

基于三相并网逆变器 SPWM 及 SVPWM 控制的仿真研究

邓松彬, 杨兆华

(佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528000)

摘 要: 对三相桥式并网逆变器采用了 SPWM 调制方式和 SVPWM 调制方式, 详细研究了 SPWM 调制方式和 SVPWM 调制方式。在 Matlab/Simulink 工作环境下给出了电路的仿真波形, 并对并网电流进行了谐波分析。仿真结果表明, 实现了并网电压与并网电流同相位和功率因数为 1, 证明了采用 SVPWM 调制方式得到的并网电流的谐波含量低于 SPWM 调制方式, 也说明了在并网电流要求较高的场合, SVPWM 控制比 SPWM 控制更具有优越性。

关键词: SPWM; SVPWM; 三相并网逆变器; 仿真

中图分类号: TM341

文献标志码: A

DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2022.07.010

近年来, 面对能源的枯竭问题, 太阳能、风能等清洁能源不断得到人们的重视, 而这些能源都需要通过并网逆变器来接入电网。目前使用最多的调制方法是正弦脉宽调制和空间矢量脉宽调制。现在逆变电路中较为普遍使用的调制技术是 SPWM, 而 SVPWM 可以被看作是 PWM 控制算法的优化, 它实际上是 SPWM 在空间上的一种拓展形式。空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术具有直流电压利用率高, 器件开关次数少、损耗低, 算法简单, 易于实现数字控制的特点, 因而得到广泛应用^[1]。

1 三相电压型桥式逆变电路

三相电压型桥式逆变电路模型如图 1 所示, 它由 6 个功率开关管组成, 同一桥臂上下 2 个开关是轮流导通和关断的, 如 Q1 和 Q2 互差 180°, 因此 Q1 和 Q2 不可能同时导通, 三相电压型逆变电路可以看作是 3 个半桥型的电路组合而成的。

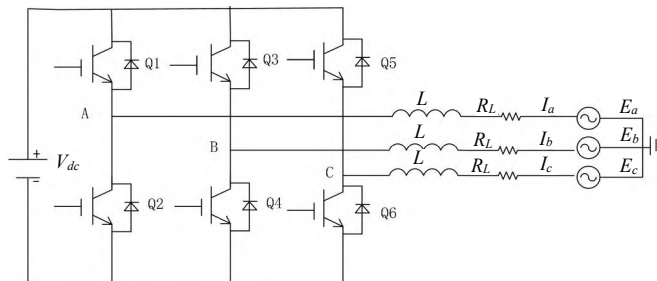


图 1 三相并网逆变器模型图

2 SPWM 算法实现

SPWM 调制法是以三角波或锯齿波作为载波, 以正弦波作为调制波的一种脉宽调制方法, 这里选用三角波作为载波, 如图 2 所示, 当调制信号 U_r 大于载波

信号 U_c 时, 输出的是高电平信号, 反之则输出低电平信号, 从而作为逆变桥的开关信号^[2]。

通过 SPWM 的输出波形, 可以很直观地发现其导通的占空比是先增大后再减小, 周期地发生变化, 这样, 与占空比不会发生改变的单位脉冲相比, SPWM 控制更加具有优越性^[3]。这里采用的是双极性 SPWM 调制方式, 可以通过改变正弦波的幅值来达到改变占空比的宽度。

