

变压器拓扑电网连接的单相光伏逆变器

Iván Patrao*, Emilio Figueres, Fran González-Espín, Gabriel Garcerá

Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales del Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

文章信息

文章历史: 收到于 2011 年 1 月 12 日

接受于 2011 年 3 月 21 日

关键词: 多电平逆变、无变压器逆变器、光伏逆变器、可再生能源

摘要

为了提高效率,降低光伏系统的成本,使用的变压器光伏逆变器是一种越来越大的替代趋势。然而,这种拓扑结构需要进一步研究,因为它提出了一些问题,有关电网和光伏发电机(如效率退化和安全问题)之间的电连接。

在本文中,着重介绍单相光伏风力发电并网逆变器,它基于已经推行的无变压拓扑结构。一方面,它是替代经典拓扑结构的基础上提出的。另一方面,研究显示,基于多层逆变器拓扑结构和经典的拓扑结构相比,没有漏电流产生。

2011 爱思唯尔出版社有限公司版权所有

目录

1. 前言	3423
2. 共模电压问题	3424
3. 桥拓扑功率变换器	3425
3.1. 全H桥	3425
3.2. 半H桥	3425
3.3. 高效可靠的逆变器的概念 (HERIC)	3426
3.4. H5的拓扑	3426
3.5. 带发电控制电路的半H桥 (GCC)	3426
4. 基于多级拓扑的逆变器	3427
4.1. 级联H桥 (CHB)	3427
4.2. 中点钳位 (NPC) 半桥	3427
4.3. 飞电容 (FC)	3428
4.4. 电容分压器NPC半桥	3428
4.5. ConergyNPC	3428
4.6. 有源NPC (ANPC)	3429
5. 无变压光伏逆变器基本特性	3429
6. 结论	3429
鸣谢	3430
参考文献	3430

1. 前言

可再生能源，特别是那些光电源[1]，由于对全球变暖的日益关注和政府对这些技术的扶持资助，近年来已经初步取得了很大的发展[2,3]。

可再生能源的功率处理方式通过电源转换器进行，由效率和成本等问题作为关键因素。光伏并网逆变器在特定情况下的功率变换器拓扑，大多数使用一个变压器运行在低或高频率，从而提供太阳能光伏板和电网之间的电气隔离。低频变压器体积大，沉重而且昂贵，并且还

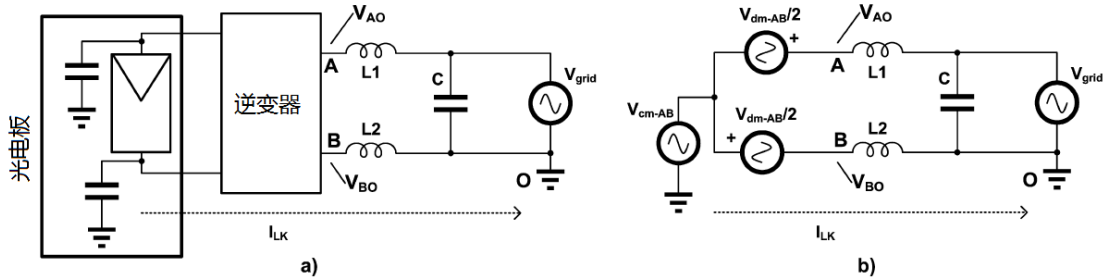


图1 (a) 共模电流和寄生电容和 (b) 光伏发电系统模型。

会在系统引入额外的损失。隔离变压器的大小可通过两个阶段的拓扑结构中的变压器工作在高频下[4]而显著减小。因为至少有两个级联的电源转换器是必须的，这种方法降低了效率。正因为如此，大量基于无变压拓扑结构的逆变器[5,6]在过去的几年里提出，更便宜，更紧凑，更高效的电源处理系统由此产生[7]。此外，使用无变压器逆变器时，一些用来测量绝缘电阻和漏电的技术必须使用，这使得无变压逆变器比变频逆变器更加安全[8]。

关于并网逆变电源的大小，在过去几年里遵循一定的变化范式[9,10]。功率大于100千瓦的大型中央逆变器正在被小尺寸的逆变器取代，它一个字符串或一组字符串处理能源供应。按照这一办法，由他们可以接触到非常不同的太阳辐射水平[11]，大型光伏板组的最大功率跟踪点可以改善。在这种情况下，使用5千瓦的单相逆变器是一个很大的发展趋势。

因为上述原因，大量涉及一种拓扑结构提出实现了网格连接单相变压器逆变器[12]。由于这种变频器的太阳能光伏板和电网间没有电隔离，使得需要特别留心一些问题，比如光伏板上的共模电压和漏电流，因为事实上，光伏电池和安装面之间的寄生电容不可忽视，在一定的操作条件（如湿度，灰尘，或安装模式）可以达到非常高的数值。通常水晶硅材质的该电容值在50到150nF/kWp之间，薄膜材质的最高值为1F/kWp。

2. 共模电压问题

整流逆变器开关可以在面板的两极交替产生的共模电压，这可能会引起电容的漏电流[13,14]，如图1 (a) 及 (b) 所示。共模电压值可估计如下公式 (1)，如果网格滤波变压器的值之间不匹配，则考虑电感L1和L2，它在共模电压问题中并发挥着重要的作用[15]。

$$V_{CM-AB} = \frac{(V_{AO} + V_{BO})}{2} + \frac{(V_{AO} - V_{BO}) \cdot (L_2 - L_1)}{(2 \cdot (L_1 + L_2))} \quad (1)$$

由于两者的影响，面板的寄生电容的和逆变器共模电压，对地漏电流的出现，这可能在光伏电站产生严重的问题（例如驱动的保护，降解效率，安全问题，附加变形网格、电磁兼容性问题[7,16-20]）。

当单极 PWM 调制在无变压全桥逆变器中使用，高频共模电压应用在光伏板上，使一个不可忽视的漏电流出现，如图 2 所示，试验条件选择如下；输出功率：5kW，电网电压：230 V/50 Hz，滤波器：2×850H/12F，开关频率：10kHz，接地电阻：1，漏电容：2×140nF。此外，漏电流在新兴的电池技术中已被发现更多的问题。当使用背接触式太阳能电池运行在高电压值时，漏电流形成在负电荷的电池表面，影响重组机制，降低电池效率。幸运的是，

如果功率光伏逆变器是为了配合负光伏串极接地，从而产生一个负电压梯度避免该现象出现 [7]，这是一个可逆的影响。在案件的非晶硅 (a-Si) 薄膜电池和碲镉 (CdTe)，如果水分凝结在内地面的模块或者负电压存在，在 TCO (透明导电氧化物) 上发生的是一个不可逆转的腐蚀过程 [7, 21]。这种现象导致减少效率，即导致较短的光伏模块寿命。为防止这种情况，它是强制性地密封该模块边界以避免在光伏组件中水分凝结。然而，很多年后，很难保证系统功能。另一个非常有效的方法是地面的负极板，由于电场方向从而避免腐蚀。

