

单相光伏级联多电平逆变器漏电流抑制与功率均衡控制综述

张 兴¹, 吴孟泽¹, 王明达¹, 王平洲¹, 付新鑫¹, 赵 涛²

(1. 可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室(合肥工业大学), 安徽省合肥市 230009;

2. 青岛大学电气工程学院, 山东省青岛市 266071)

摘要: 单相级联多电平逆变器(CMI)因其可实现组件级最大功率点跟踪(MPPT)、组件可关断、多电平输出电压谐波含量低、集优化器与并网逆变器为一体的结构等优势,近年来在光伏并网系统的研究领域受到关注。以单相非隔离型独立直流母线结构的光伏级联多电平逆变器(PV-CMI)为研究对象,针对其存在的两个问题进行综述:一是因缺少隔离环节可能导致的漏电流问题;二是单相PV-CMI各单元间相互独立的直流光伏输入可能导致的功率不均衡问题。这两个问题对单相PV-CMI的安全稳定运行造成了威胁,从而极大地限制了单相PV-CMI的推广和应用。文中分析了单相PV-CMI的基本原理和拓扑特点,分别就其漏电流与光伏功率不均衡两大关键问题,综述现有的研究方案并进行了总结。最后,展望了PV-CMI未来的发展趋势及其存在的技术挑战,为后续研究提供了参考。

关键词: 级联多电平逆变器(CMI); 漏电流; 功率不均衡; 光伏逆变器

0 引言

《可再生能源2021全球现状报告》^[1]显示,光伏发电在电力系统中的装机容量占比连年攀升,2020年全球光伏发电装机容量新增了约139 GW,占可再生能源新增发电量的一半以上,巩固了太阳能光伏发电技术在新能源发电的领先地位。其中,户用光伏市场近年来持续呈现爆发态势,随着国家能源局实施“千家万户沐光行动”,公布整县推进分布式光伏的县市达676个,中国户用型光伏产业将迎来重大利好^[2]。

户用型光伏逆变器是户用型光伏发电系统的关键设备。常见的户用型光伏逆变器包括户用组串逆变器、微型逆变器、基于功率优化器的集散系统以及正弦波级联结构等。其中,户用组串逆变器不易实现组件级关断和组件级最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)^[3];微型逆变器虽然可以实现组件级关断和组件级MPPT,但每个光伏板都需要进行连接,功率小、数量多、成本高、效率低^[4-9];基于功率优化器的集散系统为功率优化器+集中式光伏并网逆变器的两级式结构,虽然能实现组件级关断和组件级MPPT,但集中逆变器的效率

仍有提升空间^[10-11];正弦波级联结构也可以实现组件级关断和组件级MPPT,但其含有多个滤波器,效率低、成本高^[12]。相比之下,单相光伏级联多电平逆变器(photovoltaic cascaded multilevel inverter, PV-CMI)具有集优化器与并网逆变器为一体的结构,单元独立易扩展,可实现组件级关断和组件级MPPT^[13],通过改变单元数即可并入不同电压等级的电网,无需升压环节^[14-15],且可以采用较低的开关频率实现多电平输出,在降低开关损耗的同时节约了滤波成本和体积,提高了系统稳定性。随着器件成本的降低、控制研究和集成通信技术的发展,单相PV-CMI有望与微型逆变器、优化器竞争,在户用光伏领域得到应用。

为提高系统效率及功率密度,单相PV-CMI省略了用于升压的工频变压器,故缺少了电气隔离,易产生漏电流,影响系统安全^[16]。因其拓扑的特殊性,漏电流问题相比全桥逆变器更加突出^[17]。此外,由于单相PV-CMI各H桥(H-bridge, HB)单元接入的光伏组件相互独立,光照强度不同时会引起HB单元功率不均衡问题,功率较大的HB单元易发生过调制,进而造成并网电流波形畸变,甚至振荡过流。漏电流及光伏功率不均衡问题极大地限制了单相PV-CMI的推广和普及,因此,对这两个问题的研究具有重要的意义。

本文阐释了单相PV-CMI的基本原理和拓扑特

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-11-12。

上网日期: 2023-01-31。

国家自然科学基金资助项目(51937003)。

点,聚焦PV-CMI的漏电流和光伏功率不均衡问题,从产生机理出发对国内外研究展开综述。最后,展望了PV-CMI未来的研究趋势及其存在的技术挑战,为后续研究提供了参考。

1 单相PV-CMI基本原理及拓扑特点

1.1 单相PV-CMI的基本原理

图1为含有 n 个HB单元的单相PV-CMI拓扑结构示意图,其中,单元数 n 取决于并网电压、光伏组件输出电压及功率,一般户用型单相PV-CMI并接220 V单相电网,单元数 n 取10~20。图中: $HB_i(i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个HB; $PV_i(i=1, 2, \dots, n)$ 表示 HB_i 直流侧所连接的独立光伏组件; C_i 为 HB_i 对应的直流母线电容; $S_{ij}(j=1, 2, 3, 4)$ 为 HB_i 所包含的4个带有反并联二极管的功率开关管; L_s 为网侧滤波电感; V_{dc_i} 为 HB_i 的直流母线电压; I_{PV_i} 为 PV_i 的输出电流; V_{Hi} 为 HB_i 的交流输出电压; v_g 和 i_g 分别为电网电压和并网电流。

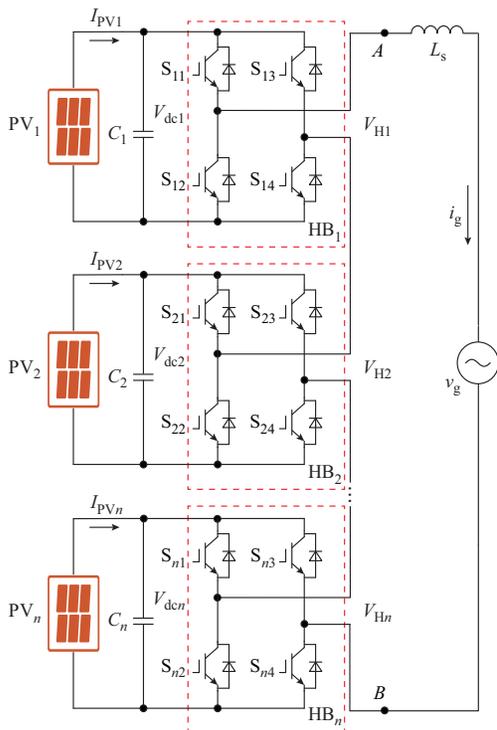


图1 单相PV-CMI拓扑结构
Fig. 1 Topology of single-phase PV-CMI

多电平逆变器的调制方式相比于传统逆变器更为复杂,包括低频方波调制^[18-19]、载波层叠调制^[20](phase disposition pulse width modulation, PDPWM)和载波移相调制^[21](phase shift pulse width modulation, PSPWM)等,但低频方波调制和PDPWM这两类调制方法应用于单相PV-CMI时,

每个HB单元的输出电压无法根据光伏组件发电功率独立调制,导致HB单元传输功率与光伏组件发电功率不匹配,且HB单元之间传输功率存在固定差异。一方面,难以实现组件级MPPT;另一方面,会造成各HB单元发热不均。而PSPWM可以使每个HB单元根据自身光伏组件最大发电功率分配的调制波独立调制,且能避免HB单元之间固定的功率差异。此外,在各功率器件开关动作频率低的情况下,可输出等效开关频率较高的电压,且开关损耗更小。因此,单相PV-CMI采用PSPWM具有显著的优势。

除了调制策略,单相PV-CMI的控制也较为复杂。为实现组件级控制,每个HB单元均须配备一个控制器,由于各HB单元之间存在一定的空间距离,控制器需要建立通信以实现数据交换。单相PV-CMI的控制架构大致可分为3类:主从式^[22]、分布式^[23]和集中式。综合通信和控制复杂度两方面因素考虑,集中式控制对通信波特率要求不高,且各控制器地位相同,动态性能和适应性好,已成为单相PV-CMI应用的主流^[24]。图2所示为单相PV-CMI的集中式控制架构,包括 n 个HB控制器和1个总控制器。图中:PI表示比例-积分调节器;PLL为锁相环;SOGI为二阶广义积分器;park表示从两相静止坐标系向两相旋转坐标系变换环节; $P_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为 HB_i 控制器计算所得 HB_i 的控制功率; P_r 为各控制功率之和; V_{gM} 和 θ 分别为PLL输出电网电压幅值和相角; I_d 和 I_q 分别为park变换输出并网电流的 d 轴分量和 q 轴分量, I_{dref} 和 I_{qref} 分别为其对应的给定值; U_d 和 U_q 分别为电流调节输出 d 轴分量和 q 轴分量; V_r 和 δ 分别为电流控制环计算的调制波电压幅值和相角; v_r 为经过调制算法输出的调制电压; $s_{ij}(j=1, 2, 3, 4)$ 为经过 HB_i 调制环节生成的4个开关管的开关信号。

