DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.306 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

不同 PWM 调制方式下器件混合型三电平变流器 EMI 特性研究

李 锦[1](中国电源学会会员)，焦娜娜[1]，黄敏超[2]，范雨顺[1]，党恩帅[1]
(1.上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2.敏业信息科技(上海)有限公司，上海 201206)

摘要：以 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型三电平有源中点钳位 3L-ANPC(three-level active neutral point clamped)变流器拓扑为研究对象，对 3 种脉宽调制方式下的共模电磁干扰 CM EMI(common-mode electromagnetic interference)特性进行研究。首先介绍了 3L-ANPC 变流器拓扑结构中 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件的 2 种组合模式及 3 种调制方式，然后对 3L-ANPC 变流器拓扑共模噪声传输机理进行分析，基于分析建立了包含寄生参数和噪声源的 EMI 模型，并推导出每种调制方式下传导路径的阻抗表达式，得到了共模传导路径阻抗特性曲线。最终通过实验验证了 3 种调制方式下器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑共模噪声的分析结论。

关键词：三电平有源中点钳位变流器；电磁干扰；脉宽调制；传导路径

Research on EMI Characteristics of Three-level Converter with Hybrid Devices in Different PWM Modes

LI Jin[1], *Member, CPSS*, JIAO Nana[1], HUANG Minchao[2], FAN Yushun[1], DANG Enshuai[1]
(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Minye Information Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: The topology of a three-level active neutral point clamped (3L-ANPC) converter with hybrid devices of SiC-MOSFET and Si-IGBT was taken as the research object to study the common-mode electromagnetic interference (CM EMI) characteristics in three pulse width modulation modes. First, two combination modes of SiC-MOSFET and Si-IGBT and three modulation modes of the 3L-ANPC converter topology were introduced. Then, the propagation mechanism of CM noise in the 3L-ANPC converter was analyzed. Based on the analysis, an EMI model including parasitic parameters and noise sources was established, and the impedance expression of propagation path in each modulation mode was derived, thereby obtaining the impedance characteristic curves of CM propagation paths. Finally, the conclusion about the CM noise of the 3L-ANPC converter with hybrid devices in three modulation modes was experimentally verified.

Keywords: Three-level active neutral point clamped (3L-ANPC) converter; electromagnetic interference (EMI); pulse width modulation; propagation path

随着光伏发电、风力发电等新能源发电的快速发展，三电平有源中点钳位 3L-ANPC(three-level active neutral point clamped)变流器拓扑成为了广泛使用的多电平变流器拓扑之一[1]。该类拓扑能提高开关器件的电压裕量，同时控制开关器件之间的损耗分布和热应力[2]。为进一步降低 3L-ANPC 变流器拓扑中功率器件的开关损耗，有学者将 SiC-MOSFET 应用到该拓扑中，提出 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 不同组合模式下的 3L-ANPC 变流器拓扑结构，并结合不同组合模式下的特定调制策略证实了SiC-MOSFET应用于变流器中可大幅提高变流器的效率及功率密度[3-6]，但当采用不同的调制方式时，器件的开关动作引起的开关电压变化率 dv/dt 会带来电磁干扰EMI(electromagnetic interference)

收稿日期：2023-03-09；**修回日期**：2023-04-20；**录用日期**：2023-05-17；**网络首发日期**：2023-06-19

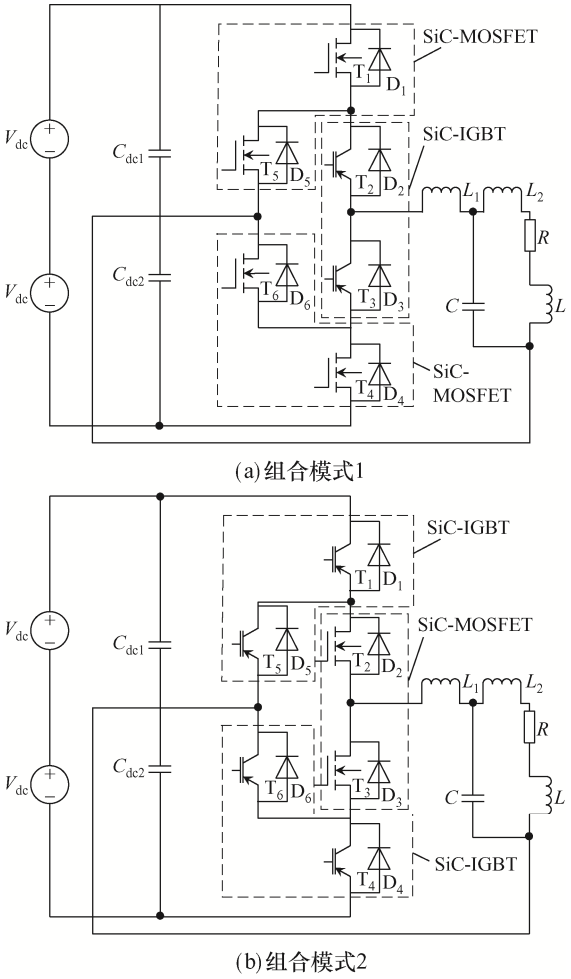
问题[7-9]。而无论哪种组合模式，SiC-MOSFET 都工作在高频，其 d*v*/d*t* 是 Si 器件的 10 倍以上，导致变流器的共模 EMI 问题更严重[10]。