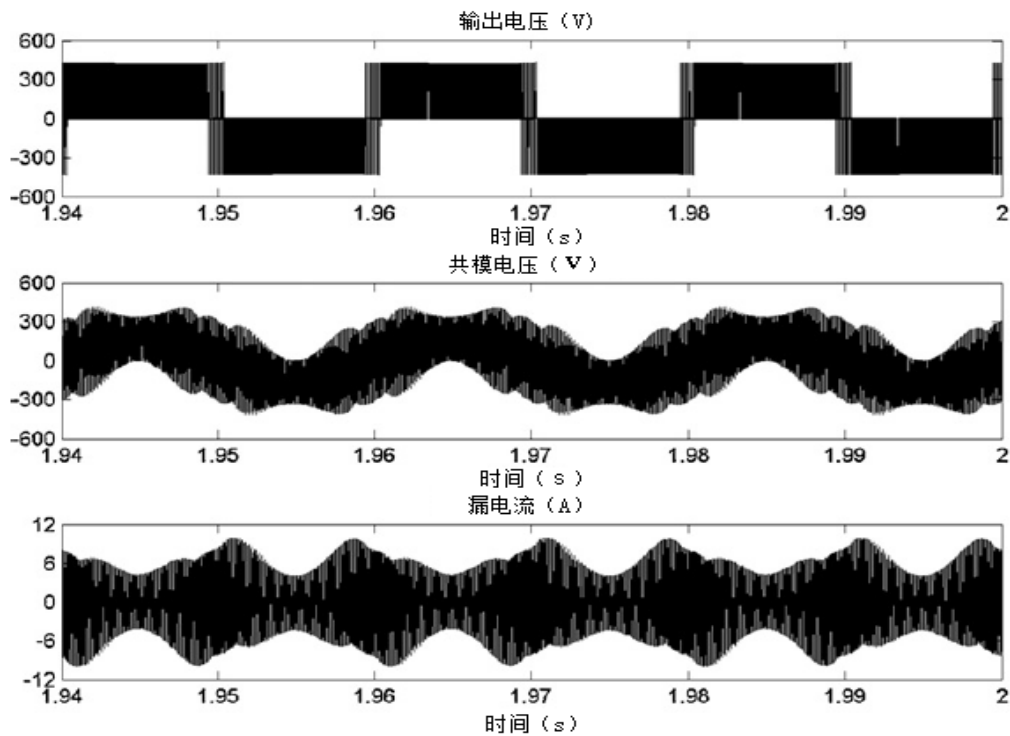


图2 全H桥单极性的PWM调制光伏逆变器产生的漏电流

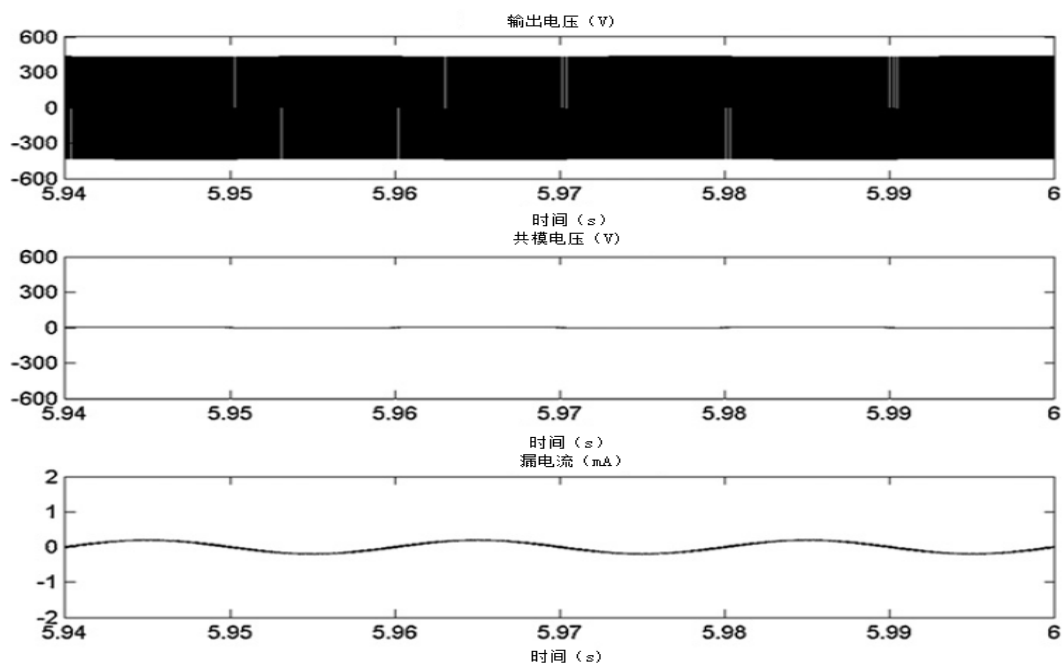


图3 半H桥光伏逆变器产生的漏电流

针对无变压逆变器的研究侧重寻找其拓扑结构具有低漏电流,以试图保持或提高经典拓扑的性能[22],例如半桥式拓扑,在中性连接中点的电压输入中,它提供了一个非常低的漏电流,如图3所示,选择与图2相同的测试条件。

本文综述了以前已经提出的实现单相无变压光伏逆变器的拓扑结构,强调某些方面的趋势,比如光伏板上的共模电压应用,产生的电流的性能大小和应用于每个拓扑结构上的半导体特征。

3. 桥拓扑功率变换器

这些基于全H桥或半H桥结构的逆变器,已被广泛的研究。在下面这一部分,我们将分析以下变压器拓扑结构:单极性或双极性调制全H桥结构,半H桥结构,HERIC拓扑结构,H5拓扑结构和外接控制电路半H桥拓扑结构。

3.1. 全H桥

在光伏并网逆变器中使用最广泛的拓扑是全H桥拓扑结构。它由4个晶体管构成,连接如图4所示。由于事实证明,大量的商用逆变器用这种拓扑结构与低频变压器配合使用,着重研究其在无变压的逆变器上的应用。

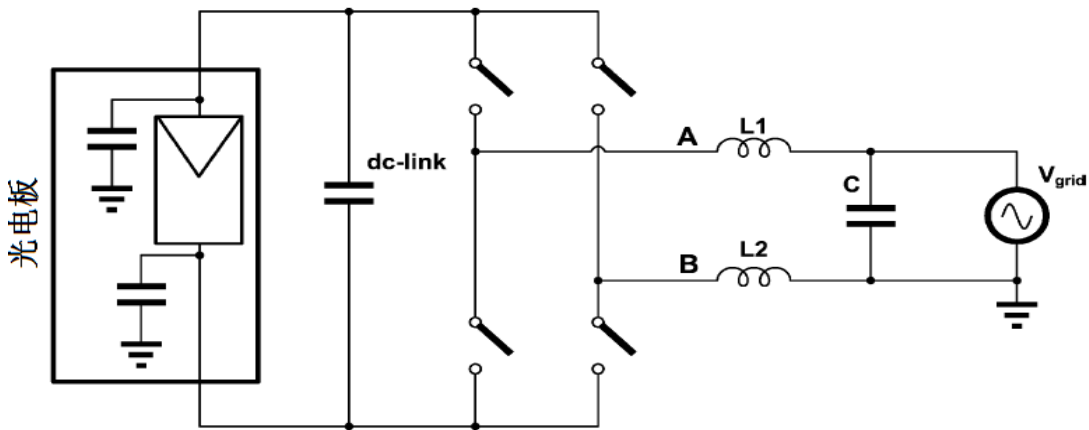


图4 全H桥拓扑

在此拓扑中最常使用的调制是单极PWM调制,因为它和双极性调制相比更有优势(例如,在高频下有更低的纹波电流,更高的效率或更低的电磁干扰)[23]。然而,当单极性PWM调制在无变压全H桥逆变器中使用,高频共模电压 $V_{DC}/2$ 施加于太阳能光伏板上,由于光伏电池板的寄生电容存在,所以会有一个不可忽视的漏电流出现。由于这个因素,建议在无变压器逆变器中不要使用这种调制[24]。

为了解决全H桥光伏逆变器中漏电流的问题,可以使用双极性PWM调制。这种调制消除了共模电压对板的高频成分[8],从而共模电压一般只有一次谐波的低频分量,从而减少漏电流的影响[13,14,25]。然而,为限制漏电流的峰值,关键要桥晶体管的栅极信号间同步性好。否则,漏电流会显著增加[26]。因此,这种拓扑结构不能实现很好替代无变压光伏逆变器,即使它使用了双极PWM调制[27]。

