

基于 MATLAB 的 SVPWM 逆变控制系统仿真^①

谢云燕, 唐文亮, 梁来鹏

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对不间断电源从市电输出到逆变输出的快速切换(要求 4ms), 提出了用空间矢量调制逆变载波的方法, 并通过电压、相位开环控制, 使市电与逆变电同步, 达到快速切换的要求。采用了 MATLAB 软件包中的 Simulink 模块对系统进行建模、仿真, 具有建模简易、结构清晰、操作方便等优点。结果清晰的表明, 通过反馈环节, 可以很方便地控制逆变电压和锁相, 以满足需要。

关键词: 空间矢量调制; 矩阵实验室; 逆变; 开环控制; 同步

Simulation and Research of SVPWM Inversion Control System Based on MATLAB

XIE Yun-Yan, TANG Wen-Liang, LIANG Lai-Peng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: For the fast switch of EPS which is from the utility power output to the inverter output, the article suggests that SVPWM modulates invert carrier via the close-cycle Control of voltage and phase, so as to synchronize the inverter output with the utility power output. In the article, we make use of Simulink modules, one of the toolboxes of MATLAB, to model and simulate the system. This environment is easily modeling, clearing structure and convenient operation. The results demonstrate that we can flexibly control voltage of inverter via feedback element and lock phase to satisfy our needs.

Key word: SVPWM; MATLAB; inversion; open-cycle control; synchronization

随着电力电子技术的发展, 空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法已经成为工业逆变电源中应用最为广泛的一种逆变控制技术。与传统模拟控制的逆变器相比, 数字逆变控制下的 SVPWM 在实际应用中, 都是以指令的方式提供数字调制算法所需的参考正弦/余弦信号, 并实现数字调制算法。因此, 采用 SVPWM 技术, 可以高效、灵活、高精度的实现参考正弦信号, 从而控制逆变器输出。

尤其在应急电源(EPS)中, 由于 SVPWM 具有直流母线电压利用率高的优点, 逆变器输出电压可调节范围也较大, 且电压调节方便, 简单, 同时对锁相部分也可以利用程序实现。本文采用 MATLAB 7.9 对逆变器建立仿真模型, 模拟三相逆变主电路, 如图 1。通过实例可以看出 MATLAB 7.9 中电力系统模块不仅

有基本电路、电力电子器件模型, 还增加了电力电子器件的离散模型、通用三相桥、有功无功检测、PWM 波形产生器, 该工具箱为电力电子逆变系统的设计提供了新途径^[1]。

本文一方面验证了 SVPWM 的电压调制度 M 与逆变输出之间的关系, 另一方面也验证了该模型的逆变电锁相功能。

1 空间矢量算法

三相对称正弦电压, 如式(1)所示。式中, U_m 为电压幅值, ω 为电压的角频率。

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = U_m \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (1)$$

① 收稿时间:2011-04-26;收到修改稿时间:2011-05-22

则可以定义电压空间矢量为式(2)所示。

$$U_s = \frac{2}{3} \left(U_a + U_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_c e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad (2)$$

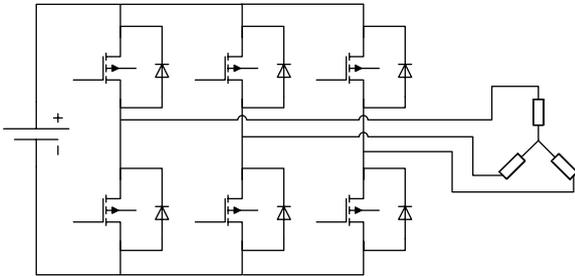


图 1 三相逆变主电路

图 2 中 a、b、c 分别表示在空间静止不动的三相绕组的轴线，空间互差 120°(实际在同一平面内)。那么，电压空间矢量 U_s 就是一个以速度 ω 旋转的矢量，而三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c 可以看作是 U_s 在 a、b、c 三个坐标轴上的投影，其方向在各相的轴线上，大小则按正弦规律变化，将式(1)带入式(2)中，可得到式(3)。

