拓展多种光伏新技术为提升电网的稳定性与光伏系统容量系数

To expand a variety of new photovoltaic technologies to improve the stability of power grid and photovoltaic system capacity coefficient

鲁思慧

摘　要：本文将拓展出多种光伏新技术以提升电网的稳定性与光伏系统容量系数作研讨,并以2.3kV IGBT7模块助力1500V光伏逆变器与新型统一电能质量调节器技术为例对其设计与应用作重点分析。

关键词：电网的稳定性，大功率模块，三电平拓扑，电能质量调节器

Abstract: This paper will develop a variety of new photovoltaic technologies to improve the stability of the power grid and photovoltaic system capacity coefficient for research, and 2.3kV IGBT7 module assisted 1500V photovoltaic inverter and new unified power quality regulator technology as an example to analyze its design and application.

Keywords: Stability of power grid， high-power module， three-level topology， power quality regulator

前言

当今可持续发展和“2030 碳达峰”和“2060 碳中和”双碳目标被国内外人们频频谈起，新能源发展终于驶入全民快车道，而新能源发电带来与拓展出很大的新机遇，尤其是通过储能技术提升电网的稳定性与提高光伏系统容量系数。进入 2022 年之后，如何看待我国风电、光伏发电等绿色电力的装机容量居世界第一，以及新能源发电及相关产品还有哪些可以发挥的空间？这是当今新能源领域企业与研发人员所特别关注的热点问题。值此本文将拓展出多种光伏新技术以提升电网的稳定性与光伏系统容量系数作研讨，并以 2.3kV IGBT7 模块助力 1500V 光伏逆变器与新型统一电能质量调节器应用为例对其设计与技术作重点分析。

1　应用 2.3kV IGBT7 模块助力 1500V 光伏逆变器方案设计

大功率光伏电站是未来清洁能源的重要组成部分，其功率等级也随着用电需求的增加越来越大。为此可应用最新的 IGBT7 大功率 PrimePACK 模块，开发了适用于目前 1500VDC 光伏系统的解决方案，它具有很高的功率密度。其特征是三电平在光伏系统中的应用。

1.1　三电平在光伏系统中的应用

光伏逆变器注重效率的要求，因此三电平电路在这个应用中广泛被采用。而 1500VDC 光伏系统需要功率半导体器件满足低宇宙射线失效率，因此用 1200V 耐压等级的模块去拼接 NPC1 或 NPC2 型三电平已经成为目前大功率光伏逆变器最常见的解决方案。

* 何谓 NPC 三电平

三电平顾名思义就是三种电平：高电平 V/2、零电平 0V、低电平 -V/2。三电平的实质就是开关阀值的问题，就是提供了三种开关状态转换。三电平的控制技术主要使用在变频器中，三电平型变频器采用钳位电路，解决了两只功率器件的串联的问题，并使相电压输出具有三个电平。三电平逆变器的主回路结构环节少，虽然为电压源型结构，但易于实现能量回馈。三电平电压波形是方波，当然能体现出三种不同的电压了。

*NPC 中性点钳位型三电平拓扑结构的原理及结构特点。

NPC（Neutral Point Clamped）三电平拓扑结构是一种应用最为广泛的多电平拓扑结构。近年来随着电力电

子技术在电力行业的发展，NPC 三电平技术开始越来越多的应用到各个领域，包括光伏逆变器、风电变流器、高压变频器、UPS、APF/SVG、高频电源等都有着广泛的应用。NPC 拓扑最常用的有两种结构，就是我们常说的“I”字型（也称 NPC1）和“T”字型（也称 NPC2、MNPC、TNPC、NPP 等）。另外 ANPC 也是一种 NPC1 的改进型，这些年随着器件的发展，ANPC 也开始有一些适合的应用。图 1 为较广泛的几种 NPC 拓扑结构。