3.2. 半H桥

半H桥拓扑结构由2个晶体管和一个连接到光伏模块电容分压器构成,如图5所示,将电网中性线连接到电容分压器中点以保证提供几乎不变的共模电压,从而防止漏电流通过光伏模块的寄生电容[28]。

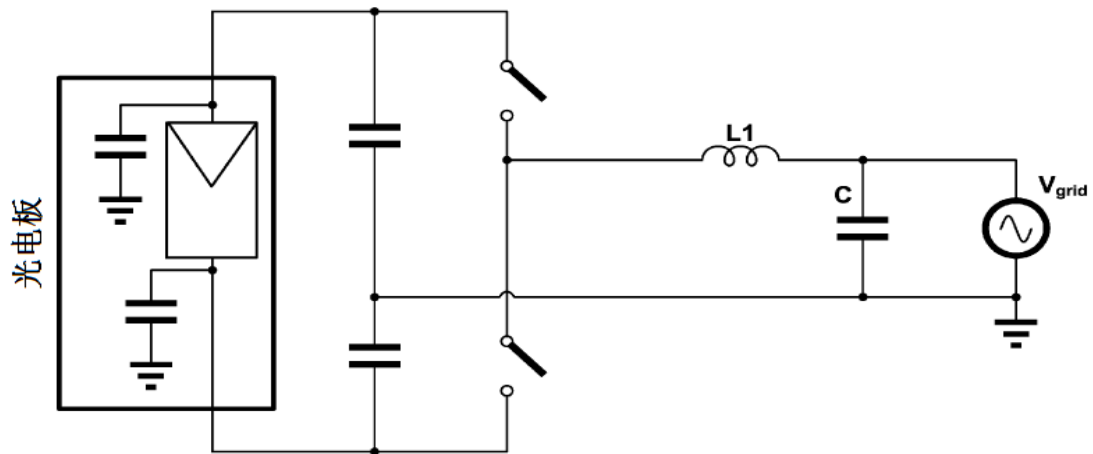


图5 半H桥逆变器的拓扑结构。

尽管和 H 桥拓扑结构相比，它的成本较低且简单（主要是由于半 H 桥比 H 桥少使用一半的半导体）[29]，由于一些缺点难以解决（例如，输出波形只有两个级别，输出电流严重失真并产生高电磁干扰，和全 H 桥拓扑相比，交换机必须支持双电压），所以这个拓扑结构在实践中很少使用[15,28]，因此需要更高阻断电压功率晶体管，从而增加了开关损耗。

为了提高半 H 桥的性能，几个这种拓扑结构的改善结构已作为无变压逆变器的关注替代品在文献中提及。其中最重要的一些将在下文详述。

3.3. 高效可靠的逆变器的概念(HERIC)

这种拓扑结构结合单极性PWM调制降低漏电流和高效率的优点，成为一些在商业逆变器中实施的拓扑结构[8,24]，特别是Sunways的拓扑结构。

正如前面章节所述，关键是使用一个 3 级输出电压无变压逆变器将光伏面板连接到电网。然而，结果如图 2 所示，采用全 H 桥已经表明，这样的安排在光伏极引入了高频纹波，这将导致一个不可忽视的漏电流流经寄生电容到面板。为了避免漏电流，同时维持 3 级的输出电压，一个基于全 H 桥逆变器的新拓扑结构已经开发并申请了专利[30]，命名缩写为 HERIC。

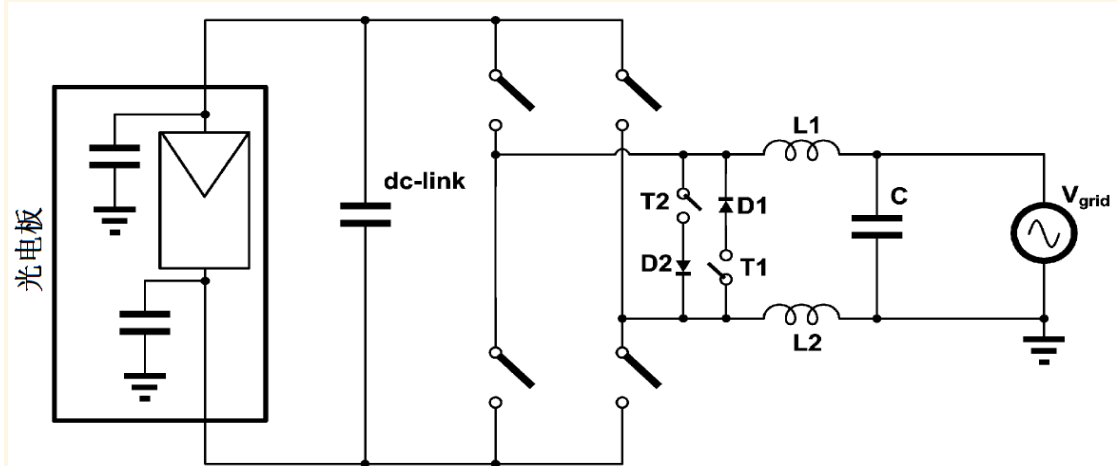


图6 HERIC 拓扑结构

在HERIC拓扑结构中，几个分支中添加了并行输出滤波器，如图6所示。这些额外的分支开关以电网频率切换，所以T1在正半周期为开启状态，在负半周期为关闭状态，而T2是负半周期为开启状态，在正半周期为关闭状态。这可以使二极管D1和D2作为一个续流二极管分别工作在正半周期和负半周期，从而防止输出电流通过二极管全桥。所体现的功能是负

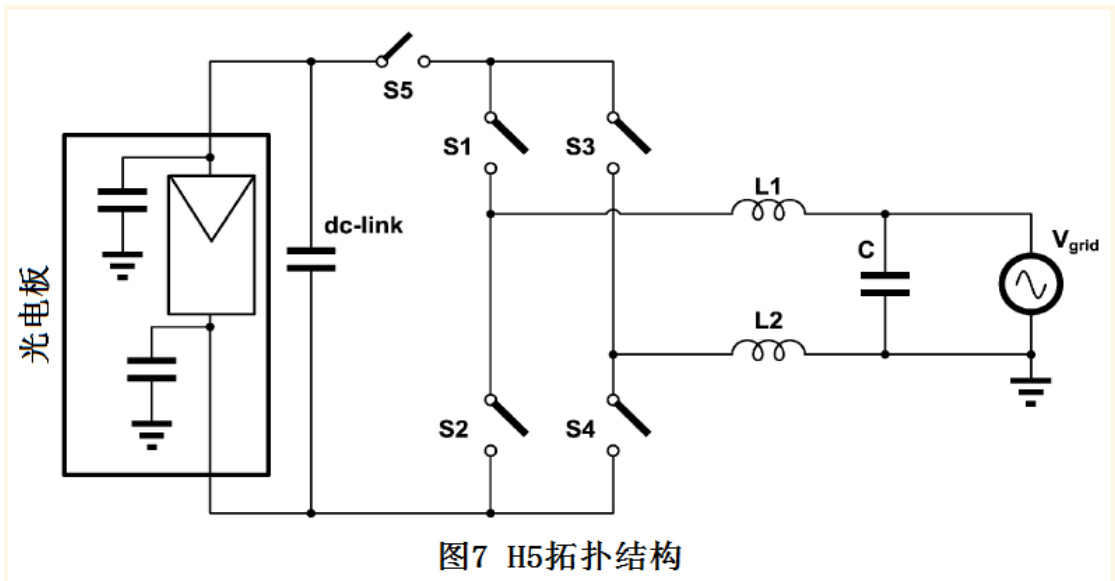
责将光伏电池板和电网电气隔离，以及获得的第三个等级，即0V级，因为当D1或D2通电时，线路仍然短路，逆变器的输出电压保持不变。HERIC拓扑允许光伏电池板保持一个浮动的对地电压，从而实现了几乎恒定的共模电压[8]。

