

非隔离光伏并网逆变技术的现状与展望

肖华锋¹, 王晓标¹, 张兴², 王政¹, 花为¹, 程明¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096;

2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省合肥市 230009)

State-of-the-art and Future Trend of Transformerless Photovoltaic Grid-connected Inverters

XIAO Huafeng¹, WANG Xiaobiao¹, ZHANG Xing², WANG Zheng¹, HUA Wei¹, CHENG Ming¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Transformerless grid-connected inverter (TLI) systems feature high efficiency, low cost, low volume and weight due to using neither line-frequency transformers nor high-frequency transformers. Therefore, TLIs have been extensively investigated in academic community and commonly installed in renewable energy industry, especially for distributed photovoltaic grid-connected systems during the decade. This paper analyzed and summarized the state of the art of TLI techniques. Three rules of leakage current (LC) suppression have been concluded from a generic common-mode (CM) voltage analysis model at the beginning. Secondly, LC suppression topologies and direct current (DC) injection methods, so called as two key challenges of first generation TLIs, have been classified and discussed in detail. Finally, some challenges and future trend of next-generation TLIs have been presented based on wide band gap devices.

KEY WORDS: transformerless inverter; CM model; LC suppression; DC injection suppression; wide band gap device

摘要: 非隔离并网系统因不含低频和高频变压器而具有变换效率高、成本低、重量轻等突出优势,近年来专家学者们对其开展了大量的研究,并在新能源开发,特别是在分布式光伏并网中普及应用。该文分析并归纳了非隔离逆变技术的发展现状。首先,从非隔离并网系统的共模分析模型出发总结出三大类漏电流抑制准则。接着,分别就第一代非隔离并网系统的两大关键技术:漏电流抑制拓扑和进网直流成分抑制方法进行类讨论。最后,结合日益成熟的宽禁带器件对第二代非隔离并网系统的关键技术与挑战进行了展望。

关键词: 非隔离逆变器; 共模模型; 漏电流抑制; 进网直流

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577033, 51207024); 江苏省自然科学基金项目(BK20171360)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51577033, 51207024); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20171360).

成分抑制; 宽禁带器件

0 引言

光伏发电作为一种清洁可持续能源受到了世界各国的广泛关注,并被迅速普及应用,我国自2015年起,一直占据世界光伏累计安装量第一位,更是创造了累计安装量5年增长100倍的世界纪录(见国家能源局2010至2015年统计数据^[1])。在我国光伏发电快速发展的过程中,受国家政策激励和安装成本快速下降等因素的促进,分布式光伏发电(distributed photovoltaic generation, DPVG)年安装占比快速增加,已接近50%,如图1所示,预计在未来的5年内还会继续维持这一比例^[2]。

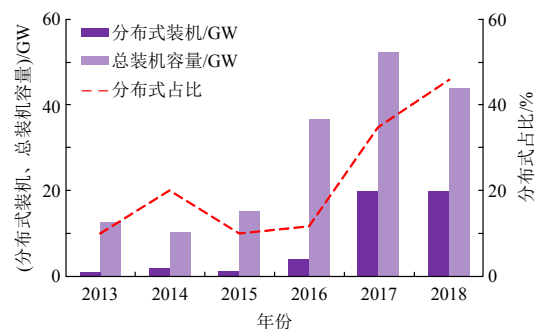


图1 中国年光伏装机量统计数据

Fig. 1 Statistical data of annual PV accumulative capacity

DPVG一般安装在低压配网侧,更接近负荷,有利于高效消纳,并避免输送通道的建设;与建筑物紧密结合也可以缓解电站建设用地紧张,以及支持“光伏扶贫”等国家战略^[3]。但是,相比大型地面光伏电站,DPVG的发电成本高,这是限制其进一步推广普及的主要障碍。

分布式光伏逆变器是DPVG的主要构成部分,用于实现光伏电池输出电力的变换和控制,并送入

电网。分布式光伏逆变器有组串式、交流模块式、直流模块式等结构^[3-5]，其中组串式因对每个光伏串配有独立 DC/DC 模块可实现独立的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)功能，从而可以适应光伏屋顶不同朝向的电池阵列，以提高发电量。组串式分布式光伏逆变器有工频隔离型、高频隔离型和非隔离型等形式^[3-5]。非隔离型光伏并网系统(transformerless photovoltaic grid-connected inverter, TLI)利用硅(包括功率器件和芯片)替代隔离型逆变器中的变压器，在提高变换效率、减小体积和降低成本的同时，可节省铜、铁等低储量不可再生资源的消耗，非常适合 DPVG 低成本的技术需求。但是，将 TLI 用于 DPVG 时，将面临接触漏电流和进网直流电流分量这两大技术挑战^[6-8]。

文献[7]详细分析了 TLI 漏电流的产生机理，发现主要是光伏电池板的对地寄生电容在开关频率共模电压激励下会产生漏电流；文献[8]则分析了 TLI 进网直流分量的产生诱因，主要是由于取消了连接至并网公共连接点(point of common coupling, PCC)的工频变压器，进而失去了“变压器隔离”这一屏障。为了促进 TLI 应用和保证其安全可靠运行，各国并网标准对漏电流和直流成分均提出了严格的指标限制^[9-11]，如表 1 所示。

表 1 几种典型并网标准中的漏电流和直流分量指标

Tab. 1 Standard values of LC and DC injection

指标	VDE0126-1-1		IEC	GB/T
	有效值/mA	断开时间/s		
漏电流	$I_{CM}>300$	0.3	相同	相同
	$\Delta I_{CM}>30$	0.3		
	$\Delta I_{CM}>60$	0.15		
	$\Delta I_{CM}>150$	0.04		
直流分量	$I_{DC}<1A$		小于额定 输出电流 1%	小于额定 输出电流 0.5%

注： I_{CM} 为漏电流有效值； I_{DC} 为进网直流电流幅值。

为了满足上述并网标准要求，各国学者和工程技术人员进行了大量研究工作^[12-19]，并取得了一系列成果，涉及建模方法、机理分析、抑制措施等方面。为了梳理该领域的研究思路和发展脉络，以便为研究人员提供理论指导以及为工程应用人员提供选型参考，本文首先对漏电流抑制和直流分量抑制这两个技术方向进行详细的分析，并提炼出抑制准则及其技术分类方法。进一步，基于上述技术特征和应用特征，并结合笔者多年的研究工作，尝试性地定义了以硅器件为基础的第一代 TLI 技术及发

展周期。

另一方面，宽禁带器件(wide band gap, WBG)的快速发展为 TLI 技术带来了跨代发展的机遇^[20]，其发展方向是高频高功率密度，以满足进一步降低 DPVG 成本的需求。按此发展方向，将有利于逆变器跟上直流变换器在开关频率和功率密度方面的发展步伐，缩短两者的技术差距^[21]。笔者基于前期开展的探索性工作，试探性地对以 WBG 器件为基础的二代 TLI 技术面临的挑战进行了展望。

1 非隔离并网系统共模特性分析与漏电流抑制准则

1.1 共模特性分析模型

电压源型 TLI 结构可以表示为图 2 所示。开关网络由多个基本单元(basic cell, BC)构成，每个基本单元可由 1 个或多个开关管和/或二极管组合而成(定义 $n_{BC}=3$)，也可为电容支路(定义 $n_{BC}=2$)，或者为短路(定义 $n_{BC}=1$)或开路(定义 $n_{BC}=0$)等状态；其电压源特性体现为开关网络中的电容 C_{dc} ； P 、 N 为开关网络直流输入端，1、2 为开关网络交流输出点； L_1 、 L_2 为电感滤波环节； C_{pv1} 、 C_{pv2} 分别为光伏板对地寄生电容； C_{Y1} 、 C_{Y2} 为 EMI 滤波器的对地 Y 电容； Z_{Line1} 、 Z_{Line2} 为从 PCC 起电网线路阻抗； Z_G 代表电网的接地点与变换器机壳接地点之间的地阻抗^[7]。

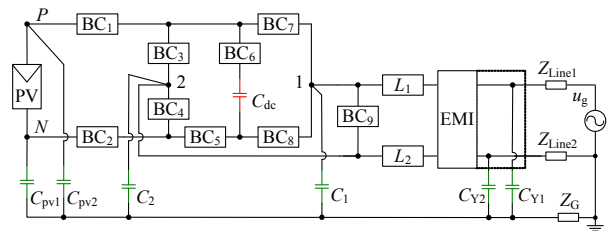


图 2 非隔离并网系统示意图

Fig. 2 Sketch diagram of genetic TLI system

以电池板输出负端 N 为参考点，点 1、2 为输出端，由差、共模电压的定义可得：

$$v_{DM} = v_{1N} - v_{2N} \tag{1}$$

$$v_{CM} = \frac{v_{1N} + v_{2N}}{2} \tag{2}$$

进一步，由式(1)、(2)可得

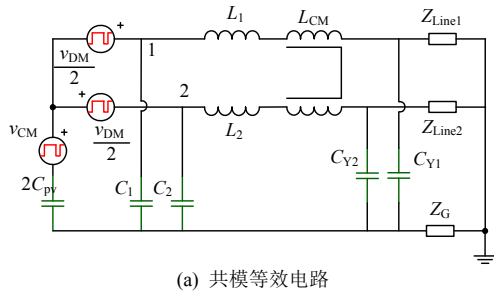
$$v_{1N} = v_{CM} + v_{DM}/2 \tag{3}$$

$$v_{2N} = v_{CM} - v_{DM}/2 \tag{4}$$

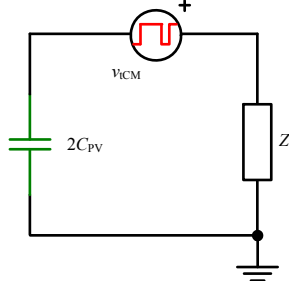
用式(3)、(4)代替图 2 中的开关网络，由“叠加原理”可略去差模(differential-mode, DM)回路及元件，得到开关频率刻度下高频共模等效电路，如