对不同调制方式下的器件混合型 3L-ANPC 变流器共模 EMI 特性进行研究。首先需对共模噪声进行建模，其次应从噪声源和传导路径 2 个方面分析 EMI 特性[11]。目前已有文献建立了三电平变流器拓扑的共模噪声模型，如：文献[12]对三电平二极管中点钳位 3L-DNPC(three-level diode neutral point clamped)变流器拓扑共模噪声综合分析并建立了含 3 个高频噪声源的共模噪声模型，但由于拓扑结构、调制方式及高频噪声源的数量不同，该共模噪声简化模型不能直接用于3L-ANPC 变流器拓扑中；文献[13]建立并简化了内侧开关管为 SiC-MOSFET 的混合型 3L-ANPC 变流器拓扑的共模噪声模型，给出共模传导路径的统一数学模型，但未对其他混合型拓扑及 PWM 调制方式下 3L-ANPC 变流器 EMI 传导模型及特性进行分析；文献[14]在建立的 3L-ANPC 变流器共模噪声模型中，对 4 种典型 PWM 调制方式下的 EMI 特性从噪声源角度进行了定性分析，但所建模型中不包含电路寄生参数，且未考虑不同调制方式下传导路径阻抗对 EMI 的影响；进一步，文献[15]建立了含电路寄生参数的 3L-ANPC 变流器共模噪声模型，对比分析了 2 种调制方式下的共模噪声频谱，但该拓扑所用开关器件均为 SiC-MOSFET 器件，其调制方式、噪声源及传导路径中的对地寄生电容均有别于 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型拓扑，所得结论不适用于器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑。综合上述分析，有必要对 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑在器件的不同组合模式及对应调制方式下的 EMI 特性进行对比研究。

本文旨在研究不同器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑中 3 种典型 PWM 调制方式对变流器 EMI 特性的影响。首先，建立考虑寄生参数的电磁干扰电路模型；其次，从噪声源及传导路径阻抗 2 个方面分析不同 PWM 调制方式下 EMI 特性，对不同调制方式下共模传导路径建模，提取传导路径的元件阻抗，并对共模传导路径阻抗特性曲线进行对比分析；最后，搭建单相 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型 3L-ANPC 变流器平台，通过实验验证上述分析结论的正确性。

1　3L-ANPC 变流器拓扑结构及调制方式

在器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑中，SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件的不同组合模式如图 1 所示。2 种组合模式均采用半桥功率模块为基本组成单元，3 个功率模块分别为外侧开关管 T_1 和钳位



(a)组合模式1

(b)组合模式2

图 1　器件混合型 3L-ANPC 拓扑结构的 2 种组合模式

Fig. 1 Two combination modes of 3L-ANPC topology with hybrid devices

开关管 T_5、内侧开关管 T_2 和 T_3、外侧开关管 T_4 和钳位开关管 T_6。如图 1(a)所示的组合模式 1，开关管 T_1、T_5、T_4 和 T_6 均采用 SiC-MOSFET 器件，T_2 和 T_3 采用 Si-IGBT 器件，构成 4SiC 和 2Si 器件混合的 3L-ANPC 变流器拓扑[4]；如图 1(b)所示的组合模式 2，开关管 T_1、T_5、T_4 和 T_6 均采用 Si-IGBT 器件，T_2 和 T_3 采用 SiC-MOSFET 器件，构成 2SiC 和 4Si 器件混合的 3L-ANPC 变流器拓扑[3]。图 1 中：C_{dc1} 和 C_{dc2} 为直流母线电容；V_{dc} 为直流电压源；L_1、L_2 和 C 分别为滤波器的电感和电容；R 和 L 分别为负载电阻和电感。

器件混合型 3L-ANPC 变流器有 3 种典型的 PWM 调制方式，为方便叙述，本文将这 3 种调制方式称之为 SPWM1、SPWM2 和 SPWM3。3 种 PWM 调制方式如图 2 所示。

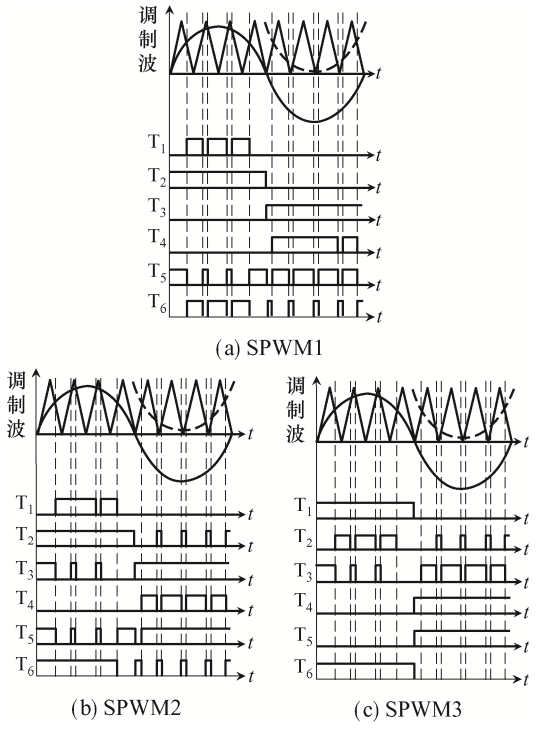


图 2 3 种 PWM 调制方式

Fig. 2 Three kinds of PWM mode

图 2(a)的 SPWM1 调制方式中，T_2 和 T_3 在一个正弦周期内始终工作在工频，T_5 和 T_6 工作在高频；在正半周 T_1 工作在高频，T_4 则关断；而在负半周则相反[4]。图 2(b)的 SPWM2 调制方式中，外侧开关管、钳位开关管以及内侧开关管均有半个正弦周期交替工作在高频，另外半个正弦周期交替工作在工频[5]。图 2(c)的 SPWM3 调制方式中，外侧开关管与钳位开关管工作在工频，内侧开关管工作在高频[3]。

