

文章编号: 1674-8190(2023)03-118-14

多类别航空变压整流器的典型故障模式研究

陈舒文¹, 喻拿仑²

(1. 上海民航职业技术学院 民航维修学院, 上海 200235)

(2. 中国商飞上海飞机客户服务有限公司 维修工程部, 上海 200241)

摘要: 随着多电飞机的发展, 关于航空变压整流器 (TRUs) 的结构改进及故障诊断的研究日益增多, 但缺少关于不同类别变压整流器典型故障模式特点及影响的研究。基于对 TRUs 的结构分析, 对 TRUs 进行零部件失效模式及影响分析 (FMEA) 和故障树分析 (FTA), 确定 TRUs 的典型故障模式; 利用 Simulink 建立典型 TRUs 的仿真模型, 分析比较不同故障模式下 TRUs 的电信号特点; 并定义 8 种 TRUs 详细的故障类别。结果表明: TRUs 的硬故障对系统影响较大, 其中高脉冲 TRUs 在故障模式下的稳定性更好, 但可靠性相对较低。

关键词: 航空变压整流器; 失效模式及影响分析; 故障树分析; Simulink 仿真; 故障模式

中图分类号: V242; V328.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.03.12

Research on the typical fault modes of multi-category aviation transformer rectifier units

CHEN Shuwen¹, YU Nalun²

(1. Civil Aviation Maintenance College, Shanghai Civil Aviation College, Shanghai 200235, China)

(2. Maintenance Engineering Department, COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: With the development of multi-electric aircraft, the researches on the structure improvement and fault diagnosis of aviation transformer rectifier units (TRUs) are increasing, but research on the characteristics and effects of typical fault modes of different types of TRUs is lacked. Based on the analysis of TRUs structures, the failure mode and effects analysis (FMEA) and fault tree analysis (FTA) of TRUs are studied to determine typical failure modes of TRUs. Then, simulation models of various TRUs are established by Simulink, and the electrical signal characteristics of TRUs under different fault modes are analyzed and compared; the detailed fault modes of 8 TRUs are defined. The results show that the hard faults of TRUs have great impact on the system, and the high-pulse TRUs have better stability under fault modes and lower reliability.

Key words: aviation transformer rectifier units; failure mode and effects analysis; fault tree analysis; Simulink simulation; fault modes

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-09-24

基金项目: 民航教育人才专项(2146999); 上海市 2020 年度晨光计划(20CGB23)

通信作者: 陈舒文, csw_nuaa@126.com

引用格式: 陈舒文, 喻拿仑. 多类别航空变压整流器的典型故障模式研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 118-131.

CHEN Shuwen, YU Nalun. Research on the typical fault modes of multi-category aviation transformer rectifier units[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 118-131. (in Chinese)

0 引言

随着节能减排、绿色环保等概念的提出,有关多电飞机和全电飞机的研究日益增多^[1]。航空器上使用较多的液压能、气压能和机械能等已逐步被电能替代,电能的使用大幅提高了航空系统的维护便捷性及可监控性^[2]。

为满足航空器上多种直流供电的需求,一般采用交流/直流(AC/DC)转换装置作为机载二次电源。变压整流器(Transformer Rectifier Units,简称TRUs)无活动部件、无换向火花、噪声及谐波含量低且转换率较高,多被用于航空器上作为机载AC/DC转换装置。TRUs可根据电源系统的不同需求,将交流电转化为270或28V的两种高低压直流电为各负载系统进行供配电。

工业领域电力电子装置可靠性的统计数据显示,超过40%的工业用户曾因电力电子装置故障而遭受了极大的损失,损失程度超过系统总成本的50%^[3-5]。由此可见,随着航空器上电力电子设备使用量的增加,航空电子器件的故障率和返修率也将大幅提升。

