

SiC 逆变器在不同开关频率下直流侧 EMI 滤波器分析

张野驰¹, 蒋 栋¹, 阳世荣²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 逆变器工作过程中产生的电磁干扰(EMI)可以通过在电路中加入滤波器的方法使其得到有效的抑制。SiC 逆变器相比于普通的 Si 逆变器可以工作在更高的开关频率,而这将恶化逆变器产生的 EMI。本文对比了 SiC 逆变器工作在不同开关频率即 10kHz 和 40kHz 这两种情况下直流侧的 EMI,并基于插入损耗和阻抗匹配的原则设计了相应的 EMI 滤波器。对于 40kHz 的开关频率,除加入 EMI 滤波器还使用随机 PWM 降低了直流侧的 EMI,通过改变调制方法和加入滤波器使得逆变器工作在 40kHz 开关频率下直流侧能够满足相应的电磁干扰标准。

关键词: SiC; EMI 滤波器; 开关频率; 随机 PWM

DOI: 10.12067/ATEEE1805069

文章编号: 1003-3076(2018)10-0077-06

中图分类号: TM46

1 引言

近年来,随着宽禁带半导体材料的不断发展,对于基于宽禁带半导体材料的逆变器的研究逐渐增多。宽禁带半导体材料如 SiC 相比于普通的硅基材料有着显著的优点:①可以以更高的开关频率工作;②器件自身的开关速度更快;③开关过程中产生的损耗更小^[1-3]。这些优良的特性使得 SiC 逆变器相比于传统的 Si 逆变器可以采用更小的散热器,并能实现更高的效率。但是由于 SiC 逆变器可以工作在更高的开关频率以及具有更快的开关速度,它在实际运行时产生的电磁干扰(ElectroMagnetic Interference, EMI)比普通的 Si 逆变器更加严重。过高的电磁干扰不但会使设备无法通过相应的电磁干扰标准,同时可能会对控制电路产生影响,甚至可能会引发保护设备的误动作。所以设计 SiC 逆变器的电磁干扰滤波器从而抑制其产生的电磁干扰是十分必要的。

许多文献分析了 EMI 滤波器的设计方法以及影响 EMI 滤波器的因素。文献[4]分析了不同调制方法对于共模干扰电流和共模电感饱和的影响。文献[5]分析了共模回路谐振以及高调制比情况下共

模电感的饱和机理,并提出了共模电感磁心的选择方法。文献[6]在逆变器开关频率为 20kHz 和 200kHz 的情况下,对交流侧共模电感进行了综合对比,结果表明在 200kHz 下共模电感体积显著增大。文献[7]设计了升压 Boost 功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)电路的差模滤波器,并提出了相应的优化方法。文献[8]分析了三相三电平变换器 EMI 滤波器的优化设计方法,所设计的 EMI 滤波器有较高的功率密度。文献[9]分析了 EMI 滤波器中元件的寄生参数以及消除寄生参数的方法。文献[10]分析了非隔离型逆变器直流侧的共模滤波器,并对比了 4 种不同拓扑结构的滤波器对直流侧共模 EMI 的抑制情况。

在高功率密度电机控制器中,尤其在应用 SiC 逆变器实现开关频率增加的场合,由于 EMI 的增大,采用体积重量更小的滤波器的同时使 EMI 抑制在电磁干扰标准内将面临更大的挑战。本文对比了 SiC 逆变器在不同开关频率下的直流侧 EMI,并依据 EMI 测试结果分析了相应的直流侧 EMI 滤波器。揭示了高开关频率下直流侧 EMI 滤波器设计的挑战以及相应的 EMI 抑制方法。

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB01006024)

作者简介: 张野驰(1992-),男,辽宁籍,博士研究生,研究方向为电磁兼容、EMI 滤波器;

蒋 栋(1983-),男,湖南籍,教授,博士,研究方向为电力电子与电力传动、电磁兼容等。

2 逆变器直流侧 EMI 等效电路及测试

2.1 等效电路建模

本文的研究对象是一台基于 CREE 公司 1200V SiC 功率模块的三相逆变器。整个 EMI 测试实验装置如图 1 所示。直流侧由可调直流电源供电,通过线阻抗稳定网络(Line Impedance Stabilization Network, LISN)接入逆变器直流母线;负载为通过电感滤波后的电阻箱;逆变器的控制板基于 TI 公司的 TMS320F28335 设计。