组合模式 1 和 2 中，分别采用相应的调制方式将高频开关动作集中于低开关损耗的 SiC-MOSFET 器件上，以降低变流器开关损耗。另外，在调制方式 SPWM1、SPWM2 和 SPWM3 下，换流回路分别为短回路换流、双回路换流和长回路换流[16]，即 3 种调制方式下的换流路径是不同的。不同换流回路的寄生参数不同，等效阻抗也不同。

2 不同 PWM 调制方式下共模干扰分析

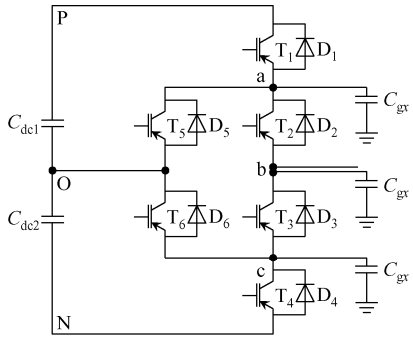
如上所述，将 SiC 器件应用到 3L-ANPC 变流器拓扑后，EMI 问题更为严重，主要是因为功率器件在开关动作时产生的跳变电压对功率模块和地之间的寄生电容进行充放电，形成共模电流，且快速变化的 dv/dt 使变流器共模噪声中高频谐波分量增加[17]。另外，3L-ANPC 变流器拓扑在不同 PWM 调制方式下，高频开关动作的开关管数量不同，即主要噪声源的数量不同，且在不同调制方式下，共模传导路径的寄生参数也会发生变化，有必要对 3L-ANPC 变流器拓扑在 3 种调制方式下的共模噪声和传导路径进行分析建模。

2.1 共模噪声建模

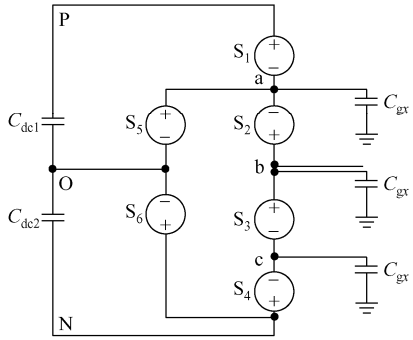
根据文献[13]的方法对 3L-ANPC 变流器的噪声源建模，建模过程如图 3 所示。图 3(a)为含对地寄生电容的单相 3L-ANPC 拓扑，其中 C_{gx}(x 代表 SiC 和 Si，在不同调制方式下含义不同)为功率模块的对地寄生电容。为模拟噪声传导路径，根据替代定理，用电压源代替开关器件，得到图 3(b)，之后根据电压源并联定理，消除并联的电压源得到图 3(c)，最后利用节点电压 V_{sa}、V_{sb} 和 V_{sc} 代替电压源 S_5、S_2+S_5 和 S_6，得到最终的共模噪声模型，如图 3(d)所示。

共模噪声模型中共有3个噪声源，为便于分析，需进一步简化。SPWM3 调制方式下噪声源 V_{sa}、

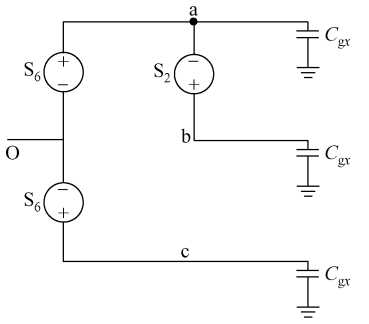
V_{sb} 和 V_{sc} 的波形如图 4 所示。可见，V_{sa} 和 V_{sc} 是 2 个波形一样的工频电压，可将二者视为大小相同的



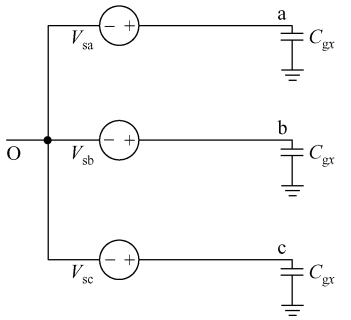
(a) 含寄生电容的3L-ANPC拓扑



(b) 电压源代替开关器件



(c) 消除并联的电压源



(d) 节点电压代替电压源

图 3　单相 3L-ANPC 拓扑共模噪声建模

Fig. 3 Modeling of single-phase 3L-ANPC topology with common-mode noise

2 个工频噪声源；而 V_{sb} 以开关频率变化，其高频分量高于另外 2 个噪声源。则在 SPWM3 调制方式下，3L-ANPC 变流器拓扑的共模噪声主要是由高频跳变电压 V_{sb} 产生的。同理，可以分析得到在 SPWM1 和 SPWM2 调制方式下 V_{sb} 为工频噪声源，变流器的共模噪声主要是由高频噪声源 V_{sa} 和 V_{sc} 产生的。

