

# 基于Si和SiC器件的逆变器系统性能对比研究

马保慧<sup>1,2</sup>

(1.天水电气传动研究所有限责任公司,甘肃天水 741020;  
2.大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室,甘肃天水 741020)

**摘要:**在电气传动和可再生能源等设备中,逆变器是核心部分,然而传统逆变器系统多采用Si器件,存在功率损耗高、效率低等不足。为解决此问题,将SiC拓展至逆变器中,构建了基于Si和SiC的两电平、三电平逆变器系统,并对此系统分别在功率损耗、效率、器件结温、运行费用和预估投资收益等方面进行了对比研究。结果表明,在功率损耗、效率、结温方面,SiC逆变器系统明显优于Si逆变器系统;SiC逆变器系统虽初始投资较高,但长远的运行费用和收益均优于Si逆变器系统。

**关键词:**逆变器系统;碳化硅;效率

**中图分类号:**TM464;TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.20170801

## Comparison Analysis for Inverter System Based on Si and SiC Power Devices

MA Baohui<sup>1,2</sup>

(1.Tianshui Electric Drive Research Institute Co., Ltd., Tianshui 741020, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741020, Gansu, China)

**Abstract:** In the equipment of electric drive and regenerative energy sources, inverter system is a crucial part of them. However, conventional inverter system use Si devices usually, there are high power consumption and low efficiency. In order to solve these problems, SiC devices would be expanded into the inverter, they were constructed of two-level and three-level inverter system based on Si and SiC, the system had carried on the comparison research in power consumption, efficiency, device junction temperature, operation cost and estimated investment returns and so on. Results show that in the power consumption, efficiency and junction temperature, SiC inverter system is obviously better than the Si inverter system; on the initial investment, SiC inverter system is higher, but under the long-term operation costs and benefits are better than Si inverter system.

**Key words:** inverter system; silicon carbide; efficiency

在现代工业快速发展的今天,逆变器已成为电力电子变换器的核心拓扑,被广泛应用于交流传动、新能源等领域。效率是考核该系统是否节能的一个重要指标,然而传统逆变器系统多采用Si功率开关器件,从而导致系统存在效率低、开关频率不高和滤波电感体积较大等问题<sup>[1-2]</sup>。

SiC功率器件以其开关频率高、开关损耗小和耐高温等优良特性而备受青睐<sup>[3-4]</sup>。自2011年,美国Cree公司推出第一代SiC MOSFET, SiC功率器件便被广泛应用于各种变换器中。文献[5]

研制了SiC逆变器样机,功率密度达60 kW/L;文献[6]将SiC功率器件应用于单级式光伏逆变器中;文献[7]设计了基于SiC器件的电机驱动器。文献[6-7]利用SiC提高了开关频率,降低了装置体积,但并未对基于Si和SiC的逆变器系统进行定量比较。

本文以基于Si和SiC的两电平型、二极管钳位NPC1型和T型NPC2型三电平逆变器为研究对象,对2种开关器件的逆变器系统功率损耗、效率、器件结温、运行费用和预估投资收

**基金项目:**大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室基金项目(SKLLDJ022016003)

**作者简介:**马保慧(1980-),男,硕士,正高,Email:mabh8066@163.com

益等方面进行了对比研究。结果表明,在上述方面, SiC 逆变器系统均明显优于 Si 逆变器系统,但 SiC 逆变器系统初始投资会稍大,随着加工成本的降低和成品率的提高,初始投资成本有望得到缓解。

## 1 逆变器系统性能对比分析

### 1.1 拓扑电路

针对两电平、三电平逆变器系统,分别给出了两电平型和二极管钳位型及 T 型三电平电路,如图 1~图 3 所示。为了便于分析,三相系统中选用一相作为分析对象。在使用 SiC 器件的例子中,内嵌的二极管将用其它器件代替。

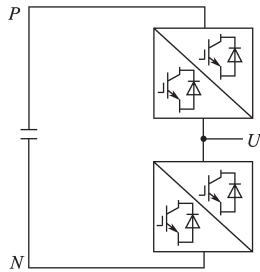


图1 两电平拓扑

Fig.1 The topology of 2-level solution

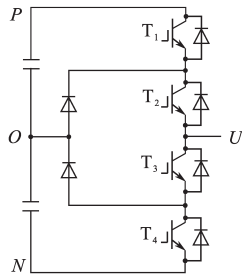


图2 三电平 NPC1 拓扑

Fig.2 The topology of 3-level NPC1 solution

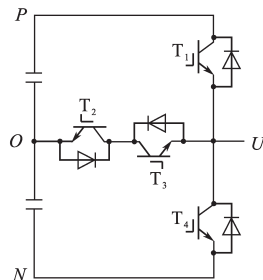


图3 三电平 NPC2 拓扑

Fig.3 The topology of 3-level NPC2 solution

两电平和三电平系统的主要不同是三电平增加了 1 个输出电平,在同样的开关频率时,可以降低输出电压和电流的纹波,降低功率器件的耐压值。在不增加开关器件损耗的条件下,三电平拓扑可以减小设备或硬件的体积,降低滤波器费