*NPC 三电平基本原理

三电平拓扑结构的思想来源于一种多级可控直流源的思想，见图 1（b）所示。

通过对不同等级电源的切入来实现多电平的控制。二极管钳位型 NPC 三电平拓扑结构正是通过引入两个钳位二极管来实现多级电压的控制。

*NPC 三电平特点

其一、更好的输出波形　由于三电平桥臂在换流过程中，每次电平的变化都是从正或者负先到中点电位，多出一个台阶如上面视频里展示的一样。

其二、改善电磁干扰（EMI）问题　三电平结构中，IGBT 开关器件的开关电压降低一半。这样在开关过程中 IGBT 的电压变化率(dv/dt)要降低许多。电压变化率(dv/dt)是电力电子系统电磁干扰的主要来源。电压变化率(dv/dt）的降低就意味着系统电磁干扰（EMI）的降低和改善；同时在变频器应用领域也可以降低轴电流，有效的改善变

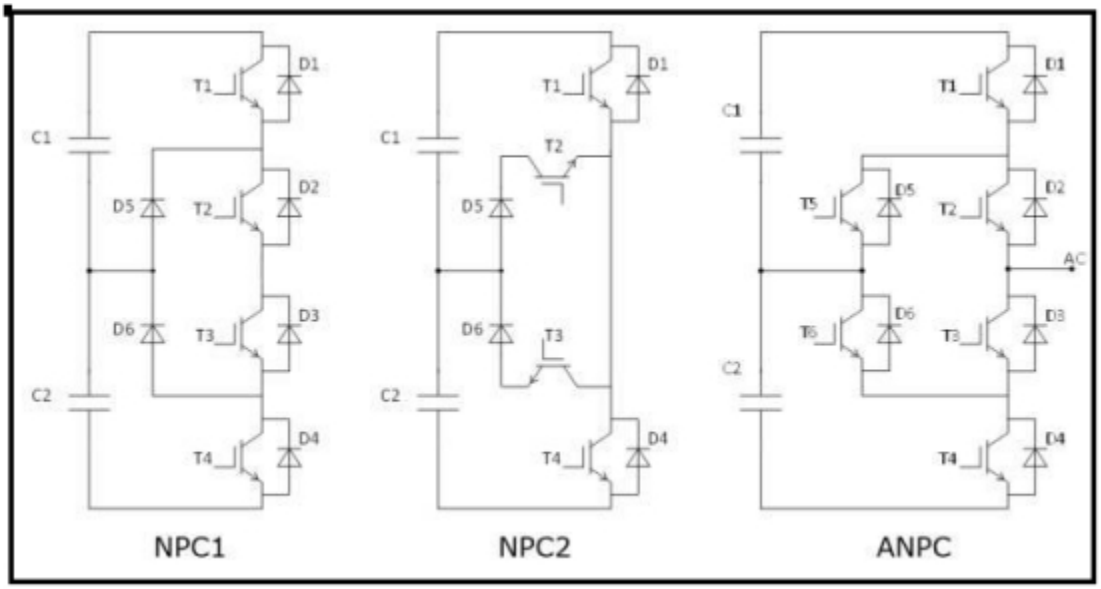

图 1（a）为较广泛的几种 NPC 拓扑结构

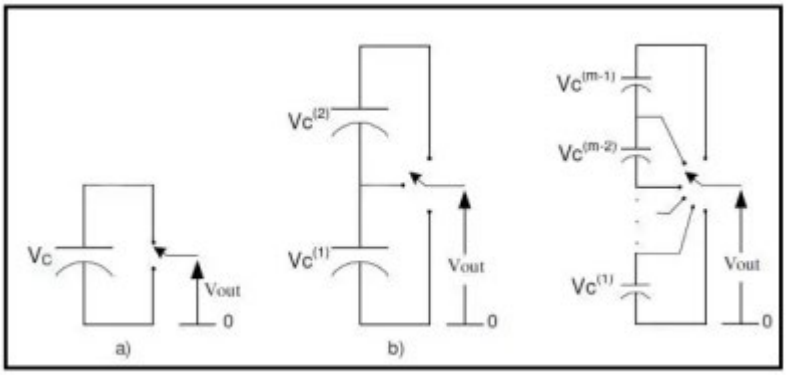

图 1（b）为多级可控直流源示意图

频器对电机寿命的影响。

其三、损耗降低，更高效率，开关频率提高　在开关过程中，IGBT 开通关断的直流电压降低会使芯片的开关损耗降低许多。

这种 NPC1 的方案也存在一些问题。如在系统需要无功功率运行状态下 (PF<1)，负载电流需要通过长回路进行换流，这时的环路电感甚至可以 >100nH，从而引发关断电压尖峰等问题。如果为解决这个问题而使用较大的门极电阻，又会造成开关损耗增加，效率降低的问题。

在 1000VDC 光伏系统的时代，NPC2 拓扑曾被广泛采用。这种拓扑比 NPC1，省去了两个钳位二极管，控制也相对简单且同样有较高的效率。但是由于该拓扑中的两个竖管需要承受整个母线电压，所以需要解决高压下宇宙射线失效率的问题，这也是 NPC2 三电平结构没有从 1000VDC 系统直接过渡到 1500VDC 系统的最主要原因。