图 1 EMI 测试装置
Fig. 1 EMI test setup

图 2 为忽略 SiC 逆变器直流侧、交流侧对地寄生电容情况下的电磁干扰等效电路图。在直流电源和直流母线电容之间加入了两个 LISN,主要用于隔离电源本身带来的电磁干扰,同时可以使实验结果具有重复性。逆变器作为待测设备(Equipment Under Test, EUT),是整个系统的电磁干扰源。 C_o 为一个 1nF 的对地电容,代表逆变器负载中性点和大地之间的等效电容。

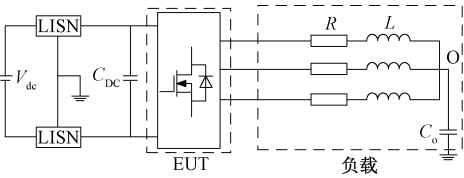


图 2 SiC 逆变器 EMI 等效电路图
Fig. 2 EMI equivalent circuit of SiC inverter

逆变器直流侧的共模干扰形成机理如下:由于逆变器中 SiC MOSFET 一直处于开关状态,其输出端相对于直流母线中点的电位一直在改变,由此便

形成了共模电压源,再通过交流侧负载的对地电容以及直流侧接地的 LISN 形成回路,这样便形成了完整的回路,共模电流可以流入到直流侧。直流侧的差模干扰形成机理如下:逆变器直流侧的电流由三相交流电流通过开关斩波之后汇入,该电流经过直流母线电容、LISN 形成差模干扰电流。对于直流侧的这两种干扰电流,可以通过电流探头进行测量,分别如图 3、图 4 所示。其中 I_p 、 I_n 分别为正、负直流母线电流。在测量直流侧共模电流时,使正、负直流母线以相同的方向穿过电流探头;测量直流侧的差模电流时,使正、负直流母线以相反的方向穿过电流探头。此时得到的测试数据为共模电流、差模电流的 2 倍。

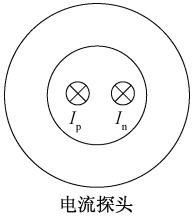


图 3 共模电流测量方法
Fig. 3 Measurement of CM current

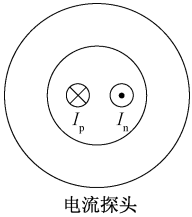


图 4 差模电流测量方法
Fig. 4 Measurement of DM current

SiC 逆变器直流侧共模、差模等效电路如图 5 和图 6 所示。其中, Z_{LOAD} 、 Z_o 分别为负载和对地电容的共模回路阻抗,可以通过阻抗分析仪测量得到; Z_{LISN_CM} 为两个 LISN 的并联阻抗,由于 LISN 的阻抗值在 150kHz ~ 30MHz 范围内可以认为是 50Ω ,所以 Z_{LISN_CM} 的值为 25Ω ; Z_{DC} 为直流母线电容的阻抗,同样可以通过阻抗分析仪测得; Z_{LISN_DM} 可以看成是两个 LISN 的串联阻抗,所以阻抗值为 100Ω 。阻抗分析仪对上述阻抗的测量结果如图 7 和图 8 所示。

2.2 不同开关频率下直流侧 EMI

2.1 节给出了直流侧共模 EMI 与差模 EMI 的等效电路,本节将对对比不同开关频率下直流侧差模与共模 EMI。为体现 SiC 器件应用后对开关频率的提高,对比了 10kHz 和 40kHz 两种开关频率下系统的传导