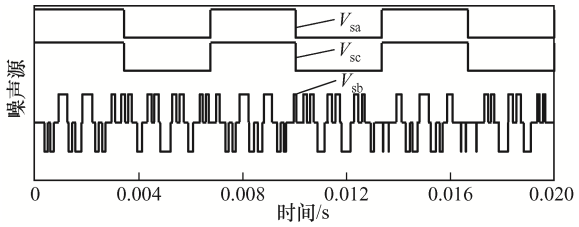


图 4　SPWM3 调制方式下的 3 个噪声源波形

Fig. 4 Waveforms of three noise sources in SPWM3 mode

2.2 共模传导路径建模

因寄生参数对共模噪声的影响很大，所以共模传导路径中应考虑元件的寄生参数及换流回路寄生参数。含寄生参数的 3L-ANPC 变流器 EMI 电路模型如图 5 所示，直流母线电容 C_{dc1} 和 C_{dc2} 的等效串联电感分别为 L_{dc1} 和 L_{dc2}。连接线性阻抗稳定网络 LISN(line impedance stabilization network)和被测物的正负电源馈线是一段较长的电流导体，其寄生参数也是影响 EMI 测量的重要因素，将其寄生参数分别表示为 L_P 和 L_N。直流侧主电路的正母排、负母排、零排和连接功率模块的母排寄生参数分别表示为 L_{bus1}、L_{bus2}、L_o、L_{12}、L_{34}。3 个半桥模块内部的杂散电感分别表示为 L_{15}、L_{23}、L_{46}。功率模块的对地寄生电容表示为 C_{gx}(x 表示 SiC 或 Si)。散热器和大地之间通过连接线连接，连接线的寄生参数表示为 L_{gnd}，另外在电路直流侧中设置 V 型 50 Ω/50 μH LISN 以提取高频噪声电流。

3L-ANPC 变流器共模传导路径模型如图 6 所示。结合 2.1 节所建立的共模噪声模型和图 5 中含寄生参数的 EMI 电路模型，得到图 6(a)所示 3 种调制方式下的统一共模传导噪声模型。3L-ANPC 变流器在 3 种调制方式下的共模传导路径均可以分为 3 个部分：功率模块与地之间的寄生电容 C_{gx}、散热器接地线阻抗 Z_{gnd}、功率模块内部及回路中寄生参数阻抗 Z_P、Z_N、Z_{roux} 与 Z'_{roux}(x=1,2,3，分别表

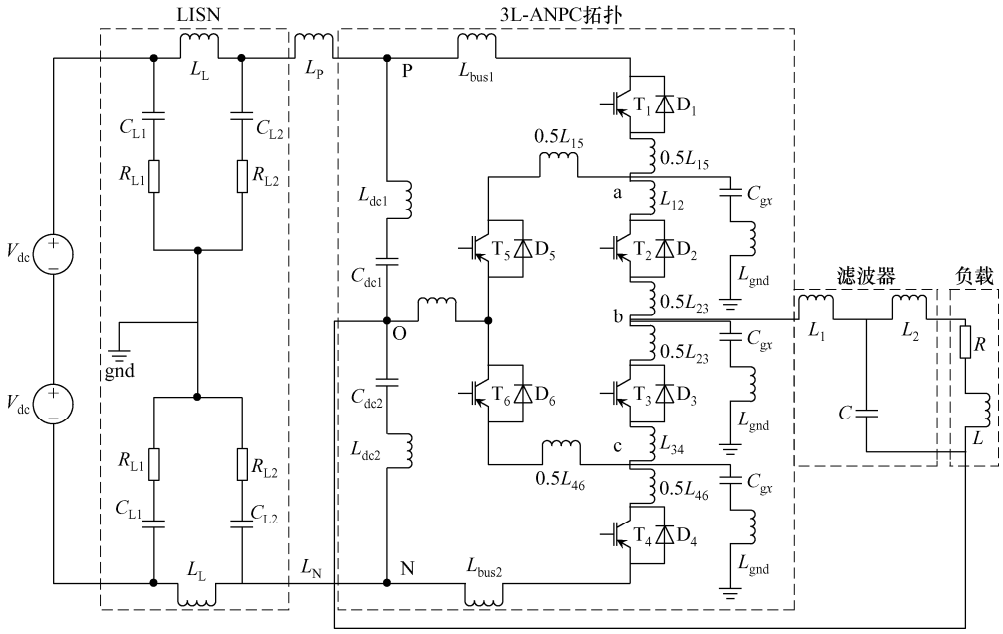
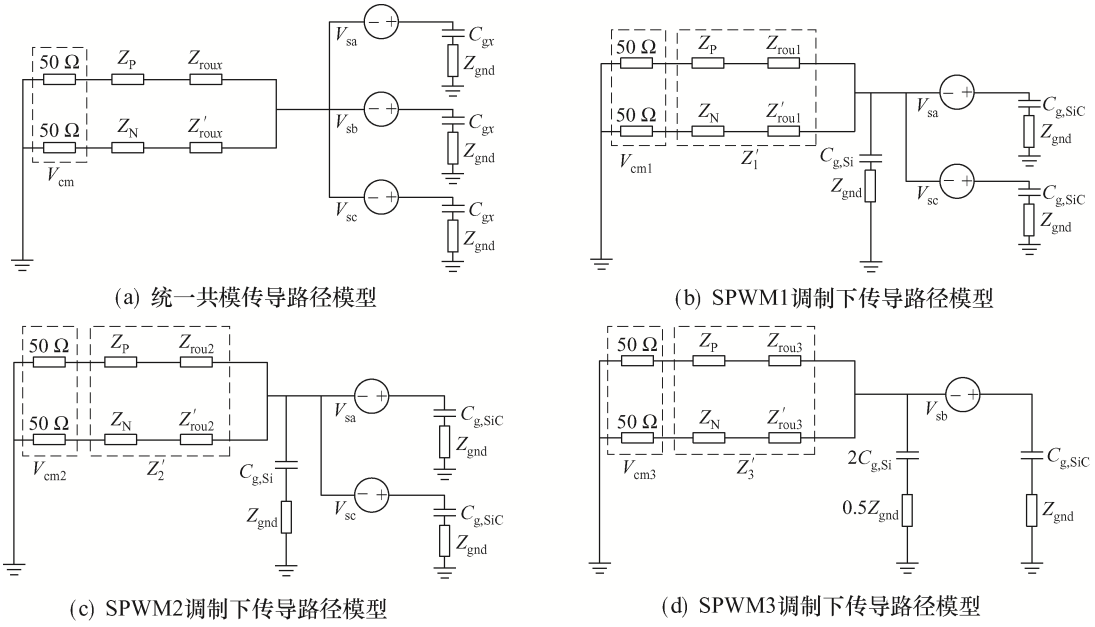