$$U_s = U_m (\cos \omega t + j \sin \omega t) = U_\alpha + jU_\beta \quad (3)$$

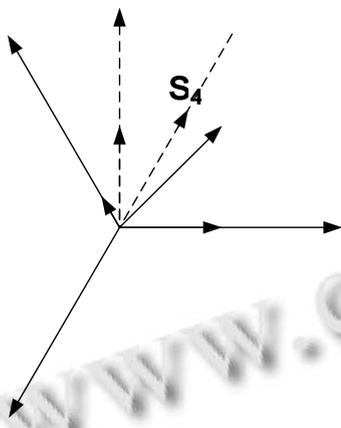


图 2 电压空间矢量图

三相对称电压可用 U_α 、 U_β 表示， U_α 、 U_β 分别为电压空间矢量 U_s 在 α 、 β 轴上的投影，其中 α 轴与 a 轴重合， β 轴超前 α 轴 90°。在电机中，定子电阻通常很小，可忽略不计，则磁链空间矢量 Ψ_s 的运动轨迹与电压空间矢量 U_s 的运动轨迹一致，其速度都为 ω 。因此，电压空间矢量脉宽调制就是以调节交流

电机定子磁链空间矢量为 Ψ_s 目的而实际对电压空间矢量 U_s 进行控制的一种调制方式。

逆变电路输出的三相电压也可以形成旋转的空间电压矢量。在图 1 中，每相上桥臂与下桥臂状态相反，可以将上桥臂开关导通下桥臂开关关断的状态记为“1”，反之为“0”。因此，三组桥臂对应 8 种输出电压状态，如表 1 所示。

表 1 三相逆变电路的开关状态与基本电压矢量

各相桥臂开关状态	基本电压矢量	空间位置
(000)	V0	-
(100)	V1	e^{j0}
(110)	V2	$e^{j\pi/3}$
(010)	V3	$e^{j2\pi/3}$
(011)	V4	$e^{j\pi}$
(001)	V5	$e^{j4\pi/3}$
(101)	V6	$e^{j5\pi/3}$
(111)	V7	-

其中 V0 和 V7 输出电压为 0，被称为零矢量；V1~V6 共六个非零矢量幅值均为 $2U_d/3$ ，空间位置依次相差 60°。这八个电压空间矢量如图 3 所示，其中 V1~V6 位于正六边形的 6 个顶点位置，并将空间化成六个扇区，两个零矢量位于原点。

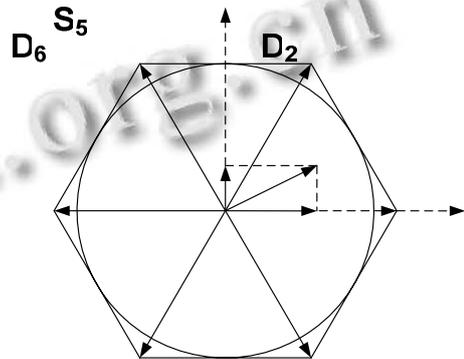


图 3 基本电压空间矢量图

对于给定的输出电压矢量 U_r ，通过这 8 个电压矢量的合成来实现。图 3 中，电压矢量 $U_r = U_{r\alpha} + jU_{r\beta}$ 位于第一扇区，假设 PWM 周期很小，则 U_r 在此期间内保持不变，可让逆变器输出 V0、V7、V1、V2 各一段时间，使磁链作用等效于 U_r 。各种组合方式很多，常用的是 7 段式组合，如表 2 所示。

表 2 SVPWM 输出电压矢量的 7 段式组合

Ur 所在扇区	SVPWM 的 7 段式组合
I	V0V1V2V7V2V1V0
II	V0V3V2V7V2V3V0
III	V0V3V4V7V4V3V0
IV	V0V5V4V7V4V5V0
V	V0V5V6V7V6V5V0
VI	V0V1V6V7V6V1V0

图 3 中, 设 T₀、T₁ 和 T₂ 分别为零矢量、V₁ 和 V₂ 在半周期内的作用时间, 则对于磁链需要满足式 (4), 其中 T_s 为 SVPWM 载波周期, T₀+T₁+T₂=T_s/2。

$$\int_0^{T_s/2} u_r dt = \int_0^{T_0/2} V_0 dt + \int_{T_0/2}^{T_0/2+T_1} V_1 dt + \int_{T_0/2+T_1}^{T_0/2+T_1+T_2} V_2 dt + \int_{T_0/2+T_1+T_2}^{T_s/2} V_7 dt \quad (4)$$