此外，和传统的H桥相比，它可以提高效率，因为，在任何期间里没有电流通过桥半导体。当逆变器在轻负载条件下时，这一特性很起作用。[6,8,31]。

相比传统的全H桥拓扑，HERIC拓扑结构的主要缺点是有太多开关，从而导致需要更复杂的转换器

3.4. H5的拓扑

这种拓扑结构相比于全桥只需要增加一个的晶体管，这就是它命名 H5 的原因。H5 拓扑结构是 SMA 的专利[32]，这是一家全球领先的光伏逆变器制造商，H5 和 HERIC 拓扑结构基于相同的概念，即在电流续流期间将光伏电池从电网断开，以防止面板两极对地电压随开关频率波动，从而保持共模电压几乎不变。



H5 的拓扑结构如图 7 所示，采用全桥组成四个开关 S1，S2，S3 和 S4，加直流旁路的开关 S5。由电网频率操作开关 S1 和 S2，而 S3，S4 和 S5 的运行在高频率。在任何期间，S5 都是打开的，将光伏面板从全 H 桥逆变器断开。晶体管的 S1 可以关闭任何路径，S3 的晶体管的正半周期为 S3 在电网的逆二极管，S1 为负半周期的逆二极管。

使用的 H5 无变压逆变器拓扑可以获得较高的效率[33]，特别在部分负荷上。与全 H 桥拓扑结构相比，它只需多一个晶体管。然而，由于全 H 桥逆变器存在一系列晶体管[16]，如果半导体的选择是不是最佳，传导损耗可能会增加。

如今，在一些商用逆变器中使用这种拓扑结构[24]，尤其是那些拥有专有专利的，有效地实现替代无变压光伏逆变器。

3.5. 带发电控制电路的半H桥(GCC)

带发电控制电路的半H桥(GCC)[34]基于半桥逆变器增加两个额外的晶体管，这使得它可以最大功率点独立跟踪光伏字符串[35]。它的拓扑结构示意图如图8所示。在这个数字同时可以查明，GCC回路，它由开关S1和S2，电感L1，半H桥电路的开关S3和S4，电感L2组成。

GCC 是一个经典的升降压升压斩波器[36]，使用中间点和直流母线电容器的负极作为输入，正极和直流母线电容器的中间点作为输出，从而分担负载电流之间的不同的字符串。

尽管事实上，还有其他替代品比 GCC 更能最大功率执行独立跟踪几个光伏电池板的拓扑，这种拓扑非常重要，当一对字符串使用时由于它需要在同一组件算作一个完整的 H-桥，

即 4 个晶体管和 2 个电感，同时保留了半 H 桥转换器的共模电压性能，从而保证了较低的共模电流。此外，GCC 的 DC/DC 开关在光伏串之间只有电源差异，降低了整体的功率损失。

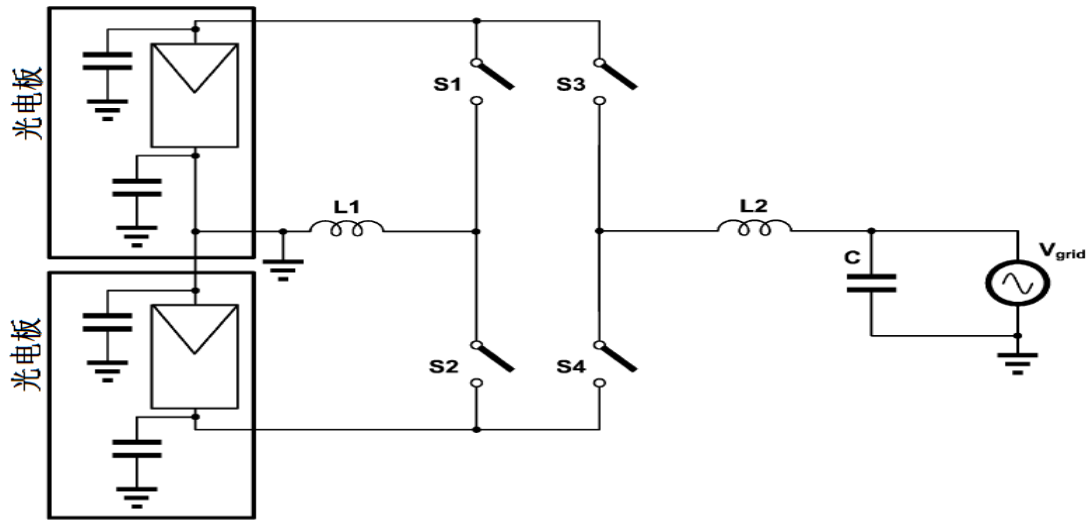


图8 带发电控制电路的半桥拓扑结构

值得指出的是，逆变器的性能比得上半 H 桥的性能，并且缺点也是相同的，即比全 H 桥更高的纹波电流，更高的功率损耗和更高的电磁干扰。然而，使用 GCC，它是可能提高太阳能光伏板的性能，由于这个事实，两个面板的最大功率点可以独立进行跟踪[11]，安装条件受到字符串安装地方影响（如不同方向，部分阴影，甚至在每个字符串面板的一个小差异）。

4. 基于多级拓扑的逆变器

多级拓扑结构是基于一个半导体和无源逆变器特别排列，这种方式有三个或多个离散的直流电压水平在电源转换器的输出。尽管这些拓扑已被广泛应用于高功率的应用[37]，它被认为是迄今为止，作为替代小功率无变压逆变器标准拓扑使用，主要是由于需要额外的功率二极管和晶体管的成本。然而，由于半导体成本减少[38,39]，多层次的拓扑最近正在小功率无变压逆变器中应用发展。

需要重点指出的是这种转换器需要克服两个局限性。一方面，减少感觉到的程度应完成的数量。另一方面，多级转换器的积木应设计，以减少寄生电感[40]。为了克服这些限制，半导体制造商正在开发与电源模块相结合的基本层次结构[41]。

无变压多级拓扑结构介绍如下：级联H桥（CHB），NPC半桥，飞电容（FC），电容分压器NPC半桥，Conergy NPC，有源NPC（ANPC）。

4.1. 级联H桥 (CHB)

最简单的多层次结构组成包括连接H桥系列中其交流侧的电池，同时使用不同直流母线的光伏电池板[42]。两个阶段的具有二阶输出滤波器的CHB多电平逆变器的示意图如图9所示。

应当指出的是，这种多层次的拓扑结构需要很多H桥功率级的隔离电源，这是考虑一个问题，当它被用在古典电力电子应用程序（例如高功率马达驱动器）。然而，光伏模块满足这一要求，从而使CHB光伏发电逆变器拓扑结构中有重要的选择设计过程[43]。

在这种拓扑结构中最重要功能之一是能够提高逆变器的交流侧电压，在既没有变压器，也没有额外升压转换器时[5,25,44]，使电流能够注入电网，由于这一事实，即尽可能多的模块根据需要，可以堆叠排列，从而多增加一些输出电压水平（例如，如图9所示，最高的 $V_{pv1} + V_{pv2}$ 在变频器的输出电压， V_{INV} ）获得。事实上，这一特性激发了不同的最大功率点的研究跟踪策略，使每个独立的控制[45,46]光伏组件组控制电流注入电网。值得指出的

