注入3次谐波的SPWM调制算法的实现与验证

针对三相逆变器尤其是VSI型逆变器，传统方法采用通过三角载波对正弦参考电压信号进行调制的SPWM控制方法，其基波电压的幅值能够占直流电压约86.6%，该直流电压利用率较低，未能充分利用直流电压。为解决这一问题，对三相电压源型逆变器的相电压通过注入3次谐波的方法，该方法能够提高直流电压利用率。与此同时，由于三相逆变器的对称性，三相平衡，因而3次谐波并不会影响输出电流的谐波特性。最后借助Matlab/Simulink仿真软件对该调制方法的正确和可行性进行仿真和验证。

刘　莉/华陆工程科技有限责任公司

刘　莉/工程师

关键词/Keywords

三相电压源型逆变器·

SPWM·

直流电压利用率·

0　引言

脉宽调制技术现已较多地应用于DC/AC等变流器的控制中。利用正弦脉宽调制（SPWM），通过三角载波可对正弦调制波进行调制，以实现VSI型逆变器的输出电压幅值、频率和相位均可控的正弦电压[1-3]。

对于脉宽调制技术，可采用自然采样、规则采样以及直接法PWM调制。这3个方法均具有其对应的特点。其中第二种方法的实现是采样的过程，其易于通过数字处理器进行工程实践，并且运行稳定，因而应用较为广泛。

对于SPWM脉宽调制技术，其调制深度的范围为[0，1]，但是对于VSI型逆变器，其线电压只能达到$\sqrt{3}U_{dc}/2$，占直流侧电压的86.6%，利用率较低。针对这一问题，在此可对三相电压添加3次谐波，以此提高其调制深度的水平，且在一定程度上提升其直流电压利用率。

本文便采用添加3次谐波的SPWM调制算法，以此提高直流侧电压的利用率，并最终通过Matlab/Simulink进行仿真，以此验证该控制策略的可行性和有效性。

1　SPWM脉宽调制

图1为两电平三相电压源型逆变器的拓扑结构。

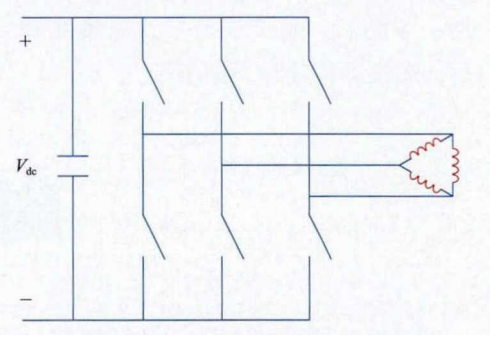

图1　VSI型逆变器三相拓扑

易获得三相正弦参考信号的数字表达式为

$$V_A = MV_{dc}\cos(\omega t) \quad (1)$$

$$V_B = MV_{dc}\cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$V_C = MV_{dc}\cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (3)$$

式中，V_A、V_B和V_C为三相相电压；M为调制深度。

依据式（1）～式（3）可以得到输出波形的线电压表达式为

$$V_{AB} = V_A - V_B = \sqrt{3}MV_{dc}\cos(\omega t + \pi/6) \quad (4)$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = \sqrt{3}MV_{dc}\cos(\omega t - \pi/2) \quad (5)$$

$$V_{CA} = V_C - V_A = \sqrt{3}MV_{dc}\cos(\omega t + 5\pi/6) \quad (6)$$

由式（4）～式（6）可以看出，线电压为正弦波，并且当采用SPWM的调制方法时，线电压与相电压幅值间存在$\sqrt{3}$倍数。与此同时，当M为1时，线电压

基波分量最大可输出$\sqrt{3}V_{dc}$，此时输出电压为直流侧电压的$\sqrt{3}/2$倍，利用率较低[4-5]。

2 注入3次谐波

如图2所示，注入3次谐波的SPWM调制算法其根本思想是在三相电压中添加3次谐波含量。调制波更改后，调制波由参考正弦电压波形改变为马鞍形，从图2上可以看出加入3次谐波后的调制波峰值相比参考正弦波在一定程度上有所减小，由此可以保证相电压峰值的减小，不易进入过调制区域[6]。

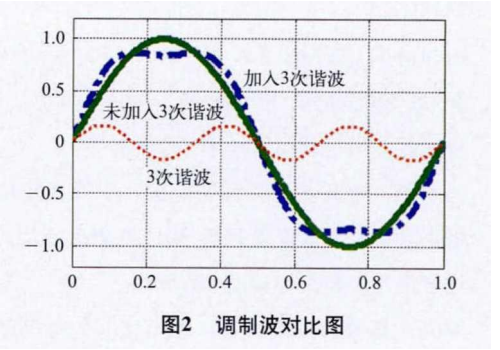

图2 调制波对比图

除此之外，由于VSI型逆变器的三相对称性，为提高直流电压利用率的3次谐波将会在各相桥臂间得以消除，因而并不会对输出电压电流的谐波含量造成影响。

注入后，其相电压调制表达式为

$$V_A = MV_{dc}\cos(\omega t) + MkV_{dc}\cos(3\omega t) \quad (7)$$

$$V_B = MV_{dc}\cos(\omega t - 2\pi/3) + MkV_{dc}\cos[3(\omega t - 2\pi/3)] \quad (8)$$

$$V_C = MV_{dc}\cos(\omega t + 2\pi/3) + MkV_{dc}\cos[3(\omega t + 2\pi/3)] \quad (9)$$