图3(a)所示;进一步,该等效电路可运用“戴维南定理”得到最简共模等效电路,如图3(b)所示。在图3(b)中, Z 为共模回路等效总阻抗,其表达式可参阅文献[7];其中, v_{iCM} 为等效共模电压源,表达式为

$$v_{iCM} = v_{CM} + \frac{v_{DM}}{2} \cdot \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \quad (5)$$



(a) 共模等效电路



(b) 最简共模等效电路

图3 非隔离并网系统共模回路模型

Fig. 3 CM voltage analysis models for TLI system

由图3(b)可知,要实现流过光伏阵列寄生电容的开关频率漏电流为零,由电容的“通交隔直”特性可知,必须维持等效共模电压源 v_{iCM} 在开关频率刻度下为恒定值。

1.2 开关频率漏电流抑制准则

根据图3(b)及式(5)可以推导出针对特征拓扑结构的开关频率漏电流抑制准则,具体叙述如下。

准则1:若 $n_{BC5}=1$ 、 $n_{BC6}=0$ 、 $n_{BC1}=n_{BC2}=n_{BC3}=n_{BC4}=3$ 、 $n_{BC7}=n_{BC8}=n_{BC9}=3$ 、 $L_1=L_2 \neq 0$,则图2转化为全桥特征的逆变电路,如图4所示。由于 $L_1=L_2$,式(5)的第二项等于0,因此,若能维持式(2)中 v_{CM} 为恒定电压幅值,则等效共模电压源 v_{iCM} 将为恒值,即全桥型逆变电路的开关频率漏电流将被消除。

准则2:若 $n_{BC1}=n_{BC2}=n_{BC5}=1$ 、 $n_{BC7}=n_{BC8}=n_{BC9}=3$ 、

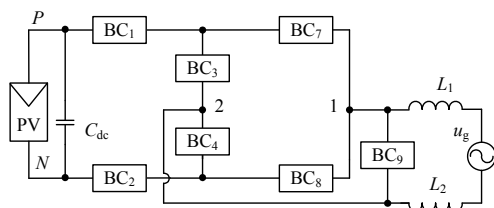


图4 全桥型非隔离逆变电路

Fig. 4 Full bridge type TLIs

$n_{BC3}=n_{BC4}=2$ 、 $L_1 \neq 0$ 、 $L_2=0$,则图2转化为半桥特征的逆变电路,如图5所示。由于 $L_2=0$,则式(5)简化为 $v_{iCM}=(v_{CM}-v_{DM})/2$,将式(1)、(2)代入可得 $v_{iCM}=v_{2N}$;又由于 $v_{2N}=v_{PN}/2$ 为恒值,则半桥型逆变电路中等效共模电压源 v_{iCM} 自然维持为恒值。

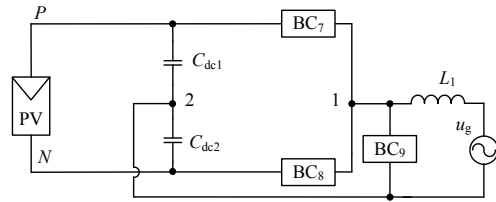


图5 半桥型非隔离逆变电路

Fig. 5 Half bridge type TLIs

准则3:若 $n_{BC9}=0$ 、 $n_{BC1}=n_{BC3}=n_{BC5}=n_{BC7}=n_{BC8}=3$ 、 $n_{BC2}=n_{BC4}=n_{BC6}=1$ 、 $L_1 \neq 0$ 、 $L_2=0$,则图2转化为共地特征的逆变电路,即光伏阵列的负端直接与电网中性线连接,如图3所示,可得 $v_{2N}=0$,再由式(1)、(2)可得 $v_{DM}=2v_{CM}$;由于 $L_2=0$,式(5)可得 $v_{iC}=(v_{CM}-v_{DM})/2=0$ 。因此,共地型逆变电路中等效共模电压源 v_{iCM} 自然维持为恒值,且为零。

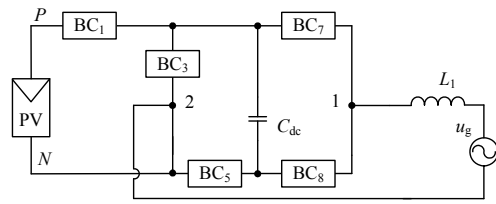


图6 共地型非隔离逆变电路

Fig. 6 Common ground type TLIs

1.3 工频漏电流抑制

1.2节讨论了开关频率及其倍数共模电压成分的抑制准则,电网工频电压同样会转化为共模电压施加在寄生电容上。按1.2节讨论的全桥型、半桥型和共地型3类拓扑,可分析出光伏阵列正、负端对地寄生电容上低频电压波形,如图7所示,其中横轴为地电位[22]。

可以看出,全桥型拓扑中存在工频共模电压,按图3(b)所示共模等效电路,将产生低频漏电流。但由于工频共模电压频率较低,寄生电容的阻抗将大幅提升,当全桥型非隔离并网系统接入低压配电

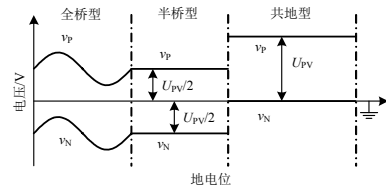


图7 不同拓扑结构下寄生电容的低频工模电压波形

Fig. 7 Low frequency CM voltage waveforms on parasitic capacitors with different topologies

网时，幅值较低的工频共模电压产生的漏电流幅值也较低，可小于并网标准的要求^[7]。

同样可以看出，半桥型和共地型拓扑的低频共模电压为恒值，按图 3(b)所示共模等效电路，由电容的“通交隔直”特性可知，不会产生低频漏电流。

2 非隔离并网系统拓扑技术

针对 TLI 可能存在的漏电流安全问题，特别是高频漏电流成分，国内外学者进行了大量的研究工作^[23-31]，且主要集中在拓扑结构和调制策略的改进上^[32-34]，并按照 1 节介绍的开关频率漏电流抑制准则，可将现有 TLI 拓扑划入全桥型、半桥型和共地型三类，如图 8 所示。

2.1 全桥型非隔离逆变拓扑

全桥型逆变电路具有电路结构对称、直流电压利用率高、调制策略丰富等优点(全桥型逆变电路拓扑如图 9(a)所示)，在学术界引起了不少研究者的关注，并在工业界得到广泛应用^[13-15]。常规四开关全桥逆变器应用于 TLI 场合时，必须运行在双极性调制方式下才能满足漏电流要求^[7, 16]，如图 9(b)所示，其开关频率共模电压为恒值。但是，双极性调制下交直流侧过多的无功循环限制了变换效率的提高和滤波电感体积的减小。因此，高效、低谐波含量的单极性调制更符合 TLI 场合的要求，如图 9(c)所示，单极性调制策略最大的优点是差模输出电压是三电平波形。