因此脉宽是随着正弦波幅值变化而变化, 正弦波的幅值越大, 脉宽越大。SPWM 输出经过滤波后是正弦波。

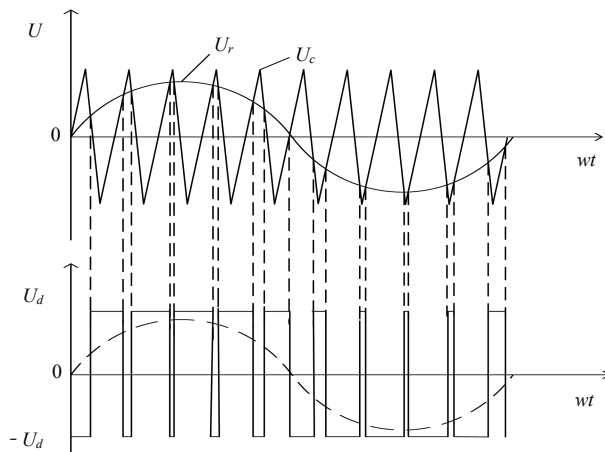


图 2 双极性 PWM 控制方式波形

3 三相并网逆变器采用 SPWM 算法的建模与仿真

仿真主要参数如下: 直流侧电压为 400 V, 交流侧电感为 5 mH, 交流侧电压峰值为 311 V, 频率为 50 Hz, 给定电流在 0.1 s 时从 40 A 变成 60 A。三相并网逆变器仿真模型如图 3 所示。

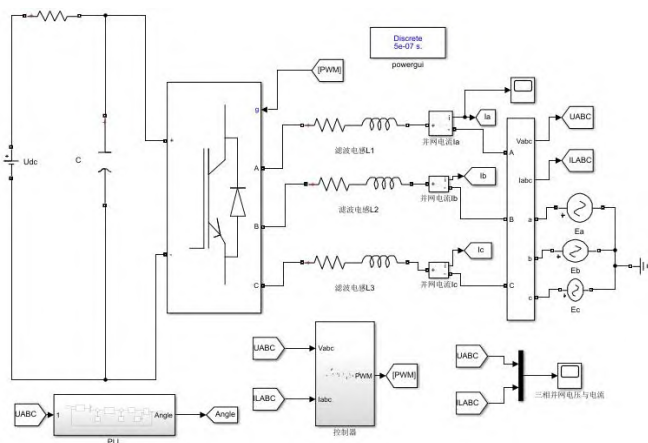


图3 三相并网逆变器仿真模型

对于并网型逆变器而言,其目的是使并网电压与并网电流实现同步,并使并网电流的畸变率小于5%。三相并网逆变器的控制框图1如图4所示。

从图4可知,首先将输出电压的相位用锁相环检测出实时相位后,再乘以 \sin 后得到的是幅值为1的单位正弦波,然后再乘以给定并网电流峰值就可以得到电流环的给定信号 I_{ref} 。电流互感器采集的网侧电流信号与 I_{ref} 的相比较后得到误差值,然后将误差值送入PI调节器,用于产生PWM脉冲的调制波信号,从而控制逆变桥的功率器件有规律地通断,以实现直流电变为交流电的功能。

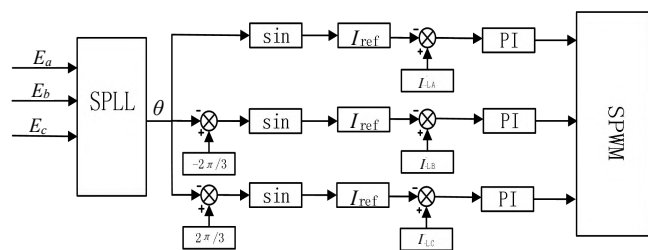


图4 三相并网逆变器的控制框图1

交流侧三相电流波形和交流侧三相电压电流波形分别如图5和图6所示。从图5和图6可知,在0.1s时,三相并网电流从40A突变到60A,系统达到稳定后,电流幅值稳定在60A左右,这与设定值非常接近,此时系统依然处于正常状态,说明电路的负反馈可靠性好。采用锁相环,可以看到电流波形与电压波形达到了同步,系统网侧功率因数为1。同时输出电流波形接近正弦,通过对并网电流进行4个周期进行采样分析,然后对其采用傅里叶分析。