是有些产品已经利用这种模块化结构的工作，即便损坏电池[47,48]，却提高了系统可靠性。

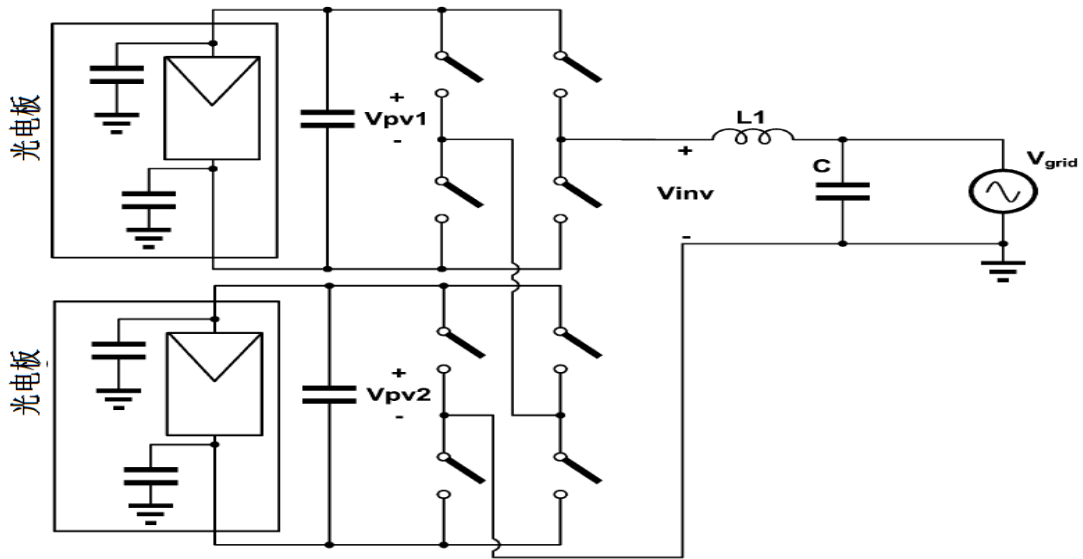


图9。级联H桥多电平逆变器

最后应该指出的是，半导体会影响所需的成本和可靠性，漏电流可以很高，这取决于连接的电池串联数量。

4.2. 中点钳位(NPC)半桥

NPC半桥是单相多层次的修订拓扑结构，应用于高功率电机驱动[49]，最近已提议作为一种替代拓扑结构用于光伏逆变器的设计中。它包括含有4个晶体管的一个分支和2个钳位二极管，如图10所示。二极管提供了一个畅通的输出电流路径，导致输出电压为0V状态[8]。

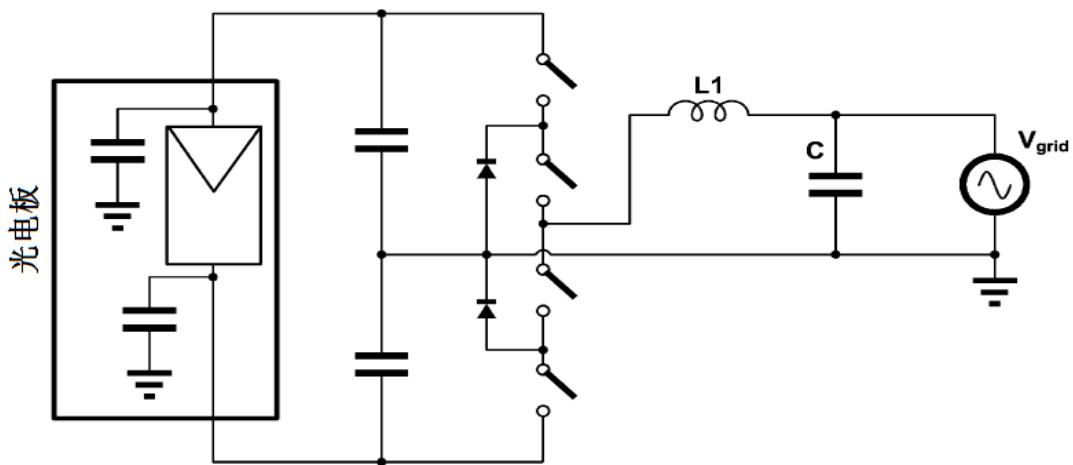


图10 NPC半桥拓扑逆变器

一方面，NPC半桥拓扑的工作方式与半桥拓扑类似，但它具有更高的效率，减少电流波动[15]和恒定的共模电压，从而防止漏电流产生。另一方面，NPC拓扑与单极化的PWM调制全桥拓扑性能类似，即有3个逆变输出电压等级，一个类似的电压衍生。因此，输出滤波器和转换器的性能与单极性PWM调制全桥拓扑是类似的[14]。

这种拓扑结构的主要缺点如下所列。它要求大功率半导体，高容量的电容器[5,25]和高输入电压，它是全桥输入电压的两倍[24]。由于缺乏并联电容[50]，另一个重要的问题是在晶体管内部会产生瞬态过电压。然而，使用一个缓冲电路就可以解决这个问题。此外，功率

损耗不均匀地分布在所有半导体上[51]。

最后，值得指出的是这种替代大约比级联H桥（CHB）或飞电容（FC）拓扑结构[52]便宜15%，以及它强大简单，所以它在一些商用无变压逆变器中使用。此外，一些半导体制造商提供拥有综合完整的NPC支路的电源模块。

4.3. 飞电容(FC)

飞电容拓扑的结构和性能和上面描述的NPC拓扑[53,54]类似，因此它提供了一个非常低的漏电流。浮动电容CFC的描绘如图11取代钳位二极管在NPC半桥拓扑中的位置，并提供了第三个输出电压水平，即0V电平。

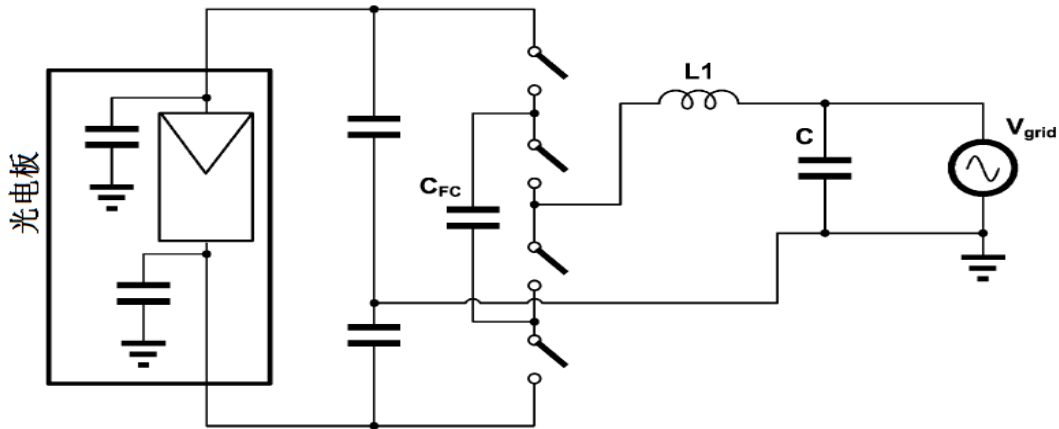


图11 飞电容逆变器

为了避免启动时在晶体管不必要的过电压，浮动电容器预充电将需要一个特殊的电路[55]。此外，浮动电容的电压必须控制在给定的参考值，因此FC控制策略比NPC控制更加复杂[5,56]。然而，当有几个输出水平时，一个简单的技术使用感应当有可用于逆变器的输出阻抗[57]。这种技术是基于冗余变频器开关状态[58,59]。

一个有趣的特性是水平足够高时，FC变频器的操作容错允许。此操作允许变频器继续工作即使晶体管或一个浮动电容器损坏[60,61]。

4.4. 电容分压器NPC半桥

这种拓扑结构，对于上述NPC半桥拓扑增加了电容分压器[15]，从而避免了直接连接中性线直流母线的中点，如图12所示。这确保了弦杆的电压保持不变通过额外的电容分压器，从而获得降低漏电流。