在此以AB线电压为例，求其基波线电压，可推得

$$V_{AB} = V_A - V_B = \sqrt{3}MV_{dc}\cos(\omega t + \pi/6) \quad (10)$$

从式（10）可以看出，线电压并未增加其他谐波含量，通过文献[7]可知k值宜取1/6。此时，可提高直流电压利用率1.15倍[8]。

并且，从图2中可以看出，未注入3次谐波的波形，其调制波易超出载波幅值，将出现过调制现象，而注入3次谐波后，调制波最大峰值刚好为1，不出现过调制，从而输出脉冲中可以得到预期的基波分量。

3 仿真验证

为了验证上述的调制策略，借助Matlab/Simulink仿真软件对其进行仿真验证，仿真电动机参数如下表所示。

表 电动机参数

额定电压/V	510	定子电阻/Ω	0.042
额定功率/kW	110	转子电阻/Ω	0.027
额定频率/Hz	108	互感/mH	3.77
最高转速/(r/min)	4 123	定子漏感/mH	0.149
极对数	3	转子漏感/mH	0.31

图3、图4为两种方式的脉冲形成方式，图3中三角波形为载波波形，载波频率为1 kHz。为了切实反映效果，脉冲向下平移了3 V的电平，实际上脉冲的电平为0、1电平。图3中未加入3次谐波的正弦参考信号经过三角载波调制后，形成脉冲驱动电动机工作。图4中加入3次谐波后的正弦波通过三角载波调制后形成脉冲驱动电动机工作。从图4中可以看出，脉冲稳定，并且呈现正弦变化趋势，波形良好。

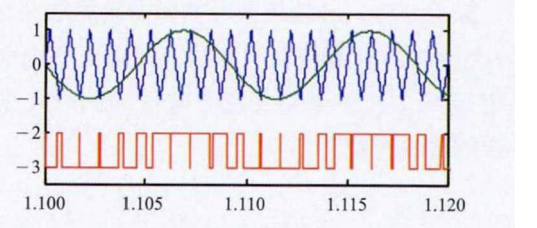

图3 SPWM调制脉冲形成

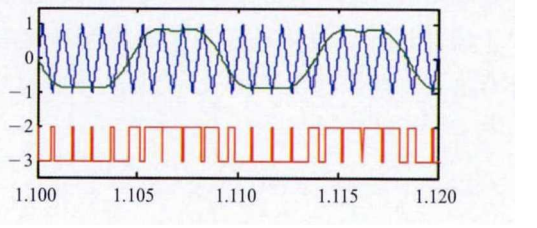

图4 注入3次谐波后脉冲形成

图5、图6为电动机运行全速下的电动机电流和电动机转速的波形。从图6中可以看出，电动机全速运行下，电动机运行稳定，无振荡现象发生，并且具有较快的动态响应性能，满足电动机运行稳定要求。

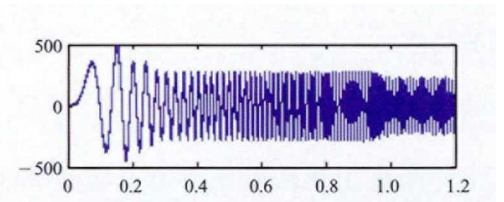

图5 电动机电流

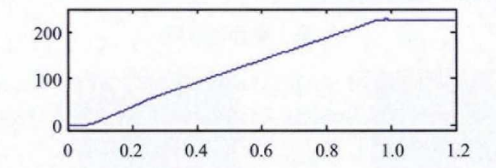

图6 电动机转速

图7为电动机稳态运行时的电动机电流波形，从图7中可以看出，电动机稳态运行稳定，正弦度良好，由此可证明注入3次谐波的SPWM调制算法运行稳定，能够保证电动机的稳定运行。

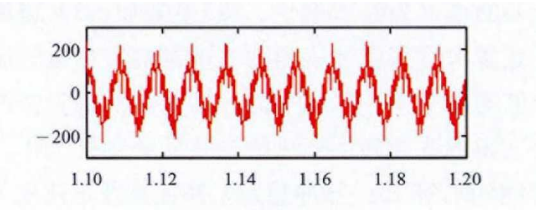

图7 电动机稳态电流

综上分析，同传统的SPWM调制算法相比，注入3次谐波的SPWM调制算法，能够保证电动机的稳定运行，且在提高直流侧电压的同时，未引入多余的谐波含量。

4 结束语

本文从传统SPWM脉宽调制算法分析出发，阐述了该算法在直流侧电压利用率方面的缺陷，并针对这一问题，提出了注入3次谐波含量的方法。该方法能够在一定程度上提高电动机的直流电压利用率，且未引入其他谐波含量，并通过Matlab/Simulink对其运行稳定进行验证，验证了该调制算法的可行性与准确性。

参考文献

[1] 薄保中，苏彦民．三电平逆变器的分析与控制[J]．电气传动，2003，33(2)：14-17.

[2] Grant D A，Houldsworth J A．The use of harmonic distorion to increase the output voltage a three-phase PWM inverter [J]．Trans．IEEE，1984，IA-20 (5)：1224-1228.

[3] Holmes D G，Lipo T A．Pulse width modulation for power converters；principles and practice [C]．New Jersey：Wiley-IEEE Press，2003.

[4] 毛承雄，李时华，陆继明，等．中性点箝位型三电平高压变频器实验分析 [J]．电力系统及其自动化学报，2008，20 (2)：78-82.

[5] 熊健，康勇，张凯，等．电压空间矢量调制与常规SPWM的比较研究 [J]．电力电子技术，1999 (1)：25-28.

[6] 文小玲，尹项根．三相逆变器统一PWM实现方法研究 [J]．微电机，2009，42 (1)：46-50.

[7] Maswood A．Optimal harmonic injection in thyristor rectifier for power factor correction [J]．IEE Proceedings：Electric Power Applications，2003，150 (5)：615-622.

[8] 罗宏浩，刘少克．新型SPWM调制技术 [J]．微特电机，2004 (3)：40-42.

(收稿日期：2017－06－25) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告