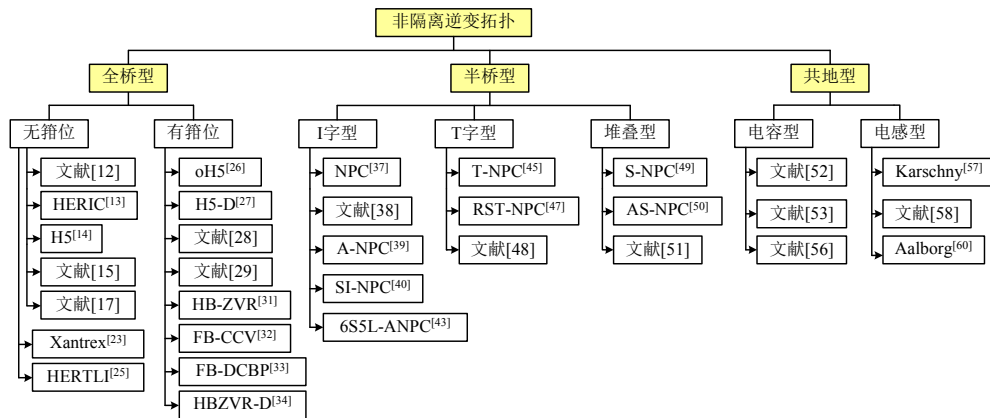


图 8 非隔离并网逆变拓扑分类图

Fig. 8 Classification diagram of TLI topologies

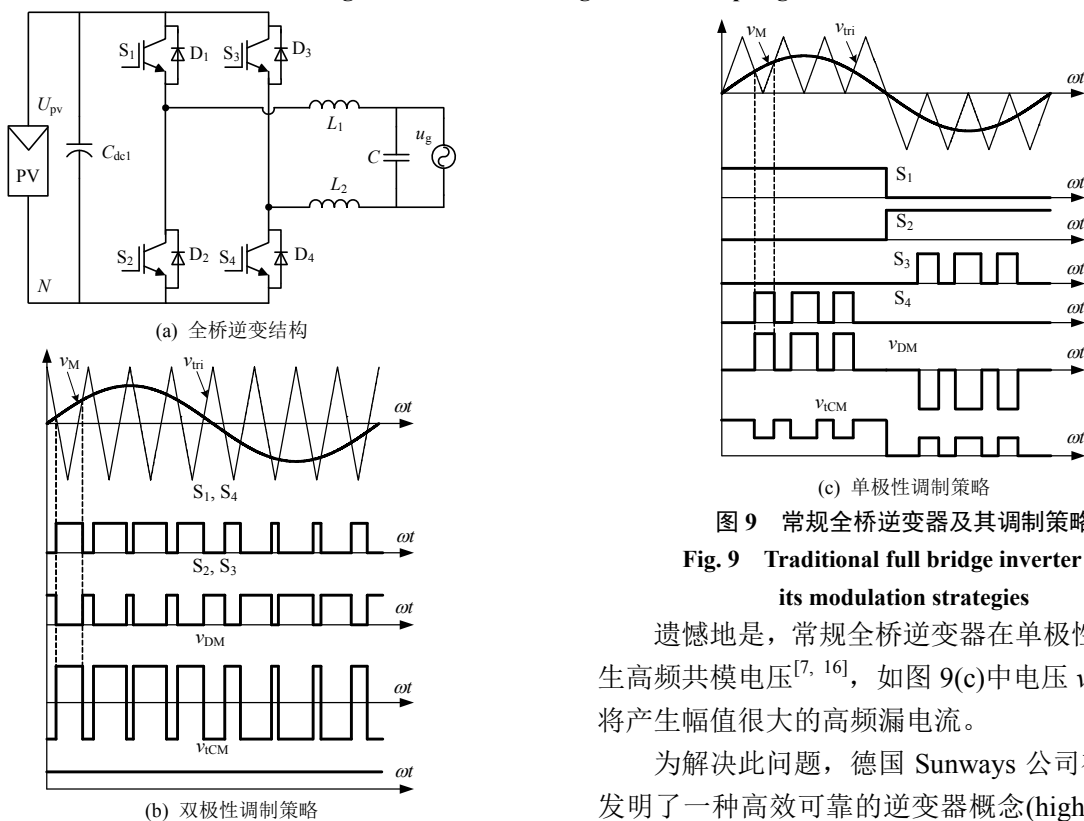


图 9 常规全桥逆变器及其调制策略

Fig. 9 Traditional full bridge inverter and its modulation strategies

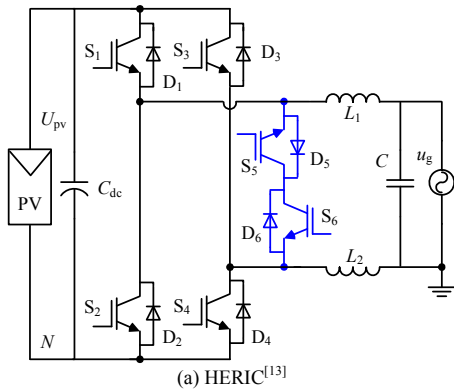
遗憾的是，常规全桥逆变器在单极性调制下产生高频共模电压^[7, 16]，如图 9(c)中电压 v_{CM} 所示，将产生幅值很大的高频漏电流。

为解决此问题，德国 Sunways 公司在 2003 年发明了一种高效可靠的逆变器概念(high efficiency

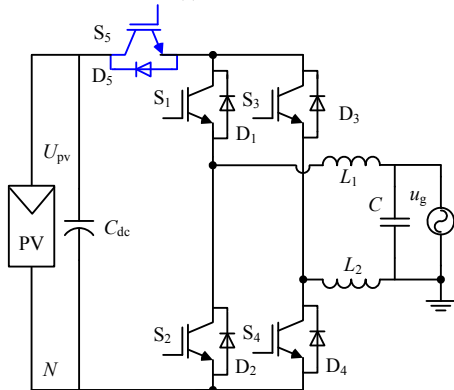
and reliable inverter conception, HERIC)电路^[13], 并获得欧洲专利(EP 1369985 A2)和美国专利(US 7046543)。其解决思路为: 在交流输出侧重构续流支路 S_5/S_6 , 如图 10(a)所示, 使得续流阶段交流侧和光伏电池阵列直流侧隔开, 共模电压失去直流电压的直接支撑而大幅下降, 并被称为“交流解耦型”。随后, 德国 SMA 公司于 2004 年发明了 H5 电路^[14], 如图 10(b)所示, 在直流侧附加 S_5 来实现续流阶段交流侧和直流侧的断开, 被称为“直流解耦型”。

按上述思路, 研究人员随后发明了一些全桥 TLI 拓扑^[15, 17-19], 比较有代表意义的拓扑为两种 H6 电路, 如图 10(c)、(d)所示, 分别属于“交流解耦型”^[15]和“直流解耦型”^[17]。

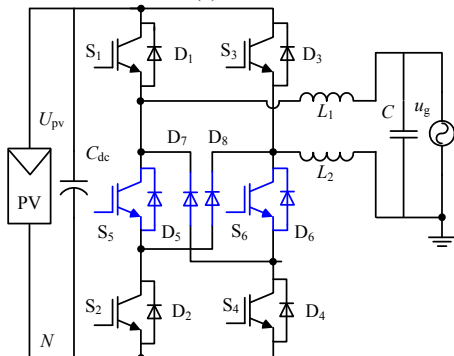
上述电路拓扑已在 DPVG 得到应用。但是, 通过现场测试波形和数据分析可以发现, 解耦型共模



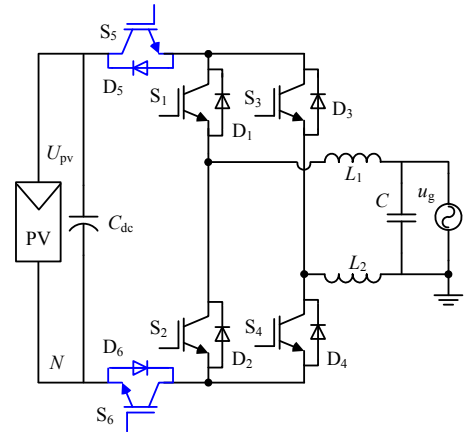
(a) HERIC^[13]



(b) H5^[14]



(c) 文献[15]所提拓扑



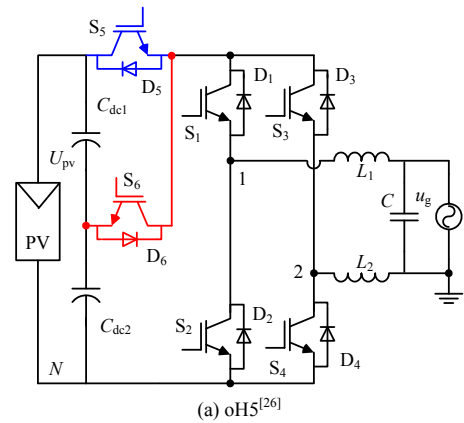
(d) 文献[17]所提拓扑

图 10 解耦型全桥非隔离拓扑

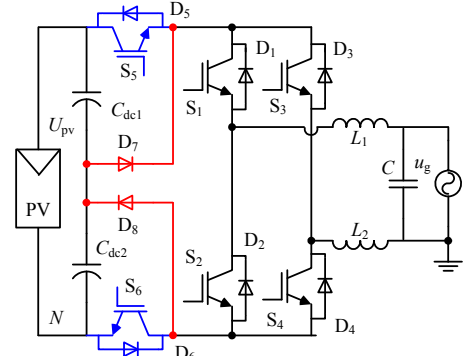
Fig. 10 Full bridge type TLIs with decoupling branches

电压消除策略不能完全消除高频共模电压^[7, 16]。其原因是续流阶段由于开关管寄生电容的存在引起了续流回路电压波动, 共模电压处于不定状态, 由 1.2 节中准则 1 可知, 全桥型电路的续流阶段共模电压必须处于输入直流电压一半的恒定值。文献[26]提出共模电压钳位的概念, 并基于 H5 电路发明了钳位支路和控制时序, 如图 11(a)所示。基于准则 1 的共模电压钳位思路, 文献[33]将 NPC 电路中钳位二极管结构引入全桥拓扑, 如图 11(b)所示。

上述基于直流侧解耦型拓扑的改进电路虽然可以实现续流阶段共模电压的恒定^[28, 34], 但在功率传输阶段(简称“传能阶段”)需要流经 3 只或 4 只



(a) oH5^[26]



(b) FB-DCBP^[33]

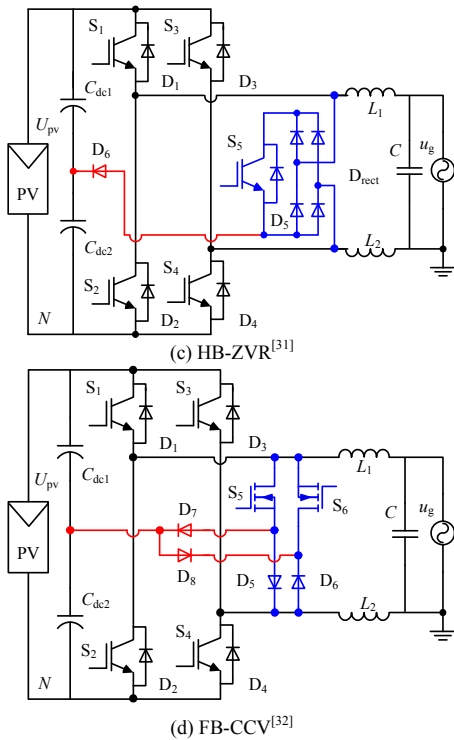


图 11 钳位型全桥非隔离拓扑

Fig. 11 Full bridge type TLIs with clamping branches

功率开关管，明显增加了导通损耗。相比较而言，交流侧解耦型拓扑在传能阶段仅流经 2 只功率开关管^[32]，可保持 TLI 效率高的优势。为此，大量学者对交流侧解耦型拓扑的续流支路和钳位支路进行了研究^[31-34]，提出的 2 种典型代表如图 11(c)、(d) 所示。

图 11(c)首先将续流网络改进为二极管全桥整流结构与有源开关管的组合，在实现双向续流的同时也形成了共模回路钳位点，并通过单只二极管与直流侧串联电容中点相连。该电路也被称为全桥零电压整流器电路(H-bridge zero voltage rectifier, HB-ZVR)^[31]，显然，该单向钳位支路只能实现续流支路电位升高时的钳位。为此，文献[34]提出一种二极管钳位全桥零电压整流器电路(diode clamped H-bridge zero voltage rectifier, HBZVR-D)，可进行双向钳位。

基于 HERIC 电路的 HB-ZVR 及其改进电路虽然可实现共模电压钳位，但续流回路的功率器件数量由 2 只增加到了 3 只，续流阶段导通损耗将会明显增加。文献[32]提出一种新型交流侧续流结构和双向钳位结构，如图 11(d)所示，电路采用无源二极管构成双向钳位结构，也称为全桥恒定共模电压电路 (full-bridge inverter topology with constant common-mode voltage, FB-CCV)，可兼顾到导通损耗和共模电压钳位二者最优。

FB-CCV 的钳位工作等效电路如图 12 所示^[32]，图中 i_{CM} 为共模电流， i_{DM} 为差模电流。图 12(a)为续流回路电位升高时钳位二极管 D_7 导通的工作模式图；图 12(b)为续流支路电位降低时的工作情况，钳位二极管 D_8 导通；最终实现了共模电压的双向钳位。