交流侧三相电流40A FFT分析和交流侧三相电流60A FFT分析分别如图7和图8所示。从图7和图8可以得到,并网电流为40A时的畸变率为4.3%,并网电流为60A时的畸变率为0.65%,满足IEC的电能质量要求。

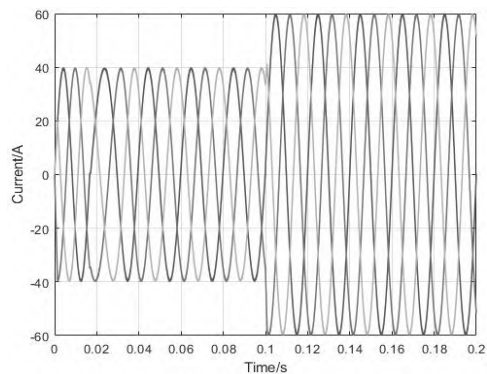


图5 交流侧三相电流波形

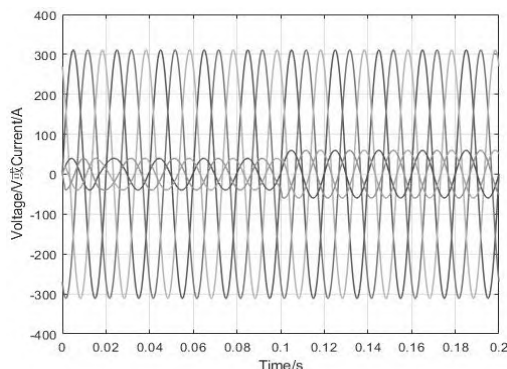


图6 交流侧三相电压电流波形

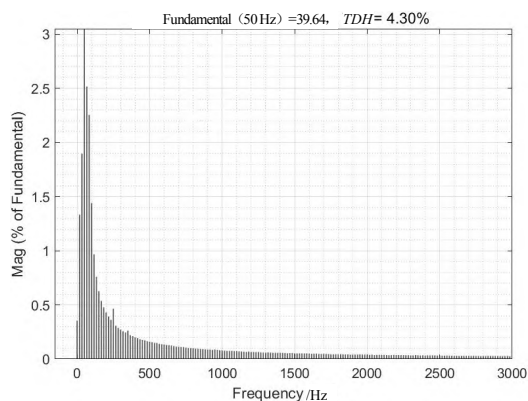


图7 交流侧三相电流40A FFT分析

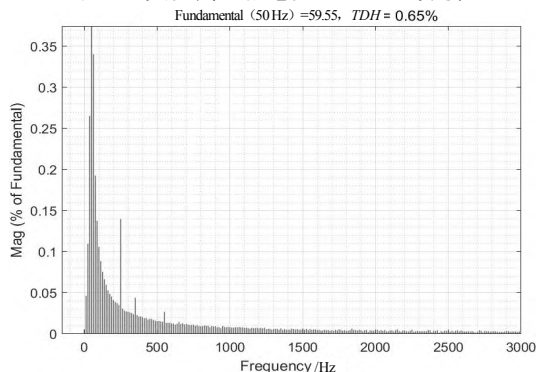


图8 交流侧三相电流60A FFT分析

4 SVPWM 算法原理

空间矢量控制是近年来被广大研究者广泛使用的新型控制方式。为了减少开关损耗,在每次进行转换的过程中都只能有一个开关状态发生改变,这样就能最大程度上减少开关带来的损耗,同时这样也能减少

逆变器输出电压产生的谐波分量。SVPWM 算法实现首先是对所处扇区进行判断, 其次是确定相邻空间电压矢量的作用时间, 最后是确定开关顺序及电压空间矢量的切换时间, 这样就可以实现尽量减少开关管的开关次数及开关损耗^[4]。