用,而且开关频率可以适当提高。对于 AC 400 V 逆变器系统,两电平的方案需要 1 200 V 的开关器件, NPC1 方案需用 650 V 开关器件, NPC2 方案  $T_1 \sim T_4$  需采用高速开关管, NPC1 方案降低了开关损耗却增加了导通损耗。

### 1.2 硬件设计工作量分析

基于 Si 和 SiC 器件的逆变器系统拓扑电路不同,所用功率器件、控制器和驱动电路也不同。对于 Si-IGBT 三电平拓扑,由于需要更多数量的开关器件,会明显增加主电路、驱动电路及系统结构设计等的设计工作量,而且过多的半导体器件会导致失效率(FIT)增加,可靠性也会降低。如果采用 SiC 的两电平解决方案,在不增加驱动电路工作量前提下,效率比三电平 Si 方案更高。

### 1.3 功率损耗和效率分析

对于图 1~图 3 所示的拓扑,利用英飞凌 IP-OSIM 损耗计算工具,输入数据进行仿真计算。相关数据可以从其选型手册的数据表中获得,在开关频率等参数确定的情况下,计算功率器件总的功率损耗,同时计算并联二极管的损耗,获得的仿真数据如表 1 所列。

表 1 不同方案的数据汇总表  
Tab.1 Data summary table of different solution

拓扑	两电平	三电平 NPC1	三电平 NPC2	两电平	两电平
电子开关 Switch	Si	Si	Si	Si	SiC
二极管 Diode	Si	Si	Si	SiC	SiC
效率/% (85%负载)	95.3	96	96	95.7	97.8
结温/ $^{\circ}\text{C}$ (100%负载)	145	103	121	143	106
开关频率/kHz	12	36	36	12	72
方案	FF450-12ME4	F3L300R-07PE4	F3L400R-12PT4_B26	原型	虚拟原型

在 3 种方案中,假设铝散热器的特性是一样的,在 85% 负载时测定效率,结温 ( $T_{vj.op}$ ) 是按照最大负载时测定。由于最大允许结温的限制,两电方案中 Si-IGBT 的开关频率设置为 12 kHz。由表 1 的数据可以看出, Si 三电方案在效率和结温上性能较优,开关频率可达 36 kHz,降低了噪音,提高了效率。对于高效逆变器系统,现阶段的 Si 三电方案是逆变技术最具发展潜力的方案,在后续的分析中以该方案作参考。全 SiC 两电方案中,效率高于 Si 三电方案,器件结温两者相当,输出电感保持和 Si 三电方案一样,为获得和 Si 三电同样的纹波电流指标,器件开关频率需翻倍。

以250 kW逆变器为例,各种方案的效率和输出功率的曲线如图4所示。

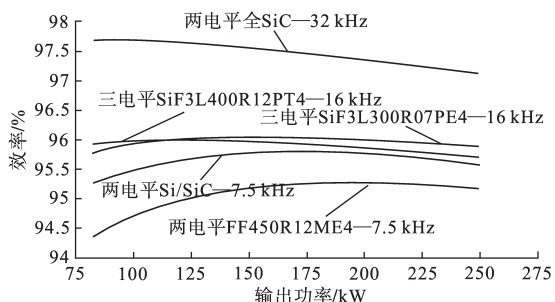


图4 输出功率和效率关系图

Fig.4 Efficiency as a function of output power

图4中,最下面的曲线是全Si两电平方案,方案中由于器件的功耗限制了工作频率,整机最大效率为95.3%。用反向恢复特性非常好的SiC二极管代替Si二极管,在相同的频率时系统效率可以提高0.5%,几乎达到Si器件三电平方案的水平。因此,只要简单替换和优化功率模块和二极管,不改变控制策略,就可以达到提高效率的效果,这是一种对Si两电平系统进行快速改进以提高效率的较优方案。

