

航空变速恒频电源系统中优化的 SPWM 调压研究

赵修科

(南京航空航天大学 306 教研室, 南京, 210016)

王石维

(南通纺织工学院, 南通, 226000)

STUDY OF VOLTAGE REGULATION FOR OPTIMIZED SPWM TECHNIQUE IN AIRCRAFT VSCF SYSTEM

Zhao Xiuke

(Faculty 306, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

Wang Shiwei

(Nantong Polytechnical Institute of Fibremanufacture, Nantong 226000)

摘 要 在航空变速恒频系统 (VSCF) 中, 航空发电机发出的变频交流电经整流变换为直流电, 再经逆变器变换成恒频交流电。逆变器通常采用固定开关点的优化的 SPWM 技术, 通过调节发电机激磁调节输出电压。由于系统是高阶系统, 为了降阶, 提出改变开关点的位置来调节输出电压, 并提出优化 SPWM 的定义, 分析了调节范围和谐波含量的变化, 并给出了实现电路。

关键词 脉宽调制, 谐波, 电源电路

中图分类号 FSV24212

Abstract In the DC-link aircraft variable speed constant frequency (VSCF) electrical system, the DC-link voltage is converted by an inverter using SPWM technique with fixed switching point to constant frequency output voltage. The amplitude of the output voltage is controlled by the magnitude of the field excitation current to maintain the output voltage within specified limits. For the high-order regulation system, it is expensive to achieve high figure of merit. An adjustable optimized SPWM to decrease orders of the system is presented. Analysis for regulation range and variation of harmonic components is performed. A prototype circuit is built and tested to verify this concept.

Key words pulse duration modulation, harmonics, power supply circuits

航空 VSCF 电源系统是将发动机带动的发电机发出的变频交流电, 变换成恒频交流电的电源系统。通常采用交-直-交系统, 即将变频交流电经整流滤波, 再经三相桥式逆变器变换成恒频交流电。在系统中, 逆变器一般采用优化的 SPWM 技术。优化的 SPWM 技术实际上是一种谐波消除技术, 它以固定的开关点构成 SPWM, 通过设置这些开关点消除输出波形中指定谐波。如果在选择开关点的同时, 又保持基波分量最大或较大, 这就是优化的 SPWM。较之其它 SPWM 技术, 它具有开关次数少、开关损耗小、直流利用率高的优点, 即同样幅值的交流输出电压, 优化 SPWM 技术比其它 SPWM 技术需要较低的直流电压, 应用较低的电压定额的功率晶体管, 这就降低了成本或提高可靠性, 而为 VSCF 系统采用。其波形图如图 1 所示。

采用优化 SPWM 技术的 VSCF 系统框图如图 2 所示。由于逆变器不能直接调节输出电压，只能通过调节主励磁机激磁来调节输出电压。可见系统是一个包含了主励磁机、主发电机、整流滤波电容、交流滤波网络的高阶闭环调节系统，这样的系统要求在发动机不同转速、不同负载条件下，具有高的品质因数是很难的，因此将系统降阶显然是解决上述困难一个重要途径。