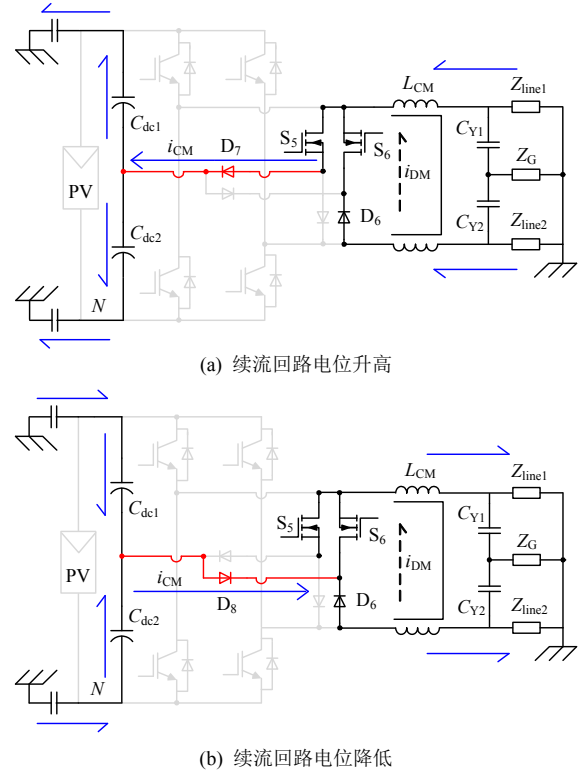


图 12 文献[37]中钳位支路工作模式图

Fig. 12 Operation modes of clamping branches in [37]

常规全桥逆变器桥臂由有源开关管串联构成，在电压源型逆变器中存在桥臂直通的风险^[32]，为提高 TLI 的可靠性，一些学者尝试将双 Buck 电路结构引入全桥型 TLI 中^[23-25]，典型代表为加拿大 Xantrex 公司发明的 Xantrex 电路^[23]和美国弗吉尼亚理工提出的一种高效、高可靠并网逆变器(high efficiency and reliability transformerless inverter, HERTLI)^[25]。可以发现，该拓扑的电路结构和元件数量相比常规全桥电路要更复杂，但它们的传能阶段和续流阶段的等效电路仍与常规全桥电路保持一致，共模特性可达到并网标准。但上述防直通结构的引入使得元器件数量大幅上升，而其利用率却大幅下降，这是为提高电路可靠性而付出的代价。

全桥型 TLI 在 DPVG 中广泛使用，覆盖从最初的欧洲市场、中国市场，到北美、澳洲市场，以及新兴的印度、越南市场等^[35]。表 2 为本节介绍的一些代表性全桥 TLI 电路特性比较，包括元件数量、损耗、差模和共模特性等方面，有利于比较各拓扑

表2 全桥型 TLI 性能比较

Tab. 2 DM and CM performance comparison of various full bridge type TLIs

TLI 电路对比	拓扑名称	元件总数				传能阶段		续流阶段	差模特性	共模特性
		SW	D	C	L	SW	SW	D		
无共模电 压钳位	HERIC ^[13]	6	0	2	2	2	1	1	单极性	续流态不定
	H5 ^[14]	5	0	2	2	3	1	1	单极性	续流态不定
	文献[12]	6	2	2	2	3	1	1	单极性	续流态不定
	文献[15]	6	0	2	2	4	1	1	单极性	续流态不定
	文献[17]	6	0	2	2	3 或 2	1	1	单极性	续流态不定
	Xantrex ^[23]	4	4	2	6	2	0	2	双极性	恒定
	HERTLI ^[25]	6	6	1	4	2	1	0	单极性	恒定
单向钳位	H5-D ^[27]	5	1	3	2	3	1	1	单极性	$\leq U_{pv}/2$
	HB-ZVR ^[31]	5	5	3	2	2	1	1	准单极性	$\leq U_{pv}/2$
有共模电 压钳位	oH5 ^[26]	6	0	3	2	3	1	1	单极性	死区内部分不定
	文献[28]	7	0	3	2	2 或 3	1	1	单极性	死区内部分不定
	文献[29]	7	0	3	2	2	1	1	单极性	死区内部分不定
	双向钳位 FB-CCV ^[32]	6	4	3	2	2	1	1	准单极性	恒定
	FB-DCBP ^[33]	6	2	3	2	4	2	2	单极性	恒定
	HBZVR-D ^[34]	5	6	3	2	2	1	1	准单极性	恒定

注：SW 为开关管；D 为二极管；C 为电容；L 为电感。

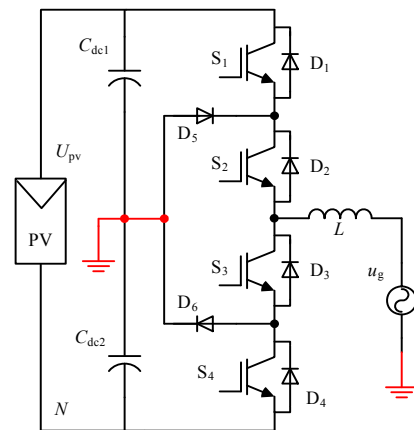
的优劣和方便工程师选择电路拓扑。

2.2 半桥型非隔离逆变电路

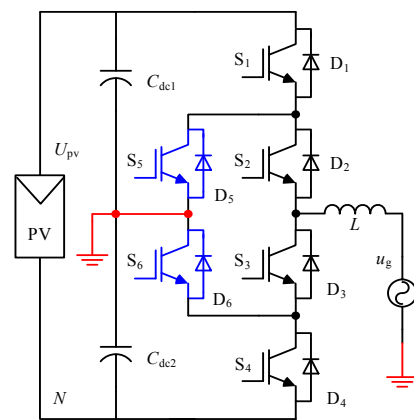
由 1.2 节中准则 2 可知，半桥型逆变电路中等效共模电压源 v_{tCM} 自然维持为恒值，即不产生高频漏电流；同时，由 1.3 节可知，也不存在工频共模电压。因此，半桥电路拓扑均可用于 TLI 系统，其拓扑技术的发展主要关注差模性能的提高，如更低的损耗、更多的输出电平数等^[36-51]。如图 8 所示，半桥型 TLI 主要有 I 字型、T 字型和堆叠型 3 类^[36]。

20 世纪 80 年代初，日本学者 Akira Nabae, Isao Takahashi 和 Hirofumi Akagi 提出中点钳位(neutral point clamped, NPC)三电平半桥逆变电路^[37]，如图 13(a)所示，也称为 I 字型三电平电路，它可直接用于 TLI-DPVG，并已被丹麦 Danfoss 公司商业化应用。NPC 电路输出差模电压为三电平波形、桥臂开关管电压应力为输入直流电压的一半，但也存在开关管损耗分布不均匀的情况^[36, 39-40]。

通过使用有源开关管替换 NPC 电路中的二极管，可形成有源钳位 NPC(active NPC, A-NPC)电路^[39]，如图 13(b)所示，器件损耗分布更加均匀。可以看出，NPC 和 A-NPC 在实际应用中同样存在桥臂直通的风险。为了降低此风险，文献[40]通过将桥臂中点分开，并分别连接输出电感，形成分裂电感 NPC(split inductor NPC, SI-NPC)电路，该分裂电感可以有效抑制桥臂直通电流的上升。遗憾的是，SI-NPC 电路无法工作于非单位功率因数，为



(a) NPC^[37]



(b) A-NPC^[39]

图 13 I 字型 NPC 电路

Fig. 13 I type NPC inverters

此文獻[41-42]使用 2 只二极管构建交流侧能量回馈通路，使得 SI-NPC 可工作于非单位功率因数。此

外，一些学者在不增加 NPC 桥臂开关管数量的约束下，尝试增加差模输出电平数^[43-44]，提高输出波形质量。

I 字型 NPC 的中点钳位结构可降低器件工作电压应力至输入直流电压的一半，适合高输入电压应用场合。当用于较低电压的 DPVG 时，在传能阶段需要流经 2 只功率开关管，导通损耗较高。为了降低导通损耗，德国 Conergy 公司在 2005 年提出了 T 型 NPC(T type NPC, T-NPC)并网逆变器^[45-46]，其结构如图 14(a)所示，也称为 Conergy 电路。可以看出，T-NPC 仅使用 4 只开关管，可输出三电平差模电压，且在传能阶段仅流经 1 只开关管，可大幅降低通态损耗。针对 T-NPC 电路的钳位支路，一些学者提出了改进措施，包括减少有源开关管数量的方案^[47](如图 14(b)所示)和采用 Cool MOSFET 替代反并联二极管减小导通损耗的方案^[48]等。

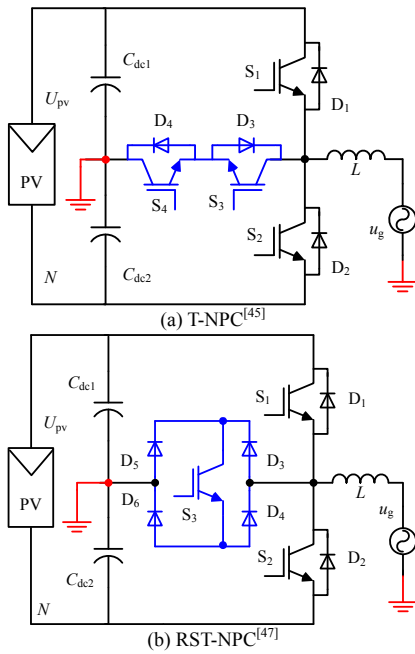


图 14 T 字型 NPC 电路

Fig. 14 T type NPC inverters

堆叠型半桥拓扑是在 NPC 和 T-NPC 电路的基础上发展起来的，即将 NPC 的桥臂结构与 T-NPC 的中点钳位结构集成到一起。文献[49]最早介绍一种堆叠 NPC 电路(stacked NPC, S-NPC)，如图 15(a)所示，电路在保持输出三电平差模电压的同时，器件损耗分布更加均匀。文献[50]将 S-NPC 电路的独立二极管替换为开关管，构成有源钳位堆叠 NPC(active stacked NPC, AS-NPC)，如图 15(b)所示。同时，为了进一步减小导通损耗，提出了混合型器件组合、CoolMosfet 替代外侧 IGBT、二极管替代等方案^[51]。