每个HB控制器主要负责独立光伏组件的MPPT、直流母线电压控制和发波;总控制器主要负责电网电压锁相、并网电流控制和调制波计算;通过通信总线实现数据交换,控制器向通信总线交互的数据有各HB单元功率、总功率、总调制波电压等。

1.2 单相PV-CMI的拓扑特点

相比于其他逆变器拓扑结构,单相PV-CMI拓扑的以下特点在光伏发电系统应用时具有一定的优势:

1)单元化的结构。单相PV-CMI由多个完全相同的HB单元组成,每个HB单元包含的功率开关器件及所连的独立直流母线电容均对应相同,以便于

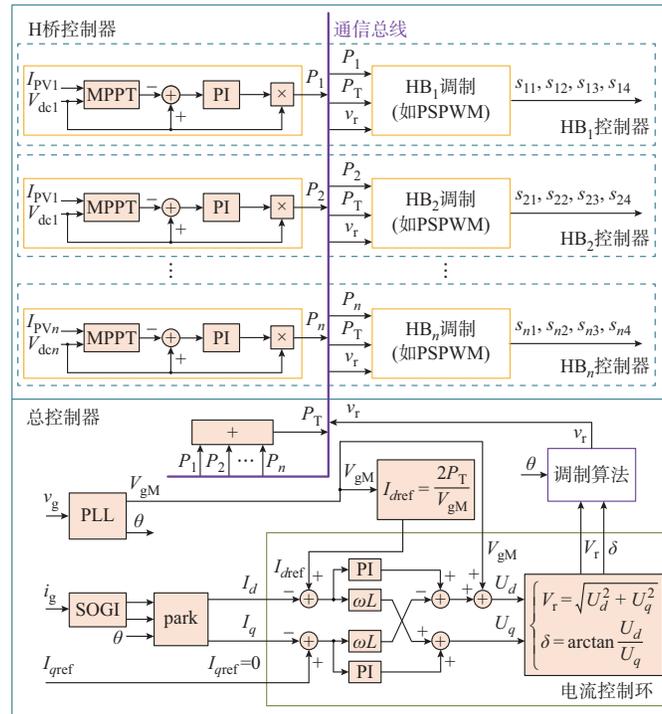


图2 单相PV-CMI的集中式控制架构
Fig. 2 Centralized control architecture of single-phase PV-CMI

生产和安装;当某些HB单元损坏或故障时,也方便进行更换维护;工程中可根据实际功率和电压等级需求灵活设计单元数,易实现系统的冗余与扩展。

2)相互独立的直流侧。单相PV-CMI的各个HB单元依靠独立的光伏组件供电,一方面无须考虑直流侧均压,另一方面可以实现组件级MPPT和组件级关断^[13],以提高光伏利用率和安全性。

3)输出电压谐波少。单相PV-CMI中各个HB单元的交流输出端相互串联,HB单元输出的方波电压叠加成逆变器输出的多电平阶梯波电压,相比于传统三电平逆变器,谐波含量更低^[25],其输出可直接采用L滤波,避免了LCL滤波器设计中谐振峰对系统稳定性的影响。

4)无需工频变压器。单相PV-CMI可通过改变单元数灵活输出任意的电压等级,从而可省略工频升压变压器^[14-15],在减小系统体积、损耗和成本的同时,减轻了弱电网条件下升压变压器漏抗与电网阻抗的耦合影响,提升了系统的弱网稳定性。

5)安全可靠。单相PV-CMI中各光伏组件输出电压较低,通过HB单元进行功率变换的电压等级较低,安全性更好。此外,可选用低耐压高效率功率器件,系统更加稳定可靠和高效^[26-27]。

6)效率高、成本低。相对于微型逆变器和基于功率优化器的集散系统^[28-29],单相PV-CMI功率变换只有一级,集优化器与并网逆变器为一体的结构,

自主实现功率优化和逆变,且无工频变压器,效率高、成本低。

综合以上几点,单相PV-CMI在光伏发电场应用前景良好,具有一定的研究价值。

2 单相PV-CMI漏电流问题

在1.2节中提到,单相PV-CMI无需工频变压器升压,不仅可以提高效率和功率密度,还能降低成本。但省略工频变压器后,光伏组件与电网之间存在直接的电气连接,逆变器开关管动作时会引起光伏组件外壳与大地之间的寄生电容两端电压变化,从而产生漏电流^[17,30]。漏电流的存在可能会对系统造成电磁干扰,甚至威胁人身安全。因此,单相PV-CMI漏电流的抑制对于系统的安全稳定运行十分必要。

图3所示为单相PV-CMI漏电流模型等效电路。图中: $C_{pvi}(i=1,2,\dots,k,\dots,n)$ 表示第*i*个光伏组件PV的对地寄生电容;两个 $L_s/2$ 为考虑共模回路对称的网侧滤波电感; v_{ci} 为寄生电容 C_{pvi} 的电压; i_{ci} 为流经寄生电容 C_{pvi} 的电流; v_L 为两滤波电感 $L_s/2$ 的电压(近似相等); v_{ia} 为HB_i左桥臂输出电压; v_{ib} 为HB_i右桥臂输出电压; i_{leak} 为系统漏电流。

以电网电流正半周期进行分析,两个对称电感上产生的电压大小近似相等,均为 v_L 。由基尔霍夫电压定律可得方程组如下:

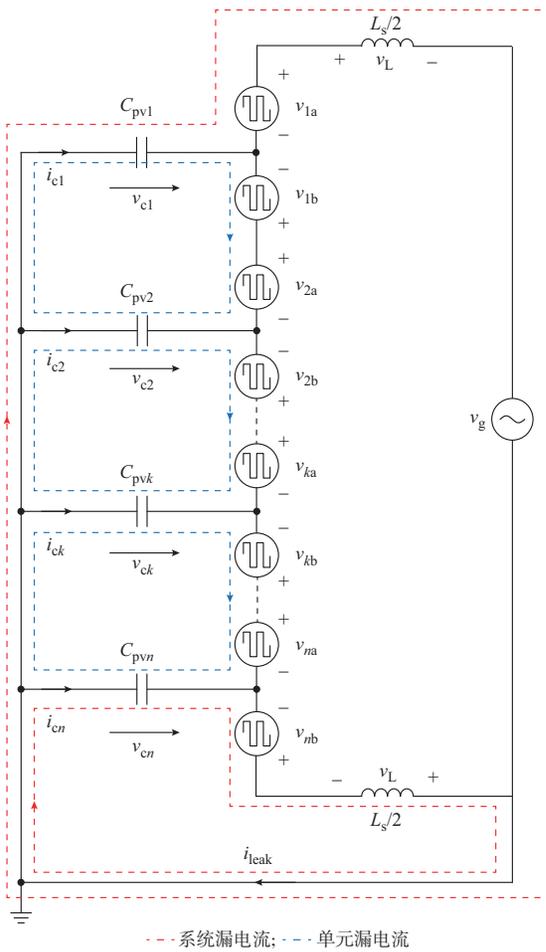


图3 单相PV-CMI漏电流模型等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of single-phase PV-CMI leakage current model

$$\begin{cases} -v_{1a} + v_L + v_g + v_{c1} = 0 \\ -v_{nb} - v_L + v_{cn} = 0 \\ -v_{1b} + v_{2a} - v_{c2} + v_{c1} = 0 \\ -v_{2b} + v_{3a} - v_{c3} + v_{c2} = 0 \\ \vdots \\ -v_{(k-1)b} + v_{ka} - v_{ck} + v_{c(k-1)} = 0 \\ \vdots \\ -v_{(n-1)b} + v_{na} - v_{cn} + v_{c(n-1)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