图 5 3L-ANPC 变流器 EMI 电路模型

Fig. 5 EMI circuit model of 3L-ANPC converter



(a) 统一共模传导路径模型

(b) SPWM1调制下传导路径模型

(c) SPWM2调制下传导路径模型

(d) SPWM3调制下传导路径模型

图 6 3L-ANPC 变流器共模传导路径模型

Fig. 6 Common-mode propagation path model of 3L-ANPC converter

示 SPWM1、SPWM2 和 SPWM3 调制方式下的共模电流通路)。其中：Z_P、Z_N 分别为正、负电源线等效阻抗；Z_{roux} 与 Z'_{roux} 分别为回路中共模电流流经正、负电源线至电压变化节点的等效阻抗。Z_{gnd} 及 Z_P、Z_N 为固定值，不随传导路径的改变发生变化，V_{cm} 为共模电流在 LISN 的 50 Ω 电阻上产生的共模电压。另外不同调制方式只改变流经电容中点的电流路径，而不影响输出电压，但 3L-ANPC 变流器共模通路中起主导作用的噪声源及其数量和回路中的等效阻抗 Z_{roux} 与 Z'_{roux} 会随着调制方式的变化而发生改变。

如 2.1 节所述，3L-ANPC 变流器拓扑在调制方式 SPWM1 和 SPWM2 下有 2 个高频噪声源，在调制方式 SPWM3 下有 1 个高频噪声源。组合模式 1 中，2 个同一型号的 SiC-MOSFET 模块的对地寄生电容相等，在 SPWM1 和 SPWM2 调制方式下，一

个工频周期内正、负半周均有 2 个噪声源对寄生电容充放电，共模传导路径模型可分别简化为图 6(b)和图 6(c)。组合模式 2 中，2 个同一型号的 Si-IGBT 模块对地寄生电容相等，SPWM3 调制方式下，只有 1 个噪声源对对地寄生电容充放电，共模传导路径模型可简化为图 6(d)。图 6 中：V_{cm1}、V_{cm2}、V_{cm3} 分别为对应调制方式下的共模电压；Z'_1、Z'_2 和 Z'_3 分别为对应调制方式下回路中除对地寄生电容和散热器接地线阻抗之外的寄生参数的等效阻抗。

根据图 6 的共模传导路径模型，3L-ANPC 变流器拓扑在 3 种调制方式下共模传导路径的等效阻抗 Z_1、Z_2 和 Z_3 分别表示为

$$Z_1=\frac{(50+Z_{rou1}+Z_P)(50+Z'_{rou1}+Z_N)}{100+Z_{rou1}+Z_P+Z'_{rou1}+Z_N}\cdot\left(\frac{1}{j\omega(C_{g,SiC}+C_{g,Si})}+0.5Z_{gnd}\right)\Big/\left[\frac{(50+Z_{rou1}+Z_P)(50+Z'_{rou1}+Z_N)}{100+Z_{rou1}+Z_P+Z'_{rou1}+Z_N}+\frac{1}{j\omega(C_{g,SiC}+C_{g,Si})}+0.5Z_{gnd}\right]+\frac{1}{j\omega C_{g,SiC}}+Z_{gnd} \tag{1}$$

$$Z_2=\frac{(50+Z_{rou2}+Z_P)(50+Z'_{rou2}+Z_N)}{100+Z_{rou2}+Z_P+Z'_{rou2}+Z_N}\cdot\left(\frac{1}{j\omega(C_{g,SiC}+C_{g,Si})}+0.5Z_{gnd}\right)\Big/\left[\frac{(50+Z_{rou2}+Z_P)(50+Z'_{rou2}+Z_N)}{100+Z_{rou2}+Z_P+Z'_{rou2}+Z_N}+\frac{1}{j\omega(C_{g,SiC}+C_{g,Si})}+0.5Z_{gnd}\right]+\frac{1}{j\omega C_{g,SiC}}+Z_{gnd} \tag{2}$$

$$Z_3=\frac{(50+Z_{rou3}+Z_P)(50+Z'_{rou3}+Z_N)}{100+Z_{rou3}+Z_P+Z'_{rou3}+Z_N}\cdot\left(\frac{1}{2j\omega C_{g,Si}}+0.5Z_{gnd}\right)\Big/\left[\frac{(50+Z_{rou3}+Z_P)(50+Z'_{rou3}+Z_N)}{100+Z_{rou3}+Z_P+Z'_{rou3}+Z_N}+\frac{1}{2j\omega C_{g,Si}}+0.5Z_{gnd}\right]+\frac{1}{j\omega C_{g,SiC}}+Z_{gnd} \tag{3}$$

式中，ω 为角频率，$\omega=2\pi f$。经测量有 $C_{g,SiC}>C_{g,Si}$，则 $\frac{1}{j\omega(C_{g,SiC}+C_{g,Si})}>\frac{1}{2j\omega C_{g,Si}}$，SPWM3 调制方式下共模噪声传导路径等效阻抗 Z_3 最大。另外，Z_1 略大于 Z_2，可以通过对比二者的阻抗特性曲线得到。

根据电路中基尔霍夫电压定律和叠加定理，可将 3L-ANPC 变流器拓扑在 3 种调制方式下 LISN 上的共模噪声 V_{cm1}、V_{cm2} 和 V_{cm3} 分别表示为

