

# 基于固态变压器的大功率逆变技术研究

宋飞宇<sup>1</sup> 张海燕<sup>1</sup> 祁明龙<sup>2</sup> 郭建<sup>1</sup> 孙忠鸣<sup>1</sup>

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 上海电气富士电机电气技术有限公司, 上海 200070)

**摘要:** 固态变压器结合了电力电子变换技术和高频电能变换技术, 实现将电能从一种电力特征转变为另一种电力特征。逆变器作为固态变压器中能量转换的装置, 技术已经很成熟, 但是在大功率逆变器运行的设计上还有许多问题有待解决。逆变器并联运行控制技术是实现模块化、高可靠性冗余逆变电源系统的基础。分析了逆变器并联运行时环流的产生原因, 总结了目前已有的逆变器并联方案。又根据组合式逆变器运行原理, 用仿真实验验证了三相组合式逆变器用于固态变压器的优越性和可行性。

**关键词:** 固态变压器; 大功率逆变技术; 并联逆变器; 组合式逆变器

**Abstract:** Solid state transformer combines power electronic conversion technology and high-frequency power conversion technology to realize the transformation of electric energy from one kind of electric power to another. As a power conversion device in solid state transformer, the technology of inverter has been very mature, but there are many problems still to be solved in the operation design of high-power inverter. The parallel operation control technology of inverter is the basis for the realization of modular and redundant inverter power supply system with high reliability. The causes of the circulating current during the parallel operation of inverter are analyzed, and the existing parallel schemes are summarized. According to the operating principle of the combined inverter, the superiority and feasibility is verified by the simulation experiments that the three-phase combined inverter can be used in solid state transformer.

**Key words:** solid state transformer; high-power inverter; parallel inverter; modular inverter

中图分类号: TM41 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0018-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.004

## 0 固态变压器简介

固态变压器(solid state transformer, SST), 也叫电力电子变压器, 是一种以电力电子变换器为基础的智能新型变压器, 能代替传统电力变压器实现电压等级变换、能量传递和电气隔离的功能。固态变压器体积小、重量轻, 还能方便地控制输入输出的电流电压, 实现输入的功率因数调整和输出的变频调压等功能。国内外众多学者都对固态变压器展开了研究, 并取得了不少成果。

固态变压器通过高频开关将变压器原边的工频信号转换成高频信号, 耦合到隔离变压器的副边, 再将高频信号转换成工频信号; 在此过程中, 应用相应的控制策略来完成固态变压器的转换工作, 将电能从一种频率和波形转换成另一种频率和波形。固态变压器在高频信号下工作, 其体积和重量将随频率增加而减小, 有助于实现小型化、模块化, 并提高整体的利用效率。

固态变压器工作拓扑如图1所示, 该固态变压器由AC/DC整流部分、DC/DC高频降压变换和DC/AC逆变部分组成。固态变压器中第3级输出级其实为逆变环节, 可当做一个逆变器来看待。由于固态变压器输出功率可能会很高, 所以对逆变环节的要求也比较高。而逆变器的容量问题是制约逆变器发展的一项关键技术。

## 1 三相全桥逆变器并联技术

采用并联技术增大固态变压器输出功率, 需将多台逆变器并联运行, 使各个电源模块共同承担系统功率, 平均到每个功率器件上所承受的电流应力减少, 从而在整体上提高输出功率。设计时可以使每台逆变器容量减小, 相应的体积和重量也会减少。这样在实现模块化的基础上, 又降低了整个变压器的生产和维护成本。因此, 逆变器模块化供电是固态变压器系统实现高可靠性、高容量和高可扩展性的基础。