1.2　光伏逆变器的大功率 IGBT7 模块应用

值此提出的解决方案是基于两种主要的 IGBT 模块，半桥模块采用 2300V 电压等级的 TRENCHSTOPTM IGBT7 模块，横管采用共集电极的 1200V 电压等级模块，同样采用基于微沟槽栅 (MPT) 的 TRENCHSTOW IGBT7 技术。

需要指出的是：TRENCHSTOPTM IGBT7 现在提供 TO-247 封装，电流等级为 20-75A；TRENCHSTOPTM IGBT7 能带来更高的击穿电压 (650V)、一流的性价比和效率，实现简单的即插即用解决方案。如图 2 所示的基于 IGBT7 模块的架构示意。

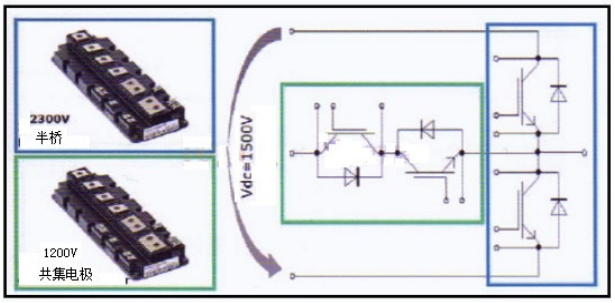

图 2 基于 IGBT7 模块的架构示意

采用这两种模块的方案考虑到了 1500VDC 下的宇宙射线失效问题，并且可以做到目前最高的功率密度。半桥模块从上一代模块 (如 FF1800R17IP5 型)1700V 的电压等级增加到 2300V，但是额定电流保持 1800A 不变；横管模块跟同样电压等级的上一代模块 (如 FF1800R12IE5 型) 相比，电流提升了 33%，从 1800A 增加到 2400A。

这两种最新的功率模块可以在光伏系统中采用不同的组合形式来实现不同功率等级的输出：只采用半桥模块的 2L 两电平拓扑；一个半桥模块加一个横管组成的 NPC2 拓扑 (见图 2 所示)；两个半桥模块并联 (2*1800A) 加一个横管组合的 NPC2 拓扑。

1.3　减小回路电感是 - 光伏逆变器系统低杂感设计的关键

如何减小回路电感是逆变器系统设计的关键问题。为此设计方案从功率器件到系统母排设计都做了考虑。

对于横管共集电极模块的设计，在一个封装中的双向开关器件实现了很低的杂感设计。如下图 3 所示，模块中成对母排中电流方向相反，从而最大限度降低模块中的杂散电感。模块的主功率端子采用正负交替排列的方式，四对母排也同时兼顾了电流输出能力。