求得方程组的根如下:

$$v_{ck} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{v_{ia} - v_{ib}}{2} + \frac{v_{ka} + v_{kb}}{2} - \sum_{i=k+1}^n \frac{v_{ia} - v_{ib}}{2} - \frac{v_g}{2} \quad (2)$$

定义HB_k单元的共模电压 v_{CMk} 和差模电压 v_{DMk} 为:

$$\begin{cases} v_{CMk} = \frac{v_{ka} + v_{kb}}{2} \\ v_{DMk} = v_{ka} - v_{kb} \end{cases} \quad (3)$$

回代到式(2),可整理得寄生电容电压 v_{ck} 表达

式为:

$$v_{ck} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{v_{DMi}}{2} + v_{CMk} - \sum_{i=k+1}^n \frac{v_{DMi}}{2} - \frac{v_g}{2} \quad (4)$$

可见,单相PV-CMI每个HB单元光伏组件上寄生电容的电压为本HB单元的共模电压、其他HB单元的差模电压的一半以及电网电压的一半的代数和。

流过HB寄生电容上的电流为:

$$i_{ck} = C_{pvk} \frac{dv_{ck}}{dt} \quad (5)$$

假设所有HB单元寄生电容大小相等,均为 C_{pv} ,则系统漏电流表达式为:

$$i_{leak} = \sum_{k=1}^n i_{ck} = C_{pv} \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^n v_{ck} \quad (6)$$

传统非隔离型单相全桥逆变器的漏电流就是共模漏电流,而单相PV-CMI的漏电流不仅包含共模漏电流,还包含差模漏电流,这是单相PV-CMI漏电流问题不同于其他非隔离型逆变器的要素所在,有必要进行研究。

按照漏电流回路的不同可以分为流经电网的系统漏电流和只流经直流侧单元之间、不流经电网的单元漏电流。目前,中国能源行业标准NB/T 32004—2013只针对系统漏电流有相关要求,因此,现有研究也主要集中在如何抑制单相PV-CMI系统漏电流的问题上。针对系统漏电流的抑制,主要可以从以下两个层面加以考虑:一是电路硬件结构的改进;二是软件调制策略的改进。后文将就这两类方案展开综述。

2.1 基于改进电路结构的漏电流抑制策略

为抑制单相PV-CMI的系统漏电流,一方面,可以通过改进电路拓扑结构避免漏电流回路通道的产生;另一方面,可以通过增设滤波器增大漏电流回路的阻抗,从而对漏电流的流通形成阻碍。

2.1.1 改进电路拓扑结构

下文首先讨论改进电路拓扑的漏电流抑制方法。文献[31-32]将应对传统非隔离型单相全桥逆变器漏电流问题的改进结构如H6、H5、Heric等分别移植到单相PV-CMI中,形成如附录A图A1所示的3种改进拓扑结构,包括图A1(b)所示的级联iH6拓扑结构、图A1(c)所示的级联H5拓扑结构、图A1(d)所示的级联Heric拓扑结构。为便于与其他方案对比,以上3种方法统称为传统拓扑移植法。

然而,根据式(1)式(6)分析可知,与传统非隔离型单相全桥逆变器不同,单相PV-CMI的漏电流不仅包含共模漏电流,还包含差模漏电流,而传统拓扑移植法无法抑制差模漏电流,对单相PV-CMI漏

电流的抑制效果有限。为此,文献[33-34]提出一种改进的级联H5拓扑结构,如附录A图A1(e)所示,在图A1(c)用H5替换图A1(a)中H4抑制共模漏电流的基础上,交流侧增加了电感和电容进行钳位分压。若保证各电感大小相同,这种钳位分压结构可有效抑制差模漏电流,从而实现系统漏电流的抑制。但这种方法改变了单相PV-CMI的多电平输出电压特性,向系统引入了较多的无源器件,增加了电路复杂度。

2.1.2 增设滤波器

相比于改进电路拓扑结构,在漏电流回路中设置滤波器的方案无须增添开关器件,也无须改变控制策略,实现更加简单。

观察图1和图3中单相PV-CMI电路图中的漏电流回路可知,系统漏电流将贯穿单相PV-CMI的直流侧和交流侧。因此,可以在HB单元直流输入端和交流输出端分别设置滤波电感^[35],即附录A图A2中不含虚线布线和交流侧电容 $C_{\text{cir,ac}}$ 的方案。为便于对比分析,将这种电路结构称为方案1。该方法结构简单,但滤波器无法滤除频次较低的谐波,适用于开关频率较高的场合。

为滤除低次谐波,可以通过在适当位置并联电容,与滤波电感共同作用,以提高滤波阶次。文献[35]提出改进电路结构方案2,即在方案1基础上增设了交流侧电容 $C_{\text{cir,ac}}$ 和钳位连线,如附录A图A2虚线所示。虽然方案2滤波阶次更高,适用于开关频率较低的场合,但增加了电路的复杂性和成本。

然而,上述方案须在每个HB单元的输入输出端增设滤波器,损耗较大、实现成本高。滤波器位置和数量对于漏电流抑制效果影响的研究较少,而这点对于单相PV-CMI的工程化应用具有重要意义。实际上,改进拓扑结构并增设滤波器有可能成为抑制单相PV-CMI漏电流的有效方案。

2.2 基于改进调制策略的漏电流抑制策略

以上讨论了基于改进电路硬件结构的单相PV-CMI系统漏电流抑制方案,下文从软件调制策略改进角度入手讨论单相PV-CMI系统漏电流抑制方案。

由式(6)可见,单相PV-CMI的漏电流与每个HB单元的寄生电容 C_{pv} 成正比,与寄生电容电压之和的变化率成正比。可以考虑通过改进调制策略,使各HB单元寄生电容电压之和保持恒定或者低频变化,从而抑制单相PV-CMI的系统漏电流。

实际上,通过改进调制策略保持寄生电容电压之和的恒定与HB单元数量有关联。文献[36]详细推导了寄生电容电压之和与单相PV-CMI所含HB

单元数量的奇偶性之间的关系,严格证明了含奇数个HB单元的单相PV-CMI无法维持寄生电容电压之和恒定。也就是说,只有当单相PV-CMI所含HB单元个数为偶数时,才有可能维持寄生电容电压之和恒定。

首先,分析了最小偶数的情况。对于含2个HB单元的单相PV-CMI,若采用传统调制方法PSPWM或者PDPWM,需要4个载波信号。文献[37-40]提出一种改进的载波层叠调制(modified phase disposition pulse width modulation, MPD PWM)技术,其调制过程如附录A图A3(a)所示,包括开关信号和2个HB单元输出电压及总输出电压。可见,其仅用两个交错层叠载波信号就能生成单相PV-CMI的所有输出电平,载波信号减少一半,且所有开关组合均能满足寄生电容电压之和恒定,有效抑制了单相PV-CMI的系统漏电流。相关方案的作用位置主要集中在图2所示的调制算法框和 n 个HB单元调制框中。本文搭建了如附录B图B1所示的基于单相PV-CMI的室内和室外实验平台,并对相关研究进行了实验验证。附录A图A3(b)和(c)分别给出了采用PDPWM和MPD PWM的漏电流实验波形,进一步验证了方案的有效性和可行性。但MPD PWM技术只针对2个HB单元的单相PV-CMI系统进行设计,难以直接扩展到含更多HB单元的单相PV-CMI中。

在此基础上,本文提出了两种调制策略以应对含有任意偶数个HB单元的单相PV-CMI的漏电流问题。其中,方案1是层叠与移相组合的调制策略^[41],如附录A图A4(a)所示。图中:讨论了含有8个HB单元的单相PV-CMI系统,组合调制策略的基本思路是按照串联顺序给各个HB单元进行编号,相邻编号的两个HB单元按照MPD PWM方法进行调制,首尾对称位置的两个HB共用开关信号以保证差模电压相等,首尾对称位置的4个HB为一组,组与组之间采用PSPWM提高系统的等效开关频率,以增加输出电平数。附录A图A4(b)给出了各HB单元输出电压波形及逆变器总输出电压波形,相比于传统的PSPWM,层叠与移相组合的调制策略由于其等效开关频率减半,导致系统输出电压谐波含量增加。