降阶办法很多，可以在整流输出加调压反馈，也可以在调压闭环内加入逆变器局部调节，方框图如图 2 中虚线部分所示。

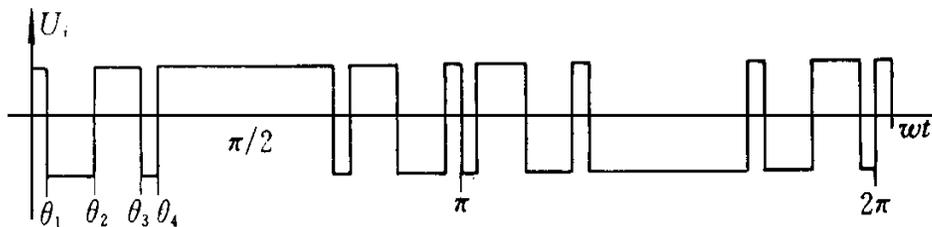


图 1 优化的 SPWM 技术

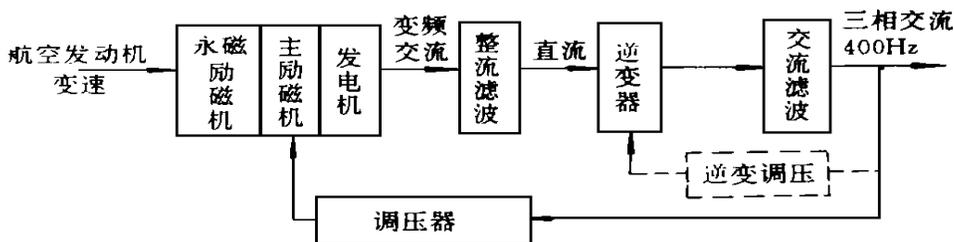


图 2 航空变速恒频电源系统交-直-交方案方框图

图 2 所示系统中，如逆变器采用固定开关点的优化的 SPWM (图 1)，当输出为三相时，输出波形中不含 3 次谐波。如选择开关点使输出波形中不含 5、7、11 和 13 次谐波，同时使输出滤波器谐振于 4.5 次，并优化电感、电容取值，使其满足波形失真度要求，又使滤波器体积小重量小。经实验验证，当负载从 0~ 100% 变化、 $\cos U$ 由 1 变到 0.75 滞后的负载时，逆变器直流输入电压变化仅 7%。可见，只要逆变器输出电压有 10% 的调节范围已满足系统要求。因此，寻求一种既保持优化 SPWM 的优点，同时又能调压的 SPWM 技术。

1 可调优化 SPWM 波形开关点的决定

对于图 1 所示的波形，因对称于 $P/2$ ，根据傅立叶级数分析，波形中只含奇次谐波

$$A_n = (4 U_i / nP)(1 - 2\cos nH + 2\cos nH - 2\cos nH + 2\cos nH) \tag{1}$$

式中 $n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ 。因此，可得到基波及各次谐波的幅值

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (4 U_i / P)(1 - 2\cos H_1 + 2\cos H_2 - 2\cos H_3 + 2\cos H_4) \\ A_3 &= (4 U_i / 3P)(1 - 2\cos 3H_1 + 2\cos 3H_2 - 2\cos 3H_3 + 2\cos 3H_4) \\ A_5 &= (4 U_i / 5P)(1 - 2\cos 5H_1 + 2\cos 5H_2 - 2\cos 5H_3 + 2\cos 5H_4) \\ A_7 &= (4 U_i / 7P)(1 - 2\cos 7H_1 + 2\cos 7H_2 - 2\cos 7H_3 + 2\cos 7H_4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

如果希望消除输出波形中某次谐波, 就令某次谐波幅值为零, 即 $A_n = 0$ 。对于图 1 所示波形, 如希望消除 5、7、11、13 次谐波, 则

$$\left. \begin{aligned} 1 - 2\cos 5H_1 + 2\cos 5H_2 - 2\cos 5H_3 + 2\cos 5H_4 &= 0 \\ 1 - 2\cos 7H_1 + 2\cos 7H_2 - 2\cos 7H_3 + 2\cos 7H_4 &= 0 \\ 1 - 2\cos 11H_1 + 2\cos 11H_2 - 2\cos 11H_3 + 2\cos 11H_4 &= 0 \\ 1 - 2\cos 13H_1 + 2\cos 13H_2 - 2\cos 13H_3 + 2\cos 13H_4 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这是一组超越方程。求解上述方程, 可以得到多组解, 这些解中满足基波分量较大的组不只一个。但是在电路实现时, 考虑到电路的复杂性, 对 H 取整, 使时钟频率不太高, 分频电路简单。其次考虑到输出功率晶体管有存储时间等因素, 输出波形总是偏离理论值。这样, 原先设定消除的谐波就可能又出现在输出波形中。经研究和计算发现, 有些组的解, 对 H 值的偏离非常敏感; 即 H 值只要有微小的偏离, 希望消除的谐波含量大大增加。而对于某些组的解则相反, 对 H 值的偏离不敏感, 由这组 H 值决定的开关点构成的 SPWM 波形才是优化的 SPWM。因此, 优化的 SPWM 应具有基波含量高, 指定谐波含量低和开关点变化指定谐波含量变化小的特点。例如一组优化开关点为: $H_1 = 60c$, $H_2 = 96c$, $H_3 = 217c$, $H_4 = 220c$ ($c = 2P/2048$)。

上述结果给一个重要启示, 由于优化的 SPWM 开关点变化, 指定消除的谐波含量变化不大, 这样就可可在一定范围内改变开关点的位置, 从而调节输出电压。因此在选定输出滤波器以后, 在最优开关点附近, 给出不同的 H 值, 求出满足输出波形失真度要求的新的 H 值。

2 可调优化 SPWM 的实现方法

为了便于电路实现, 用类似于自然采样的方法, 用直流或正弦波信号与一特定的载波相交得到宽度可调的 SPWM 信号。此载波构成原则是: 在一定 H 值下, 对应此特定的载波幅值应是唯一的。同时, 对奇数标号 H 值加大时, 波形幅值减小; 而对于偶数标号 H 值加大时, 波形幅值增加。为了简化处理, 采用直流调节, 并保证直流调节电压与基波幅值变化成线性关系。