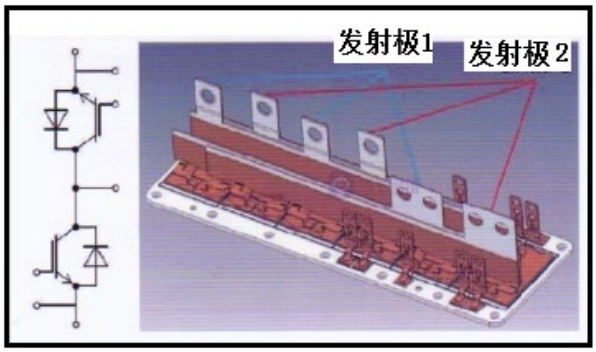

图 3 共集电极主要的 IGBT 模块内部结构图

系统直流母排和交流母排的设计会影响整个功率单元的电气、机械和热特性。为了降低杂散电感，通常采用叠层母排。但是叠层母排如果超过三层，其重量和成本也会明显增加，为此在方案中，直流侧采用三层叠层母排，把交流母排组合在一起的时候做了一个避免交叠的设计，避免四层叠层的出现。

1.4　应用功率单元对电气特性设计实践验证

* 为了验证本文方案的输出特性，可搭建了一个功率单元。采用上述的两个 2300V 的半桥模块并联加上一个

1200V 横管的 3 模块方案，采用上一设计的叠层母排。

首先测试的是模块的动态特性，双脉冲实验。母线电压为正负 650V（光伏逆变器全功率输出最常用的电压），负载电流 2400A（横管的额定电流）。可显示了在室温下 T1 管（半桥模块上管）的开通和关断波形。

半桥的 2300V IGBT 芯片设计为高压的快速芯片，可以通过调整门极电阻来调整开关的软度。在测试中，半桥模块的换流是通过 1200V 的共集电极横管模块来实现的，关断过电压为 190V。

方案采用两个半桥模块并联的方案，所以两个模块的均流特性也需要试验验证其均流特性。从实践验证中可以看出两个并联模块的均流差异小于 3%。

1200V 横管的测试条件与半桥模块一样，测试电压和电流与之前测试一致。横管的关断过电压为 180V。

* 应用热仿真平台对最大输出功率的评估

为了评估方案的功率输出能力，热测试是必须的环节。（在此应用功率模块、分立器件和平板压接式器件的损耗和热仿真平台 -IPOSIM 进行实施）首先，基于光伏案集中式逆变器现场工况用 IPOSIM 对模块进行损耗的仿真。得出系统在不同输出功率时，每个模块的损耗数值。然后对预埋热电偶的 IGBT 模块通入恒定的电流，半桥模块通入直流电流，共集电极模块通入交流电流。由于模块在电流经过时，芯片都会有一定的压降，所以可以通过流过模块的电流大小来控制每个模块的发热量。

根据之前模块的仿真结果，逐渐加大电流，使模块的损耗逐渐增加，同时通过热电偶来观测模块芯片温度的升高情况，在模块芯片温度达到所允许的最高结温时，记录下此时模块的损耗。对照之前损耗仿真，就可以得出该方案所组成的逆变器最大输出功率。根据最终的测试结果可以看到，该方案的最大输出功率可以达到 2MW。

2 光伏分布式电源电网中提升电网稳定性及容量系数新技术

2.1 光伏分布式电源电网中的痛点

随着以光伏、风电为代表的分布式电源在电网中渗透率的不断提高，以及非线性负载的广泛接入，现代配电网更易受到诸如电压暂降与波动、电流畸变等不同电能质量问题的干扰。为了综合解决电压与电流质量问题，在国内已开发出多种技术与设施以弥补电压与电流质量问题的空白与短板。值此以新型统一电能质量调节器为典例的所提供切实可行的解决方案作重点解析。