为克服上述方案1的不足,本文提出了基于工频与高频的混合调制策略(方案2)^[42]。该方案利用工频模组提供调制波台阶,利用高频模组进行调制以降低谐波,如附录A图A5(a)所示。图中:讨论了含有8个HB单元的单相PV-CMI系统,混合调制策略的基本原理是让首尾对称位置的两个HB单元作

为一个模组,位于正中间的两个HB模组为维持寄生电容电压之和恒定采用MPDPWM调制策略,称作高频模组;其余模组称为工频模组,为维持共模电压恒定采用双极性调制输出工频方波,为保障差模电压相等模组内的两个HB单元输出相同电压。附录A图A5(b)给出了各HB单元输出电压波形及逆变器总输出电压波形。由于高频模组位置固定,易造成各HB单元的功率管动作频率不一致,发热不均。

然而,当单相PV-CMI含奇数个HB时,难以维持寄生电容电压和恒定,只能通过降低其变化频率来降低系统漏电流。文献[43]按照以上思路提出一种改进的移幅载波调制(modified level-shifted pulse width modulation, MLSPWM)策略,能降低含3个HB单元的PV-CMI系统漏电流。

目前,抑制单相PV-CMI系统漏电流的改进调

制方案多针对含偶数个HB单元的情况。针对含奇数个HB单元的情况研究极少,且调制方案的设计与HB单元个数息息相关,对于单相PV-CMI系统的容错控制不友好。开发一种自适应不同HB单元个数的全范围适用漏电流抑制策略具有重要意义,仍有待进一步研究。

2.3 对比分析

综合2.1节、2.2节内容,表1总结了现有抑制单相PV-CMI系统漏电流方案的优缺点。从改进硬件电路结构层面而言,不论是改进电路拓扑还是增设滤波器,均难以消除单相PV-CMI系统漏电流,单独作用时的抑制效果有限,而结合传统的拓扑移植法并在电路适当位置增设滤波器,为抑制单相PV-CMI系统漏电流提供了一种思路。而从改进软件调制策略层面而言,目前的研究仍不完善,现有方案均存在较大的缺陷和限制,难以工程化应用。

表1 抑制单相PV-CMI漏电流的方案对比
Table 1 Comparison of schemes for suppressing single-phase PV-CMI leakage current

方案	特点及适用范围		
改进电路结构	传统拓扑移植法 改进级联H5	能有效抑制共模电流,但无法抑制差模电流 能同时抑制差模及共模电流,但电路复杂	
	增设滤波器	方案1	电路结构简单、滤波阶次低,适用于开关频率较高场合
		方案2	电路结构复杂、滤波阶次高,适用于开关频率较低场合
	改进调制策略	MPDPWM	针对含2个HB单元的调制方法
层叠与移相组合		适用于含偶数个HB单元的PV-CMI,输出电压谐波含量增加	
工频与高频混合		适用于含偶数个HB单元的PV-CMI,各HB单元功率管工作不一致,发热不均	
MLSPWM		针对含3个HB单元的调制方法,抑制效果不及以上方案	

通过改进硬件电路结构并同时设计相应的软件调制方案或许能最大限度地抑制单相PV-CMI系统漏电流,但两者结合实现时是否存在冲突,在应用时该如何解决仍有待研究。

3 单相PV-CMI功率不均衡问题

在1.2节中提到,单相PV-CMI中各HB单元依靠独立的光伏组件供电,无须考虑直流侧均压,且能实现组件级关断和组件级MPPT,提高了光伏发电量。然而,级联多电平逆变器(cascaded multilevel inverter, CMI)各单元独立直流侧结构易产生不均衡,当其应用于电池储能系统中时,表现为电池荷电状态不均衡^[44-49],这是由电池生产工艺和使用不同等造成的,相关行业标准对储能电池的衰减容量比进行了规范。因此,CMI的不均衡程度是有限的,当其应用于静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)时,表现为相内直流侧电压不均衡^[50-55],主要由HB链节差异、实际触发脉冲

延时、并联损耗与开关损耗不同造成,也不会导致较大的不均衡。相比而言,当CMI应用于单相户用光伏系统中时,其不均衡主要受独立直流侧的输入功率所影响,单相PV-CMI各光伏电池板的发电量受制于其接收的光照强度。当受到局部遮阴时,部分光伏板的功率可能出现骤降,甚至难以输出功率,这使得其不均衡程度非常大。因此,在户用光伏系统中,单相PV-CMI的不均衡问题可能更加严峻。此时,若按照HB单元发电功率分配调制电压,部分功率较大的HB单元(HB_i)基波调制电压 m_i 较高,易发生过调制,即基波调制度 $M_i > 1$,如图4(a)所示。当采用幅值大于1的正弦波进行调制时, HB_i 的交流输出电压 v_{th} 如图4(b)所示。可见,过调制会增加输出电压的谐波含量,从而影响并网电流质量,造成并网电流波形畸变甚至振荡过流,相关实验波形如附录A图A6所示。而采取恰当的功率均衡措施能够避免HB单元过调制,对系统的稳定运行起到了关键作用。

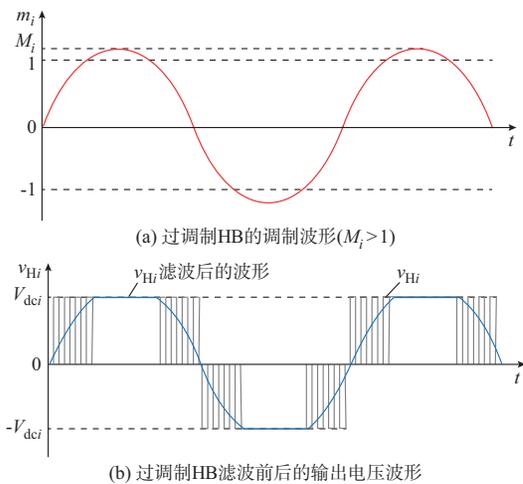


图4 过调制影响并网电流机理
Fig. 4 Mechanism of influence of over-modulation on grid-connected current

针对这个问题,提出了一系列功率均衡控制策略,包括:无功补偿法、混合调制法、改进MPPT算法、谐波补偿法和功率自适应法等。相关方案的作用位置遍布在图2所示的直流侧控制、电流环控制、调制算法框和 n 个HB调制框中。

3.1 基于无功补偿的功率均衡控制策略

为避免过调制,可降低总调制电压幅值,向输出电压向量补偿无功角。文献[56-58]按照以上思路提出一种基于无功补偿的功率均衡控制策略,如附录A图A7所示。可见,随着无功补偿角 φ 的增大,单相PV-CMI输出电压基波幅值 V_{AB} 逐渐减小,当直流侧电压不变时,能降低发生过调制的概率。在此基础上,文献[59]提出一种有功功率按比例分配和无功功率按需求分配的原则,进一步明确了无功补偿控制策略的物理意义。

然而,上述基于无功补偿的功率均衡控制策略在向电网注入无功功率的同时,系统功率因数也将减小(相关实验波形见附录A图A6),需要在后级增设无功补偿装置,以满足单位功率因数并网的要求,增加了实现成本。

3.2 基于混合调制的功率均衡控制策略

为保障逆变器单位功率因数并网,可通过改进调制策略避免过调制的发生,即采用混合调制策略,以提高逆变器整体直流电压利用率。

文献[60]按照以上思路提出一种基于混合调制的功率均衡控制策略,如附录A图A8所示。当总调制电压 v_{ABT} 位于区域K时,通过排序选择,仅让一个HB单元工作在脉宽调制(pulse width modulation, PWM)模式,以改善波形品质,其余HB单元输出 $\pm V_{dc}$ 相互叠加,把PWM波抬升或降低至

区域K,从而在保证多电平输出的同时,通过方波的调制作用提高整体的直流侧电压利用率达1.273。

但混合调制策略并未直接控制单相PV-CMI的直流母线电压,而是根据直流母线电压给定值与实际值的偏差大小作为HB单元充、放电需求的大小,按需求分配HB单元输出直流母线电压方波和PWM波,会加剧直流母线电压的波动(相关实验波形见附录A图A6)。为此,文献[61-62]提出一种改进的混合调制策略,机理是使充放电需求较小的HB单元既不充电也不放电,工作于“0状态”,从而减少直流母线电压的波动。