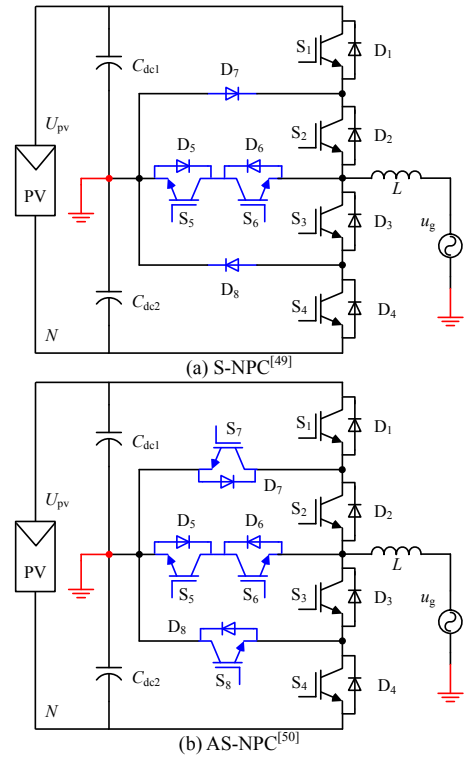


图 15 堆叠型 NPC 逆变电路

Fig. 15 Stacked NPC inverters

半桥型 TLI 拓扑在中大功率 DPVG 中得到使用，表 3 为本节介绍的一些半桥 TLI 电路的特性比较，主要集中在元件数量、损耗等方面。

表 3 半桥型 TLI 差模特性比较

Tab. 3 DM performance comparison of various half bridge type TLIs

半桥 TLI 电路	拓扑名称	元件总数				传能阶段		续流阶段	
		SW	D	C	L	SW	D	SW	D
I 字型	NPC ^[37]	4	2	2	1	2	1	1	1
	文献[38]	4	2	4	1	2	1	1	1
	A-NPC ^[39]	6	0	2	1	2	1	1	1
	SI-NPC ^[40]	4	2	2	2	2	1	1	1
T 字型	6S5L-ANPC ^[43]	6	2	3	1	2/1	1	1	2
	T-NPC ^[45]	4	0	2	1	1	1	1	1
	RST-NPC ^[47]	3	4	2	1	1	1	1	2
堆叠型	文献[48]	6	0	2	1	1	4	0	0
	S-NPC ^[49]	6	2	2	1	2	1	1	1
	AS-NPC ^[50]	8	0	2	1	2	1	1	1
	文献[51]	6	6	2	1	2	2	2	2

注：SW 为开关管；D 为二极管；C 为电容；L 为电感。

2.3 共地型非隔离逆变电路

“共地型”是指 TLI 系统的电网中性线与光伏阵列负端直接相连，如图 6 所示。由 1.2 节中准则 3 可知，共地型 TLI 等效共模电压源 v_{1CM} 自然维持为恒值，且为零；同时，由 1.3 节可知，不存在工频共模电压。因此，共地型 TLI 有实现最佳共模

特性的潜力。现有的共地型拓扑构造方法可分为电容型^[52-56]和电感型两大类^[57-60]。

电容型共地拓扑主要是通过中间电容环节为电网电压负半周提供稳定直流电压^[52-75]。文献[52]提出了一种仅用4只开关管的共地型TLI，如图16(a)所示，可实现单极性三电平输出，但电容C₂仅能在电网正半周充电、负半周放电，使得C₂较大。文献[53]提出一种虚拟直流母线逆变器(virtual DC bus inverter, VDCBI)，如图16(b)所示，电容C₂在电网负半周提供直流电压并在开关频率刻度下充电，可大幅减小C₂，但开关管S₁、S₃的电流应力增大。文献[54-55]提出了几种可实现开关频率刻度下中间电容充电的电路结构，同样存在部分开关管电流应力大的问题。为降低兼具充电功能的开关管的电流应力，文献[56]采用开关管替代文献[54]所提拓扑的二极管，可以改变电流的续流路径，从而缓解了开关管的电流应力增加，电路结构如图16(c)所示。

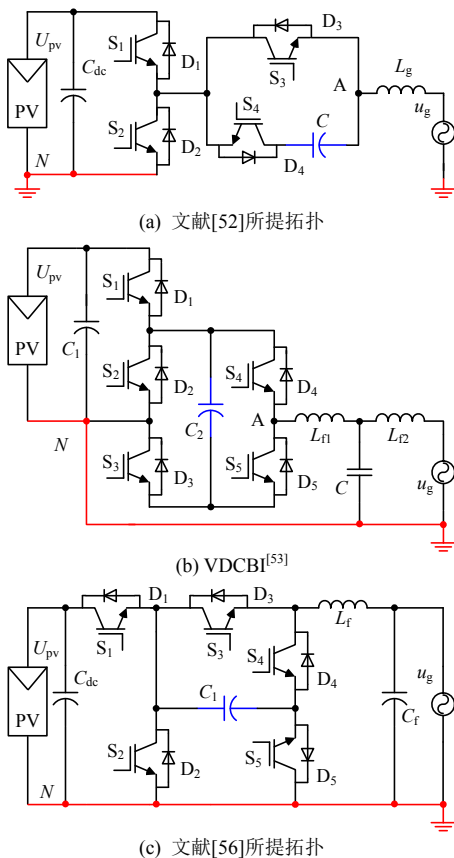


图16 电容型共地逆变电路

Fig. 16 Capacitor type common ground inverters

电容型共地拓扑虽然解决了电网负半周直流电压的问题，但其只能工作在 Buck 模式，即要求较高的输入直流电压，将限制其在小功率 DPVG 场合的应用。为实现共地拓扑的升降压能力，可采用

电感作为中间环节，即电感型共地 TLI^[57-60]。文献[57]提出了一种基于电感的共地型 TLI，如图17(a)所示，也被称为 Karschny 电路。在电网正半周，开关管 S₃关断，S₄、S₅导通，仅 S₁和 S₂高频动作，电路工作于双管同向 Buck/Boost 模式；在电网负半周，开关管 S₂、S₃导通，开关管 S₄、S₅关断，仅 S₁高频动作，电路工作于单管反向 Buck/Boost 模式。文献[58]提出了另一种电感型共地 TLI，如图17(b)所示，其电路结构看起来与图17(a)差异较大，但它们的工作模式一致。

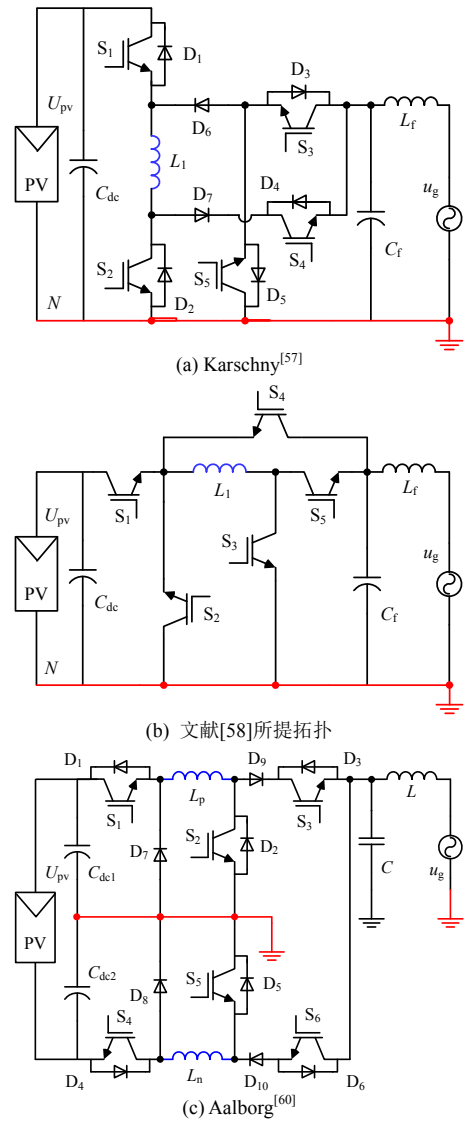


图17 电感型共地逆变电路

Fig. 17 Inductor type common ground inverters

图17(a)、(b)虽然同时提供了负半周电压和升降压能力，但为全功率处理模式，限制了变换效率的提高。文献[60]提出了一种集成 DC/DC 对称结构的共地型 TLI，如图17(c)所示，也称为“奥尔堡”逆变器(Aalborg inverter)。由于电路结构在正负电网对称，在此分析电网正半周的情况。当直流输入电

压高于交流电压幅值时，开关管 S_3 导通、 S_2 关断，仅 S_1 高频工作，为 Buck 模式；当直流输入电压低于交流电压幅值时，开关管 S_1 、 S_3 导通，仅 S_2 高频工作，为 Boost 模式。相比全功率 Buck/Boost 模式，分段 Buck 模式和 Boost 模式仅处理部分功率，可大幅提高变换效率。

共地型 TLI 在小功率分布式光伏 TLI 系统中已得到应用，表 4 为本节介绍的几种代表性共地 TLI 电路特性比较，主要集中在差模特性，包括元件数量、损耗等方面。

表 4 共地型 TLI 差模特性比较
Tab. 4 DM performance comparison of various common ground type TLIs

类型	拓扑名称	元件总数				传能阶段		续流阶段	
		SW	D	C	L	SW	D	SW	D
电容型	文献[52]	4	0	2	1	1 或 2	1 或 0	1	1
	文献[53]	5	0	3	2	3 或 2	0	2	1
	文献[56]	5	0	3	1	2	0	1	1
电感型	Karschny ^[57]	5	2	2	2	3	1	2	2 或 1
	文献[58]	5	0	2	2	2	0	2	0
	Aalborg ^[60]	6	4	2	6	2	1	1 或 2	2 或 0

注：SW 为开关管；D 为二极管；C 为电容；L 为电感。

3 非隔离并网系统直流分量抑制技术

TLI 没有工频变压器隔离进入电网 PCC 的直流

成分，该直流成分可能引起配电网上级变压器饱和、电缆绝缘老化、逆变器寿命降低等问题^[8, 61]。因此，各国并网标准均对进网直流分量提出了严格限值，参见表 1。为了有效抑制 TLI 进网直流分量，首先需要分析进网直流分量产生的原因，归纳起来主要包括^[62-63]：1) 功率器件特性差异及驱动信号不对称；2) 参考量引入直流成分；3) 传感器和运放的零点漂移和放大器误差；4) 模数转换误差；5) 电网电压的直流电压成分等。