2.2 新型统一电能质量调节器基本柘扑

先述什么是新型统一电能质量调节器设计思想？它是应用国内外相关企业推出的一种可视化仿真工具。它属于是一个模块图环境，用于多域仿真以及基于模型的设计。它支持系统设计、仿真、自动代码生成以及嵌入式系统的连续测试和验证。而新型统一电能质量调节器是用这仿真技术构建的电能质量调节器。

该设备以具并联有源滤波器和动态电压恢复器两者的功能，可以实现包含电流与电压电能质量在内的多重电能质量综合治理，是有效治理电能质量问题的定制型电力技术装置，其功能全面、经济有效等优势在微电网系统具有广阔的应用前景。

下图 4 为统一电能质量调节器的基本拓扑结构，它是由两个串联与并联相结合的功率变流器通过一个公共的直流链节背靠背连接而成。

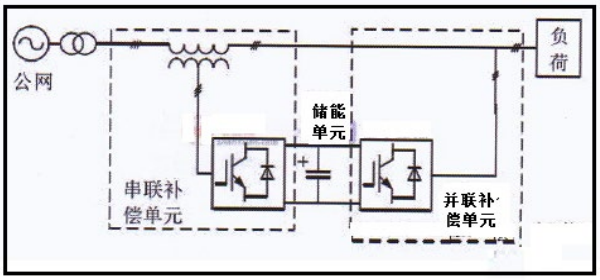

图 4 为新型统一电能质量调节器的基本拓扑结构

图 4 中串联变流器的交流输出被串联接入到电网与负载之间，主要用来调节负载电压幅值和补偿电网电压谐波，保证给负载提供稳定的三相正弦电压。而并联变流器的交流输出则并联接入系统中，主要作用是补偿负载谐波电流，并保证中间直流母线电压的稳定，以保证流入电网的电流是平衡三相正弦电流。

2.3 应用例举

以单相为例，其图 5 为该装置的等效电路。

其中 μ_c 和 i_C 分别是串联变流器和并联变流器根据指令信号输出的补偿电压和补偿电流。当电网中存在电压跌落或暂升时，则统一电能质量调节器串联部分对 PCC 处

的电压进行补偿，使得负载两端的电压维持不变；当负载中含有大量谐波及无功成分时，并联部分对电网电流进行补偿，使得电网电流维持不含谐波电流及无功电流。总结起来就是：电压检测电路从电网电压中检测出电压波动的成分，驱动串联变流器产生对应的补偿电压；电流检测电路从负载电流中检测出谐波电流，驱动并联变流器产生与谐波电流大小捂等、相位相反的补偿电流。

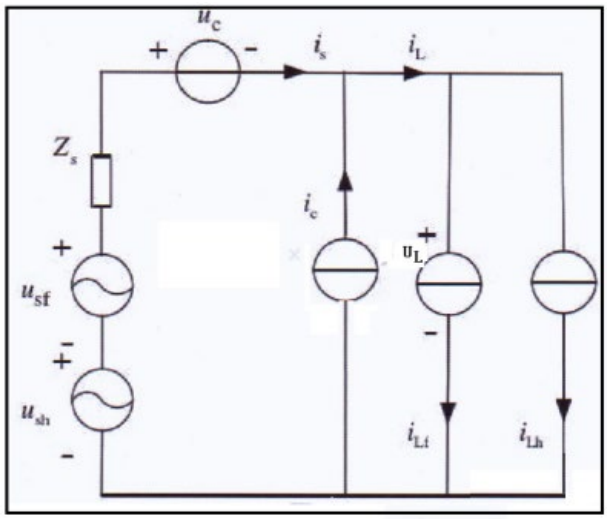

图 5 单相为例装置的等效电路

当电网电压出现跌落时，$\mu_s<U_L$，$P_{VCS1}>0$，$P_{VCS2}<0$，这个过程中串联补偿装置发出有功，并联部分吸收有功经直流侧流向串联部分；$Q_{VSC1}=0$，$Q_{VSC2}>0$，即说明负载所需无功都来自并联侧的无功补偿。通过其仿真可以看出，在电网电压出现跌落或者抬升时，负载电网能够维持不变，说明新型统一电能质量调节器实现电压补偿功能。