TRUs作为航空电源系统的重要设备,一旦发生故障不能及时进行诊断及维护,将对航空电源系统及相关的直流供电设备造成极大的影响。目前,关于TRUs的研究大致可以分为两类:TRUs结构改进^[6-8]和TRUs故障诊断研究^[9-10]。关于TRUs结构改进的研究较多,关于TRUs故障诊断的研究较少。Jiang F等^[6]、李男等^[7]、杨光等^[8]分别依据不同的要求对不同脉冲数的TRUs结构进行了研究及改进,改善了TRUs的调压技术、降低了系统的复杂度等;石旭东等^[9]采用一种基于堆叠降噪自动编码器与粒子群优化支持向量机相结合的算法对某一12脉TRUs进行了故障诊断研究;Lin Y等^[10]采用了两阶段神经网络算法基于TRUs多种电信号对某一12脉TRUs进行故障诊断研究;Chen S等^[11]采用SDCNN方法针对3种24脉TRUs进行故障诊断研究。这些研究主要针对故障诊断方法的准确性、及时性等方面进行改进,且大部分仅选择单一结构的TRUs作为研究对象,未对不同类别TRUs的典型故障模式进行详细分析和比较。随着TRUs结构及类别的多样化,明确TRUs典型的故障模式及故障逻辑关系极为重要。

本文将在TRUs结构分析的基础上,首先对现

有TRUs的结构及分类进行研究;然后结合失效模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis,简称FMEA)和故障树分析(Fault Tree Analysis,简称FTA)方法对TRUs进行安全性分析,确定TRUs的典型故障模式;最后基于Simulink对多类别TRUs进行建模,研究不同故障模式下TRUs的信号波形特点,并细化TRUs的故障模式。

1 TRUs的结构介绍

1.1 TRUs的基本结构

随着航空电子集成度的提高,有关航空TRUs的研究和应用逐渐增多。最简单且最早应用于航空业的是6脉冲整流电路,如图1所示,其主要包括变压器和桥式三相不控型整流电路两部分。

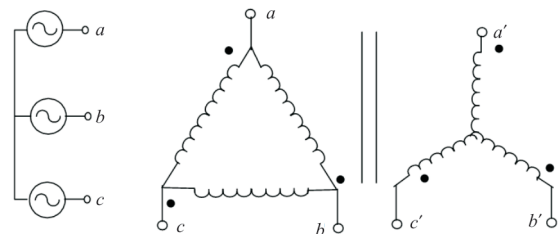


图1 6脉冲变压整流器拓扑

Fig. 1 6-pulse transformer rectifier topology

随着TRUs的发展,民航适航标准RTCA DO-160G—2011^[12]和国军标GJB299C—2006^[13]中均对交流侧电流总谐波含量(Total Harmonic Distortion,简称THD)进行了规定。6脉冲整流电路的输入侧电流的THD值远未达到规定的标准。因此,为了降低输入电流的总谐波畸变率,获得更高的等效容量和功率系数,对TRUs结构的研究和应用日益增多。

对多类别的TRUs进行研究发现,TRUs结构一般包括4个部分:

- 1) 交流汇流条:为TRUs供电,是TRUs的三相输入电压;
- 2) 主变压器:主要包括变压器绕组和铁芯两部分;不同的铁芯结构及绕组形式将影响TRUs的体积、重量、等效容量、电流密度等;
- 3) 整流模块:主要由整流二极管组成,由于整流二极管数量较多,一般使用集成模块;
- 4) 平衡电抗器模块:用于系统均流。

1.2 TRUs的分类

本文依据 TRUs 主变压器类型、交流侧与直流侧是否有电隔离以及 TRUs 整流器中各组整流桥的能量传输情况对 TRUs 进行类别划分。并依据整流器的脉冲数,将 TRUs 结构进一步细分为 12 脉、18 脉、24 脉等,如图 2 所示。

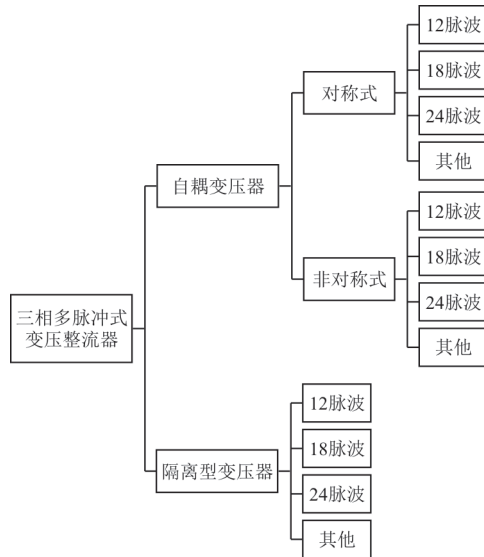


图 2 三相多脉冲式变压整流器分类
Fig. 2 Classification of three-phase multi-pulse transformer rectifier