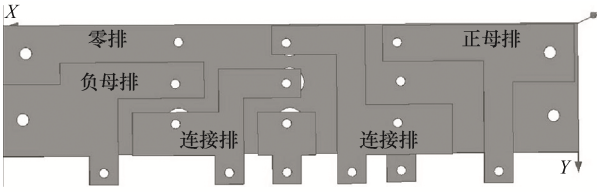
$$V_{cm1}=25(V_{sa}+V_{sc})/Z_1 \tag{4}$$

$$V_{cm2}=25(V_{sa}+V_{sc})/Z_2 \tag{5}$$

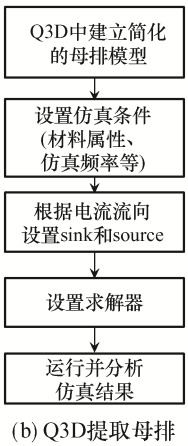
$$V_{cm3}=25V_{sb}/Z_3 \tag{6}$$

2.3 共模传导路径阻抗提取

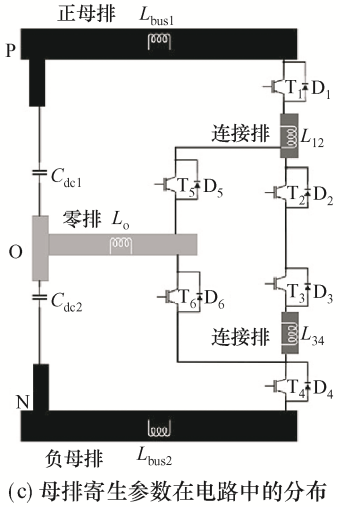
采取实验测量结合 Q3D 建模方法得到图 5 中的寄生参数，Q3D 提取母排寄生电感如图 7 所示。其中母排寄生电感采用 ANSYS Q3D 软件建模仿真得到，Q3D 中建立的母排仿真模型如图7(a)所示，



(a) 母排仿真模型



(b) Q3D提取母排寄生参数流程



(c) 母排寄生参数在电路中的分布

图 7　Q3D 提取母排寄生电感

Fig. 7 Extraction of parasitic inductance of busbar with Q3D

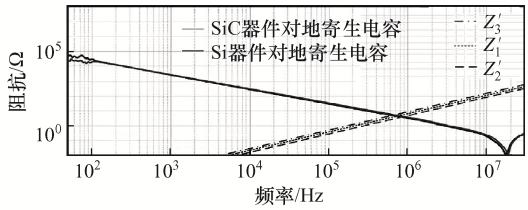
在建立仿真模型的过程中，为提高仿真效率，减少运算时间，对母排的局部结构做了简化，如忽略母排螺栓、将母排棱边用直角边代替等，母排寄生参数提取流程如图 7(b)所示，相对应的母排寄生参数在电路中的分布如图 7(c)所示。其余寄生参数均采用矢量网络分析仪德 E5061B 的阻抗分析功能测量得到。电路寄生参数见表 1。

表 1 电路寄生参数

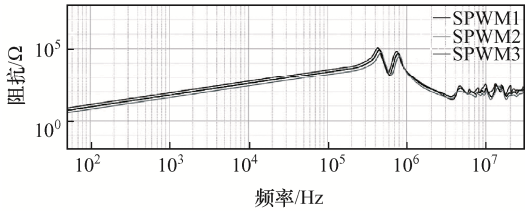
Tab. 1 Parasitic parameters of circuit

参数	数值	参数	数值
L_{bus1}/nH	31.71	L_{12}/nH	41.38
L_{bus2}/nH	53.13	L_{23}/nH	13.47
L_{dc1}，L_{dc2}/nH	58.74	L_{34}/nH	21.72
L_o/nH	91.33	L_{gnd}/nH	453.13
L_{15}/nH	15.27	$C_{g,SiC}$/pF	276.13
L_{46}/nH	14.91	$C_{g,Si}$/pF	189.57

重要寄生参数及传导路径阻抗特性曲线如图 8 所示，其中电路中寄生参数阻抗特性曲线如图 8(a)所示。图中 SiC-MOSFET 模块对散热器的寄生电容比 Si-IGBT 的大，均为 pF 级；3 种调制方式下回路中部分寄生参数的等效阻抗 Z'_3 最大，Z'_1 其次之，Z'_2 最小。3 种调制方式下变流器共模传导路径的阻抗特性曲线如图 8(b)所示，虽部分频段 3 种阻抗特性曲线部分交叠，但整体上可以看出 SPWM3



(a) 寄生参数阻抗特性曲线



(b) 3种调制方式下共模传导路径阻抗特性曲线

图 8 重要寄生参数及传导路径阻抗特性曲线

Fig. 8 Impedance characteristic curves of important parasitic parameters and propagation paths

调制方式下，共模传导路径的等效阻抗最大，其次是 SPWM1 调制方式下的，而 SPWM2 调制方式下的传导路径的等效阻抗最小。这主要因为在 SPWM1 和 SPWM2 调制方式下，共模传导路径中的寄生电容大于 SPWM3 调制方式下的寄生电容。

结合对 3L-ANPC 变流器拓扑 3 种调制方式下共模噪声源和传导路径的分析，可知在 SPWM3 调制方式下，仅有 1 个高频噪声源且传导路径阻抗最大，而 SPWM1 和 SPWM2 调制方式下均有 2 个高频噪声源，且 SPWM1 调制方式下的传导路径阻抗略大于 SPWM2 调制方式下的阻抗。在 3 种调制方式下噪声源波形相同条件下，可以得到 3L-ANPC 变流器拓扑在 SPWM3 调制方式下的共模噪声最小，其次是 SPWM1 调制下的，而 SPWM2 调制下的共模噪声最大。