而图 6(a) 所示为电网电压出现跌落时情况下的系统功率流动走势。

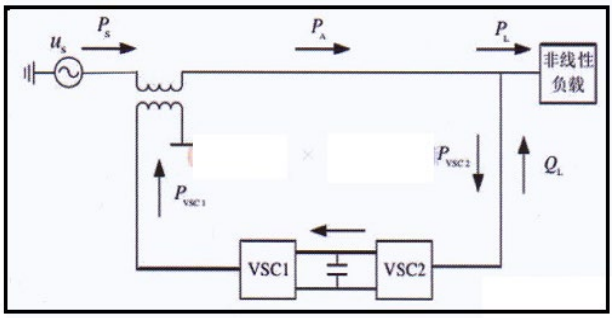

图 6(a) 所示为电网电压出现跌落时情况下的系统功率流动走势

当电网电压出现上升时，$\mu_s>U_L$，$P_{VCS1}<0$，$P_{VCS2}>0$，这个过程中串联补偿装置吸收有功，并联部分发出有功经直流侧流向并联部分；$Q_{VSC1}=0$，$Q_{VSC2}>0$，说明负载所需无功都来自并联侧的无功补偿。

图 6(b) 所示为电网电压出现上升时情况下的系统功率流动走势。

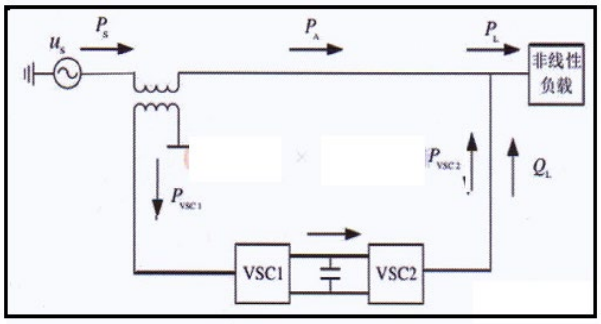

图 6(b) 所示为电网电压出现上升时情况下的系统功率流动走势

2.4 新型统一电能质量调节器补偿功能应用优势

采用这仿真技术构建的电能质量调节器补偿功能：在 0.3s 时刻电网电压跌落 50%，0.6s 时刻电压上升 10%，分别持续 0.1s，通过其仿真结果可知在电网电压出现跌落或者抬升时，负载电网能够维持不变。电网电压电流及负载电压负载电网能够维持不变，这是从因为从直流侧电压波形可知电压跌落时，电容放电，电压上升时，电容充电，在电网电压恢复正常后，直流电压在一个周波内恢复。

3 后话

*应该说上述基于最新一代首要的IGBT7技术的模块，是提出了一种适用于 1500V 光伏逆变器的新型解决方案。尤其是 2.3kV 的半桥模块和 1.2kV 的共集电极模块组成了 NPC2 拓扑，既控制简单又可靠性更高。除此之外为了实现最大的单元输出功率，两个半桥模块并联加一个横管的方案被采用，双脉冲实验证明了良好的电气特性，热测试实践证明该功率单元可以最大输出 2MW 功率。

* 上述二大拓展多种光伏新技术也又是根据目前光伏产业降低度电成本越来越强烈诉求，所出现新的整合趋势。为此又可以如何在提升产品质量的基础上，能有效的降低成本，提高转换效率，推动行业的良性竞争与发展。为此，当今还开发拓展出新型光伏MPPT宽压、高效控制等等新技术方案。