三相电压型桥式并网逆变器有 6 个功率开关管, 如果将上桥臂器件导通定义为数字“1”, 下桥臂定义为数字“0”, 这样就可以得到逆变器的 8 种工作状态对应于 8 种电压矢量, 这 8 种电压矢量也叫作基本电压矢量, 其中 6 个非零电压矢量的幅值是 $2U_{dc}/3$, 2 个零电压矢量的幅值是 0, 任意一个时刻只有 3 个开关管是工作在导通状态的, 而另外 3 个开关管处于关断状态, 同时为了避免上下桥臂导通造成短路问题, 同一个桥臂的上下 2 个开关管不能导通, 所以上下桥臂的开关器件是互锁的, 6 个非零的基本电压矢量把逆变器的一个周期分割成 6 个区域, 这 6 个区域分别对应一个扇区, 通过合理控制 2 个相邻基本电压矢量及其与零矢量之间的切换, 在每一个开关周期内去逼近旋转参考矢量, 使合成电压矢量的运动轨迹逼近圆形^[5]。电压空间矢量图如图 9 所示。

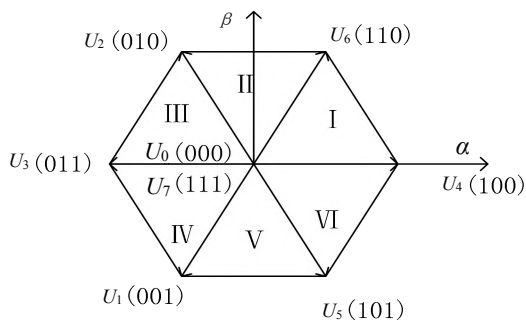


图 9 电压空间矢量图

4.1 参考电压所在扇区判断

对于参考电压所在扇区进行判断时, 要对电压矢量进行坐标变换, 经过坐标变换后就会得到 U_α 和 U_β , 并定义为以下变量:

$$\begin{cases} U_1 = U_\beta \\ U_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2} \\ U_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{U_\beta}{2} \end{cases}$$

若 $U_1 > 0$, 则 $A=1$, 否则 $A=0$;

若 $U_2 > 0$, 则 $B=1$, 否则 $B=0$;

若 $U_3 > 0$, 则 $C=1$, 否则 $C=0$ 。

计算 N 值为: $N=A+2 \times B+4 \times C$, N 值和扇区所对应关系如表 1 所示。

表 1 N 值和扇区所对应关系

| N | 3 | 1 | 5 | 4 | 6 | 2 |
|-----|---|----|-----|----|---|----|
| 扇区号 | I | II | III | IV | V | VI |

4.2 合成矢量作用时间的计算

扇区中相邻的电压矢量的作用时间 X 、 Y 、 Z 满足:

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}T_{pwm}}{U_{dc}}U_\beta \\ Y = \frac{T_{pwm}}{U_{dc}}\left(\frac{3}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta\right) \\ Z = \frac{T_{pwm}}{U_{dc}}\left(-\frac{3}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta\right) \end{cases}$$

T_1 和 T_2 与中间变量 X 、 Y 、 Z 的关系如表 2 所示。依据表 2, 相邻 2 个基本电压矢量作用的时间计算就会变得更加方便, 增强了系统的效率。如果不使用中间变量, 参考电压落到 6 个扇区时, 这样 T_1 、 T_2 就会有 6 个公式来表示, 即有 6 组公式来表示相邻两端的作用矢量, 这样就会变得复杂, 完全没必要每次都进行计算。通过引入中间变量 X 、 Y 、 Z , 计算出 X 、 Y 、 Z 之后, 根据 T_1 、 T_2 与 X 、 Y 、 Z 的对应关系, 就可以非常清楚地知道 2 个彼此相邻的基本电压矢量所作用时间。

表 2 T_1 和 T_2 与中间变量 X 、 Y 、 Z 的关系

| 扇区 | I | II | III | IV | V | VI |
|-------|----|----|-----|----|----|----|
| T_1 | -Z | Z | X | -X | -Y | Y |
| T_2 | X | X | -Y | Z | -Z | -X |

