

降压式 18 脉自耦变压整流系统研究

杨光 葛红娟 陈思

(南京航空航天大学 新能源发电与电能变换重点实验室 南京 210016)

摘要: 18 脉自耦变压整流器具有输入电流谐波含量低,输出电压纹波小、变压器等效容量小等优点,但输出电压不满足航空低压直流系统的要求。在 18 脉自耦变压整流器的基础上设计降压电路,保证原有性能优势不变,实现 28 V 低压直流输出。首先介绍了 18 脉自耦变压整流器的移相原理和绕组结构,并对其输出电压特性进行了分析。根据降压的需要引入了降压电路及其控制电路,进一步设计了主电路及控制电路的主要参数。最后在 Saber 仿真环境中进行系统建模和仿真分析,验证了该系统具有良好的输入输出性能。

关键词: 变压整流器;航空低压直流;谐波

中图分类号: TM461 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on buck 18-pulse auto-transformer rectifier system

Yang Guang Ge Hongjuan Chen Si

(Key Laboratory of New Energy Power Generation and Electrical Energy Transformation,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The advantage of 18-pulse auto-transformer rectifier unit(ATRU) is low input current harmonic content, output voltage ripple and transformer equivalent capacity. But the output voltage can not satisfy the requirements of the aviation low voltage DC system. This paper based on 18-pulse auto-transformer rectifier, designed buck circuit, kept the advantage of original performance and achieved the 28 V DC output. The paper introduced the phase shifting principle and winding structure of 18-pulse auto-transformer rectifier firstly, then analysed the output voltage characteristic. According to the need of reducing voltage introduced the buck circuit and its control circuit. In addition, designed parameters of main circuit and control circuit. Finally, the system was established and analysed in Saber simulation environment, verified the system had a good input and output performance.

Keywords: transformer rectifier unit; aviation low voltage direct current; harmonics

1 引言

变压整流器和蓄电池组是飞机 28 V 直流电源系统的主要电源和备用电源,在飞机安全飞行中起着重要的作用。隔离式 12 脉变压整流器作为机载蓄电池组的充电电源,已经在空客 A320 和波音 737 列机型上得到应用。通过变压器副边星型绕组和三角形绕组不同的连接方式,使两组三相电压产生 30° 相移,合理设计变压器变比从而输出 28 V 直流电压。这种方案具有较高的可靠性和过载能力,缺点是变频输入时,输出电压调整率变化较大,并且输入电流总谐波含量(total harmonic distortion, THD)为 15.2%^[1],需要结合无源滤波方案才能满足 $THD < 10\%$ 的航空标准。在 12 脉整流器的基础上,增加移相变压器的绕组和整流模

块,可以实现更高脉冲数的 18 脉整流系统,进一步降低输入谐波含量和输出脉动系数^[2-4]。隔离式的 18 脉变压整流器可以直接输出 28 V 电压,然而其变压器的体积重量大,绕组结构复杂;自耦式的 18 脉变压整流器虽然体积小重量轻,但其输出电压过高(280 V)且不可调^[5]。本文采用自耦式 18 脉变压整流器与降压电路相结合的方式构成蓄电池充电及整流单元(battery charger and rectifier unit, BCRU),实现航空变频交流电源到直流 28 V 的转换,并给蓄电池提供稳定的充电电源。本文以 18 脉自耦变压整流器及其降压电路为研究对象,设计了降压式 18 脉变压整流系统的结构和主要参数,分析其输入和输出特性,并在 Saber 仿真环境中对系统进行建模和仿真分析,验证系统的合理性。

2 系统工作原理

降压式18脉变压整流系统由18脉自耦变压整流器以及降压电路组成,如图1所示。

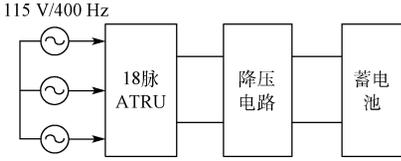


图1 系统原理

在18脉自耦变压整流器低输出电压纹波、低输入电流谐波的基础上用两级Buck电路进行降压,进一步通过后级Buck的闭环控制实现电压的28V恒定输出,满足航空低压直流的标准。

3 18脉ATRU性能分析

本文采用的18脉自耦变压整流器为DP型结构,如图2所示。输入为115V/400Hz三相交流电,自耦变压器产生3组三相电压(主桥相电压 V_a, V_b, V_c ,两组辅桥相电压分别为 $V_{a'}, V_{b'}, V_{c'}$ 和 $V_{a''}, V_{b''}, V_{c''}$,两组辅桥相电压分别超前和滞后主桥相电压 37°),3组三相电压经整流桥输出后的电压为瞬时最大线电压,由于整流桥传输功率不对称,故不需要平衡电抗器,输出端直接并联为负载供电。