在85%的负荷时,Si三电平方案效率可达96%,也是Si逆变器系统最高的效率,且不受输出功率的影响,效率近乎常数。5种方案中最优方案为SiC两电平方案,系统损耗降低显著,器件结温低,效率可达97.6%,在低功率输出时,器件的单极性特性也提高了效率,特性明显优于Si方案。

图5所示为5种方案能耗图。图5中都是以Si器件三电平方案的功耗作参考的相对功率损耗。在功率损耗方面,Si三电平方案优于Si两电平方案,SiC两电平方案更优于所有Si方案,逆变器总功耗降低超过40%,间接减小了系统感性原件损耗,性能极其优越。

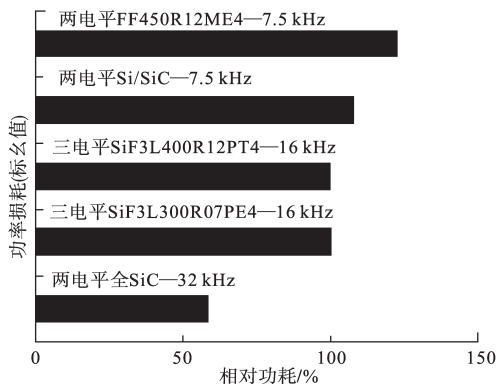


图5 不同方案的相对能耗图

Fig.5 Power losses for the different solutions

## 2 逆变器系统运行费用分析

### 2.1 基本思路

提升逆变器系统的效率有很多方法,最直接可观的就是降低功耗。SiC器件提供了一种理想的解决方案,它不但具有极低的导通损耗,而且在超高频率时,可以维持很好的电气性能。例如从基于Si器件的三电平方案改为基于SiC的两电平方案,效率可以从96%提高到97.6%,功耗降低可达40%。由此可见,使用快速SiC器件,可以大幅度提高开关频率,降低系统成本,提高系统效率,同时会大幅降低前级和后级滤波电路中磁性元件的成本。

以NPC2拓扑结构为例,对逆变单元进行器件和拓扑优化的过程如图6所示(图6中只给出了单相示意)。传统拓扑中,主开关器件选用高速3模块一体的80 A/1 200 V Si-IGBT,每个IGBT反并联1 200 V Si-FWD二极管,采用600 V Si快速二极管和Si-IGBT实现逆变器中性端。在图6逆变单元优化A步骤中,为了提高开关频率 $f_{sw}$ ,将拓扑I中的1 200 V Si-IGBT用同耐压等级的SiC-IGBT器件代替。

替代后,在 $f_{sw}=36$  kHz状态下,SiC-IGBT可以输出额定电流 $I_n=45$  A。3倍频率后,在保持同等大小电流的状态下,交流并网电感从 $L_{AC}=2.7$  mH减小到 $L_{AC}=0.9$  mH,电感值减少到原来的1/3,体积将会缩小3/5,变得更小更轻。

在逆变器运行时,通常为获得单管SiC-IGBT的常闭特性,需要和低压P沟道MOSFET串联,此方案能够确保在门极断电或短路时系统的运行安全。通常逆变器系统需要开发一个门极驱动芯片来控制IGBT/MOSFET级联器件。

在B步骤中,为了进一步降低系统成本,省略了IGBT中性点支路,转化为两电平逆变器拓扑,为了保证同样的电流纹波( $L_{AC}=0.9$  mH),频率需提高到 $f_{sw}=72$  kHz,IGBT的电流将达到60 A,门极驱动单元数量会减少,门极控制的复杂度会降低。

各优化方案参数如表2所列,SiC器件在提高开关频率、降低滤波电感方面优势明显,它既能降低逆变器系统总的损耗,又能提高系统的工作效率,这使得整个逆变器系统通过改变功率器件的优化成为可能。