从图 2 可以看出:目前研究的 TRUs 类别主要可以分为自耦变压整流器 (Auto-transformer Rectifier Unit, 简称 ATRU)、隔离型变压整流器 (Isolated-transformer Rectifier Unit, 简称 Iso-TRU) 两大类。其中,TRUs 的主变压器主要包括星形(Y 型)、三角形(D 型)、多边形(P 型)、差接三角形(DP 型)4 种典型拓扑,如图 3 所示,其中 Y 型绕组绕制最为简单,DP 型结构的绕制最为复杂。另外,TRUs 的脉冲数越高,其使用的整流二极管越多,结构越复杂。平衡电抗器模块一般仅在对称式自耦变压器中使用。

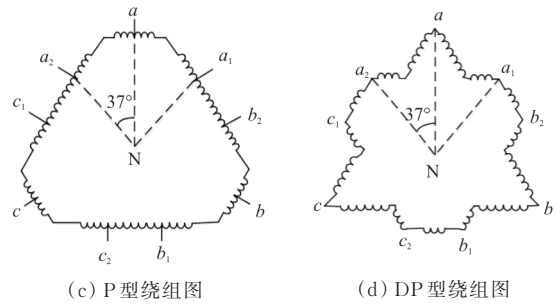
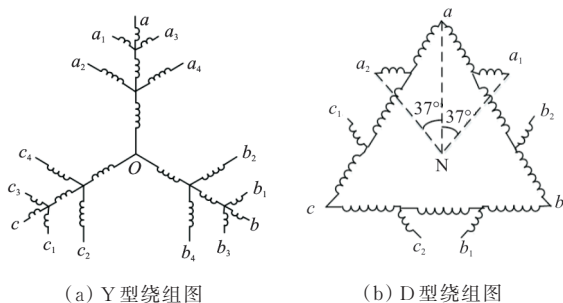


图 3 绕组结构图
Fig. 3 Structures of different windings

由常用电力电子电路的失效因素统计得知,功率开关管失效与焊接点失效占整体失效的 40% 左右^[14]。而 TRUs 主要由变压器和功率开关管组成,发生故障的概率较高。因此,本文将从 TRUs 的 4 个部分出发对多类别 TRUs 的典型故障模式进行分析。

2 TRUs 的典型故障模式研究

2.1 TRUs 的失效模式及影响分析

失效模式及影响分析(FMEA)是一种自下而上、由因及果的归纳分析方法。FMEA 可全面分析元器件、零部件、设备等系统底层各器件可能出现的故障模式、原因、检测方法及严酷度。变压整流器的故障状态对系统影响的严重程度如表 1 所示。

表 1 变压整流器直流供电的严酷度等级^[15]
Table 1 Severity level of DC power supply of TRUs^[15]

严酷度	等级	描述
灾难的	I	飞机直流供电系统失效
危险的	II	系统丧失主要功能,任务失败
较大的	III	系统功能下降,任务出现延误
较小的	IV	系统功能正常,需要进行非计划性维修
无安全影响	V	系统正常运行