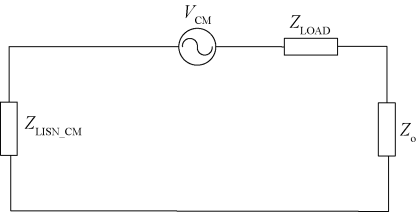


图 5 直流侧共模等效电路

Fig. 5 DC side equivalent CM circuit

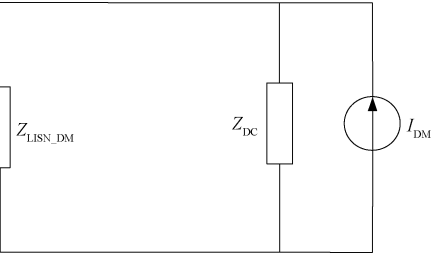


图 6 直流侧差模等效电路

Fig. 6 DC side equivalent DM circuit

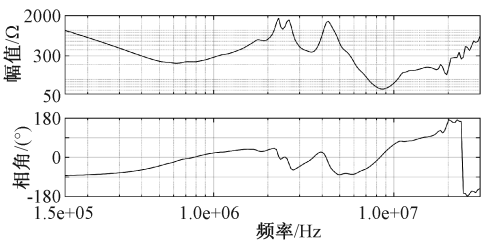


图 7 Z_{LOAD} 与 Z_o 的串联阻抗

Fig. 7 Impedance result of Z_{LOAD} in series with Z_o

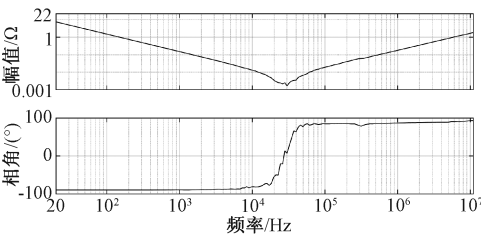


图 8 Z_{DC} 的阻抗

Fig. 8 Impedance result of Z_{DC}

EMI。对比实验中采用相同调制方式和门极驱动,所以系统的传导 EMI 完全由开关频率决定。

对比 SiC 逆变器在不同开关频率下的直流侧 EMI,结果如图 9 和图 10 所示。其中选取的电磁兼容标准是 DO160 标准,它定义了 150kHz ~ 30MHz 之间的传导 EMI 限值。

从图 9 和图 10 可以看出,随着开关频率的增加,无论是共模 EMI 还是差模 EMI,其整个频段内

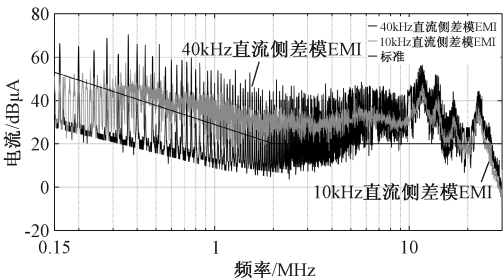


图 9 不同开关频率下直流侧差模 EMI 对比

Fig. 9 Comparison of DC side DM EMI under different switching frequencies

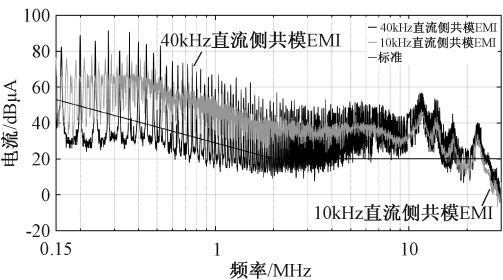


图 10 不同开关频率下直流侧共模 EMI 对比

Fig. 10 Comparison of DC side CM EMI under different switching frequencies

的 EMI 都有所增加。但是相比于高频段的 EMI,低频段范围内的 EMI 受到的影响更大,增大的幅度更多。因为 EMI 主要集中在开关频率的整数倍附近,在同一频率范围中,10kHz 的整数倍远多于 40kHz 的整数倍点数,因此,EMI 在 40kHz 开关频率下将更集中,造成 EMI 峰值偏高。随着 EMI 频率范围的提高,PWM 对 EMI 的影响逐渐减弱,决定因素逐渐过渡为器件开关特性,因此高开关频率对于 EMI 的影响主要集中在中低频范围。而滤波器的大小主要取决于低频段范围内的 EMI 值,所以更高的开关频率将会导致 EMI 滤波器体积的增大。

3 逆变器直流侧 EMI 滤波器分析

从图 9 和图 10 可以看出,无论开关频率是 10kHz 还是 40kHz,直流侧的 EMI 都无法满足 DO160 标准,所以需要在直流侧加入相应的滤波器对 EMI 进行衰减以满足要求,滤波器的设计流程图如图 11 所示。