针对上述诱因，各国研究人员进行了大量研究并提出一系列抑制方法^[64-69]，如图 18 所示，可分为检测反馈法、电容隔直法和智能算法三大类。

3.1 检测反馈法

具体地，检测反馈法是指基于检测到的进网直流成分反馈进入控制系统，再通过开关动作产生偏置电压进行抑制。直流成分的检测又可分为直接电流检测和间接电流检测两种方式。为了精确检测出进网电流的直流分量，文献[62]提出一种基于耦合电感的检测方法，如图 19 所示，其中变压器匝比为 1； i_g 为进网电流，也为变压器原边电流； i_s 为副边电流； I_{dc} 为直流分量。通过将变压器的原边和副边按图示方向同时穿过霍尔传感器，可得进网电流直流成分，可以看出该方法的难点在于变压器匝比的精确设计。

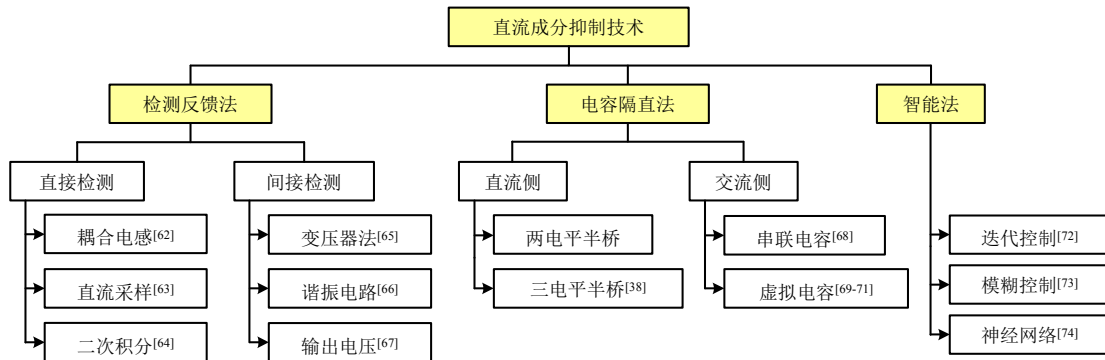


图 18 直流分量抑制方法

Fig. 18 DC component suppression methods

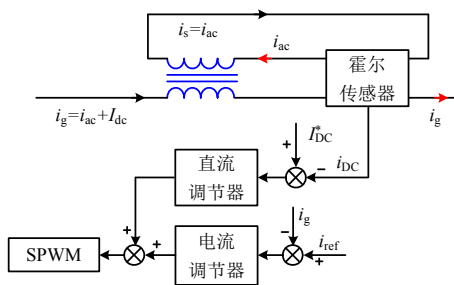


图 19 耦合电感法

Fig. 19 Parallel current transformer method

对直流分量进行直接检测反馈时，对耦合电感或者霍尔传感器的精度要求很高，其零漂、非线性等实际因素会给检测结果带来不利影响。因此，许多学者提出了间接检测方法，即检测反映电流直流分量的电压量。文献[65]采用变压器的方法检测直流成分，如图 20 所示，变压器匝比约为 1，若进网电流中含有直流成分，其在 u_g 支路将产生压降 u_{dc} ，即 $u_{12} = u_g + u_L + u_{dc}$ ，而电容 C 所在副边支路的电压同样等于 u_{12} ，即 $u_{12} = u_s + u_C$ ，其中 u_s 为变压器次级电

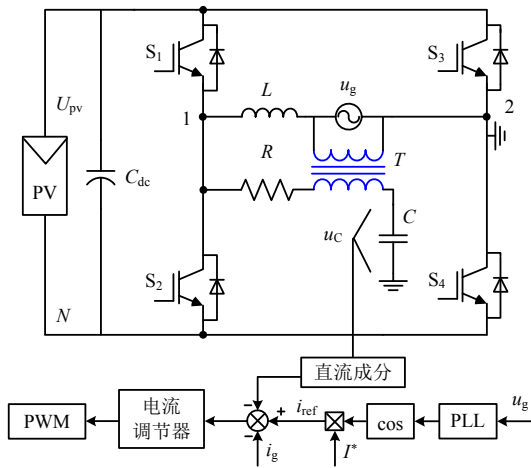


图 20 并联变压器方法

Fig. 20 Parallel voltage transformer method

压, 因此电容 C 两端的电压可反映进网直流分量的大小和方向。可以看出, 该检测方法简单可靠, 但需要使用较大体积的磁芯和低电阻绕组, 并紧密耦合以减小变压器的漏磁^[87]。

为了简化检测电路, 文献[66]采用谐振电路的方式检测直流成分, 如图 21 所示, 其中 R_a 为进网电流采样电阻, L_b 为第一级阻挡网络; L_r 和 C_r 串联形成谐振陷落旁路交流分量; L_m 为第二级阻挡网络。因此, R_m 两端的电压可以反映直流电流成分。这种方法虽然简单, 但电路参数设计较复杂。

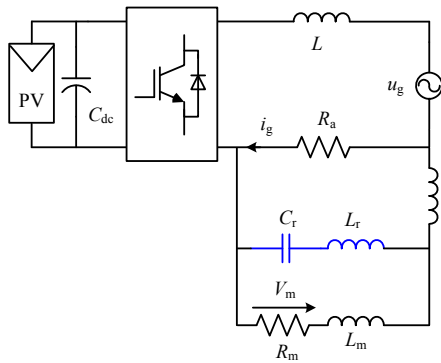


图 21 谐振电路检测方法

Fig. 21 Resonant circuit detection method

检测反馈法虽然可以简化检测电路和提高直流成分抑制能力, 但其受检测精度的制约。

3.2 电容隔直法

在进网电流回路中加入“隔直电容”是一种不依赖检测精度的直流成分抑制方法, 根据隔直电容的位置, 可以分为直流侧和交流侧两种。半桥类拓扑是典型的直流侧含隔直电容的结构, 图 22 是传统两电平半桥 TLI 电路, 在传能阶段和续流阶段进网电流均流过电容, 隔直效果好; 而图 13(a)所示的 NPC 三电平电路虽然有更好的差模特性, 但续流阶段进网电流不能流过电容, 弱化了隔直效果。为此,

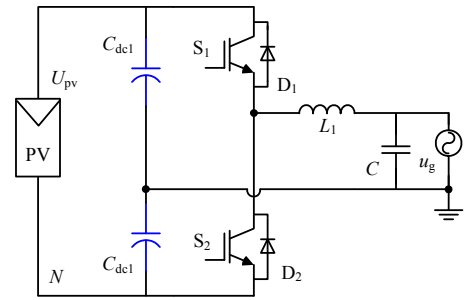


图 22 两电平半桥电路

Fig. 22 Half bridge circuit with two DC capacitors

文献[38]提出了一种采用双电容桥臂的 NPC 电路, 可保证传能阶段和续流阶段的隔直效果, 并维持三电平差模电压输出。

直流侧隔直电容方式一般需要使用较大体积的电解电容, 且对均压要求较高, 电容电压不平衡将影响隔直效果。为此, 文献[68]将隔直电容置于交流侧, 如图 23 所示。该方法简单直观, 但也存在较多不足, 如容值选取困难^[61]、电容的串联电阻降低 TLI 的效率等。

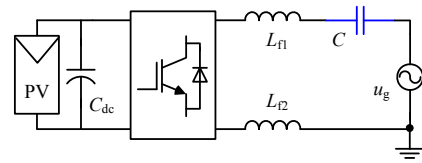


图 23 交流侧串联电容方法

Fig. 23 Series capacitor method at ac side

针对交流侧隔直电容的上述不足, 研究人员提出一种“虚拟电容”的隔直方法^[69-71], 如图 24 所示, 其中, $1/(K_{pwm}C_s)$ 为等效的虚拟电容^[69]。

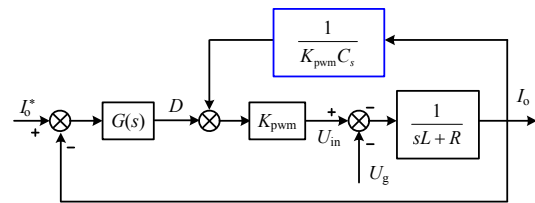


图 24 虚拟电容方法的并网逆变器模型

Fig. 24 Control diagram of grid-connected inverter with virtual capacitor concept

3.3 智能算法

传统控制器和检测算法的参数固定, 当系统参数或外部扰动出现变化时将导致系统跟踪误差和检测误差变大, 用于进网直流分量检测和抑制时将失去有效性。随着计算机硬件资源的高速发展和智能控制算法的逐渐成熟, 智能算法已应用在直流分量抑制技术中^[72-74], 是一个具有广阔发展前景的研究方向。

文献[72]提出一种模糊迭代 PI 方法, 在迭代 PI 方法的基础上由模糊推理产生 PI 控制器参数, 使其

对直流成分的补偿精度更高。

文献[74]提出一种应用于三相并网逆变器的BP神经网络算法，采用滑窗双倍积分法(sliding window double integration method, SWDIM)提取进网直流成分，采用QPR调节器控制进网电流，进网直流成分控制环路采用PID控制器，其控制参数由自适应BP算法实时计算产生，可达到对进网直流成分的精确抑制。

4 非隔离逆变技术展望

TLI从基本概念提出、关键技术攻克和DPVG应用经历了近20年的发展，目前已形成了以漏电流和直流成分抑制为主要技术特征、成熟的设计生产方法和国际通用的测试检验标准等一套完整的体系，本文称其为以硅器件为基础的第一代TLI技术；从发展周期来看，大约起步于2000年、成熟于2015年前后。

TLI技术必须持续向前发展，在演绎“硅进铜退”战略的同时追求更安全、更高功率密度、更强电网适应能力等性能指标，本文称其为以WBG器件为基础的第二代TLI技术。本节对第二代TLI关键技术进行简要介绍和展望。