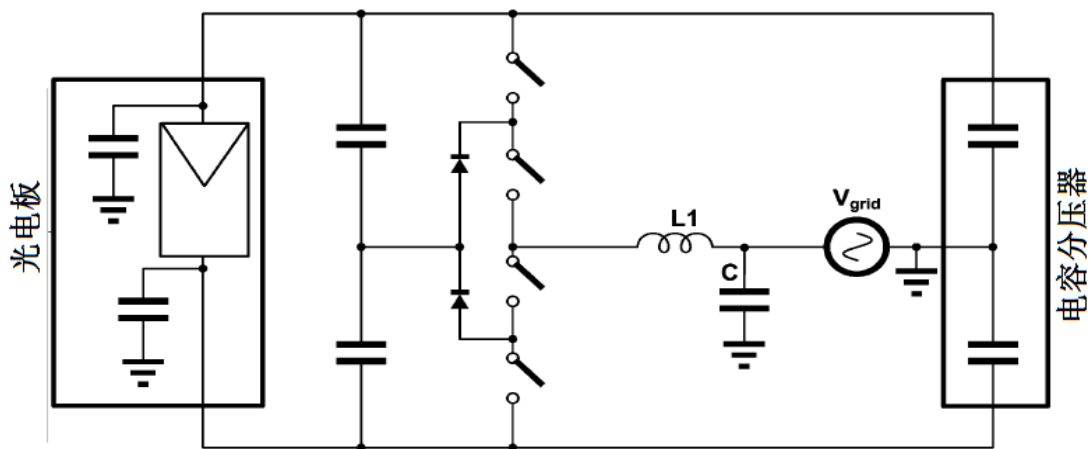


图12 电容分压器NPC半桥拓扑

需要指出的是,如果直接使用中性线连接高精度的直流母线的中点传感器是必要的,以确保没有直流电流注入到电网,使整个系统的成本和复杂增加。在NPC半桥电容分压器拓扑上,电容器集成了输出电流的随时间变化的直流分量,从而促进传感器不太准确的检测电压,因此尽管有两额外的大电流电容器,却有更低的成本。应当指出的是,拓扑结构其余的优点和缺点与NPC半桥拓扑是相同的。

4.5. Conergy NPC

Conergy NPC半桥,是Conergy公司已开发和专利另一个变种NPC半桥拓扑[62]。如图13所示拓扑结构的基本原理,它包括半桥逆变器和一个可以适用于0V输出电压的分支。

这种拓扑结构的特点是类似于NPC半桥,但它提供了更高的效率,使得它适合于低功耗应用[63]。

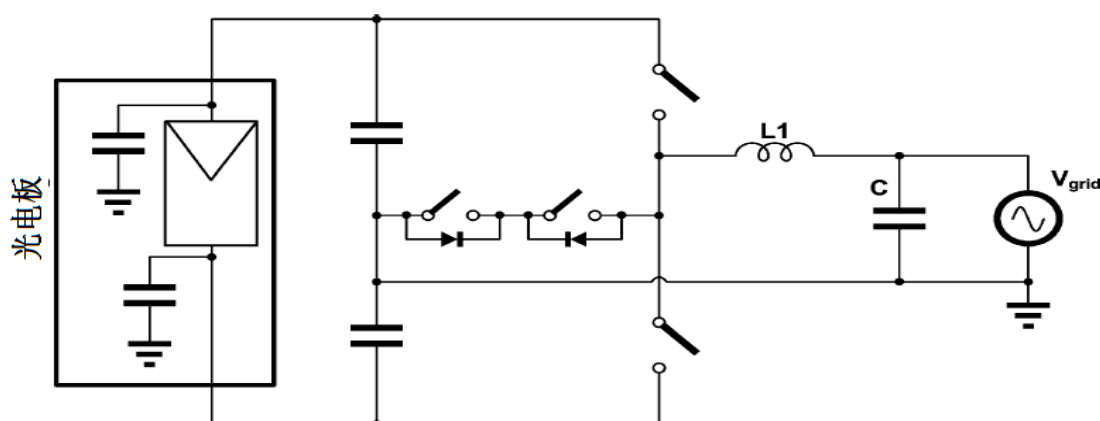


图13 Conergy NPC逆变器

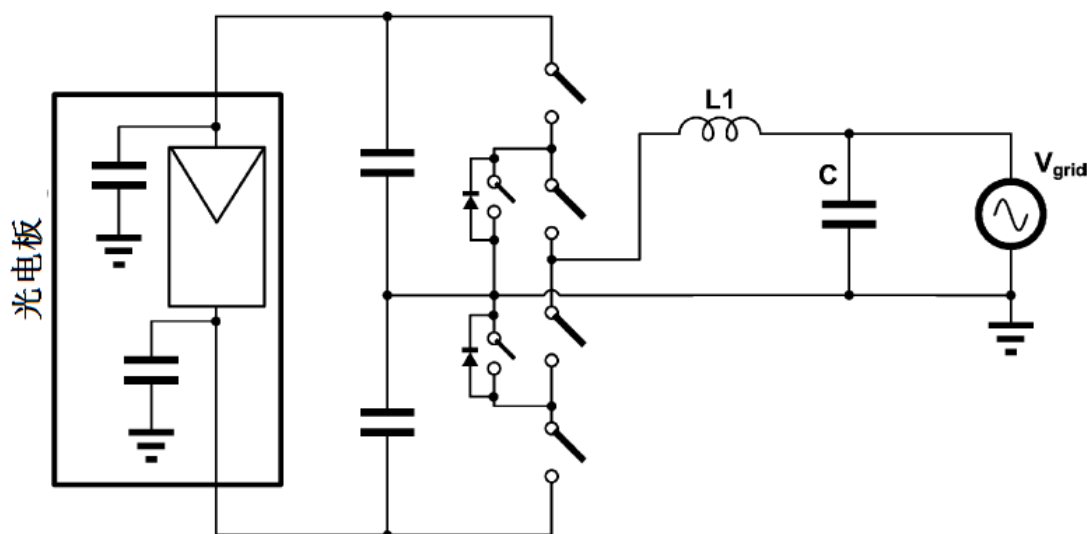


图14 有源NPC逆变器

4.6. 有源NPC (ANPC)

它由反并联功率晶体管取代NPC的钳位二极管逆变器,拓扑结构如图14所示。这种拓扑结构被称为有源NPC拓扑(ANPC),其主要特点是可以在任何时间控制路径的电流[63,64],它可以让分布损失提高[65-67],从而平均功率晶体管的负载,并增加了转换器的最大输出功率[49,51]。但是,有时候可能选择最大电流的NPC拓扑结构更加便宜[68],尤其是在低功耗应用中。

5. 无变压光伏逆变器基本特性

为了获得更好的了解到现在为止提出的几个拓扑的性能,用以下前定义的关键项目比较他们:

- 输入电容器和电容数量: 输入电容用于提供输入电流的交流分量。在某些拓扑多个电容器(或多个银行电容器)是必要的,因此,直流环节的设计更为复杂。在一些拓扑输入频率电流低,因此,输入电容必要时可以达到峰值。

- 功率半导体: 使用的最低数量电源开关很重要,因为它直接影响到转换器的成本。半导体的额定电压通常会影响到其功率损失,因此,它在低电压等级的开关拓扑结构。

- 输出电压: 一个好的输出电压质量意味着一个很好的输出电流品质,低电流谐波含量容易过滤掉。这意味着,三电平输出电压拓扑有能力比那些只具有较低的电磁辐射两个级别的输出电压有更好的表现。

- MPPT的数量: 光伏逆变器能够控制其输入电压从光伏组件获得的功率。一些拓扑可以控制一个以上的输入电压,因此它可以跟踪几个最大电源点,从而提高了不同条件下的性能隔离条件。

- 漏电流: 正如前面的介绍,它是强制性,需要强制减少无变压逆变器中的漏电流。

表 1 显示拓扑结构通过使用的先定条件之间的比较项目

6. 结论

本文回顾了单相光伏逆变器无变压拓扑的提出。一方面,替代结构都基于古典拓扑,半桥和全桥被广泛研究。另一方面,提出了基于多电平逆变器的拓扑,以及他们的发展。无变压拓扑结构的主要问题是在输入两极对地的波动电压。两个解决这个问题的方法是:在电网连续阶段断开光伏,或连接太阳能光伏板极的中性线。