根据系统阻抗,同时由于直流侧共模干扰较大,因此选取 CL 结构的滤波器。滤波器结构如图 12 所示。加入滤波器后的等效差模、共模电路分别如图 13、图 14 所示。

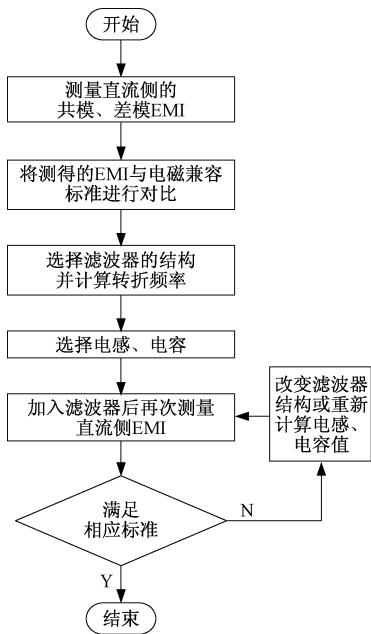


图 11 滤波器设计流程图
Fig. 11 Flow chart of filter design

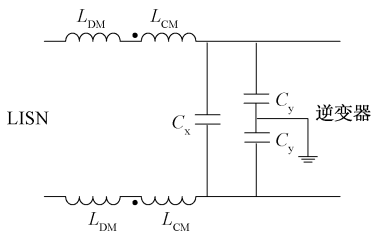


图 12 EMI 滤波器结构
Fig. 12 Structure of EMI filter

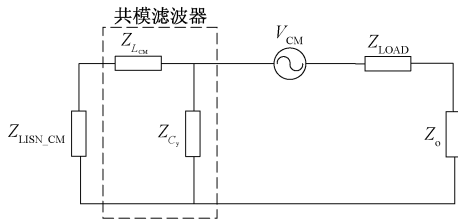


图 13 直流侧包含共模滤波器共模等效电路
Fig. 13 DC side equivalent CM circuit with CM filter

图 13 中, Z_{C_Y} 为滤波器中电容 C_Y 的阻抗, $Z_{L_{CM}}$ 为包含滤波器中的共模电感和差模电感的阻抗。图 14 中, $Z_{C_{DM}}$ 为共模电容 C_Y 以及差模电容 C_X 的并联阻抗, $Z_{L_{DM}}$ 为包括共模电感的漏感和差模电感的阻抗。

在确定滤波器的结构后, 可以根据插入损耗计算得到滤波器所需的电感、电容值。单级滤波器的插入损耗为 40dB/dec, 可以以此计算得到电感、电

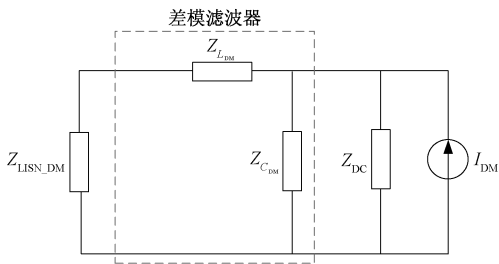


图 14 直流侧包含差模滤波器差模等效电路
Fig. 14 DC side equivalent DM circuit with DM filter

容值。在开关频率为 10kHz 的情况下, 对于直流侧共模干扰, 为防止电容 C_Y 产生的漏电流过大, 所以电容 C_Y 的值不能过大, 本文选取 C_Y 为 1.5nF 作为电路中的共模电容, 而滤波器中的共模电感的值约为 4.5mH。对于直流侧差模干扰, 选取电容 C_X 的值为 0.47μF, 其所需的差模电感值很小, 仅为 5.2μH, 所以可以不使用额外的差模电感, 仅仅依靠共模电感的漏感作为差模电感, 从而实现对直流侧差模干扰的抑制。加入滤波器后直流侧共模、差模干扰的结果如图 15 所示。