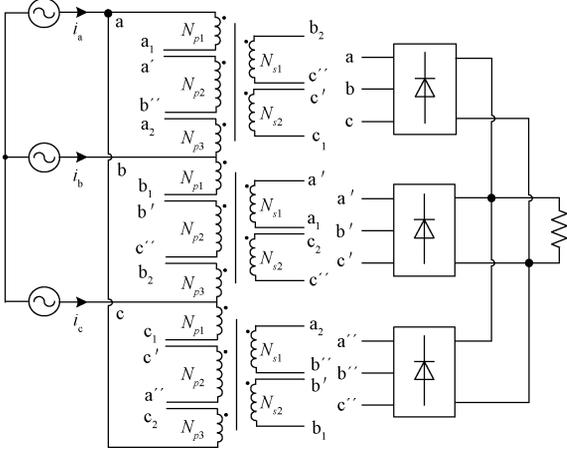


图2 DP型18脉自耦变压整流器

当辅桥电压超前和滞后主桥电压 37° ,并幅值是其0.767倍时,自耦变压器的输出为18个大小相等,相邻 20° 的线电压矢量,其部分绕组结构如图3所示。

根据图3可计算出的变压器匝比为:

$$\frac{N_{p1}}{N_{p2}} = \frac{N_{p3}}{N_{p2}} = 0.742, \quad \frac{N_{s1}}{N_{s2}} = \frac{N_{s2}}{N_{s2}} = 0.394 \quad (1)$$

整流器的输出在1个周期有18个脉波,其输出电压平均值为^[6]:

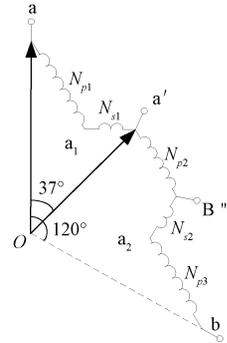


图3 DP型18脉自耦变压整流器部分绕组图

$$V_d = \sqrt{2}V_l \frac{18}{\pi} \sin \frac{\pi}{18} = 1.407V_l \quad (2)$$

式中: V_l 是主整流桥的输入电压有效值。当 V_l 为115V时, V_d 为280V,输出电压纹波理论值为 $0.015V_d$ 。

输入电流表达式为^[6]:

$$i_{sa} = \sum_{n=1,17,19L}^{+\infty} \frac{4I_d}{n\pi} (0.394 \cos \frac{n\pi}{18} + 0.347 \cos \frac{3n\pi}{18} + 0.259 \cos \frac{5n\pi}{18} + 0.135 \cos \frac{7n\pi}{18}) \sin n\omega t \quad (3)$$

由式(3)可得,输入电流中只含有 $18k \pm 1$ 次的谐波($k=1,2,\dots$),输入电流THD值为 10.1% ^[6]。一般在交流侧加入小感值滤波电感,即可使输入电流谐波满足国军标准要求。且DP型18脉自耦变压整流器的等效容量是输出功率的0.28倍^[6],体积重量小。

4 降压电路设计

4.1 降压电路参数设计

由于18脉自耦变压整流器不具有降压功能,其输出电压不能直接应用于飞机低压直流系统。考虑到若采用单级Buck进行降压,会导致由于占空比过小(理论值为0.1)而使开关管不能完全导通^[7],故本文采用两级Buck电路的方式进行降压,原理如图4所示。设计参数使前一级Buck的输出电压达到110V,通过后级Buck电路进行再次降压,两级Buck的占空比均在0.25~0.5之间,使输出电压稳定在28V,并为蓄电池提供稳定的充电电源。

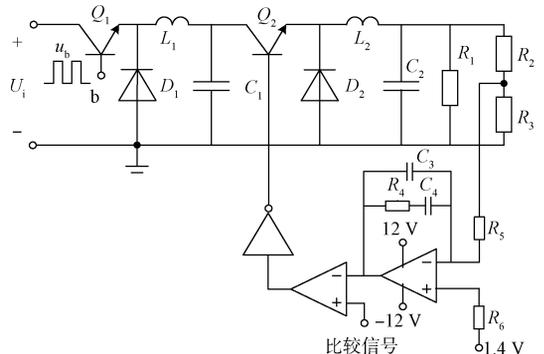


图4 降压电路

Buck 电路通过对开关管 Q 进行周期性的通、断控制进行降压,连续工作时输入电压 U_i 和输出电压 U_o 的关系为: $d=U_o/U_i$; d 是开关管的占空比, $d=T_{on}/T_s$, T_{on} 是开关管导通时间, T_s 是开关周期。当电感电流连续时,根据电感临界连续电流计算电感的表达式为^[7]:

$$L = \frac{U_i \cdot T_s \cdot d(1-d)}{2I_G} \quad (4)$$

式中: I_G 是电感临界连续电流,一般取纹波电流值为最大电流值的 10%~30%。实际电感值应大于临界电感值。根据输出电压纹波要求计算电容表达式为^[7]:

$$C = \frac{U_i d(1-d)}{8Lf^2 \Delta U_c} \quad (5)$$

式中: f 是开关频率, $\Delta U_c = \Delta U_{pp}$, 即输出纹波,实际为了更低的输出电压脉动,可取更大容值。

设计系统功率为 6.4 kW,开关管驱动的开关频率为 100 kHz,降压电路的设计参数如表 1 所示。

表 1 两级 Buck 电路主要设计参数

参数	输入电压/V	输出电压/V	占空比	输出电流/A	电感值/ μ H	电容值/ μ F
前级 Buck	270 \pm 2.7	110 \pm 1	0.407	60	54	50
后级 Buck	110 \pm 1	28 \pm 0.4	0.255	230	5.8	940

4.2 控制电路参数设计

采用电压型控制方法对后级 Buck 电路进行控制。其优点是占空比调节限制小,调试简单,对输出负载变化的响应较好^[8]。通过反馈回路控制开关管的导通和关断,实现对输出电压的调节。当输出电压变化时,占空比对应发生变化,调整输出电压使其稳定^[9]。根据图 4 电路可得后级 Buck 电路开环传递函数为:

$$G_{ud}(s) = \frac{V_1(1+sC_2R_c)}{L_2C_2s^2 + \frac{L_2}{R_1}s + 1} \quad (6)$$

式中: R_c 是 C_2 内阻,取 0.01 Ω 。由于开环系统不稳定,通过设计补偿网络降低系统截止频率,提高相角裕度,其传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{1+sR_4C_4}{sR_5(C_4+C_3)(1+sR_4C_3)} \quad (7)$$

故 Buck 闭环传递函数为:

$$T(s) = G_{ud}(s)K_v(s)G_c(s)F_m(s) \quad (8)$$

$K_v(s)$ 是 Buck 输出端由电阻分压构成的采样网络传递函数 $K_v(s)=R_3/(R_2+R_3)$ 。 $F_m(s)$ 是 PWM 发生器传递函数: $F_m(s)=d/u=1/V_M$ 。计算得反馈网络具体参数如表 2 所示。

表 2 反馈网络设计参数

器件	$R_2/$ k Ω	$R_3/$ k Ω	$R_4/$ k Ω	$R_5/$ k Ω	$R_6/$ k Ω	$C_3/$ μ F	$C_4/$ μ F
参数	19	1	10	1	10	0.03	20

设计之后的 Buck 电路截止频率为 5 kHz,对应相角裕度为 44°,系统稳定^[10]。

5 仿真实证

Saber 是美国 Analogy 公司开发的一款主要用于外围电路的仿真模拟软件,为了验证理论分析的正确性,根据上述计算的参数,用 Saber 软件建模进行仿真。主电路由三相电源、DP 型 18 脉自耦变压整流器、3 个三相整流桥、两级 Buck 电路以及后级 Buck 的控制电路组成。

设置三相电源为 115 V/400 Hz,取仿真步长为 1 μ s,额定输出电压 28 V,功率为 6.5 kW。在输入端串联电阻模拟电源的内阻,设置阻值为 25 m Ω ,输出端的滤波电容为 $C=470 \mu$ F,忽略其寄生电容和寄生电阻,在变压器的三相输入端分别串联滤波电感 $L=50 \mu$ H。

5.1 稳态性能仿真

18 脉自耦变压整流器仿真的输出为直流 276 V 电压,纹波为 2.1 V。图 5 是 18 脉自耦变压整流系统的输入电流波形,每 20° 一个电平,正弦性较好,其频谱分析结果显示频谱中低次谐波均被消除,只剩下了 17、19、35 和 37 次谐波,THD 值是 6.96%。图 6 是系统输出电压波形图,输出电压稳定在 28 V,电压纹波为 0.347 V。整个系统性能良好,均满足国军标的要求。