在半桥拓扑中,输入电流有一个50Hz的分量,而在全桥拓扑结构中这部分频率是100Hz。因此,全桥拓扑结构需要的输入电容比半桥的低。因此,全桥转换器可能比半桥更可靠的和较低成本。

CHB拓扑结构使用最低的额定电压开关,因此可以实现高效率,但是,它需要大量的开关。相反,半桥拓扑只需要2开关,但他们需要限制最高电压。

为了获得性能和转换器成本之间良好的比例,可获得了三个水平的输出电压。全桥拓扑结构和一些多层次的半桥拓扑允许转换器获得三个水平的输出电压。此外,CHB的拓扑结构可以产生更多的输出电压水平。

发电控制电路可以和半桥拓扑结构使用,从而控制两输入电压。如果使用CHB拓扑,那么更高的输入电压水平可控制在转换器内。

如果栅极信号之间的同步是正确的调整,HERIC和H5拓扑结构能提供一个非常低的漏电流。此外,值得指出的是,所有的半桥拓扑结构连接到输入的中点中性电压呈现相当低的漏电流。

鸣谢

这项工作是由西班牙科技部和创新基金ENE2009 - 13998 - C02 -02 支持。

参考文献

- [1] Jaer-Waldau A. Photovoltaics and renewable energies in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007;11:1414 - 37.
- [2] de Alegría Mancisidor IM, Díaz de BasurtoUraga P, Martínez de Alegría Mancisidor I, Ruiz de Arbuló López P. European Union's renewable energy sources and energy efficiency policy review: the Spanish perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13:100 - 14.
- [3] Eltawil MA, Zhao Z. Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems—a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews

2010;14:112 - 29.

- [4] Manjrekar MD, Kieferndorf R, Venkataramanan G. Power electronic transformers for utility applications. In: Conference record of the 2000 IEEE industry applications conference. 2000. p. 2496 - 502.
- [5] Calais M, Agelidis VG, Meinhardt M. Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: an overview. *Solar Energy* 1999;66:325 - 35.
- [6] Kerekes T, Teodorescu R, Rodriguez P, Vazquez G, Aldabas E. A new highefficiency single-phasetransformerless PV inverter topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2009;58:184 - 91.
- [7] Araujo SV, Zacharias P, Sahan B. Novel grid-connected non-isolated converters for photovoltaic systems with grounded generator, PESC 2008. In: IEEE power electronics specialists conference. 2008. p. 58 - 65.
- [8] Burger B, Kranzer D. Extreme high efficiency PV-power converters, EPE '09. In: 13th European conference on power electronics and applications. 2009. p. 1 - 13.
- [9] Velasco D, Trujillo CL, Garcerá G, Figueres E. Review of anti-islanding techniques in distributed generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:1608 - 14.
- [10] Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2000;4:157 - 75.
- [11] Kjaer SB, Pedersen JK, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2005;41:1292 - 306.
- [12] Salas V, Olías E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: inverters below 10 kW. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;13:1541 - 50.
- [13] Lin M, Fen T, Fei Z, Xinmin J, Yibin T. Leakage current analysis of a singlephase transformer-less PV inverter connected to the grid, ICSET 2008. In: IEEE international conference on sustainable energy technologies. 2008. p. 285 - 9.
- [14] Lopez O, Freijedo FD, Yepes AG, Fernandez-Comesaa P, Malvar J, Teodorescu R, et al. Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2010;25:140 - 7.
- [15] Gonzalez R, Gubia E, Lopez J, Marroyo L. Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2008;55:2694 - 702.
- [16] Schimpf F, Norum LE. Grid connected converters for photovoltaic, state of the art, ideas for improvement of transformerless inverters. NORPIE; 2008.
- [17] Kerekes T, Teodorescu R, Borup U. Transformerless photovoltaic inverters connected to the grid, APEC 2007. In: Twenty second annual IEEE applied power electronics conference. 2007. p. 1733 - 7.

- [18] Ministerio de Economía. Real Decreto 1663/2000, de 29 de Septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de bajatensión; 2000.
- [19] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems. IEEE Std 1547-2003. IEEE Std 1547-2003, 0-16; 2003.
- [20] Liuchen C, Kojabadi HM. Review of interconnection standards for distributed power generation. In: LESCOPE 02 large engineering systems conference on power engineering. 2002. p. 36 - 40.
- [21] D'Aiello RV, Twesme EN, Fagnan DA. Performance of Solarex/Philadelphia Electric Co. amorphous silicon PV test site. In: Conference record of the twentieth IEEE photovoltaic specialist conference. 1988. p. 1092 - 7.
- [22] Spagnuolo G, Petrone G, Araujo SV, Cecati C, Friis-Madsen E, Gubia E, et al. Renewable energy operation and conversion schemes: a summary of discussions during the seminar on renewable energy systems. IEEE Industrial Electronics Magazine 2010;4:38 - 51.
- [23] Baker DM, Agelidis VG, Nayer CV. A comparison of tri-level and bi-level current controlled grid-connected single-phase full-bridge inverters, ISIE '97. In: Proceedings of the IEEE international symposium on industrial electronics. 1997. p. 463 - 8.
- [24] Araujo S, Zacharias P, Mallwitz R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2000;57:3118 - 28.
- [25] Lopez O, Teodorescu R, Doval-Gandoy J. Multilevel transformerless topologies for single-phase grid-connected converters. In: IECON 2006-32nd annual conference on IEEE industrial electronics. 2006. p. 5191 - 6.
- [26] Kai Z, Yunbin Z, Yonggao Z, Yong K. Reduction of common mode EMI in a fullbridge converter through automatic tuning of gating signals, IPERC 2006. In: CES/IEEE 5th international power electronics and motion control conference. 2006. p. 1 - 5.
- [27] Hinz H, Mustcher P. Single phase voltage source inverters without transformer in photovoltaic applications PERC '96. In: International power electronics and motion control conference and exhibition. 1996. p. 161 - 5.
- [28] Qin J, Brown J. Comparison of electromagnetic compatibility of different PV inverter. In: 4th IEEE international conference on power electronics and drive systems. 2001. p. 420 - 4.
- [29] Shen CL, Peng ST. A half-bridge PV system with bi-direction power flow controlling and power quality improvement, PEDS '07. In: 7th International conference on power electronics and drive systems. 2007. p. 725 - 31.
- [30] Schmidt H, Siedle C, Ketterer J. Patente: Inversor u ondulator para convertir una tensión eléctrica continua en unacorriente alterna o en unatensión alterna [DE 102 21 592]. 22-10-2009.
- [31] Myrzik JMA, Calais M. String and module integrated inverters for single-phase