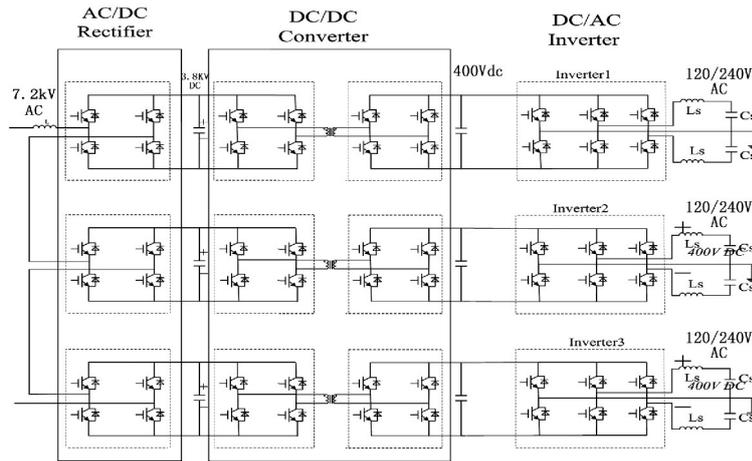


图1 固态变压器工作拓扑

### 1.1 逆变器并联运行存在的问题

下面以并联两台单相逆变器为研究对象对逆变器并联进行分析。图2为两台逆变器并联运行的等效电路。其中 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 分别为两台逆变器的未经滤波输出的正弦电压波的基波分量； $\dot{U}_{11}$ 和 $\dot{U}_{12}$ 分别为两台逆变器输出的正弦电压； $\dot{U}_o$ 为并联后输出的实际电压； $L_1$ 、 $L_2$ 和 $C_1$ 、 $C_2$ 分别为两台逆变器的滤波电感电容； $r_{L1}$ 和 $r_{L2}$ 表示滤波电感内阻、线路阻抗； $r_1$ 和 $r_2$ 则表示连线阻抗； $Z_o$ 为负载。一般忽略线路阻抗（因其非常短）。

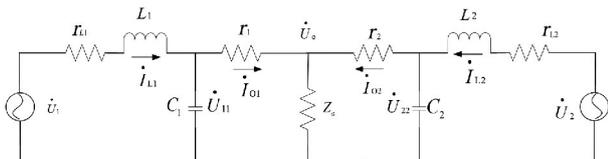


图2 两台逆变器并联运行等效电路

对电路进行分析和公式推导，可得出如下关系：

若两台逆变器的参数相同，即 $L_1 = L_2 = L$ 和 $C_1 = C_2 = C$ 时，有当 $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ 时， $\dot{i}_{L1} = \dot{i}_{L2} = (I_{o2}^* / 2) + j\omega C \cdot \dot{U}_o$ ，此时两台逆变器的功率均分；否则 $\dot{U}_1 \neq \dot{U}_2$ 时，逆变器负载分担的功率不同，此时的 $\dot{i}_{L1}$ 和 $\dot{i}_{L2}$ 由两部分组成：环流成分和负载电流成分。

### 1.2 环流及常用均流方法

均流（负载均分）技术和逆变器间环流的抑制，制约着并联逆变器的发展。而对于逆变器的并联均流问题，已经有许多不同的方案被提出。常见并联控制方案的分类总结如表1所示。这些均流方法都在一定程度上增加了控制策略的复杂程度。固态变压器整体系统的控制本身就很复杂，因此不宜再加

上复杂的均流控制策略。

表1 常用并联控制方法汇总表

| 均流开环控制<br>(外特性下垂法)       | 均流闭环控制<br>(电流跟踪控制) |                                     |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 基本电压下垂法<br>采用非线性增益的电压下垂法 | 平均值均流法             | 基本平均值均流<br>改进平均值均流                  |
| 基于功率均分的频率、电压下垂控制         | 峰值均流法<br>(主从控制法)   | 主从设置法(DM)<br>轮主均流法(RM)<br>自主均流法(AM) |

1) 外特性下垂法：一般通过调节各逆变器基准信号的幅值和相位，可实现各并联逆变器输出无功功率和有功功率的平衡。阻性输出阻抗时，

$$P = \frac{(E - U_{o1})}{R} U_{o1} \quad Q = -\frac{E U_{o1}}{R} \varphi$$

对上式全微分可得

$$\Delta P = \frac{U_{o1}}{R} \Delta E \quad \Delta Q \approx -\frac{U_{o1} E}{R} \Delta \varphi$$

