谐波源。

逆变器属于发电设备，它本身对输出电压是不控的，依托于电网电压，只是把电流灌入电网，这种工作方式对电网电压谐波的影响较小（但如果逆变器引发了电网的谐振除外），所以在衡量光伏电站并网点电能质量时，在电网电压谐波能够达到5%要求的情况下，重点关注的是逆变器输出的电流谐波。逆变器的电流谐波主要和以下几个因素有关：

（1）输出电压波形质量：逆变器的控制算法中输出电压为正弦波，当经过逆变器调制输出 PWM 波有畸变时，将影响逆变器的输出谐波与控制效果。提高开关频率与输出 PWM 电平数有助于降低 PWM 波形的畸变率，高开关频率三电平的组串式逆变器比低开关频率两电平的集中式逆变器更有优势。

（2）软件控制带宽：逆变器的开关频率越高，控制带宽越宽，对于宽范围的电流谐波抑制更充分，为保证稳定性，逆变器的控制带宽通常取开关频率的1/10左右；组串式逆变器的开关频率（16kHz 左右）远高于集中式逆变器（两电平逆变器为3kHz，三电平可以做到8k 左右），控制带宽更宽，对于低次谐波的控制能力更强。控制频率高，可以在控制环路中对电网谐波进行检测，加入对低频谐波的抑制程序，使得逆变器的输出电流谐波比电网的电压谐波做的更好。

（3）并网滤波器性能：控制带宽以外输出电流高频成分，需要依赖滤波器来滤除，组串式逆变器一般采用 LCL 型滤波器，具有高频谐波衰减能力强、受并网阻抗影响小的优点。

（4）并机谐波抵消能力：1个方阵多台组串式逆变器距离升压变压器距离不一样，线路阻抗会有差异。线路阻抗会等效改变并网 LCL 滤波器中 L2的电感，不同的滤波器参数会改变谐波的相位。当多台组串式逆变器并联工作时，谐波成分将会由于相位的差异而部分相互抵消，降低系统整体的谐波值。

从以上四点可以看出，组串式逆变器的输出电流谐波原理上并不会比集中式的差，由于其工作频率更高，完全可以在算法中加入谐波抑制的算法，保证输出电流谐波不受电网谐波的干扰，这是比集中式更有优势的地方。

3) 误区三，组串式逆变器的并联的数量多，更容易引起谐振，导致系统不稳定

逆变器多机并联系统由光伏电池阵列、多台逆变器、输配电设备与电网组成。逆变器和输配电设备都具有很强的非线性，功率输入端的光伏电池阵列与输出电网也可能出现大幅度的扰动，整个系统非常复杂。设计不合理有可能出现多台逆变器之间，逆变器与电网之间的振荡，

导致逆变器保护脱网，甚至造成人身与财产损失。谐振的产生原因是多方面的，跟设备的数量多少并没有直接的关系。举个例子，从配电网的情况看，配电网中居民用户有大量的用电设备，功率大小不等，但谐振的情况并不明显，反而是工厂里面的数量少的大功率设备，更加容易引起谐振。

并网逆变器中常见的并联谐振分为两种情况：

第一种情况是逆变器多机并联工作时，其输出并网端有公共阻抗引发了并联逆变器之间的多机谐振。在并联系统中，当其中一台逆变器的输出电流含有谐波时，该谐波分量将在回路上产生谐波压降，并影响并联的其他逆变器的并网端电压，当该电压谐波与逆变器的控制频率接近时，就有可能导致多机并联谐振。这种谐振多见于工作频率较低的逆变器并联系统，集中式逆变器工作频率为3~8kHz，而组串式逆变器工作频率高于16kHz，因此，并联的集中式逆变器更容易出现这种谐振。

第二种情况是，逆变器端口有滤波电容，该电容与变压器的漏感组成 LC 网络，逆变器的输出电流中含有的高次谐波正好与该 LC 网络谐振频率相同时，就会产生谐振。此时如果电网中正好也含有相同频率的高次谐波，震荡就会加剧，从而导致了电网电压的震荡。这种谐振在电网较干净的大型地面电站的场合较难碰到，而分布式的低压并网场合由于本地负载情况复杂，电网中含有高次谐波含量较大时就可能出现。