进一步可以推出非零矢量 V_k 和 V_{k+1} (k=1,2,...,6) 的作用时间 T_k 和 T_{k+1} 为:

$$\begin{pmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_s}{U_d} \begin{pmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{r\alpha} \\ U_{r\beta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

先计算电压指令所在的扇区, 再根据表 2 选择恰当电压矢量, 然后由式(5)计算出各基本矢量的作用时间, 便可通过编程实现 SVPWM。

2 用 MATLAB 7.9 中的电力系统模块工具箱建立控制系统

2.1 电力系统模块工具箱

MATLAB 图形化仿真是在 SIMULINK 环境下, 电力系统工具箱在 SimPowerSystems 模块中。进入 Simulink 环境, 弹出一个标题为 SimPowerSystems 模块库窗口, 该窗口中包含电路仿真所需的各种元件模型, 包括电源模块、电力电子模块、电机模块、测量模块以及附加功率模块等模块库^[2]。

各个模块库有不同的模块选择, 如电源模块库里有电流源、直流电压源、交流电压源、受控电压源等电源模型; 电力电子模块库中包含了晶闸管、功率场效应管、理想开关元件等功率开关元器件模型。利用电力系统工具箱对电路进行仿真实验, 只需将所需元件模型拖入仿真窗口并设定元件参数, 然后根据仿真电路的拓扑结构, 连好线路, 仿真模型便生成了^[2]。因此, 仿真模型的建立过程主要是对各元器件模型设

定参数的过程, 整个电路的建模比较简易。

2.2 逆变控制模型

利用 MATLAB/Simulink 中的模块搭建仿真模型, 采用 SVPWM 脉冲发生器模块 (Discrete SVPWM Generator) 产生控制信号, 选择外部信号指令模式, 输入幅度、角度, 也可以选择内部发生模式模拟系统, 开关模式“Pattern #1”, 就是前面所述的七段式工作模式。三相负载的有功功率取 1kW, 感性无功功率为 500Var。载波频率设置为基波频率的 30 倍, 即 1500Hz。逆变器采用 IGBT 模块, 直流母线电压为 530V。

仿真时间设置为 0.06s, 在 powergui 中设置为离散仿真模型, 采样时间为 5×10⁻⁷s, 测量逆变电的相电压、相电流、线电压和直流电流波形, 以及模拟的市电相电流, 并与逆变输出电流进行相位比较^[3]。仿真原理图如图 4 所示。

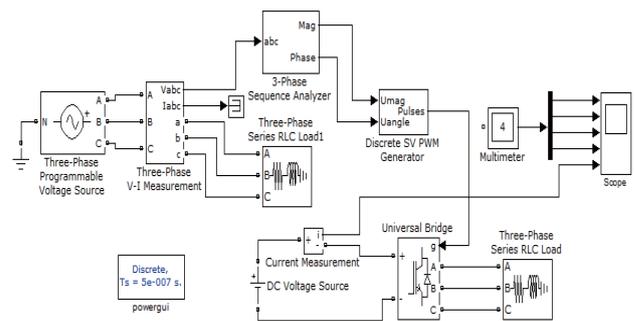


图 4 逆变控制系统仿真原理图

3 仿真结果分析

3.1 逆变电压控制分析

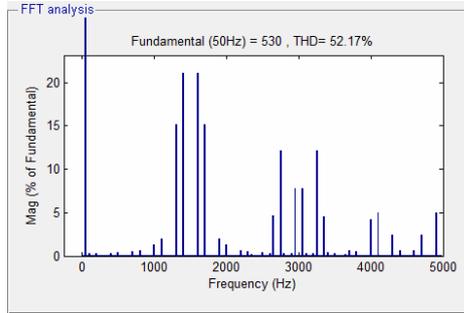
在实际应用中, 逆变电的电压幅度由电压调制比控制, 调制比计算公式如式(6)所示^[4]。

$$M = \frac{2U_\phi}{\sqrt{2}V_{dc}} = \frac{\sqrt{2}U_\phi}{V_{dc}} \leq 1 \quad (6)$$