式中： $P$ 为输出有功功率； $Q$ 为输出无功功率； $E \angle \varphi$ 为交流电源； $R$ 为逆变器等效输出阻抗； $U_{o1}$ 为输出电压。明显看出可以通过调节相位和幅值来实现功率输出的调节，进而实现并联模块的均流。并联系统中模块相对完全独立，易实现冗余系统，可提高系统的可靠性。目前大多数并联逆变系统采用此方法。

2) 平均值均流法：每台逆变器有电流反馈环、电压反馈环及外部均流环3个控制环。各逆变器输出电流的平均量通过均流总线产生一个公共电流参考量，公共参考电流和各逆变器实际输出电流之间的误差经均流控制器处理后作为参考电压的补偿信号，闭环调节使误差趋近于0，从而实现均流。由于

需要平均多个信号,模块间的信号线较多,易受干扰,并联控制电路也很复杂,也不适于远距离通讯。

3) 主从控制法是以电压型 PWM 逆变器(VCPI)作为主控制模块,用来控制整个逆变系统的输出电压,而N个电流型 PWM 逆变器(CCPI)通过跟踪给定电流来控制自身输出电流,分担系统的负载。主从并联易于设计和制作,但是功率分配中心或者主模块一旦出现故障,将导致整个系统无法正常工作。

## 2 组合式逆变器

### 2.1 组合式逆变器结构

组合式三相逆变器由3个单相全桥逆变器构成。3个单相逆变器的开关控制信号互差 $120^\circ$ ,三相输出电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 大小相等,相位相差 $120^\circ$ ,构成一个平衡对称的三相交流电源。每相之间相互独立,可当作单相逆变器来分析;并采用较为灵活的控制方案,可以三相独立控制,也可以统一控制。组合式三相逆变器主电路拓扑结构如图3所示。由A、B、C 3个单相逆变器组合而得,分别通过LC滤波器得到三相正弦电压。组合式三相逆变器具有良好的带不平衡负载能力和优良的电气性能。在相同功率条件下,六桥臂12个开关控制的三相逆变器,与三桥臂的三相逆变器相比,每个IGBT承担的电流低一半。

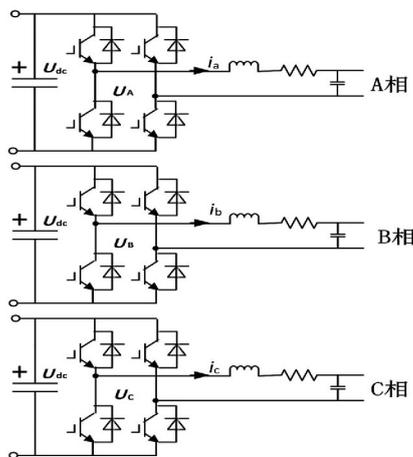


图3 组合式三相逆变器主电路拓扑结构

组合式三相逆变器工作原理和数学模型与三相逆变器类似,这里不再赘述。

### 2.2 组合式逆变器应用优点

在为固态变压器选择三相逆变电路的主电路拓扑时,一般需要考虑到整体控制难度、系统体积、模

块化程度及系统输出特性等因素。采用组合式拓扑结构如图3,在固态变压器系统中可以获得如下好处:

1) 各模块相互独立,在某一模块损坏时只需更换相应的H桥模块。

2) 由于是由3个单相逆变器组成的三相逆变器,所以在控制时可以参照单相逆变器的控制方案进行控制。不仅降低了分析难度,同时也降低了控制系统的复杂度。

3) 可以方便地实现三相四线制连接,增强了系统的带不平衡负载的能力。同时每相模块相互独立,既可以三相运行,也可以单相运行。

## 3 组合式三相全桥逆变器的仿真分析

首先利用Matlab中的电力电子模块建立系统模型。在这里,首先建立全桥结构的单相逆变器的仿真模型,然后组合成三相逆变器。再对逆变器进行组合式并联仿真。在仿真时通过改变负载参数,依次进行平衡负载和不平衡负载下的仿真实验,以验证系统的带不平衡负载的能力。最后通过对比试验结果,验证组合式逆变器在固态变压器里应用的合理性。

### 3.1 全桥逆变器仿真模型

所述结构的逆变器仿真参数,固态变压器直流输出端用直流电源代替。直流侧电源电压为500V,滤波电感;电容分别为 $L = 1.5 \text{ mH}$ 、 $C = 10 \text{ e} - 6 \text{ F}$ ;采用三相四线制,中性点直接接地。仿真模型如图4所示。