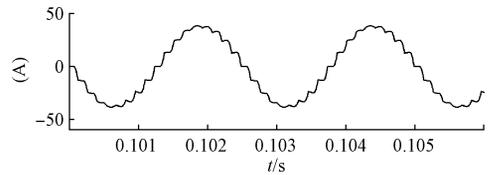


图 5 系统输入电流仿真波形

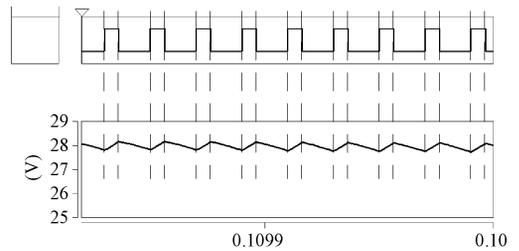


图 6 系统输出电压仿真波形

当输入电压、频率变化时变化时,仿真结果如表 3 所示。

结果表明当输入电压和频率发生变化时,系统在仿真环境中的输出电压稳定,电压波动小,且输入电流 THD 值均小于 10%,受电源输入影响较小。

5.2 动态性能仿真

为验证系统动态性能,当输入稳定时使负载从额定负载突变到 0.5 倍负载,系统输入电流与输出电压仿真波形分别如图 7 和 8 所示。

表3 不同输入下的系统仿真结果

三相输入	U_o/V	U_{pp}/V	$THD(A相)$
108 V/360 Hz	28	0.358	6.91%
108 V/400 Hz	28	0.314	6.71%
108 V/800 Hz	28	0.338	5.68%
115 V/360 Hz	28	0.345	7.14%
115 V/400 Hz	28	0.347	6.95%
115 V/800 Hz	28	0.355	5.61%
118 V/360 Hz	28	0.363	7.27%
118 V/400 Hz	28	0.373	7.05%
118 V/800 Hz	28	0.339	6.69%

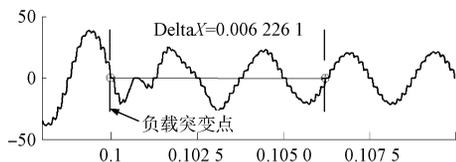


图7 负载突变时输入电流仿真波形

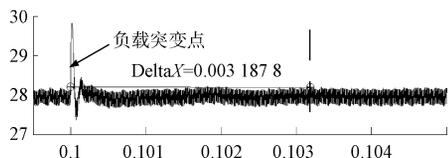


图8 负载突变时输出电压仿真波形

当负载突变时,系统的输入电流和输出电压在发生畸变后均可以在短时间恢复稳定。如图7所示的输入电流在震荡之后变小,测得稳定之后的电流谐波为8.01%;系统输出电压在震荡之后保持28V,如图8所示,电压纹波不变。系统动态性能良好。

6 结 论

本文研究了一种新型的降压式18脉自耦变压整流系统,可稳定输出航空低压直流28V并给蓄电池提供稳定的充电电源。分析了18脉自耦变压整流器、Buck及其控制电路的工作机理,设计了闭环系统的电路参数。通过对

系统进行建模仿真,分析了系统的输出电压及其纹波和输入电流谐波,其输入输出满足国军标的要求,系统的稳态性能和动态性能均良好,验证了理论分析的正确性。

参考文献

- [1] 毛浪. 低谐波多脉冲整流器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [2] SINGH B, BHUVANESWARI G, KALPANA R. Autoconnected transformer-based 18-pulse ac-dc converter for power quality improvement in switched mode power supplies[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(4):525-541.
- [3] SWAMY M, KUME T J, TAKADA N. A hybrid 18-pulse rectification scheme for diode front end variable frequency drives [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 1562-1568.
- [4] 谢小威. 飞机变压整流器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [5] 欧阳玲. 基于自耦变压器的18脉波整流器的研究及应用[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [6] 杨春. DP型18脉冲自耦变压整流器仿真研究及设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] 丁道宏. 电力电子技术[M]. 北京:航空工业出版社,1999.
- [8] 周楚,张琼英,高宇,等. 一种通用高精度DSP控制的Buck变换器设计[J]. 电子测量技术,2014, 37(4): 19-24.
- [9] 吴红斌,顾细,赵波,等. 蓄电池充放电管理的全过程仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014, 28(8): 843-849.
- [10] 王毅. 压控型Buck变换器系统分析及设计[D]. 长沙:湖南大学,2013.

作者简介

杨光(通讯作者),1992年出生,硕士研究生,主要研究方向为飞机电源系统。

E-mail:guangtmy@163.com