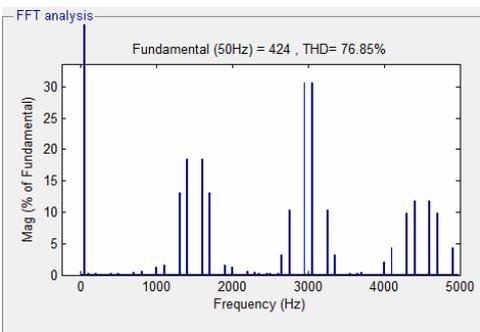
其中, U_φ 是输出线电压的幅值; V_{dc} 是直流母线电压值。图 5 给出了 M 分别等于 1 和 0.8 时的线电压的频谱分析。观察基波频率为 50Hz 的线电压值, 其他频率部分可以采取滤波的方式消除。

当 M=1 时, 输出线电压的幅值为 530V, 直流电压利用率达到了 100%; 当 M=0.8 时, 输出线电压的幅值为 424V, 直流电压利用率达到了 80%。可见, 直流电压利用率与 M 值有关。在逆变电源的实际应用中,

通过程序调节 M 值，就可以控制逆变输出电压，并与市电电压同步。



(a) M=1



(b) M=0.8

图 5 输出线电压的 FFT 变换

3.2 逆变电锁相分析

在 EPS 的应用研究中，锁相部分尤为重要，锁相是完成逆变电与市电相位同步的一个重要手段，并且是 EPS 满足快速切换条件的重要指标之一^[5]。

图 6 给出了示波器的显示结果，从上到下依次是，逆变电相电压、逆变电相电流、市电相电流、逆变线电压和直流电流的波形。由逆变电相电流与市电相电流的波形图，可以看出，逆变电相位开始与市电相位不一致，通过锁相环节快速进行调节，使得逆变电相位最终与市电相位一致。

仿真结果说明，该系统不仅可以快速调节逆变电输出电压，还可以快速调节逆变电的相位，这样，就可以应用于 EPS 的快速切换中。此外，再结合一些优良的算法，该系统还可以应用于一些电机控制系统领域。

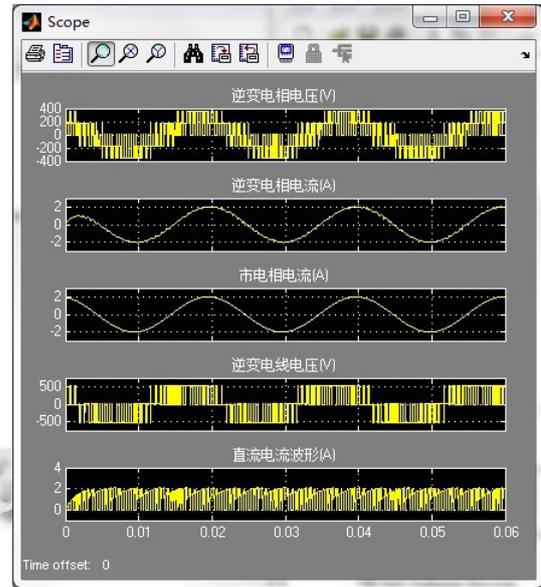


图 6 示波器仿真结果

4 结论

本文介绍了在 MATLAB 环境下，建立了可调压、锁相的逆变控制系统，模拟数字化 EPS 的变压、锁相环节。仿真结果证明了，SVPWM 算法具有易于实现、算法精度高、直流电压利用率高和开环控制相应快等众多优点。因此，SVPWM 算法和此逆变控制系统在数字化 EPS 的领域内，有极高的研究和应用价值。

参考文献

- 1 张珍敏,赵军红,等.基于 SPWM 和 SVPWM 的变频电源仿真分析.通信电源技术,2009,26(4).4-7.
- 2 黄成玉,王成员.基于 MATLAB 的 PWM 控制系统仿真.防灾技术高等专科学校学报,2005,7(1).104-106.
- 3 林飞,杜欣.电力电子应用技术的 MATLAB 仿真.北京:中国电力出版社,2009.8.
- 4 易龙强,戴瑜兴.正弦逆变电源的数字脉宽调制技术.湖南大学学报,2007,34(1).37-42.
- 5 Tefanovic VR. Space-vector PWM voltage control with optimized switching strategy. IEEE/IAS Annual Meeting, 1992:1025-1033.