对称负载时: $R1 = R2 = R3 = 20 \Omega$ ;不对称负载时: $R1 = 15 \Omega$ , $R2 = R3 = 20 \Omega$ 。

### 3.2 对称负载下仿真结果

$R1 = R2 = R3 = 20 \Omega$ , $L1 = L2 = L3 = 1.5 \text{ mH}$ , $C1 = C2 = C3 = 10 \text{ e} - 6 \text{ F}$ , $V_{dc} = 500 \text{ V}$ 。

由图5和图6可以得出:输出电流和电压是完美正弦波,输出电流幅值在15V左右;输出电压基波频率50Hz,基波幅值302.8V;总谐波畸变率 $\text{THD} = 2.33\%$ ,与理论分析结果吻合。

### 3.3 不对称负载下仿真结果

$R1 = 15 \Omega$ , $R2 = R3 = 20 \Omega$ , $L1 = L2 = L3 = 1.5 \text{ mH}$ , $C1 = C2 = C3 = 10 \text{ e} - 6 \text{ F}$ , $V_{dc} = 500 \text{ V}$ 。

由图7、图8和图9可以看出:输出电流和电压

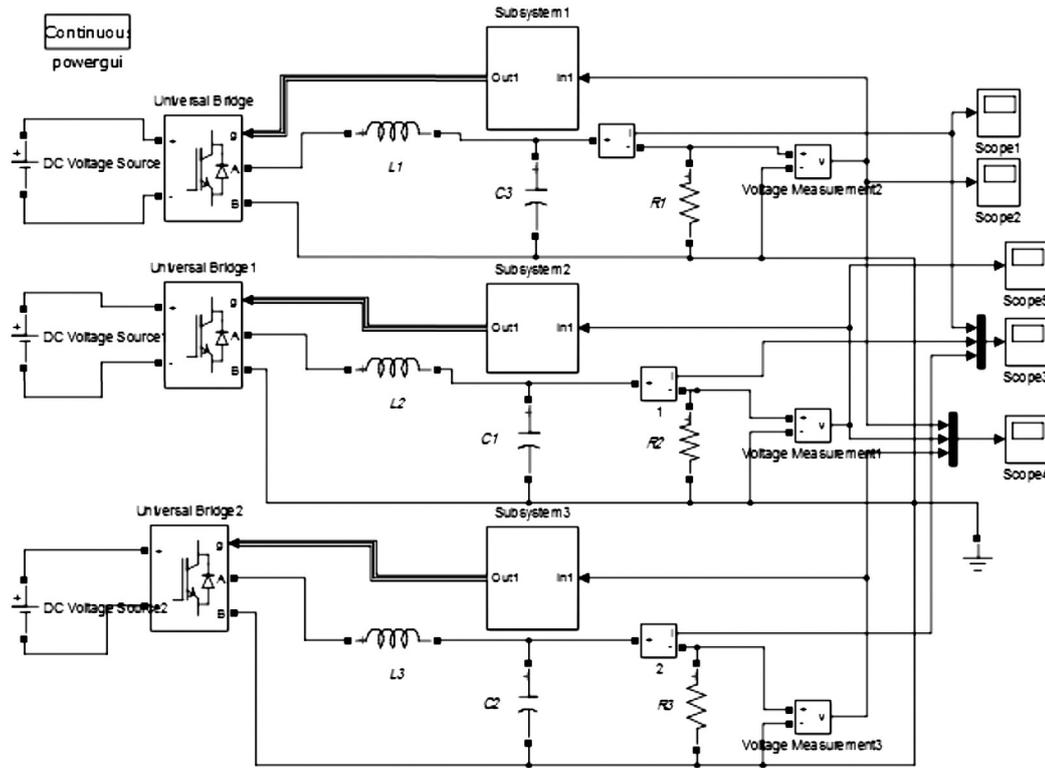


图 4 组合式逆变器仿真模型

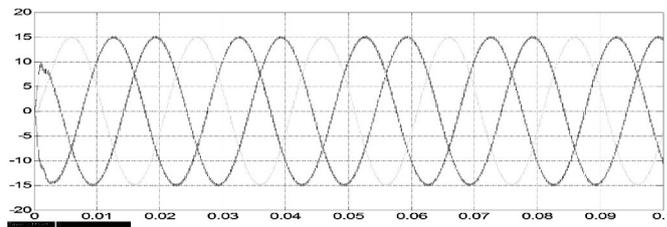


图 5 三相对称负载下仿真输出电流

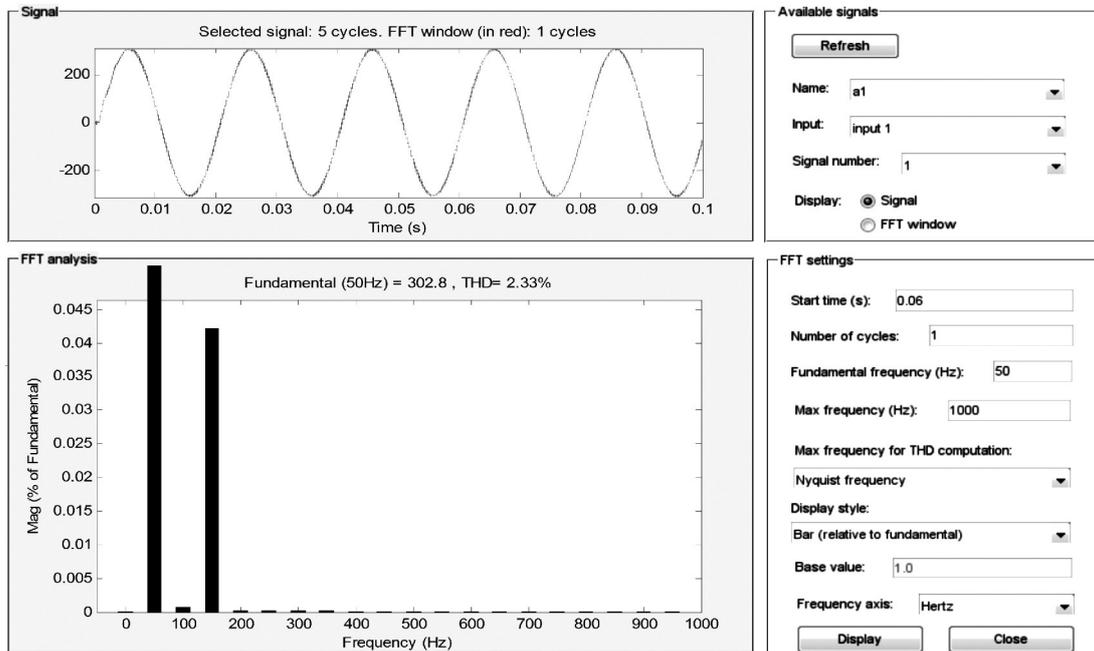


图 6 三相对称负载 A 相输出电压的傅里叶分析结果