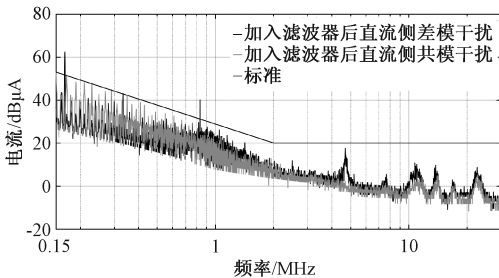


图 15 开关频率 10kHz 下加入滤波器后直流侧 EMI
Fig. 15 DC side EMI after inserting filter under 10kHz switching frequency

从图 15 可以看出, 加入滤波器后直流侧的 EMI 基本可以满足电磁兼容标准。直流侧差模 EMI 超出标准的两处频率是由于电源产生的干扰造成的, 逆变器产生的电磁干扰已经得到有效抑制, 这证明了所设计的滤波器是有效的。逆变器开关频率为 40kHz 时, 仍加入上述滤波器, 此时直流侧的 EMI 结果如图 16 所示。

从图 16 可以看出, 加此滤波器后, 直流侧的 EMI 不能满足电磁兼容标准, 这是由于在开关频率为 40kHz 时, 直流侧的原始电磁干扰大于 10kHz 时的电磁干扰, 所以此时还使用 10kHz 的滤波器不足以提供系统所需的衰减值。为了能够满足电磁兼容标准则需要增大滤波器中的电容、电感值或是降低

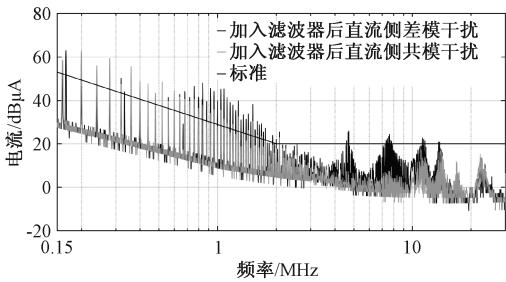


图 16 开关频率 40kHz 下加入滤波器后直流侧 EMI

Fig. 16 DC side EMI after inserting filter under 40kHz switching frequency

干扰源幅值,由于增大滤波器中元件值会进一步增大滤波器的体积,所以此处通过调制手段进一步降低干扰源的原始电磁噪声。逆变器采取常规 SVPWM 的调制方式工作时,开关频率是固定的,产生的谐波分布在开关频率的倍数附近,因此此时产生的 EMI 能量较为集中。如果可以采取改变开关频率的方法,将逆变器产生的谐波均匀分布在各个频率,则可以降低逆变器产生的 EMI 幅值,使其所需要的滤波器中的各个元件值变小。改变开关频率的方法包括随机 PWM (Random PWM, RPWM) 和混沌 PWM (Chaotic PWM) 等方法^[11-13],采用这两种调制方法都可以达到扩频的目的,从而降低逆变器产生的 EMI。本文选取 RPWM 的方法,逆变器开关频率变化范围为 32 ~ 48kHz,其等效开关频率仍可以认为是 40kHz。采用 RPWM 方法后仍使用 10kHz 滤波器的直流侧 EMI 结果如图 17 所示。图 17 中直流侧超出电磁兼容标准的几处仍然是由于电源的干扰造成的,而逆变器所产生的电磁干扰通过 RPWM 以及加入的滤波器已经得到了有效的抑制,逆变器的直流侧基本满足相应的电磁兼容标准。

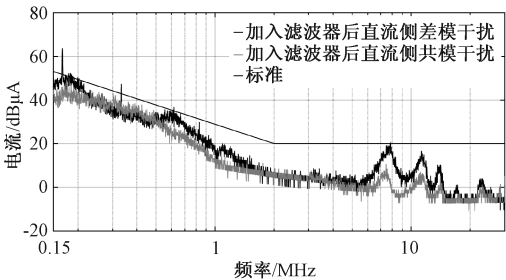


图 17 采用 RPWM 下加入滤波器后直流侧 EMI

Fig. 17 DC side EMI after inserting filter using RPWM

4 结论

应用宽禁带电力电子器件在给变流器带来效率

和控制性能改善的同时,还会给系统电磁干扰方面带来更多的挑战。开关频率提高是造成 EMI 更多挑战的一个原因,本文对比了 SiC 逆变器在不同开关频率下直流侧的 EMI 情况,得出以下结论:

(1)使用 SiC 逆变器可以带来开关频率的提升,但是随着开关频率的提升,逆变器直流侧产生的 EMI 也有所增加。主要原因是因为 EMI 在高开关频率下更加集中,从而带来更高的 EMI 峰值,尤其在中低频范围比较明显。由于原始噪声的幅值增加,按照较低开关频率设计的 EMI 滤波器将难以满足高开关频率下的 EMI 抑制需要,需要在参数和体积重量上有所增加。

(2)通过 RPWM 扩频方法,可以实现对 EMI 峰值分布的均衡化,使 EMI 降低。利用 RPWM 的方法,在保证平均开关频率与高开关频率一致的前提下,可以降低逆变器直流侧 EMI,有效应对高开关频率下 EMI 滤波器体积增大的挑战。

参考文献 (References):

- [1] Elasser A, Chow T P. Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90 (6): 969-986.
- [2] Millán J, Godignon P, Perpiñà X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (5): 2155-2163.
- [3] 段卓琳, 范涛, 张栋, 等 (Duan Zhuolin, Fan Tao, Zhang Dong, et al.). 全 SiC 三相逆变器传导电磁干扰建模与预测 (Modeling and prediction of electromagnetic interference in whole SiC three phase inverters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of electrical Engineering and energy) 2018, 37 (1): 1-7.
- [4] Jiang D, Wang F, Xue J. 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.
- [5] Luo F, Wang S, Wang F, et al. Analysis of CM volt-second influence on CM inductor saturation and design for input emi filters in three-phase DC-fed motor drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (7): 1905-1914.
- [6] Han D, Morris C T, Lee W, et al. Comparison between output CM chokes for SiC drive operating at 20-and 200-kHz switching frequencies [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 (3): 2178-2188.
- [7] Singh A, Mallik A, Khaligh A. A comprehensive design

- and optimization of the DM EMI filter in a Boost PFC converter [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54 (3): 2023-2031.
- [8] Boillat D O, Krismer F, Kolar J W. EMI filter volume minimization of a three-phase, three-level T-type PWM converter system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32 (4): 2473-2480.
- [9] Wang Shuo. Characterization and cancellation of high-frequency parasitics for EMI filters and noise separators in power electronics applications [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [10] 张姣, 陈文洁, 张斌, 等 (Zhang Jiao, Chen Wenjie, Zhang Bin, et al.). 非隔离型逆变器直流侧电磁干扰滤波器研究 (DC side EMI filter analysis in transformer-less inverter) [J]. *电工技术学报* (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (S2): 107-113.
- [11] Li H, Liu Y, Lu J, et al. Suppressing EMI in power converters via chaotic SPWM control based on spectrum analysis approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61 (11): 6128-6137.
- [12] Trzynadlowski A M, Wang Z, Nagashima J M, et al. Comparative investigation of PWM techniques for a new drive for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 39 (5): 1396-1403.
- [13] Kirlin R L, Lascu C, Trzynadlowski A M. Shaping the noise spectrum in power electronic converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58 (7): 2780-2788.

DC side EMI filter analysis based on silicon carbide inverter under different switching frequencies

ZHANG Ye-chi¹, JIANG Dong¹, YANG Shi-rong²

- (1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: EMI generated by inverters in operation can be effectively suppressed by adding a filter in the circuit. The Silicon Carbide (SiC) inverters can work at a higher switching frequency than the ordinary silicon inverter which will deteriorate the EMI generated by the inverters. The DC side EMI of the SiC inverter is compared at different switching frequencies, 10kHz and 40kHz, and corresponding EMI filters based on the principle of insertion loss and impedance matching are analyzed. For the switching frequency of 40kHz, in addition to adding the EMI filter, the random pulse width modulation (RPWM) is used to reduce the EMI on the DC side. In combination with the two methods of changing the modulation method and adding the filter, the DC side EMI of inverter operates at 40kHz switching frequency can fulfill the electromagnetic interference standard.

Key words: SiC; EMI filter; switching frequency; RPWM