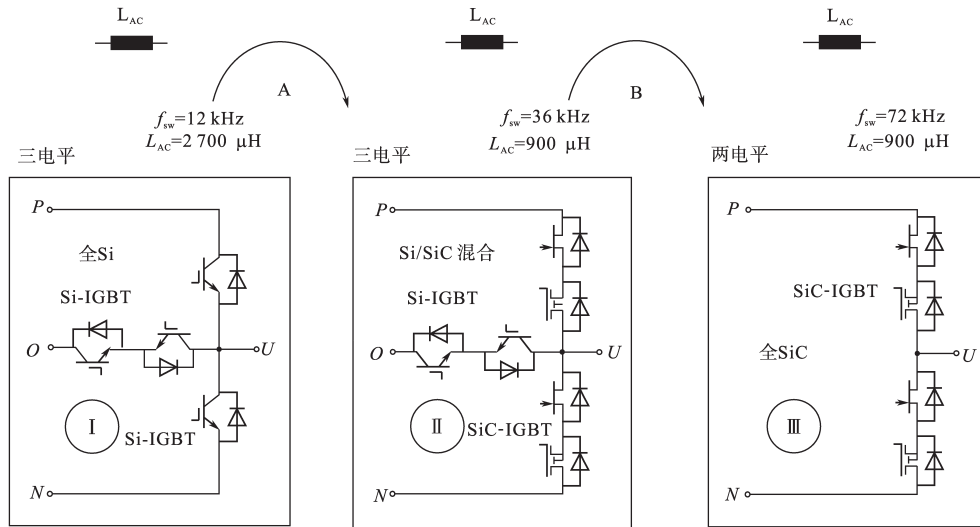


图6 逆变单元优化步骤

Fig.6 Optimizing steps of inverter unit

表2 优化方案参数汇总

Tab.2 Summarizes of the different solutions

方案	I	II	III
拓扑	三电平 NPC2	三电平 NPC2	两电平
模块	全 Si	全 SiC	全 SiC
快恢复半导体	1 200 V 80 A + 600 V Diode	1 200 V 45 A + 600 V Diode	1 200 V/60 A
$f_{s,max}/kHz$	12	36	72
电感/mH	2.7	0.9	0.9
$T_{vj,op}/^{\circ}C$	150	120	130

### 2.2 逆变器系统的总费用

在考虑系统冗余和过载全覆盖情况下,逆变器系统通常工作在非全载状态下。每周工作 7 d, 每天 24 h 85% 负荷运行是标准的工作状态。

在执行不同的电价时,功耗年运行费用如图 7 所示,可以看出,逆变器系统效率从 94% 提高到 98%, 运行费用降低超过 50%。

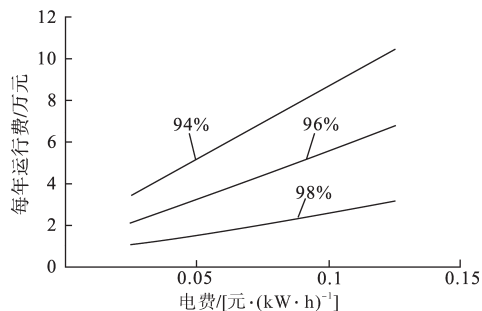


图7 不同效率时的年运行费

Fig.7 Electricity costs per year at different efficiencies

为了评估基于 SiC 器件两电平方案的经济效益,需要考虑逆变器系统全生命周期的费用。对于各种方案,假设维护费用是相同的,在运行期间与费用有关的就剩下初始投资和功耗费用,这些也是所有费用的主要部分。初始投资包括逆

变本体(功率模块、磁性元件和散热器)和其它系统部件,不同的方案包含各自不同的功率模块和驱动。

随运行周期而变化的费用如图 8 所示。图 8 中, Si 两电平和三电平方案开关频率为 12 kHz, 而 SiC 两电平方案开关频率为 36 kHz。虽然 SiC 开关器件的功率单元价格比三电平方案的高,但系统效益是最优的。

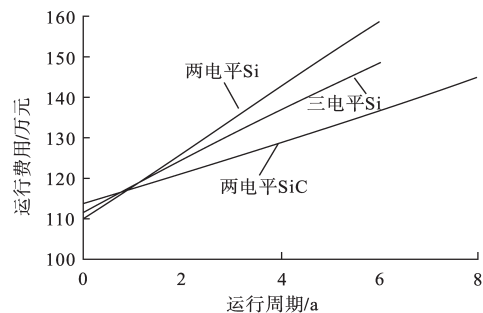


图8 不同方案的运行费用

Fig.8 Total cost of different solutions

逆变器系统的初始投资费用取决于技术方案的选择。在重点考虑效率时,这些可以忽略。从图 8 中可以看出,和 Si 两电平进行比较,三电平拓扑的节能效果最佳,由于显著降低了功率损耗,运营公司会选择 SiC 两电平方案。图 9 所示是 5 a 后的收益对比图。图 9 中以 Si 器件方案作为参考,依据所损耗电费和所采用的技术,系统初始投资的收益是非常显著的。所以采用 SiC 器件对系统费用的降低起到非常大的贡献。

(下转第 48 页)