3 实验验证

3.1 实验平台搭建

为验证以上 PWM 调制方式对 3L-ANPC 变流器传导 EMI 特性影响的理论分析正确性，本文搭建了如图 9 所示的 EMI 测试平台，对 3L-ANPC 变流器在 3 种调制方式下的共模 EMI 进行实验验证。实验平台设备参数见表 2。测试工况为：直流电压为 200 V，负载电流为 2.5 A，开关频率为 20 kHz。拓扑中用 3 个 62 mm 封装的半桥功率模块搭建桥臂主电路，同时设计了叠层母排以减少换流回路的寄生电感，通过 DSP+CPLD 控制板生成相应的脉冲。测试时将被测物置于接地铜板上，频谱仪作为接收机接收 LISN 上的传导噪声，测量频段为

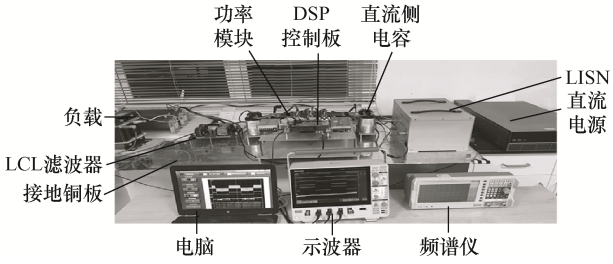


图 9 3L-ANPC 变流器 EMI 测试实验平台

Fig. 9 EMI testing platform for 3L-ANPC converter

表 2　实验平台设备参数

Tab. 2 Equipment parameters of testing platform

设备	厂商	型号
SiC-MOSFET 模块	英飞凌	FF6MR12KM1
Si-IGBT 模块	英飞凌	FF200R12KT4
LISN	敏业信息科技(上海)有限公司	MYJ50A 单线 V 型
频谱仪	Rohde&Schwarz	FPC1500
电流探头	PEM	CWTUM/3/B

150 kHz~30 MHz。

3.2　3L-ANPC 变流器 3 种调制方式下共模传导噪声测试结果

基于图 9 中的 EMI 测试实验平台，对 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型 3L-ANPC 变流器在 3 种典型调制方式下的共模传导噪声进行测试，得到 3 种调制方式下 3L-ANPC 的共模电流测试结果，如图 10 所示。可看到 SPWM2 调制方式下共模电流最大，其次是 SPWM1 调制方式下的共模电流，SPWM3 调制方式下共模电流最小。

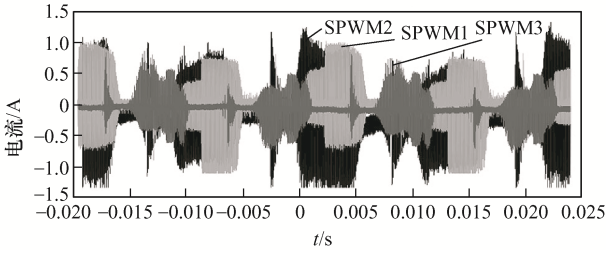
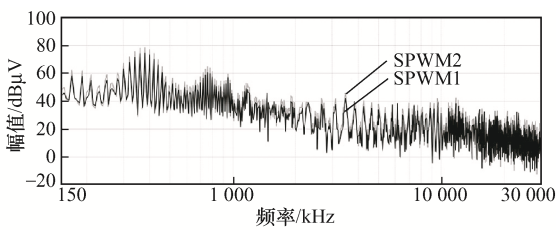


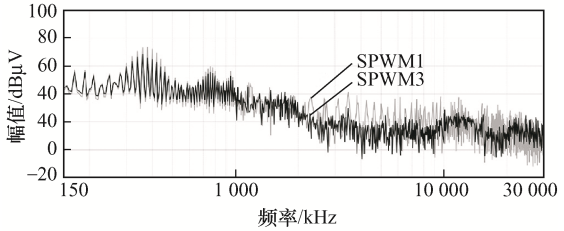
图 10　3 种调制方式下的共模电流

Fig. 10 Common-mode current in three modulation modes

3 种调制方式下，3L-ANPC 变流器的共模噪声测试结果如图11所示。可以看出，SiC-MOSFET 与 Si-IGBT 器件混合型 3L-ANPC 变流器在不同调制方式下的共模传导噪声频谱幅值不同。SPWM2 调制方式下，变流器共模噪声频谱幅值最大，其次是 SPWM1 调制下的噪声，而 SPWM3 调制下的噪声最小，与之前的理论分析结果一致。为便于理解，将共模噪声分为 3 个频段进行比较分析：在低频段(150 kHz~3 MHz)，相比于 SPWM1 和 SPWM2，SPWM3调制方式下3L-ANPC变流器的共模噪声最大分别降低了 3.0 dB 和 9.8 dB 左右；在中频段(3~10 MHz)，SPWM3 调制方式下 3L-ANPC 变流器的共模噪声最大分别降低了 10 dB 和 13 dB 左右；在高频段(10~30 MHz)，SPWM3 调制方式下 3L-ANPC 变流器的共模噪声最大分别降低了 13 dB 和 17 dB 左右。通过改变调制方式，3L-ANPC 变流器共模噪声幅值有所降低，因 EMI 滤波器难以对高频共模噪声进行衰减，所以高频 EMI 的降低对于 EMI 特性的改善很重要[18]。