4.1 新型半导体器件应用技术

WBG的出现看起来很好地兼顾了高开关频率和低损耗，而被寄予厚望，被认为是下一代功率变换装置的半导体器件基础。但当前电力电子器件应用市场仍然是硅型器件占主流，究其原因，除了晶圆生长工艺不成熟导致良品率不高，而使得WBG器件成本居高不下外，WBG器件在电路应用中未发挥出所期待的效果是另一主要因素^[20, 75]。事实上，开关器件的开关损耗主要是由开关过程中电压电流的交叠区大小决定的。因此，WBG器件要在应用中达到期望的低损耗目标，除了得益于材料特性带来的低导通损耗外，还需要通过加快开关速度来减小电压电流交叠区。

遗憾地是，快速开关使得瞬态过程分析的时间尺度从微秒级提升到纳秒级，使原来功率回路中可忽略的寄生参数变成主导开关瞬态特性的主要因素。在现实应用中表现为给器件带来严重的电压电流应力甚至越过安全工作区、给变换器带来严重的EMI问题等^[20]；再加上WBG器件目前不太可靠的门级性能又引起了严重的开关震荡。而在WBG器件的极端环境运行技术方面，如短路下的驱动保护技术等^[20, 75-76]，以及串扰抑制、串并联运行等同样是

应用研究的重点^[20, 76]。围绕WBG器件的一系列应用挑战已引起学术界和工业界的极大关注^[21, 76-77]，并取得了一定进展，但离WBG的普及应用还有较大差距。

4.2 高频软开关技术

显然，若能主动柔化WBG器件的开关过程，将是解决其应用困局的一条途径。因为基于软开关技术的SiC-TLI具有以下优点：1)可减小或消除开关损耗，从而解除开关频率的制约；2)开关过程的软化解决了WBG器件应用的开关震荡和开关应力难题；3)可充分利用线路的寄生参数，降低了高频电路布局和设计难度。正如著名的美国工程院院士、中国工程院外籍院士、IEEE Fellow、美国电力电子系统工程研究中心(CPES)创始主任、软开关技术奠基人李泽元教授曾早在2014年的国际年会IEEE PEAC上所讲“有人对我说WBG器件的出现使得软开关技术不再需要了，而我认为恰恰相反。”^[78]

可以预见，以WBG为基础的第二代TLI将要求兼顾恒定共模电压特性的逆变器软开关技术快速发展成熟^[79-81]，包括谐振轨迹规划方法、谐振网络构造和化简方法、非单位功率因数运行等，以便为实现高功率密度TLI打下基础^[80-82]。

4.3 直流母线电容小型化技术

WBG器件和软开关技术的结合可以解除开关频率对TLI的约束，带来无源元件减小、功率密度提高。但是，TLI直流侧母线电容并不随着开关频率的提高而减小，以单相TLI为例，工频脉动的输出功率会在直流电压中产生二次脉动，其并不随开关频率的变化而降低，因此，低寿命、大体积的电解电容仍然存在^[13, 14, 19, 83]。

显然，这是阻碍第二代TLI实现高功率密度的一大障碍。有着类似技术需求的有源PFC系统的解决方案值得借鉴，如采用薄膜电容或无电解电容的方案^[83-84]。但不同之处在于：PFC系统为被动二次功率脉动解耦，TLI系统为主动二次功率脉动解耦。因此，二次功率脉动需求参考量的准确产生将是主要挑战，是高能量密度直流解耦电容必须攻克的技术难关之一^[83-84]。

4.4 进网电流快速控制技术

TLI向高频化方向发展虽然为交流滤波器小型化提供了基础，但大幅减小的电感使得动态过程和故障过程中来自网侧的冲击或故障电流将快速上升，给TLI的半导体器件带来巨大冲击。为此，以高频高功率密度为性能特征的第二代TLI必须要求

快速、精准的电感电流控制技术^[85]，以限制动态和故障下冲击电流的上升。

4.5 规模化并网适应能力提升技术

第二代 TLI 将进一步提升 DPVG 在光伏系统中的占比，其规模化应用特征将进一步突出。从 TLI 角度来看，适应各种电网情况，如末端弱电网、电压短时跌落和掉电(1ms)等的需求将更加迫切；从电网角度来看，DPVG 占比的提升将必须担负起电网安全稳定责任，如无功率-电压调节、有功-频率调节^[20]等。

以高开关频率为典型特征的第二代 TLI 为实现上述技术需求提供了更大的空间，探索高频化带来 TLI 性能提升的边界具有重要意义，能为我国参与 DPVG 国际标准制定提供数据参考和促进我国 TLI 技术由目前的“并跑”向“领跑”迈进。

5 结论

本文详细叙述和梳理了非隔离光伏并网系统的关键技术、解决方案和应用挑战，重点分析了 3 种共模漏电流抑制准则，并以此对当前主流非隔离逆变器拓扑进行了分类总结。总体而言，经过近 20 年的研究和发展，以硅器件为基础的第一代非隔离逆变技术已趋成熟。论文同时结合快速发展的新型半导体器件，提出以宽禁带器件为基础的第二代非隔离逆变技术的主要技术挑战和发展方向。

参考文献

- [1] 国家能源局. 光伏发电统计数据[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2016[2019-10-09]. <http://www.nea.gov.cn>.
- [2] 中国产业信息网. 2018 年中国光伏行业新增装机容量及行业发展趋势[EB/OL]. 北京: 智研咨询集团, 2018[2019-10-09]. <http://www.chyxx.com/industry/201805/644488.html>
- [3] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 1-17. Zhang Xing, Cao Renxian. Grid-connected solar photovoltaic power generation and its inverter control [M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2012: 1-17(in Chinese).
- [4] 薛世伟, 贾清泉, 苏亚超, 等. 组串式光伏发电系统直流侧可变拓扑及多目标控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1968-1976. Xue Shiwei, Jia Qingquan, Su Yachao, et al. Variable DC side topology and multi-objective control strategy in group-string Pv generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 1968-1976(in Chinese).
- [5] Kamran Z, Waqar U, Muhammad A K, et al. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1120-1141.
- [6] Zhou L W, Gao F, Xu T. A family of neutral-point-clamped circuits of single-phase PV inverters: generalized principle and implementation[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2017, 32(6): 4307-4319.
- [7] 肖华锋, 谢少军, 陈文明, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流分析模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 9-14. Xiao Huafeng, Xie Shaojun, Chen Wenming, et al. Study on leakage current model for transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 9-14(in Chinese).
- [8] Long B, Zhang M, Liao Y, et al. An overview of DC component generation, detection and suppression for grid-connected converter systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 110426-110438.
- [9] DIN VDE V 0126-1-1, Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid[S]. 2006.
- [10] IEC, IEC 62109-2, Safety of power converters for use in photovoltaic power systems-Part 2: Particular requirements for inverters[S]. Geneva: IEC National Committees, 2005.
- [11] 中国电力科学研究院. GB/T 19964-2012, 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [12] Zhang L, Sun K, Xing Y, et al. H6 transformerless full-bridge PV grid-tied inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2014, 29(3): 1229-1238.
- [13] Schmidt H, Siedle C, Ketterer J. Inverter for transforming a DC voltage into an AC current or an AC voltage: Germany, EP1369985 A2[P]. 2003-05-13.
- [14] Victor M, Greizer F, Bremicker S, et al. Method of converting a direct current voltage from a source of direct current voltage, more specifically from a photovoltaic source of direct current voltage, in to an alternating current voltage: USA, US 7411802 B2[P], 2008-08-12.
- [15] Yu W, Lai J S, Qian H, et al. High-efficiency MOSFET inverter with H6-type configuration for photovoltaic

- nonisolated AC-module applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, 26(4): 1253-1260.
- [16] Li W H, Luo H Z, Gu Y J, et al. Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4537-4551.
- [17] Yang B, Li W H, Gu Y J, et al. Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2012, 27(2): 752-762.
- [18] Zhang L, Sun K, Xing Y, et al. H6 transformerless full-bridge PV grid-tied inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2014, 29(3): 1229-1238.
- [19] Xiao Huafeng, Liu Xipu, Lan K. Optimised full-bridge transformerless photovoltaic grid-connected inverter with low conduction loss and low leakage current[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(4): 1008-1015.
- [20] 曾正, 邵伟华, 胡博容, 等. SiC 器件在光伏逆变器中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 221-233.
- Zeng Zheng, Shao Weihua, Hu Borong, et al. Chances and challenges of photovoltaic inverters with silicon carbide devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 221-232(in Chinese).
- [21] 肖华锋. 非隔离型光伏并网逆变器软开关技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 812-821.
- Xiao Huafeng, Soft-switching techniques for transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 812-821(in Chinese).
- [22] Barater D, Lorenzani E, Concaro C, et al. Recent advances in single-phase transformerless photovoltaic inverters[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(2): 260-273.
- [23] Garabandic D. Method and apparatus for reducing switching losses in a switching circuit: USA, US 6847196 B2[P]. 2005-01-25.
- [24] Chen B F, Gu B, Lai J S, et al. Current distortion correction in dual buck photovoltaic inverter with a novel PWM modulation and control method[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, CA, USA, 2013.
- [25] Gu B, Dominic J, Lai J S, et al. High reliability and efficiency single-phase transformerless inverter for grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2013, 28(5): 2235-2245.
- [26] Xiao H F, Xie S J, Yang C, et al. An optimized transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1887-1895.
- [27] Li H, Zeng Y, Zhang B, et al. An improved h5 topology with low common-mode current for transformerless pv gridconnected inverter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2019, 34(2): 1254-1265.
- [28] Ahmad Z, Singh S N. An improved single phase transformerless inverter topology for grid connected PV system with reduce leakage current and reactive power capability[J]. Solar Energy, 2017, 157: 133-146.
- [29] Mei Y, Hu S, Lin L, et al. Highly efficient and reliable inverter concept-based transformerless photovoltaic inverters with tri-direction clamping cell for leakage current elimination[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(8): 1675-1683.
- [30] Ma L, Xu H, Huang A Q, et al. Single-phase hybrid-H6 transformerless PV grid-tied inverter[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(15): 2440-2449.
- [31] Kerekes T, Teodorescu R, Rodriguez P, et al. A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 184-91.
- [32] Xiao H, Lan K, Zhang L. A quasi-unipolar SPWM full-bridge transformerless PV grid-connected inverter with constant common-mode voltage[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2014, 29(6): 3122-3132.
- [33] Gonzalez R, Lopez J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(2): 693-697.
- [34] Freddy T, Rahim N A, Hew W P, et al. Comparison and analysis of single-phase transformerless grid-connected PV inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2014, 29(10): 5358-5369.
- [35] Gaetan M, Izumi K. Trends 2018 in photovoltaic applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2017[R]. Switzerland: IEA-PVPS, 2018.
- [36] Faraji F, Mousavi G, Mohammad S, et al. Single-stage single-phase three-level neutral-point-clamped transformerless grid-connected photovoltaic inverters: topology review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 197-214.