从算法上有别于传统的INC法和P&Q法,兼顾了精确性和速度,为MPPT的研究提出了新的思路,在光伏领域有着良好的应用前景。

参考文献

[1] Schoeman J J, Wyk J D. A Simplified Maximal Power Controller for Terrestrial Photovoltaic Panel Arrays [C]//Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 1982:361-367.  
 [2] 胥芳,张任,吴乐彬,等. 自适应BP神经网络在光伏MPPT中的应用[J]. 太阳能学报, 2012,33(3): 468-472.  
 [3] Alajmi B N, Ahmed K H, Finney S J, et al. Fuzzy-logic-control Approach of a Modified Hill-climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1022-1030.  
 [4] Esram T, Chapman P L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion EC, 2007, 22(2): 439.  
 [5] Hussein K H, Muta I, Hoshino T, et al. Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions [C]//Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-IET, 1995(1): 59-64.  
 [6] 周习祥,李加升. 基于自适应占空比扰动算法的光伏发电

系统MPPT控制[J]. 电气传动, 2012, 42(8):24-28.  
 [7] Khaehintung N, Wiangtong T, Sirisuk P. FPGA Implementation of MPPT Using Variable Step-size P&O Algorithm for PV Applications [C]//International Symposium on. Communications and Information Technologies, 2007, 84(6): 212-215.  
 [8] Liu F, Duan S, Liu F, et al. A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2622-2628.  
 [9] Xu Z, Yang P, Zhou D, et al. An Improved Variable Step Size MPPT Algorithm Based on INC [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(2): 487-496.  
 [10] 高嵩,罗浩,何宁,等. 基于MPPT的新型变步长增量电导法的研究[J]. 电气传动, 2015, 45(2): 16-19.  
 [11] 郭明明,沈锦飞. 基于改进变步长电导增量法光伏阵列MPPT研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 14-16.  
 [12] 郑颖楠,王俊平,刘旭圆. 基于阻抗匹配误差调节的光伏发电MPPT方法[J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1441-1449.  
 [13] Djmila Rekiou, Ernest Matagne, 瑞奇奥,等. 光伏发电系统的优化建模、仿真和控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.

收稿日期:2016-06-16

修改稿日期:2016-12-29

(上接第6页)

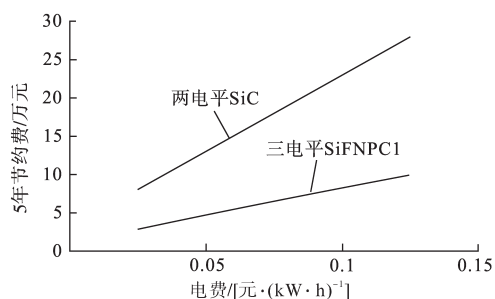


图9 不同方案的5a节约费用

Fig.9 Savings after five years of different solutions

3 结论

针对逆变器系统采用传统Si器件导致的功率损耗高、效率低等不足,将SiC拓展至逆变器系统中,并以两电平型、二极管钳位型和T型三电平型拓扑为研究对象,对基于Si和SiC的逆变器系统在功率损耗、效率、器件结温、运行费用和预估投资收益等方面进行了对比研究。结果表明:三电平方案可以获得很好的节能效果和很高的系统效率,但在功率损耗、效率、结温方面, SiC逆变器系统明显优于Si逆变器系统。

尽管SiC器件的价格高于Si器件,但是SiC

技术方案在降低功耗方面优势明显,且能显著提高系统效率。在未来5 a运行中还可以节省9%的初始投资。可以看出, SiC逆变器系统的运行费用和收益均优于Si逆变器系统。

参考文献

[1] 刘志立. SiC功率半导体器件的优势及发展前景[J]. 电力电子技术, 2015, 45(1): 77-80.  
 [2] 马保慧. 用于太阳能和风力发电系统并网LCL滤波器分析和设计[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(3): 23-26.  
 [3] 崔晓英. SiC半导体材料和工艺的发展状况[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(4): 58-62.  
 [4] 赵正平. SiC新一代电力电子器件的进展[J]. 半导体技术, 2013, 38(2): 81-88.  
 [5] 吴琪乐. 功率密度高达60 kW/L的SiC逆变器[J]. 半导体信息, 2013(1): 18-19.  
 [6] 王剑, 黄海. 在单级式光伏逆变器中应用1 700 V碳化硅开关器件的效益研究[J]. 电力电子, 2011(4): 19-22.  
 [7] 马保慧. 基于SiC模块的太阳能逆变系统优点分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(9): 239-241.  
 [8] 章亦宾, 郑琼林. 用于电动机驱动的SiC逆变器模块[J]. 电力电子, 2004, 2(4): 53-54.

收稿日期:2016-08-09

修改稿日期:2017-01-13