为了得到此特定载波, 根据载波构成原则, 将上述最优开关点附近的解由计算机按基波幅值进行排序 (表 1), 然后作成图 3 (a) 所示的 $1/4$ 周期波形, 利用对称关系可以得到整个周期波形。

图 3 (a) 所示波形与不同调压直流信号相交, 得到宽度可变的 SPWM 输出波形图 3 (b)。经进一步分析证明, 用前述的输出滤波器, 在允许失真度 $< 5\%$ 范围内, 电压调整范围可达 10.4% 。这一结果完全满足了系统要求。

在上述讨论中, 采用直流调节脉冲宽度, 因航空 VSCF 系统输出是三相交流电, 三相整流后纹波较小, 滤波电容不大, 对系统调节影响不大。当然也可用交流反馈调节, 只是在形成载波时稍有不同。

表 1 最优附近解

调制度*	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
H_1	55.00	55.50	56.00	56.50	57.00	57.50	58.00	58.50	59.00	59.50	60.00
H_2	99.00	98.70	98.40	98.10	97.80	97.50	97.20	96.90	96.60	96.30	96.00
H_3	213.00	213.40	213.80	214.20	214.60	215.00	215.40	215.80	216.20	216.60	217.00
H_4	238.00	236.20	234.40	232.60	230.80	229.00	227.20	225.40	223.60	221.80	220.00
基波幅值* *	1.0683	1.0809	1.0935	1.1060	1.1184	1.1308	1.1432	1.1555	1.1677	1.1799	1.1921

* 直流调节电压与达到最大输出时直流电压之比

** 令 $U_i = 1$ 按式(2)计算值。

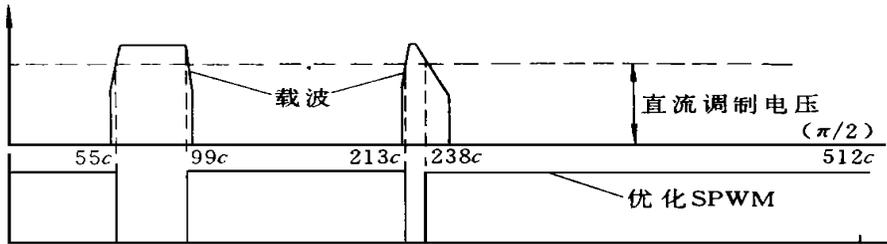


图 3 可调优化的 SPWM 波形的产生 (1/4 周期)

3 电路实现方法

原系统中优化 SPWM 信号是由时钟脉冲产生地址码, 读取 EPROM 预置的 SPWM 信号, 由数字电路直接提供给功率晶体管驱动。在本调节方案中, 一相电路框图如图 4 所示。时钟脉冲产生地址码, 读取 EPROM 中波形数据, 这里需经 D/A 变换得到载波。此载波与直流反馈电压比较, 得到可调的优化的 SPWM 信号。虽然波形发生电路较之原方案复杂些, 且都是小功率电路, 代价是不大的。原电路中其他部分完全相同。

该电路进行了逆变器部分调压实验, 直流电压调节 8% 时, 保证输出在给定范围之内。当直流变化超出 8%, 失真度将超过 5%。

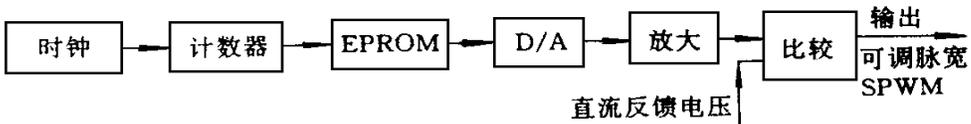


图 4 可调优化的 SPWM 实现电路

4 结论

通过上述分析可知, 所谓优化的 SPWM 应当具有既消除特定谐波, 直流利用率高, 又要在脉冲宽度变化时, 谐波分量变化不大的特点。优化的 SPWM 在一定范围内可通过改变脉冲宽度调节输出波形中的基波分量。用于 VSCF 系统中, 可作为降阶方法之一。优化的 SPWM 技术, 也可用于类似的逆变系统中。例如 UPS 系统。

参 考 文 献

1 Rossum MA. Design consideration of DC link aircraft generation systems. Lima OH: Westinghouse Electric Corp Aerospace Electr2 © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

cal Div.

- 2 Pollard D D. Modular packaging of VSCF converters. Lima OH: Westinghouse Electric Corp Aerospace Electrical Div.
- 3 Rashid M H. Power electronics: circuits, device and application. 1989