- grid connected photovoltaic systems - a review. In: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. 2003. p. 8.
- [32] Victor M, Greizer F, Bremicker S, Hübler U. Patent: method of converting a DC voltage of a DC source, in particular of a photovoltaic DC source, in an AC voltage [EP 1 626 494]. 25-6-2004.
- [33] Vazquez G, Kerekes T, Rolan A, Aguilar D, Luna A, Azevedo G. Losses and CMV evaluation in transformerless grid-connected PV topologies, ISIE 2009. In: IEEE international symposium on industrial electronics. 2009. p. 544 - 8.
- [34] Shimizu T, Hashimoto O, Kimura G. A novel high-performance utilityinteractive photovoltaic inverter system. IEEE Transactions on Power Electronics 2003;18:704 - 11.
- [35] Shimizu T, Hirakata M, Kamezawa T, Watanabe H. Generation control circuit for photovoltaic modules. IEEE Transactions on Power Electronics 2001;16:293 - 300.
- [36] Hirachi K, Yamanaka M, Kajiyama K, Isokane S. Circuit configuration of bidirectional DC/DC converter specific for small scale load leveling system PCC Osaka 2002. In: Proceedings of the power conversion conference. 2002. p. 603 - 9.
- [37] Wu B. High power converters and AC drives. Wiley, IEEE Press; 2006.
- [38] Daher S, Schmid J, Antunes FLM. Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2008;55:2703 - 12.
- [39] Rodriguez J, Jih-Sheng L, Fang ZP. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2002;49:724 - 38.
- [40] Pandey A, Singh B, Singh BN, Chandra A, Al-Haddad K, Kothari DP. A review of multilevel power converters. The Institution of Engineers 2006;86:220 - 31.
- [41] Di Lella M, Ramin R. IGBTs for 3-level inverters. Bodo' s Power; 2008.
- [42] Malinowski M, Gopakumar K, Rodriguez J, Perez M. A survey on cascaded multilevel inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2000;57:2197 - 206.
- [43] Kavidha B, Rajambal K. Transformerless cascaded inverter topology for photovoltaic applications IICPE 2006. In: India international conference on power electronics. 2006. p. 328 - 31.
- [44] Khajehoddin SA, Bakhshai A, Jain P. The application of the cascaded multilevel converters in grid connected photovoltaic systems, EPC 2007. In: IEEE Canada electrical power conference. 2007. p. 296 - 301.
- [45] Alonso O, Sanchis P, Gubia E, Marroyo L. Cascaded H-bridge multilevel converter for grid connected photovoltaic generators with independent maximum power point tracking of each solar array, PESC '03. In: IEEE 34th annual power electronics specialist conference. 2003. p. 731 - 5.
- [46] Kouro S, Bin W, Moya A, Villanueva E, Correa P, Rodriguez J. Control of a cascaded H-bridge multilevel converter for grid connection of photovoltaic systems, IECON '09. In: 35th annual conference of IEEE industrial electronics. 2009. p. 3976 - 82.

- [47] Sanmin W, Bin W, Fahai L, Xudong S. Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter with faulty power cells, APEC '03. In: Eighteenth annual IEEE applied power electronics conference and exposit. 2003. p. 261 - 7.
- [48] Lee SJ, Bae HS, Cho BH. Modeling and control of the single-phase photovoltaic grid-connected cascaded H-bridge multilevel inverter, ECCE 2009. In: IEEE energy conversion congress and exposition. 2009. p. 43 - 7.
- [49] Rodriguez J, Bernet S, Steimer P, Lizama I. A Survey on Neutral Point Clamped Inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2000;57:2219 - 30.
- [50] Zhao Z, Zhan C, Han Y, Xie T, Zhao L. Analysis on voltage unbalance between the inner and outer devices in three level IGBT converters, PEDS '99. In: Proceedings of the IEEE 1999 international conference on power electronics and drive systems. 1999. p. 218 - 24.
- [51] Bruckner T, Bernet S, Guldner H. The active NPC converter and its loss-balancing control. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2005;52:855 - 68.
- [52] Panagis P, Stergiopoulos F, Marabeas P, Manias S. Comparison of state of the art multilevel inverters. In: PESC 2008 IEEE power electronics specialists conference. 2008. p. 4296 - 301.
- [53] Bor-Ren L, Chun-Hao H. Single-phase converter with flying capacitor topology TENCON 2004. In: IEEE Region 10 Conferente. 2004. p. 73 - 6.
- [54] Lie X, Vassilios GA. VSC transmission system using flying capacitor multilevel converters and hybrid PWM control. IEEE Transactions on Power Delivery 2007;22:693 - 702.
- [55] Thielemans S, Ruderman A, Melkebeek J. Self-precharge in single-leg flying capacitor converters, IECON '09. In: 35th annual conference of IEEE industrial electronics. 2009. p. 812 - 7.
- [56] Wu B. Other multilevel voltage source inverters. In: High power converters and AC drives. Wiley, IEEE Press; 2006. p. 179 - 186.
- [57] Bor-Ren L, Chun-Hao H. Single-phase capacitor clamped inverter with simple structure, ISCAS '04. In: Proceedings of the 2004 international symposium on circuits and systems. 2004.
- [58] Lin BR, Hung TL, Huang CH. Bi-directional single-phase half-bridge rectifier for power quality compensation. IEE Proceedings - Electric Power Applications 2003;150:397 - 406.
- [59] Gui-Jia S. Multilevel DC-link inverter. IEEE Transactions on Industry Applications 2005;41:848 - 54.
- [60] Alian C, Chenghui Z, Xiangning H, Naxin C. Fault-tolerant design for flying capacitor multilevel inverters, IPEMC '09. In: IEEE 6th international power electronics and motion control conference. 2009. p. 1460 - 4.
- [61] Xiaomin K, Corzine KA, Familiant YL. A unique fault-tolerant design for flying capacitor multilevel inverter. IEEE Transactions on Power Electronics 2004;19:979 - 87.
- [62] Knaup P. International Patent: Inverter [WO 2007/048420]. 3-5-2007.

- [63] Lin M, Kerekes T, Teodorescu R, Xinmin J, Floricau D, Liserre M. The high efficiency transformer-less PV inverter topologies derived from NPC topology, EPE '09. In: 13th European conference on power electronics and applications. 2009. p. 1 - 10.
- [64] Lin M, Xinmin J, Kerekes T, Liserre M, Teodorescu R, Rodriguez P. The PWM strategies of grid-connected distributed generation active NPC inverters, ECCE 2009. In: IEEE energy conversion congress and exposition. 2009. p. 920 - 7.
- [65] Floricau D, Floricau E, Dumitrescu M. Natural doubling of the apparent switching frequency using three-level ANPC converter, ISNCC 2008. In: International school on nonsinusoidal currents and compensation. 2008. p. 1 - 6.
- [66] Floricau D, Floricau E, Gateau G. Three-level active NPC converter: PWM strategies and loss distribution, IECON 2008. In: 34th annual conference of IEEE industrial electronics. 2008. p. 3333 - 8.
- [67] Floricau D, Popescu CL, Popescu MO, Floricau E, Spataru L. A comparison of efficiency for three-level NPC and Active NPC voltage source converters, CPE '09. In: Compatibility and power electronics. 2009. p. 331 - 6.
- [68] Sayago JA, Bernet S, Bruckner T. Comparison of medium voltage IGBT-based 3L-ANPC-VSCs, PESC 2008. In: IEEE power electronics specialists conference. 2008. p. 851 - 8.

表 1 几种拓扑结构的比较

	H 桥 (单极 PWM 调制)	H 桥 (双极 PWM 调制)	半桥	HERIC 拓扑	H5 拓扑	GCC 半桥	级联 H 桥 (n 电池)	NPC 半桥	飞电容	特种 NPC	Conergy NPC	有源 NPC
输入电容数	1	1	2	1	1	2	n	2	3	4	2	2
输入电容量	低	低	高	低	低	中等	很高	高	高	高	高	高
开关数	4	4	2	6	5	4	4n	4	4	4	4	6
二极管数	0	0	0	2	0	0	0	2	0	2	0	0
晶体管电压	400V	400V	800V	400V	400V	800V	400V/n	400V	400V	400V	400V	400V
输出电压级数	3	2	2	3	3	2	2n-1	3	3	3	3	3
一次谐波	2fsw	fsw	fsw	2fsw	2fsw	fsw	2nfsw	2fsw	2fsw	2fsw	2fsw	2fsw
电磁干扰	低	高	高	低	低	高	很低	低	低	低	低	低
MPPT 数	1	1	1	1	1	2	n	1	1	1	1	1
漏电流	高	低	很低	很低	很低	很低	中等	很低	很低	很低	很低	很低