当 $T_1+T_2>T_s$, 说明这时算出来的 T_1 和 T_2 的时间大于三角载波的周期, 此时是出现过调制的现象, 这时应取:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_1 T_{pwm}}{T_1 + T_2} \\ T_2 = \frac{T_2 T_{pwm}}{T_1 + T_2} \end{cases}$$

4.3 电压空间矢量的切换时刻的计算

定义了 3 个时间变量 t_{aon} 、 t_{bon} 、 t_{con} , 为了计算空间矢量比较器切换时间 T_{com1} 、 T_{com2} 、 T_{com3} , 定义:

$$\begin{cases} T_{aon} = \frac{(T - T_1 - T_2)}{4} \\ T_{bon} = T_{aon} + \frac{T_1}{2} = \frac{T + T_1 - T_2}{4} \\ T_{com} = T_{bon} + \frac{T_2}{2} = \frac{T + T_1 + T_2}{4} \end{cases}$$

各扇区与矢量切换点如表 3 所示。

表 3 各扇区与矢量切换点

| 扇区 | I | II | III | IV | V | VI |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| T_{com1} | t_{aon} | t_{bon} | t_{con} | t_{aon} | t_{bon} | t_{aon} |
| T_{com2} | t_{bon} | t_{aon} | t_{aon} | t_{bon} | t_{con} | t_{con} |
| T_{com3} | t_{con} | t_{con} | t_{bon} | t_{con} | t_{aon} | t_{bon} |

5 三相软件锁相环技术

目前,使用最广泛的相位跟踪锁定方法主要是软件锁相技术(SPLL),SPLL是以坐标变换原理为前提,通过PI调节器实现对电网电压的基波分量进行锁相控制,从而输出精确的电网电压矢量的位置角^[6]。三相软件锁相环原理如图10所示。

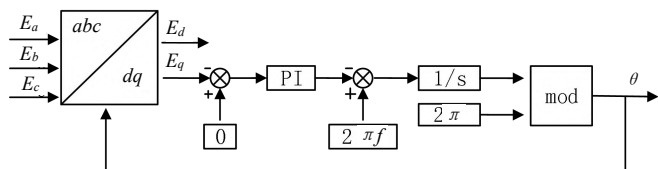


图10 三相软件锁相环原理图

如果三相软件锁相环系统输出的相角 θ 与电网电压矢量位置角相同,这时三相电压通过变换后为0, E_d 的值为一定值。当 E_q 的值不为0时,其值和0比较后进行PI调节器得到偏差信号 w ,并加上标准角频率 $2\pi f$,然后将差值进行积分,这样就能得到与电网电压矢量同相角。为此,通过构建闭环系统实现对电网电压矢量的精准锁相的目的。

6 三相并网逆变器采用 SVPWM 算法的建模与仿真

三相并网逆变器的控制框图2如图11所示。从图11可知,首先将输出电压与输出电流进行 abc - $\alpha\beta$ - dq 变换后得到对应旋转坐标下的直流变量,其中输出电流经过坐标变换后的2个实时变量 I_d 和 I_q 与给定的有功电流和无功电流 I_{qref} (其中 $I_{qref}=0$)作差后,将差值送入到PI调节器,然后经过反park变换后,然后将其作为SVPWM控制算法的输入量,经过SVPWM算法的调制后,从而产生PWM脉冲的调制波信号,这样就能有规律地控制逆变桥的功率器件通断,从而实现将直流电变为交流电。

交流侧三相电流波形和交流侧三相电压电流波形分别如图12和图13所示。从图12和图13可知,在0.1s时,三相并网电流从40A突变到60A,系统达到稳定后,电流幅值稳定在60A左右,这与设定值非常接近,此时系统依然处于正常状态,说明电路的负反馈可靠性好。三相并网逆变器采用三相软件锁相环的技术,可以看到电流波形与电压波形达到了同步,系统网侧功率因数为1。同时输出电流波形接近正弦,通过对输出电流4个周期进行采样,然后对其采用傅里叶分析。