(a) SPWM1和SPWM2共模噪声频谱对比



(b) SPWM1和SPWM3共模噪声频谱对比

图 11　3 种调制方式下 3L-ANPC 变流器的共模噪声频谱

Fig. 11 Common-mode noise spectra of 3L-ANPC converter in three modulation modes

4　结语

本文通过对 SiC-MOSFET 和 Si-IGBT 器件混合型 3L-ANPC 变流器拓扑在 3 种调制方式下的共模噪声源和传导路径进行理论分析和建模，得到不同调制方式下的共模噪声模型。进一步得到了不同调制方式下的传导路径阻抗及共模噪声表达式，结合噪声源和传导路径的阻抗特性曲线，分析得到器件混合型 3L-ANPC 共模传导噪声中，SPWM3 调制方式下 3L-ANPC 变流器共模噪声最小，其次是 SPWM1 调制方式下的，而 SPWM2 调制方式下共模噪声最大。最后，实验结果验证了这一结论。

参考文献：

[1] 董璧韬, 胡长生, 姚文熙, 等. 一种改进的 CHB 多电平

变换器 PWM 调制策略[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 55-63.
Dong Bitao, Hu Changsheng, Yao Wenxi, et al. An improved PWM control strategy for CHB multilevel converter [J]. Journal of Power Supply, 2023,21(1):55-63. (in Chinese)

[2] Li Jin, Liu Jinjun, Boroyevich D, et al. Three-level active neutral-point-clamped zero-current-transition converter for sustainable energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3680-3693.

[3] Guan Qingxin, Li Chushan, Zhang Yu, et al. An extremely high efficient three-level active neutral-point-clamped converter comprising SiC and Si hybrid power stages [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8341-8352.

[4] Zhang Di, He Jiangbiao, Pan Di. A megawatt-scale medium-voltage high-efficiency high power density “SiC Si” hybrid three-level ANPC inverter for aircraft hybrid-electric propulsion systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5971-5980.

[5] Jiao Yang, Lee F C. New modulation scheme for three-level active neutral-point-clamped converter with loss and stress reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5468-5479.

[6] Feng Zhijian, Zhang Xing, Yu Shaolin, et al. Comparative study of 2SiC&4Si hybrid configuration schemes in ANPC inverter [J]. IEEE Access, 2020, 8: 33934-33943.

[7] Jiang Dong, Wang Fei, Xue Jing. PWM impact on CM noise and AC CM choke for variable-speed motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 963-972.

[8] 彭长川, 陈为, 林苏斌. 单管正激变换器传导共模 EMI 特性分析[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 298-306.
Peng Changchuan, Chen Wei, Lin Subin. Analysis of conducted common-mode EMI characteristics of single-switch forward converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 298-306. (in Chinese)

[9] 徐浩东, 罗嗣勇, 毕闯, 等. 基于 SiC MOSFET 同步 Buck DC-DC 变换器的宽频混合 EMI 滤波器设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3060-3069.
Xu Haodong, Luo Siyong, Bi Chuang, et al. Design of broadband hybrid EMI filter in synchronous Buck DC-DC converter with SiC MOSFETs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(10): 3060-3069. (in Chinese)

[10] Yuan Xibo, Walder S, Oswald N. EMI generation characteristics of SiC and Si diodes: influence of reverse-recovery characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1131-1136.

[11] Jiang Dong, Chen Jianan, Shen Zewei. Common mode EMI reduction through PWM methods for three-phase motor controller [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2): 133-142.

[12] Zhang Huan, Yang Le, Wang Shuo, et al. Common-mode EMI noise modeling and reduction with balance technique for three-level neutral point clamped topology [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7563-7573.

[13] Wang Jianing, Liu Xiaohui, Xun Yuanwu, et al. Common mode noise reduction of three-level active neutral point clamped inverters with uncertain parasitic capacitance of photovoltaic panels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6974-6988.

[14] Pan Donghua, Chen Mengxing, Wang Xiongfei, et al. EMI modeling of three-level active neutral-point-clamped SiC inverter under different modulation schemes [C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea, 2019: 1-6.

[15] Kumar S, Akin B, Gohil G. EMI performance of active neutral point clamped phase leg for dual active bridge DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 6093-6104.

[16] Chen Mengxing, Pan Donghua, Wang Huai, et al. Investigation of switching oscillations for silicon carbide MOSFETs in three-level active neutral-point-clamped inverters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4839-4853.

[17] Fang Zhihao, Jiang Dong, Zhang Yechi. Study of the characteristics and suppression of EMI of inverter with SiC and Si devices [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(3): 37-46.

[18] Wang Shuo. EMI modeling and reduction in modern power electronics systems [C]// 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI). Long Beach, CA, USA, 2018: 1-44.



李锦

作者简介：

李锦(1982—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：大功率变流器拓扑，控制及其应用。E-mail：jin_li@shiep.edu.cn。

焦娜娜(1997—)，女，硕士研究生。研究方向：变流器电磁兼容。E-mail：jiaonana@mail.shiep.edu.cn。

黄敏超(1972—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电磁兼容技术和电力电子技术。E-mail：huangmc@myemc.net.cn。

范雨顺(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：中压大功率变流器。E-mail：fanyushun@mail.shiep.edu.cn。

党恩帅(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：高频软开关变流器拓扑。E-mail：des1149@163.com。

(责任编辑：陈国珍)

(上接第 305 页)

supply based on piezoelectric transformer [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020. (in Chinese)

[21] Kim H, Brockhaus A, Engemann J. Atmospheric pressure argon plasma jet using a cylindrical piezoelectric transformer [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(21): 211501.

[22] Timmermann E, Bansemer R, Gerling T, et al. Piezoelectric-driven plasma pen with multiple nozzles used as a medical device: Risk estimation and antimicrobial efficacy [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(2): 025201.



王伟骞

作者简介：

王伟骞(1998—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：智能装备。E-mail：373682444@qq.com。

李占贤(1965—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：机器人技术。E-mail：lizhanxian@ncst.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)