这两种谐振从本质上看都是逆变器自身输出含有高次谐波导致。抑制谐振的根本方法是改善逆变器的控制和 LC 滤波器的设计，保证逆变器输出侧不含高频谐波。对于采用组串式逆变器的大型电站来说，设计上一般1~2MW 组成一个并网单元，通过隔离变压器并网。隔离变压器将在 MW 单元之间起到良好的解耦作用，确保 MW 单元之间不会相会影响。在 MW 单元内部，多机并联时，由于组串式逆变器开关频率较高，一般达到16KHz 以上，控制带宽也相应较宽，一般达到2kHz 左右，而电网中的谐波分量一般不超过2kHz，在组串式逆变器的控制带宽之内，组串式逆变器可以在控制环路中加入这些谐波的抑制算法，使得逆变器对这些频率的谐波不响应，就能有效防止谐振的发生，从而保证系统的稳定。

4) 误区四，组串式逆变器的低压穿越性能比集中式差

所谓低穿/零穿是逆变器检测到电网电压跌落后，短时间内保持不脱网，并对电网输出无功支持电网尽快恢复。零穿的时候电网电压并不是完全跌到零，标准上认为电网电压跌倒5%以下

就是零穿，因为零穿时逆变器还需要检测到电网的相位，才能发出无功对电网进行支撑。逆变器对低穿产生响应的关键点在于逆变器能够及时检测到电网电压的跌落，然后再根据内部的算法做出相应的反应。在一个并网单元内，交流线缆的阻抗不大，逆变器都能够及时检测到电网跌落并作出反应。因此，低穿完全是逆变器自主的行为，不需要逆变器之间有任何的联动，电站的低穿特性跟逆变器的数量没有必然的联系。德国中压并网标准 BDEW 在业界第一次提出了低压穿越的要求，该标准对逆变器低穿的评估主要是进行单机的测试，然后根据单机测试结果进行建模仿真。多机并联的低穿特性通过软件仿真得到，在并联仿真的过程中多台逆变器之间也不会出现相互干扰导致低穿性能变差。

5) 误区五，多台组串式逆变器相互干扰会导致孤岛无法保护

孤岛是指当电网因故障、事故、自然因素或停电维修等原因而跳脱中断供电时，光伏并网逆变器未能即时检测出停电状态而将自身切离市电网络，仍继续向电网输送一定比例的电能，由太阳能并网发电系统和周围的负载形成的一个电力公司无法掌握的自给供电孤岛。从定义中可以看出，并网光伏逆变器形成孤岛的条件有以下2个：逆变器系统与电网脱离；逆变器输出功率与本地负载匹配，导致输出电压持续维持输出，从而形成供电孤岛运行。

逆变器的防孤岛保护方案分为主动式防孤岛保护方案和被动式防孤岛保护方案。被动式方案通过检测逆变器交流输出端电压或频率的异常来检测孤岛效应，这种方案中，各台逆变器对电网进行检测，多台逆变器之间是不会产生相互干扰的。主动式方案通过有意地引入扰动信号来监控系统中电压、频率以及阻抗的相应变化，以确定电网的存在与否。主动式防孤岛效应保护方案主要有频率偏移、电流脉冲注入引起的阻抗变动、电力线载波通讯等。在主动式孤岛的方案中，如果一个并网单元中存在不同厂家的逆变器，是可能存在扰动信号方向不一致导致主动孤岛方案受到影响的現象。

标准认证的过程中，反孤岛的测试非常严格，测试机构专门构造了谐振频率为50Hz 的 LC 谐振网络对孤岛进行测试，确保逆变器的在这些极端的情况下都能够进行孤岛保护，逆变器为了满足标准的要求，光靠被动式反孤岛还不够，必须增加主动式的反孤岛方案。而在现实的并网中，谐振频率正好50Hz 的 LC 谐振网络几乎不可能碰到，逆变器通过电压和频率检测等被动反孤岛手段就可以达到保护的目。荷兰有研究机构发布报告表明，虽然欧洲有大量的电站都采用组串式逆变器，并且不同厂家的逆变器之间的主动孤岛方案可能都不一致，但仅靠被动孤岛方案就能够实现保护，而被动孤岛方案是不会相互干扰的，所以实际电站中没有因为孤岛而出问题的案例。

四、总结

随着我国光伏电站的装机容量越来越大，发电量和可维护性将成为电站设计的考虑重要因素。组串式逆变器技术成熟，设计灵活，维护方便，适应性强，不仅能够用于分布式的屋顶电站，而且在大型地面电站中也将得到广泛的应用。可以预见，在未来的一段时间内，组串式逆变器我国的光伏电站中将占据越来越重要的地位。（山西电力勘测设计院 王艳国）