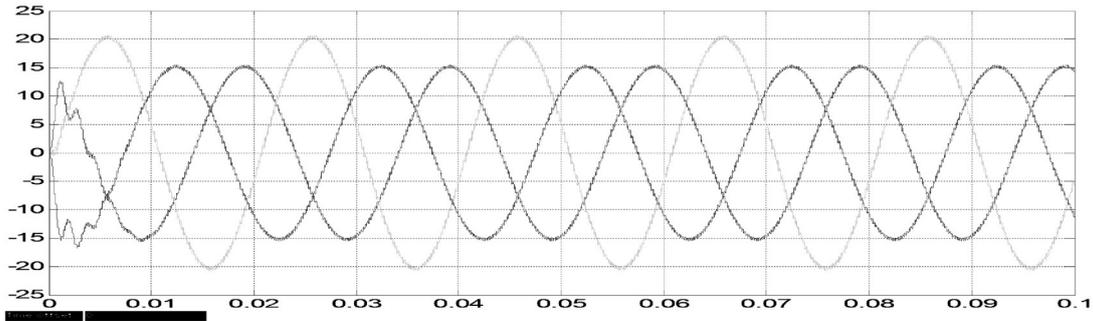


图 7 三相不对称负载下仿真输出电流波形

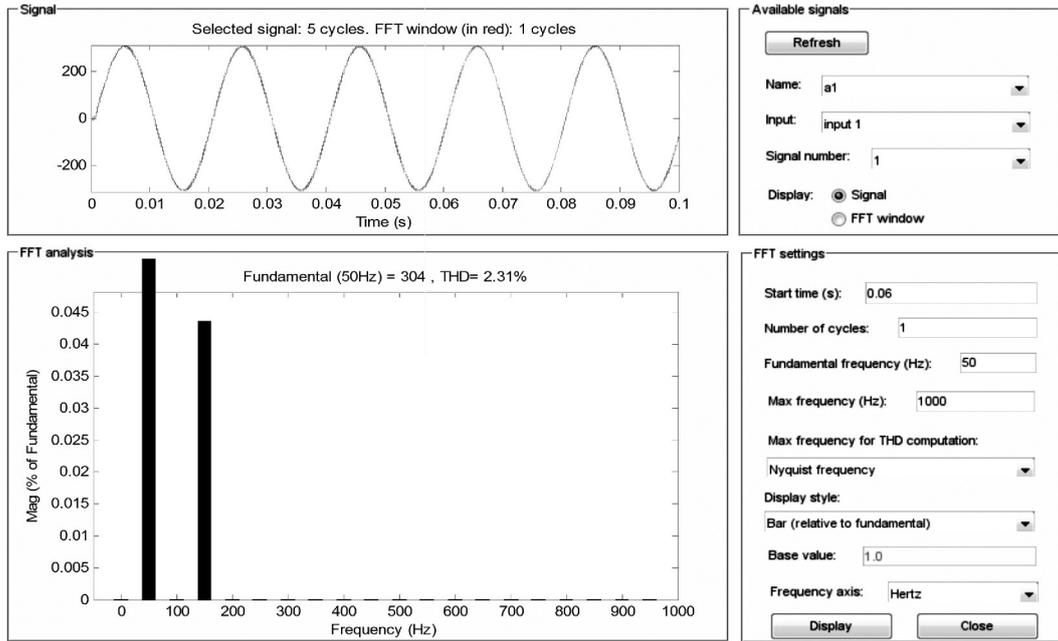


图 8 三相不对称负载 A 相输出电压的傅里叶分析结果

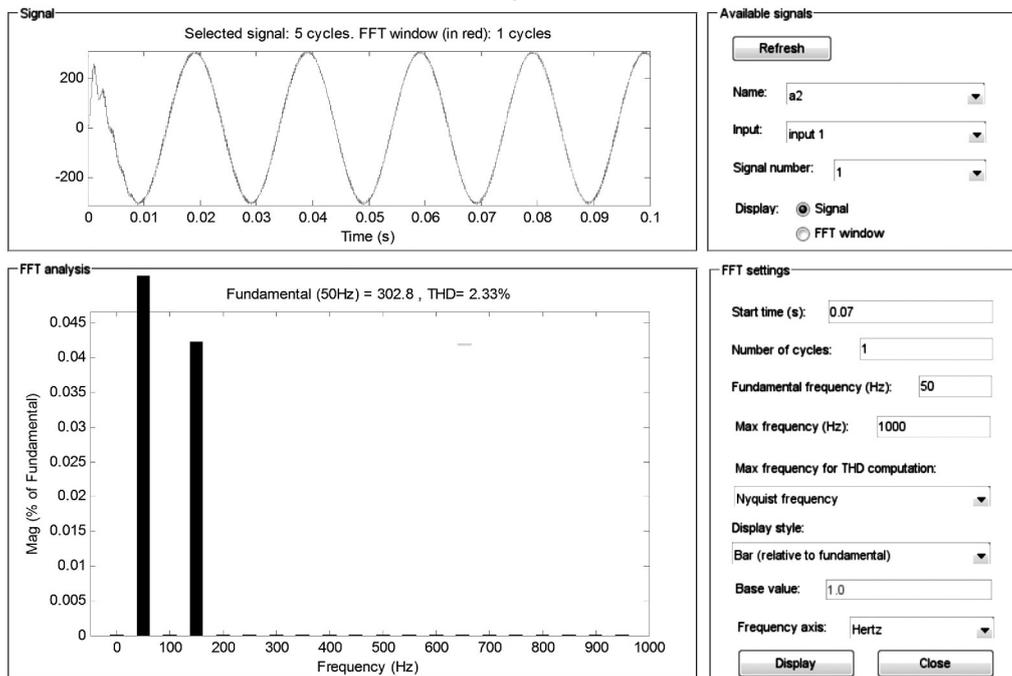


图 9 不对称负载下 B、C 相输出电压的傅里叶分析结果

是完美正弦波,但在不对称负载下 A、B、C 三相输出电压依然对称,而输出电流不对称;B、C 相输出电流幅值依然在 15 A 左右,而 A 相输出电流则幅值增大到 20 A。

输出电压基波频率 50 Hz,基波幅值 302.8 V(A 相为 304 V),总谐波畸变率 THD = 2.33% (A 相为 2.31%),与对称负载下仿真结果相差不大。

### 3.4 仿真结果分析

1) 从图 5 和图 7 对比可以看出,在负载不对称的情况下,整个逆变系统输出电流除了 A 相电流幅值增大外,另外两相并无明显变化,即周期和频率均无明显变化。

2) 从图 6 和图 8 对比可以看出,在负载不对称的情况下,整个逆变系统输出电压除了 A 相电压基波略微增大 1.2 V 外,另外两相基本无明显变化。

仿真结果表明,组合式逆变器在增大整体系统输出功率的同时,在应对负载不对称时有较好的电气性能。如应用在固态变压器上,不仅可以简化其逆变输出级的控制策略,也可增强其应对不对称负载的能力。