交流侧三相电流40A FFT分析和交流侧三相电流60A FFT分析分别如图14和图15所示。从图14和图15得出,并网电流为40A时的畸变率仅为0.48%,并网电流为60A时的畸变率仅为0.32%,完全满足IEC

的电能质量要求。

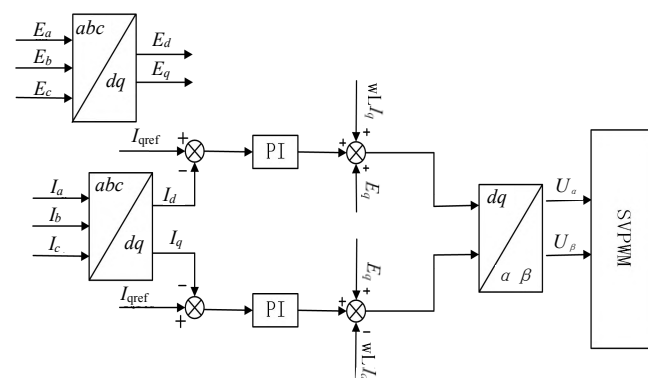


图11 三相并网逆变器的控制框图

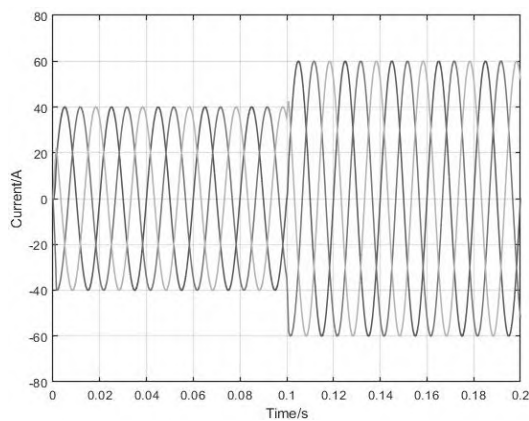


图12 交流侧三相电流波形

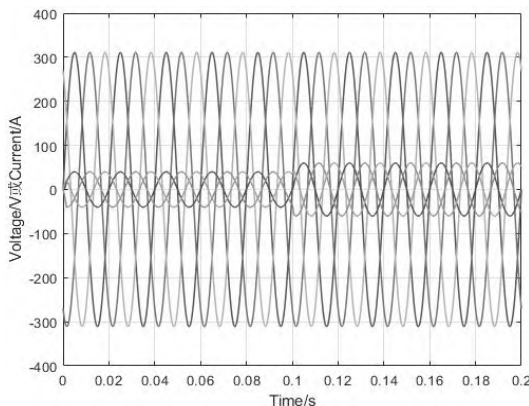


图13 交流侧三相电压电流波形

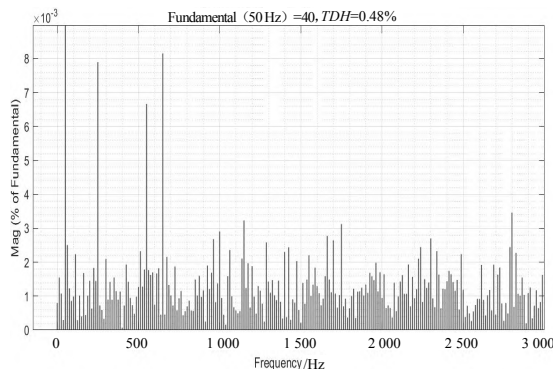


图14 交流侧三相电流40A FFT分析

(下转第42页)