- [37] Nabae A, Takahashi I, Akagi H. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1981, 17(5): 518-523.
- [38] Gonzalez R, Gubia E, Lopez J, et al. Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2008, 55(7): 2694-2702.
- [39] Bruckner T, Bernet S, Guldner H. The active NPC converter and its loss-balancing control[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2005, 52(3): 855-868.
- [40] 肖华锋, 谢少军, 杨晨. 高可靠型非隔离三电平光伏并网逆变器[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(8): 114-119. Xiao Huafeng, Xie Shaojun, Yang Chen. Transformerless three-level PV grid-connected inverter with high reliability, electric power automation equipment[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(8): 114-119(in Chinese).
- [41] Frisch M, Temesi E. Inverter topologies usable with reactive power, USA, US20110013438 A1[P]. 2011-01-20.
- [42] Polisenio M C, Mastromauro R A, Liserre M, et al. High efficiency transformerless PV power converters[C]//*IEEE International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Sorrento, Italy, 2012: 93-98.
- [43] Wang H, Kou L, Liu Y, et al. A new six-switch five-level active neutral point clamped inverter for PV applications [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2017, 32(9): 6700-6715.
- [44] Teymour H R, Sutanto D, Muttaqi K M. A novel modulation technique and a new balancing control strategy for a single-phase five-level ANPC converter[J]. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2015, 51(2): 1215-1227.
- [45] Knaup P. International patent application, WO2007/048420A1[P]. 2007.
- [46] Schweizer M, Kolar J W. Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2013, 28(2): 899-907.
- [47] Hasanzadeh, Edrington C S, Leonard J. Reduced switch NPC-based transformerless PV inverter by developed switching pattern[C]//*IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, FL, USA, 2012: 359-363.
- [48] Wang Y, Shi W W, Xie N, et al. Diode-free T-type three level neutral-point-clamped inverter for low voltage renewable energy system[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6168-6174.
- [49] Floricaud D, Gateau G, Dumitrescu M, et al. A new stacked NPC converter: 3L-topology and control[C]//*IEEE European Conference on Power Electronics and Applications*, Denmark, Aalborg, 2007: 1-10.
- [50] Floricaud D, Gateau G, Leredde A. New active stacked npc multilevel converter: operation and features[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2010, 57(7): 2272-2278.
- [51] Wang Y, Li R. Novel high-efficiency three-level stacked-neutral point-clamped grid-tied inverter[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3766-3774.
- [52] Kadam A, Shukla A. A Multilevel Transformerless inverter employing ground connection between PV negative terminal and grid neutral point[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2017, 64(11): 8897-8907.
- [53] Gu Y, Li W H, Zhao Y, et al. Transformerless inverter with virtual DC bus concept for cost-effective grid-connected PV power systems[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2013, 28(2): 793-805.
- [54] Siwakoti Y P, Blaabjerg F. Common-ground-type transformerless inverters for single-phase solar photovoltaic systems[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2100-2111.
- [55] Ardashir J F, Sabahi M, Hosseini S H, et al. A single-phase transformerless inverter with charge pump circuit concept for grid-tied PV applications[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 5403-5415.
- [56] Liao Z L, Cao C, Qiu D, et al. Single-phase common-ground-type transformerless PV grid-connected inverters [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 63277-63287.
- [57] Dietrich K. Wechselrichter, Germany, DE Patent DE 19642522 C1[P]. 1998-04-23.
- [58] Azary M T, Sabahi M, Babaei E, et al. Modified single-phase single-stage grid-tied flying inductor inverter with MPPT and suppressed leakage current[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2018, 65(1): 221-231.
- [59] Araújo S V, Zacharias P, Mallwitz R. Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems[J]. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2010, 57(9): 3118-3128.
- [60] Wu W, Ji J, Blaabjerg F. Aalborg inverter—a new type of “Buck in Buck, Boost in Boost” grid-tied inverter[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2015, 30(9):

- 4784-4793.
- [61] 刘鸿鹏, 王卫, 吴辉. 光伏逆变器的调制方式分析与直流量抑制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 27-32. Liu Hongpeng, Wang Wei, Wu Hui. Modulation mode analysis and suppressing DC current of PV inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 27-32(in Chinese).
- [62] Abdelhakim A, Mattavelli P, Yang D, et al. Coupled-inductor-based DC current measurement technique for transformerless grid-tied inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2018, 33(1): 18-23.
- [63] Zhang W, Armstrong M, Elgendy M A. DC injection suppression in transformer-less grid-connected inverter using a DC-link current sensing and active control approach[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2019, 34(1): 396-404.
- [64] Wang B C, Guo X Q, Gu H R, et al. Real-time DC injection measurement technique for transformerless PV systems[C]//IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China, 2010: 980-983.
- [65] Sharma R. Removal of DC offset current from transformerless PV inverters connected to utility[C]//International Universities Power Engineering Conference, Cork, Ireland, 2005: 1-5.
- [66] Ahmed A, Li R. Precise detection and elimination of grid injected DC from single phase inverters[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(8): 1341-1347.
- [67] He G F, Xu D H, Chen M. A novel control strategy of suppressing DC current injection to the grid for single-phase PV inverter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2015, 30(3): 1266-1274.
- [68] Blewitt W M, Atkinson D J, Kelly J, et al. Approach to low-cost prevention of DC injection in transformerless grid connected inverters[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(1): 111-119.
- [69] 王宝诚, 郭小强, 梅强, 等. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器直流注入控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 23-28. Wang Baocheng, Guo Xiaoqiang, Mei Qiang, et al. DC Injection control for transformerless PV grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 23-28(in Chinese).
- [70] Yan Q, Wu X, Yuan X, et al. Minimization of the DC component in transformerless three-phase grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2015, 30(7): 3984-3997.
- [71] Long B. Design and implementation of a virtual capacitor based DC current suppression method for grid-connected inverters[J]. ISA Transactions, 2019, 92: 257-272.
- [72] 徐鹏, 吴雷. 基于模糊迭代 PI 控制直流量抑制策略[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2015, 14(5): 585-589. Xu Peng, Wu Lei. Suppression strategy of DC component based on fuzzy iteration PI[J]. Jiangnan University: Natural Science Edition, 2015, 14(5): 585-589(in Chinese).
- [73] Kumarappan A L, Sandhiya S. Fuzzy based minimization of the DC component in transformerless three-phase grid-connected photovoltaic inverters[J]. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, 2016, 2(6): 30-36.
- [74] Long B, Huang L, Sun H B, et al. An intelligent dc current minimization method for transformerless grid connected photovoltaic inverters[J]. ISA Transactions, 2018, 88: 268-279.
- [75] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371-379. Wang Xuemei. Researches and applications of wide bandgap SiC power devices in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 371-379(in Chinese).
- [76] Puschkarsky K, Grasser T, Aichinger T, et al. Review on SiC MOSFETs high-voltage device reliability focusing on threshold voltage instability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(11): 4604-4616.
- [77] 张斌锋, 许津铭, 钱强, 等. SiC MOSFET 特性及其应用的关键技术分析[J]. 电源学报, 2016, 14(4): 39-51. Zhang Bin Feng, Xu Jinming, Qian Qiang, et al. Analysis on characteristics of SiC MOSFET and key techniques of its applications[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(4): 39-51(in Chinese).
- [78] Mu M K, Lee F C. Comparison and optimization of high frequency inductors for critical model GaN converter operating at 1MHz[C]//IEEE Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai, China, 2014.
- [79] Hong F, Wu Y, Ye Z, et al. A passive lossless soft-switching single inductor dual buck full-bridge inverter [J]. Journal of Power Electronics, 2018, 18(2): 364-374.
- [80] Xiao H F, Lan K, Zhang L. A zero-voltage-transition HERIC-type transformerless photovoltaic grid-connected

- inverter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1222-1232.
- [81] Xiao H F, Lan K, Zhou B, et al. A family of zero-current-transition transformerless photovoltaic grid-connected inverter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2015, 30(6): 3156-3165.
- [82] Xiao H F, Zhang L, Wang Z, et al. A new soft-switching configuration and its application in transformerless photovoltaic grid-connected inverters[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9518-9527.
- [83] 王浩然, 朱国荣, 伏潇斌, 等. 无电解电容单相电力变换器直接脉动功率控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3573-3581.
Wang Haoran, Zhu Guorong, Fu Xiaobin, et al. A directly pulsation power control strategy for single-phase power converters with E-cap free[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3573-3581(in Chinese).
- [84] Xia Y L, Roy J, Ayyanar R. A capacitance-minimized, doubly grounded transformer less photovoltaic inverter with inherent active-power decoupling[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2017, 32(7): 5188-5201.
- [85] Xiao Huafeng, Li Mingming, Cheng Ming, et al. A current sensor-less controller for grid-connected inverters[C]// IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Guangdong, China, 2018: 1-5.



肖华锋

收稿日期: 2019-10-12。

作者简介:

肖华锋(1981), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高频功率电子变换、新能源利用技术等研究, xiaohf@seu.edu.cn;

王晓标(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为并网逆变器技术, w306796@163.com;

张兴(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电技术, 电力电子电力传动, honglf@ustc.edu.cn;

王政(1979), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机驱动及应用、新能源与分布式发电, zwang@seu.edu.cn。

(责任编辑 李婧妍)