但相比于传统PSPWM,采用上述混合调制策略的单相PV-CMI直流母线电压仍有一定波动,不利于提高光伏组件的MPPT效率。

3.3 基于改进MPPT的功率均衡控制策略

为避免直流侧电压大幅波动,保障逆变器单位功率因数运行,可考虑从功率不均衡的源头出发,通过减少功率较大HB单元的发电功率,降低单相PV-CMI发生过调制的概率。

按照这个思路,文献[63]提出一种基于改进MPPT的功率均衡控制策略,如附录A图A9所示。令过调制HB单元的直流侧电压上升,使之偏离最大功率点电压,退出MPPT运行,从而降低其光伏组件的发电量,而非过调制HB单元继续MPPT运行,功率不变,从而降低了各HB单元功率不均衡的程度,避免了过调制的发生。然而,这种方法会牺牲部分光伏组件的发电量。

3.4 基于谐波补偿的功率均衡控制策略

为避免发电损失,可考虑调动其他非过调制HB单元的调节能力。文献[64]提出一种基于三次谐波补偿的功率均衡控制策略,通过向过调制HB单元调制波中注入一定量的三次谐波,降低其幅值,从而避免过调制的发生。同时,向非过调制HB单元注入等量反向的三次谐波,以抵消注入三次谐波对总输出电压的影响,实现HB单元传输功率能力的重新分配,从而解决由光伏功率不均衡导致的过调制问题,如附录A图A10所示,并推导出注入三次谐波幅值为 $1/6$ 的正弦基波时,能够使直流侧电压利用率达到最高值1.155。

然而,向非过调制HB单元的调制波中注入反向三次谐波会抬高非过调制HB单元的调制波幅值,存在一定的过调制风险。为此,文献[65]提出一种按需求向过调制HB单元注入三次谐波、按承受能力向非过调制HB单元注入反向三次谐波的功率均衡控制策略,有效扩大了单相PV-CMI的稳定运行范围。在此基础上,文献[66]定量推导了单相

PV-CMI输出电压的三次谐波分量的组成,其包含直流侧电压的二倍频纹波同调制波基波共同产生的三次谐波,并提出一种优化的三次谐波补偿功率均衡控制策略,采用闭环控制的方式精准抑制谐波。

然而,仅通过注入三次谐波应对过调制的HB单元最大线性调制度不能超过1.155,难以解决光伏功率不均衡程度较大时的过调制问题。为此,文献[67-70]提出一系列基于多次谐波补偿的功率均衡控制策略,通过向过调制HB单元注入多次谐波,进一步扩大了HB单元的线性调制范围,使直流侧电压利用率高达1.273,按照调制波波形的不同可以分为:方波调制^[67](本研究团队提出)、梯形波调制^[68]、不连续调制^[69]及钳位正弦波调制^[70](本研究团队提出)。

附录A图A11为方波调制的原理示意图。基本实现方式是将过调制HB单元的调制波补偿为宽度可调的方波,根据过调制HB单元调制度计算导通角 φ ,以及原正弦调制波和修改后的方波调制波计算注入的多次谐波波形。当导通角达 $\pi/2$ 时,调制波形变为仅含 ± 1 值的满方波,此时,过调制HB单元调制度达到1.273(相关实验波形见附录A图A6)。

当光伏功率不均衡程度进一步扩大时,基于谐波补偿的功率均衡控制策略将难以继续应对其过调制问题。此外,补偿谐波可能会对单相PV-CMI输出电压的谐波分布产生影响,现有研究缺少定量分

析,仍有待完善。

3.5 自适应的功率均衡控制策略

为进一步扩大谐波补偿方法的运行范围,可考虑结合改进的MPPT算法,通过发电量降额实现功率均衡。

依据这个思路,文献[71-72]提出一种功率自适应控制策略。如附录A图A12所示,通过检测直流侧光伏功率不均衡的程度,自适应调整工作模式,确定是否降额运行,并选择给各HB单元的调制波注入不同谐波,实现灵活应对全范围功率不均衡场合的稳定高效运行。

3.6 各种功率均衡控制策略的对比

根据以上分析,表2从调制波、运行范围、是否降额、功率因数、输出谐波含量及直流母线电压波动情况等方面总结了前文提及的各种方案。虽然无功补偿法能够应对单相PV-CMI功率不均衡的程度较大,但采用该控制策略时逆变器难以工作在单位功率因数,不符合并网要求;混合调制改变了单相PV-CMI的传统PSPWM,不利于直流侧光伏组件的MPPT效率;改进MPPT算法会牺牲光伏组件的发电量;谐波补偿控制能够应对的光伏功率不均衡程度受限;而自适应的功率均衡控制策略综合了改进MPPT算法和谐波补偿控制的特点,虽为实现极端条件下系统的稳定运行牺牲了部分性能,但仍是目前适应光伏并网系统且能应对单相PV-CMI光伏功率不均衡程度的最佳方案。

表2 各种功率均衡控制策略的对比
Table 2 Comparison of various power equalization control strategies

方法	调制波	运行范围	降额	功率因数	输出谐波含量	直流母线电压
无功补偿	基波	较大	否	<1	低	波动小、无静差
混合调制	方波+PWM波	调制度为1.273	否	1	低	波动大、有静差
改进MPPT	基波	较大	是	1	低	波动小、无静差
谐波补偿	基波+三次谐波	调制度为1.155	否	1	低	波动小、无静差
	基波+多次谐波	调制度为1.273	否	1	略高	波动小、无静差
自适应	根据功率不均衡程度变化	较大	根据功率不均衡程度变化	1	根据功率不均衡程度变化	波动小、无静差

实际上针对这个问题,除了改进控制策略,还可以从硬件层面加以考虑:1)可以通过给单相PV-CMI配备冗余的HB模块以提高总体的直流电压和,从而避免过调制的发生;2)可以考虑为屋顶光伏电池板设计更加合理的空间排布规则,以尽量减小光照不均;3)配置储能设备也能够一定程度上减小功率不均衡的程度。然而,这些措施都将提高一定的初期建设成本。

针对单相PV-CMI的功率不均衡问题,结合硬

件和软件两个层面,或许能够开发出更加可靠高效的方案,相关研究仍有待开展。

4 PV-CMI问题总结与研究展望

4.1 PV-CMI漏电流及光伏功率不均衡问题总结

单相PV-CMI在户用场合应用时,漏电流及光伏功率不均衡两个问题极大地限制了其推广和工程化应用。根据前文内容,对这两个问题总结如下:

1)现有抑制单相PV-CMI系统漏电流的软件方

案仍不完善,硬件方案也具有一定的局限性,多种方案同时作用或许能够进一步优化漏电流抑制效果,而各方案之间如何协调运行并进一步优化,是未来的研究方向。

2) 现有应对单相PV-CMI光伏发电功率不均衡的软件控制方案解决思路多,其中,自适应的功率均衡控制策略是目前适应光伏并网系统且能应对单相PV-CMI光伏功率不均衡程度的最佳方案。结合硬件改进,或许能够开发出更加可靠的应对方案,仍有待进一步研究。

3) 针对漏电流和光伏功率不均衡两个问题,都可以从软件层面加以考虑,通过改进调制和控制策略来解决应对。然而,两者在实现时存在目标优化上的冲突,开发能同时解决上述两个问题并适用于光伏发电系统的调制方法,具有重要的价值和一定的难度,仍有待学者们开展相关研究。

4.2 PV-CMI未来应用的技术难点及发展趋势

实际上,PV-CMI不仅可以应用在户用光伏领域,其模块化的结构可结合隔离型DC/DC变换器为系统扩容实现光伏中压直挂式并网提供一种新的思路^[73-76],具有广阔的发展前景和市场潜力。高频隔离型DC/DC变换器取代了体积和重量大、漏抗大的工频变压器^[77-80],不仅避免了前文所提及的漏电流问题,而且避免了常规光伏并网系统网侧变压器的夜间空载自损耗。为此,本研究团队合作开发了35 kV中压直挂式PV-CMI样机,并进行了相关技术与实验,然而在推广应用上仍面临着很多挑战,规模化生产还需进一步的研究,其技术难点及未来发展趋势包括但不限于以下几个方面:

1) 随着系统扩容,PV-CMI从单相系统扩展到三相系统,上述光伏功率不均衡问题可能不仅存在于相内各模块之间,还可能存在于相与相之间,造成三相并网电流不对称,系统将无法稳定运行。目前,已有相关文献从改进控制策略的角度提出了解决方案,但这些方案仍难以彻底解决功率不均衡问题,具有一定的局限性。而研究能同时应对PV-CMI相内和相间功率不均衡的解决方案对系统的稳定运行具有重要的意义。

2) 当电网发生不对称故障时,受负序电压的影响,三相PV-CMI中某一相可能从电网吸收有功功率,即发生有功回流。在低电压穿越期间,由于没有平衡运行点,导致HB单元直流母线电压持续升高,PV-CMI最终因过压故障而停机脱网。这使其在电网发生故障情况下的低电压穿越控制研究更加复杂,具有一定的难度和挑战。

3) 除了光伏功率不均衡问题和有功回流问题,

PV-CMI自身复杂的模块串联结构发生故障也是一个棘手的问题。当发生故障时,系统呈现非线性、并发性和不确定性,难以建立精确的数学模型,故诊断难度较高。基于传统模型的故障诊断方法检测点少,诊断结果不精确、实时性不好,难以满足PV-CMI复杂系统结构的故障诊断需求。其故障检测设备较多,采集的样本数及维度较大,给数据的压缩、传输和存储带来困难。如何去除冗余特征及数据、实现数据维度和数据量的压缩,以及提高故障诊断覆盖率、诊断结果精确率和实时性等方面仍然是PV-CMI故障诊断的技术难点。随着人工智能算法的发展,融合智能技术的故障检测方法不断发展优化,为PV-CMI故障诊断提供了新的思路。此外,对PV-CMI故障状态预警和设备运行寿命预测,能在故障发生的早期阶段进行排除,对系统的稳定可靠运行十分关键。而在现有故障条件下,保障整机正常运行的容错控制也具有重要的研究意义,仍有待进一步研究。

4) 随着系统容量的进一步扩展,PV-CMI子模块数量不断扩大,系统通信及控制成本增加。传统光纤通信的布线复杂、装配和人力消耗大,而无线通信易受强磁场干扰、可靠性差,实现线路简化和运行可靠性的平衡值得重点关注。此外,实现系统级控制与子模块控制之间的解耦对系统控制的简化也具有一定的意义。高速通信体系及新的控制架构均面临着巨大的挑战,仍有待进一步研究。

5) PV-CMI中高耐压高频变压器的设计复杂,其磁芯选择、绕组排布、绝缘设计、温升处理难度高,需通过电磁-热多物理场分析进行设计,以实现更小的体积、更快的瞬态响应、更低的电压过冲/欠冲、更低的噪声、更高的效率、更少的散热量等多目标优化,这也是其大规模工程化应用亟待攻克的关键问题。

6) 随着高比例新能源和高比例电力电子设备接入电网,中国大部分地区明确提出了新能源搭配储能使用的要求,PV-CMI配合储能必将成为未来的发展趋势。一方面,配置储能可以在一定程度上平抑独立直流母线结构的PV-CMI各单元的功率,实现稳定的功率输出,解决上述功率不均衡问题,强化PV-CMI本身的性能;另一方面,配置储能可以使PV-CMI逐步由“适应电网”向“支撑电网”转变,即从跟网型控制向构网型控制过渡,为电网系统提供可靠的电压、频率支撑。然而,PV-CMI配置储能将带来一系列新的挑战和研究方向。首先,PV-CMI系统将呈现多源输入特性,针对多端口之间的解耦控制值得进一步研究。此外,直流端口还可以接入

电动汽车等直流负荷,与直流微电网和直流配电技术的发展相辅相成,PV-CMI系统能量管理控制策略也值得进一步深入研究。其次,在电网强度下降的趋势下,PV-CMI网侧采用单L滤波,既避免了采用LCL滤波所导致的谐振风险,有助于提高系统在弱电网条件下的稳定性^[80-81],在自同步构网控制下又可以完全模拟同步发电机的同步电抗,具有一定的优势。然而,较多的模块和较低的开关频率导致多电平调制具有较大延时,恶化了系统的动态和稳态性能。因此,对PV-CMI拓扑结构和调制策略的优化是配置储能的核心研究内容之一。最后,较小的滤波器使得PV-CMI输出阻抗较小,难以应对高压系统电网故障瞬间引起的并网冲击大电流问题。构网技术研究的挑战不仅在于解决稳态条件下的控制问题,更是电网故障条件下的暂态过流抑制问题。弱电网下PV-CMI端电压与动态并网电流之间的耦合也给有功回流的抑制带来更加严峻的挑战,仍有待学者们开展系统性的研究工作。

5 结语

本文介绍了单相PV-CMI的基本原理和拓扑特点,针对漏电流和光伏功率不均衡两个问题,分别综述了其研究现状,分析对比了各类解决方案的优点和不足,并进行了总结。同时,展望了PV-CMI未来的研究趋势及其存在的技术挑战,为后续研究提供了参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] REN21. Renewables 2021 global status report[R/OL]. [2022-06-05]. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- [2] 阮荻黎. 光伏行业,风口证伪?[J]. 产城, 2021(10): 66-67.
RUAN Qiuli. Photovoltaic industry, tuyere falsification? [J]. Industry & City, 2021(10): 66-67.
- [3] ARRÁEZ-CANCELLIERE O A, MUÑOZ-GALEANO N, LOPEZ-LEZAMA J M. Performance and economical comparison between micro-inverter and string inverter in a 5, 1 kWp residential PV-system in Colombia [C]// 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, May 31-June 1, 2017, Bogota, Colombia: 1-5.
- [4] NANAKOS A C, TATAKIS E C, PAPANIKOLAOU N P. A weighted-efficiency-oriented design methodology of flyback inverter for AC photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3221-3233.
- [5] LI Y L, ORUGANTI R. A low cost flyback CCM inverter for AC module application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1295-1303.
- [6] 阙加荣,陈瑞颖,周磊,等. 具有低频电流纹波抑制功能的电流型桥式光伏微逆变器[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 129-136.
KAN Jiarong, CHEN Ruiying, ZHOU Lei, et al. Current-fed full-bridge photovoltaic micro-inverter with reduction of low-frequency current ripple [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 129-136.
- [7] 陈天牧,曾国宏,王静,等. 抑制电流纹波的模块化多电平直流变换器移相调制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 206-214.
CHEN Tianmu, ZENG Guohong, WANG Jing, et al. Phase-shifted modulation strategy of modular multilevel DC/DC converter for current ripple suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 206-214.
- [8] 魏少翀,张广明,嵇保健,等. 一种高效率低输入纹波电流的光伏并网微逆变器[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 91-97.
WEI Shaochong, ZHANG Guangming, JI Baojian, et al. A high efficiency photovoltaic grid-connected micro-inverter with low input current ripple [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 91-97.
- [9] HU H B, HARB S, KUTKUT N, et al. A review of power decoupling techniques for microinverters with three different decoupling capacitor locations in PV systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2711-2726.
- [10] DONG M, DONG H, WANG L N, et al. A simple open-circuit detection strategy for a single-phase grid-connected PV inverter fed from power optimizers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2798-2802.
- [11] 杜进,王睿驰,王志鹏,等. 并联型单开关管光伏组件优化器的研究与设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 184-192.
DU Jin, WANG Ruichi, WANG Zhikun, et al. Design and analysis of a parallel single-switch panel-integrated PV optimizer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 184-192.
- [12] ZHANG X, ZHAO T, MAO W, et al. Multilevel inverters for grid-connected photovoltaic applications: examining emerging trends [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2018, 5(4): 32-41.
- [13] XIAO B L, HANG L J, MEI J, et al. Modular cascaded H-bridge multilevel PV inverter with distributed MPPT for grid-connected applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1722-1731.
- [14] SHAHABADINI M, IMAN-EINI H. Leakage current suppression in multilevel cascaded H-bridge based photovoltaic inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 13754-13762.
- [15] HUANG Q Y, HUANG A Q, YU R Y, et al. High-efficiency and high-density single-phase dual-mode cascaded buck-boost multilevel transformerless PV inverter with GaN AC switches [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7474-7488.
- [16] 周京华,汪凡,籍祥,等. 级联型H桥储能功率变换系统关键控制策略综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 8-17.
ZHOU Jinghua, WANG Fan, JI Xiang, et al. An overview of