件节点验收完成,且测量量测数据正常,未出现超标情况。拆除过程中,必须按照危大工程进行管控,安排专人进行警戒、疏散和巡视,保证拆除安全。

8 结语

梦海大道 11 号景观桥在深圳市敏感带进行工程施工,针对运输困难、场地受限的情况,结合桥梁的复杂结构,重点把控了软基处理、构件运输、起重吊装、滑移就位、监控量测等重点环节的风险,有效降低了施工作业风险,项目目前已经安全建成并实现顺利通车,如图 12 所示,从前海的合作区可以快速抵达宝安区的中心,真正变成了前海合作向北的直通门户,把即将要开发的大湾和相关区域有效接通,对强化多区域协同具有非凡意义。该项目对相同类型的施工具有较高的参考意义。



图 12 项目建成情况

参考文献:

- [1] 何志东.繁忙交通条件下钢拱肋吊装施工安全控制研究[J].四川建材,2018,44(7):192-193,195.
- [2] 陈岩.大跨度拱桥拱肋吊装施工控制研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [3] 蒲阳,束冬林,王文炳,等.公路路基软岩质粗颗粒填料级配及力学性能研究[J].路基工程,2021(2):76-81.
- [4] 史世波,刘尚各,陈飞飞,等.新建路基开挖换填对下方既有盾构隧道影响研究[J].路基工程,2021(3):165-170.
- [5] 汤贝贝.空间双曲面钢桁架现场拼装技术研究[J].建筑技术开发,2020,47(18):2.
- [6] 王卫.钢管混凝土拱桥主拱吊装施工过程控制[J].中华建设,2011(11):138-139.

作者简介:钟正君(1969—),男,四川简阳人,硕士研究生,高级工程师,主要从事项目管理、安全质量风险管控研究。

[编辑:王霞]

(上接第 38 页)

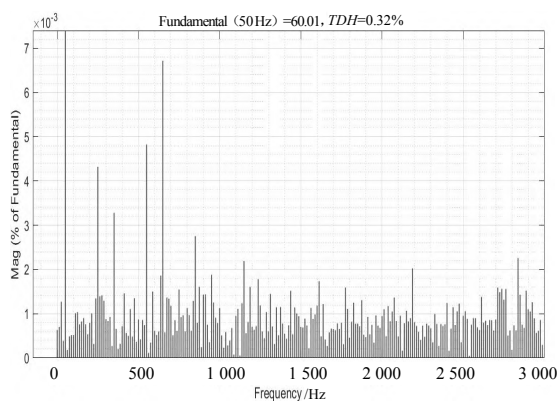


图 15 交流侧三相电流 60 A FFT 分析

7 结语

本文详细描述了 SPWM 的调制方式和 SVPWM 的调制方式,通过对并网逆变器采用电流闭环的控制策略,在 Matlab/Simulink 软件中进行了系统建模与仿真调试,仿真结果表明:采用的 SPWM 调制技术输出波形良好,控制实现起来比较简单,在并网电流要求不是很高的场合具有良好的应用前景,采用 SVPWM 控制得到的并网电流的谐波含量低于 SPWM 控制,这说明在并网电流要求较高的场合, SVPWM 控制比 SPWM 控制更具有优越性。

参考文献:

- [1] 闫大新,于雁南,姜华.SVPWM 三相电压型逆变器的仿真研究[J].系统仿真技术,2012,8(1):56-61.
- [2] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2010:162-166.
- [3] 黄捷音,李光升,谢永成.基于 SPWM 小功率单相逆变器的仿真研究[J].通信电源技术,2015,32(6):38-40.
- [4] 周恒.基于空间矢量 PWM 控制的永磁同步电机驱动系统的研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [5] 赵峰,理文祥,葛莲.基于 SVPWM 控制的逆变器仿真研究[J].2012,9(1):1386-1389.
- [6] 周文华.3 kW 三相光伏并网逆变系统的研究与设计[D].西安:西安科技大学,2017.

作者简介:邓松彬(1994—),男,广东梅州人,在读研究生,研究方向为电力电子技术在新能源发电、储能及智能电网中的应用。

[编辑:王霞]