## 4 总结与展望

以固态变压器输出级作为研究对象,对比了两种提高逆变器容量的方法。在分析了逆变器并联有环流产生后,发现并联逆变器在固态变压器上应用的局限性;并在此基础上提出了组合式逆变器的应用优点。又对组合式三相逆变器在三相对称和不对称负载下进行仿真,验证其电气性能和应用在固态变压器上的可行性。最终发现由 3 个单相逆变器组合而成的三相逆变器在逆变器扩容方面有自己独特的效果,并且能扩展固态变压器带三相不对称负载的能力。

前面所做的工作中,只是完成了最基本的仿真实验工作。就逆变器扩容这一分支的研究工作还有许多工作要做。而且所完成的仿真实验中仍有许多工作要后续完成:1) 所做实验只是在阻性负载下进

行,后续还需要进行阻感负载的实验,用以检验本设计突出的带不平衡负载能力;2) 只对三相组合逆变器进行了仿真,后续需要对整个固态变压器系统进行仿真,并搭建实物实验平台。

### 参考文献

- [1] 毛承雄. 电子电力变压器 [M]. 北京: 中国电力出版社 2010.
- [2] 于玮, 徐德鸿. 基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 32 - 39.
- [3] 卢彦杰. 三相逆变器并联技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学 2011.
- [4] 杨志兵. 6 kVA 三相航空静止变流器的研制 [D]. 武汉: 华中科技大学 2012.
- [5] 何中一. PWM 逆变器的控制及并联运行控制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [6] 王建华, 刘磊, 张方华, 等. 组合式三相逆变器锁相控制策略 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 79 - 84.
- [7] 李慧斌. 多模块并联交流电源控制技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2012.
- [8] 华明. 三相逆变器冗余并联运行关键技术及应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学 2011.
- [9] 李立, 黄松柏, 汪洪亮. 基于电压/电流控制模式的组合式三相逆变器 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(2): 63 - 70.
- [10] 郑志曜, 孙钦斐, 王江波等. 组合式三相逆变器同步控制方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 146 - 151.
- [11] 李鹏程. 基于组合式逆变器并网发电的控制策略研究 [D]. 无锡: 江南大学 2011.
- [12] He W., Li Y. W., D. Bosnjak, et al. Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel - inverter - based Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234 - 246.

作者简介:

宋飞宇(1992), 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

(收稿日期: 2016 - 03 - 11)