- key control strategy based on cascaded H-bridge power conversion system [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2018(1): 8-17.
- [17] 肖华锋, 王晓标, 张兴, 等. 非隔离光伏并网逆变技术的现状与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1038-1054.
XIAO Huafeng, WANG Xiaobiao, ZHANG Xing, et al. State-of-the-art and future trend of transformerless photovoltaic grid-connected inverters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1038-1054.
- [18] FRANQUELO L G, RODRIGUEZ J, LEON J I, et al. The age of multilevel converters arrives [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2008, 2(2): 28-39.
- [19] FILHO F, MAIA H Z, MATEUS T H A, et al. Adaptive selective harmonic minimization based on ANNs for cascade multilevel inverters with varying DC sources [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(5): 1955-1962.
- [20] 周京华, 陈亚爱. 高性能级联型多电平变换器原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 53-54.
ZHOU Jinghua, CHEN Yaai. Principle and application of high performance cascaded multilevel converter[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 53-54.
- [21] LI B B, YANG R F, XU D D, et al. Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(1): 297-310.
- [22] VILLANUEVA E, CORREA P, RODRIGUEZ J, et al. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(11): 4399-4406.
- [23] 徐君, 张兴, 赵涛, 等. 单相级联H桥光伏并网逆变器的分布式控制策略[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(9): 83-85.
XU Jun, ZHANG Xing, ZHAO Tao, et al. A distributed control strategy for single-phase cascaded H-bridge photovoltaic grid-connected inverter [J]. *Power Electronics*, 2019, 53(9): 83-85.
- [24] 胡超, 张兴. 级联多电平光伏并网逆变器研究[J]. *电力电子技术*, 2011, 45(7): 17-19.
HU Chao, ZHANG Xing. Research on cascaded multilevel photovoltaic grid-connected inverter [J]. *Power Electronics*, 2011, 45(7): 17-19.
- [25] LASHAB A, SERA D, HAHN F, et al. Cascaded multilevel PV inverter with improved harmonic performance during power imbalance between power cells [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2788-2798.
- [26] FARIVAR G, HREDZAK B, AGELIDIS V G. A DC-side sensorless cascaded H-bridge multilevel converter-based photovoltaic system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(7): 4233-4241.
- [27] HUANG Q Y, HUANG A Q. Feedforward proportional carrier-based PWM for cascaded H-bridge PV inverter [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(4): 2192-2205.
- [28] IQ8M/IQ8A microinverter data sheet [EB/OL]. [2022-06-05]. <https://enphase.com/installers/microinverters/iq8/iq8a>.
- [29] SolarEdge power optimizer module embedded solution OPJ300-LV [EB/OL]. [2022-06-05]. <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-pb-csi-datasheet.pdf>.
- [30] 郭小强, 吴卓群, 骆然, 等. 高可靠性非隔离型五电平并网逆变器拓扑与控制[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(5): 151-160.
GUO Xiaoqiang, WU Zhuoqun, LUO Ran, et al. Topology and control of five-level transformerless grid-connected inverter with high reliability [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(5): 151-160.
- [31] LI W H, GU Y J, LUO H Z, et al. Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(7): 4537-4551.
- [32] CHEN K, HUANG Z K, HANG L J, et al. Cascaded iH6 multilevel inverter with leakage current reduction for transformerless grid-connected photovoltaic system [C]// 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, December 12-15, 2017, Honolulu, USA: 613-617.
- [33] GUO X Q, JIA X Y. Hardware-based cascaded topology and modulation strategy with leakage current reduction for transformerless PV systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(12): 7823-7832.
- [34] 郭小强, 贾晓瑜. 非隔离型级联H5光伏逆变器共模漏电流特性分析[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(2): 361-369.
GUO Xiaoqiang, JIA Xiaoyu. Analysis of common mode leakage current for transformerless cascaded H5 PV inverter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(2): 361-369.
- [35] ZHOU Y, LI H. Analysis and suppression of leakage current in cascaded-multilevel-inverter-based PV systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(10): 5265-5277.
- [36] 赵涛. 级联H桥光伏逆变器关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
ZHAO Tao. Research on key techniques of cascaded H-bridge photovoltaic inverter [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [37] SELVAMUTHUKUMARAN R, GARG A, GUPTA R. Hybrid multicarrier modulation to reduce leakage current in a transformerless cascaded multilevel inverter for photovoltaic systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 1779-1783.
- [38] WANG F S, LI Z, DO H T, et al. A modified phase disposition pulse width modulation to suppress the leakage current for the transformerless cascaded H-bridge inverters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(2): 1281-1289.
- [39] 王付胜, 于世能. 级联H桥逆变器漏电流分析与抑制[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(增刊2): 103-110.
WANG Fusheng, YU Shineng. Analysis and suppression of the leakage currents in the cascaded H-bridge inverter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(Supplement 2): 103-110.

- [40] 王付胜,于世能,张兴.抑制两H桥级联逆变器漏电流的调制方法:CN105450059A[P].2016-03-30.
WANG Fusheng, YU Shineng, ZHANG Xing. Modulation method for suppressing leakage current of two-H-bridge cascaded inverter: CN105450059A[P]. 2016-03-30.
- [41] 赵涛,张兴,王付胜,等.基于MPDPWM与CPSPWM组合调制策略的级联H桥光伏逆变器漏电流抑制方法[J].太阳能学报,2018,39(11):3124-3130.
ZHAO Tao, ZHANG Xing, WANG Fusheng, et al. A method of suppressing leakage current of cascaded H-bridge based on hybrid modulation strategy of MPDPWM and CPSPWM [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3124-3130.
- [42] 王付胜,于世能,杨乐,等.抑制H桥级联逆变器漏电流的调制方法:CN105610343B[P].2018-04-03.
WANG Fusheng, YU Shineng, YANG Le, et al. Modulation method for inhibiting leakage current of H-bridge cascade inverters: CN105610343B[P]. 2018-04-03.
- [43] 叶满园,康力璇.级联H桥光伏并网逆变器漏电流抑制调制策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(7):30-35.
YE Manyuan, KANG Lixuan. Modulation strategy with leakage current reduction for cascaded H-bridge photovoltaic grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019, 31(7): 30-35.
- [44] 李骏驰,吴俊勇,熊飞,等.多端口电力电子变压器的安全稳定运行区域分析与控制[J].电力系统自动化,2022,46(20):129-138.
LI Junchi, WU Junyong, XIONG Fei, et al. Analysis and control of safe and stable operation region for multi-port power electronic transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 129-138.
- [45] 熊飞,吴俊勇,段青,等.一种适用于级联H桥储能变换器的相内功率分配控制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1732-1748.
XIONG Fei, WU Junyong, DUAN Qing, et al. A novel inner-phase power distribution control strategy for cascaded H-bridge converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1732-1748.
- [46] 陈舒钰,刘文华,赵香花,等.注入无功功率的链式电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(8):83-91.
CHEN Shuyu, LIU Wenhua, ZHAO Xianghua, et al. Balancing control strategy of state of charge for cascaded battery energy storage system with injection of reactive power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 83-91.
- [47] 艾洪克,吴俊勇,郝亮亮,等.级联式储能系统中电池自均衡控制策略研究[J].电工技术学报,2015,30(14):442-449.
AI Hongke, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Research on battery self-balancing control strategy in cascade energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 442-449.
- [48] YU J R, ZHANG G, PENG M K, et al. Power-matching based SOC balancing method for cascaded H-bridge multilevel inverter [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 352-363.
- [49] LIANG G W, RODRIGUEZ E, FARIVAR G G, et al. A constrained intersubmodule state-of-charge balancing method for battery energy storage systems based on the cascaded H-bridge converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12669-12678.
- [50] 赵国亮,陈维江,邓占锋,等.柔性低频交流输电关键技术及应用[J].电力系统自动化,2022,46(15):1-10.
ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [51] 陆道荣,沙辰星,周骏贵,等.电网电压跌落下基于零序电压注入的星形级联H桥STATCOM相间直流电压均衡控制策略[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2924-2932.
LU Daorong, SHA Chenxing, ZHOU Jungui, et al. Zero-sequence-voltage-based cluster voltage balancing control under grid voltage sag for star-connected cascaded H-bridge STATCOM [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2924-2932.
- [52] 傅闯,叶运铭,汪娟娟,等.基于D分割法的LCC-HVDC系统控制器参数整定方法[J].电力系统自动化,2022,46(13):139-150.
FU Chuang, YE Yunming, WANG Juanjuan, et al. D-partition method based controller parameter setting method for LCC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 139-150.
- [53] HU K, ZHAO G L, LU D R, et al. A linear and simplified cluster voltage balancing control based on the zero-sequence voltage injection for star-connected cascaded H-bridge STATCOM [J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems: 1-11 [2022-06-05]. <http://10.17775/CSEEJPES.2022.01700>.
- [54] LU D R, WEI M Y, SHEN S B, et al. A coordination control with extra active power exchange way to extend negative sequence current compensation range for STATCOM based on hybrid cascaded converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15442-15456.
- [55] BEHROUZIAN E, BONGIORNO M, SVENSSON J R, et al. A novel capacitor-voltage balancing strategy for double-Y STATCOM under unbalanced operations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2692-2701.
- [56] REZAEI M A, FARHANGI S, IMAN-EINI H. Enhancing the reliability of single-phase CHB-based grid-connected photovoltaic energy systems [C]// 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, February 16-17, 2011, Tehran, Iran: 117-122.
- [57] LIU L M, LI H, XUE Y S, et al. Reactive power compensation and optimization strategy for grid-interactive cascaded photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 188-202.
- [58] WANG C, ZHANG K, XIONG J, et al. A coordinated compensation strategy for module mismatch of CHB-PV systems based on improved LS-PWM and reactive power injection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2825-2836.

- [59] 赵涛,张兴,毛旺,等.基于无功补偿的级联H桥光伏逆变器功率不平衡控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(17):5076-5085.
ZHAO Tao, ZHANG Xing, MAO Wang, et al. Control strategy for cascaded H-bridge photovoltaic inverter under unbalanced power conditions based on reactive compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5076-5085.
- [60] MIRANBEIGI M, IMAN-EINI H. Hybrid modulation technique for grid-connected cascaded photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7843-7853.
- [61] 毛旺,张兴,王付胜,等.一种改进型级联H桥光伏逆变器混合调制策略[J].电力电子技术,2018,52(8):94-97.
MAO Wang, ZHANG Xing, WANG Fusheng, et al. A modified hybrid modulation strategy of cascaded H-bridge inverters for grid-connected photovoltaic systems [J]. Power Electronics, 2018, 52(8): 94-97.
- [62] ZHAO T, ZHANG X, MAO W, et al. A modified hybrid modulation strategy for suppressing DC voltage fluctuation of cascaded H-bridge photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3932-3941.
- [63] ESKANDARI A, JAVADIAN V, IMAN-EINI H, et al. Stable operation of grid connected cascaded H-bridge inverter under unbalanced insolation conditions [C]// 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, October 2-4, 2013, Istanbul, Turkey: 1-6.
- [64] KO Y, ANDRESEN M, BUTICCHI G, et al. Power routing for cascaded H-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9435-9446.
- [65] ZHAO T, ZHANG X, MAO W, et al. An optimized third harmonic compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge photovoltaic inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8635-8645.
- [66] 王明达,张兴,赵涛,等.一种优化的单相级联H桥逆变器三次谐波补偿策略[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1073-1081.
WANG Mingda, ZHANG Xing, ZHAO Tao, et al. An optimized third harmonic compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1073-1081.
- [67] WANG M D, ZHANG X, ZHAO T, et al. Harmonic compensation strategy for single-phase cascaded H-bridge PV inverter under unbalanced power conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10474-10484.
- [68] YE M Y, REN W, CHEN L, et al. Research on power-balance control strategy of CHB multilevel inverter based on TPWM[J]. IEEE Access, 2019, 7: 157226-157240.
- [69] KO Y, ANDRESEN M, BUTICCHI G, et al. Thermally compensated discontinuous modulation strategy for cascaded H-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2704-2713.
- [70] ZHAO T, ZHANG X, MAO W, et al. Harmonic compensation strategy for extending the operating range of cascaded H-bridge PV inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1341-1350.
- [71] 徐君,张兴,赵涛,等.扩大级联H桥光伏逆变器运行范围的控制策略[J].太阳能学报,2021,42(5):240-245.
XU Jun, ZHANG Xing, ZHAO Tao, et al. Control strategy for extending operation range of cascaded H-bridge photovoltaic inverter [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 240-245.
- [72] WANG M D, ZHANG X, WU M Z, et al. A control strategy for achieving the whole operation range power matching of single-phase cascaded H-bridge PV inverter [J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics: 1-10 [2022-06-05]. <http://10.1109/TIE.2022.3192696>.
- [73] ZHAO T, CHEN D L. Research on the module power equalization control strategy of three-phase common DC-bus cascaded H-bridge multilevel inverter for large-scale PV power plants[J]. IEEE Access, 2020, 8: 181904-181915.
- [74] ZHAO T, CHEN D L. Active power backflow control strategy for cascaded photovoltaic solid-state transformer during low-voltage ride through [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 440-451.
- [75] ZHAO T, CHEN D L. Analysis and suppression of active power backflow of three-phase common DC-bus cascaded H-bridge PV grid-connected inverter during LVRT [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 745-759.
- [76] ZHAO T, ZHANG X, WANG M D, et al. Analysis and suppression of resonant current envelope ripple of LLC converter in cascaded modular PV solid-state transformer [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3744-3757.
- [77] WANG M D, ZHANG X, ZHAO T, et al. Module power balance control strategy for three-phase cascaded H-bridge PV inverter under unbalanced grid voltage condition [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5657-5671.
- [78] ZHAO T, ZHANG X, WANG M D, et al. Module power balance control and redundancy design analysis of cascaded PV solid-state transformer under fault conditions [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 677-688.
- [79] MAO W, ZHANG X, ZHAO T, et al. Research on power equalization of three-phase cascaded H-bridge photovoltaic inverter based on the combination of hybrid modulation strategy and zero-sequence injection methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9337-9347.
- [80] HU Y H, ZHANG X, MAO W, et al. An optimized third harmonic injection method for reducing DC-link voltage fluctuation and alleviating power imbalance of three-phase cascaded H-bridge photovoltaic inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2488-2498.
- [81] 杨思为,张兴,毛旺,等.弱电网下级联H桥光伏并网逆变器稳定性分析[J].太阳能学报,2022,43(1):398-405.
YANG Siwei, ZHANG Xing, MAO Wang, et al. Stability analysis of CHB photovoltaic grid-connected inverter in weak

grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(1): 398-405.

张 兴(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:新能源变流技术。E-mail:honglf@ustc.edu.cn
吴孟泽(1998—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方

向:级联H桥光伏逆变器。E-mail:2020110332@mail.hfut.edu.cn

王明达(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:级联H桥光伏逆变器。E-mail:wmd6094@mail.hfut.edu.cn

(编辑 章黎)

Review on Leakage Current Suppression and Power Balance Control of Single-phase Photovoltaic Cascaded Multilevel Inverter

ZHANG Xing¹, WU Mengze¹, WANG Mingda¹, WANG Pingzhou¹, FU Xinxin¹, ZHAO Tao²

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;

2. College of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The single-phase cascaded multilevel inverter (CMI) has attracted much attention in the research field of grid-connected photovoltaic systems in recent years because of its advantages such as the module-level maximum power point tracking (MPPT), the module-level shutdown, the low harmonic content of multilevel output voltage and the structure integrating the optimizer and the grid-connected inverter. The single-phase transformerless photovoltaic cascaded multilevel inverter (PV-CMI) with the independent DC bus structure is taken as the research subject, and two existing problems are summarized. One is that the lack of isolation circuits may lead to leakage current problems, and the other is that the independent DC photovoltaic inputs between the units in single-phase PV-CMI may lead to power imbalance problems. These two problems threaten the safe and stable operation of the single-phase PV-CMI, thus greatly limiting the promotion and application of the single-phase PV-CMI. The basic principle and topology characteristics of the single-phase PV-CMI are analyzed, and the existing research schemes are summarized on the two key problems of its leakage current and photovoltaic power imbalance. Finally, the current technical challenges and the future development trends of the PV-CMI are presented, which provides references for the subsequent research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51937003).

Key words: cascaded multilevel inverter (CMI); leakage current; power imbalance; photovoltaic inverter