由之前的分析可知,TRUs 主要包括输入端、主变压器、整流模块和平衡电抗器 4 个部分。TRUs 的零部件 FMEA 分析结果如表 2 所示。

表 2 TRUs 零部件 FMEA
Table 2 TRUs parts FMEA

零部件	功能	故障模式	故障原因	故障检测方法	严酷度
交流汇流条	输入电压	幅值不对称	负载电流变化;环境温度变化	测试; TRUs 综合故障信号灯亮起	IV
		相位不对称	负载电流变化;环境温度变化	测试; TRUs 综合故障信号灯亮起	IV
主变压器	变压器电路部分	绕组开路	绕组相间焊接点接触不良;绕组老化	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		绕组短路	相间/匝间/层间绝缘击穿	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		绕组参数漂移	杂质灰尘、热胀冷缩等	测试	IV
	变压器铁芯	铁芯绝缘下降	铁芯受潮;铁芯绝缘层损坏	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		铁芯变形或破裂	极大的机械冲击;机械振动	目视检查;TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		磁芯老化	长时间过热工作	测试	IV
整流模块	整流	二极管短路	过压击穿;过流击穿;开机浪涌电流等	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		二极管开路	温度过高,焊锡二次熔化;应力冲击,元件破裂	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		二极管参数漂移	二极管老化	测试	IV
平衡电抗器	均流	匝间短路	焊接质量不佳;电感局部温度过高	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		绕组与引线接触不良	连接处长期发热,导致电抗器引线接头熔断	TRUs 综合故障信号灯亮起	III
		电抗器参数漂移	连接处长期发热,导致电抗器老化	测试	IV

从表 2 可以看出:TRUs 的大部分故障与环境、焊接点、机械振动等相关。因此,在 TRUs 的运行过程中,应保证其环境干燥、散热良好,并避免出现极大的机械冲击或长时间的机械振动;在维护过程中,应注意铁芯绕组的使用情况,查看是否出现松动或裂缝等情况。

2.2 TRUs 的故障树分析

故障树分析(FTA)可用于设备故障的定性和定量分析,已广泛应用于工程实践之中。为了明确 TRUs 各故障之间的逻辑关系,建立包含平衡电抗器的 ATRU 故障树模型,如图 4 所示。

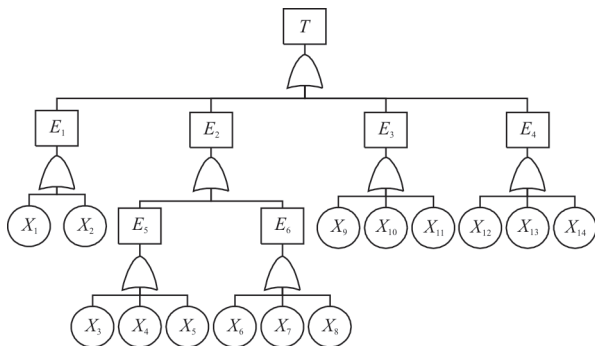


图 4 多脉冲 ATRU 故障树

Fig. 4 Multi-pulse ATRU fault tree

图 4 中, T 代表顶事件, E 代表中间事件, X 代表底事件, 各编号含义如表 3 所示。

表 3 ATRU 故障树事件编号及含义^[16]
Table 3 Event number and meaning of ATRU FTA^[16]

编号	含义	编号	含义
T	ATRUs 供电通道输出故障	X ₅	绕组参数漂移
E ₁	输入端不对称	X ₆	绝缘下降
E ₂	主变压器失效	X ₇	变形或破裂
E ₃	整流桥失效	X ₈	磁芯老化
E ₄	平衡电抗器失效	X ₉	二极管短路
E ₅	绕组失效	X ₁₀	二极管开路
E ₆	铁芯失效	X ₁₁	二极管参数漂移
X ₁	幅值不对称	X ₁₂	匝间短路
X ₂	相位不对称绕组	X ₁₃	引线接触不良
X ₃	绕组开路	X ₁₄	参数漂移
X ₄	绕组短路		

对 ATRU 故障树进行布尔运算, 得:

$$T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = E_5 + E_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} \quad (1)$$

基于《电子设备可靠性预计手册》^[13], ATRU 各器件的失效率计算如下:

1) 自耦变压器

参考《电子设备可靠性预计手册》^[13], 变压器的工作失效率模型为

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_K \quad (2)$$

式中: λ_p 为工作失效率; λ_b 为基本失效率; π_E 为环境系数; π_Q 为质量系数; π_K 为种类系数。

各参数如表 4 所示。

表 4 三相变压器工作失效率
Table 4 Failure rate of three-phase transformer

参数	数值	参数	数值
$\lambda_b/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.013 8	$\pi_K/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	5
$\pi_E/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	12	$\lambda_p/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.496 8
$\pi_Q/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.6		

注: λ_b 按最高工作环境温度 70 °C 选取, 平均温升 4.5 °C。

结合式 (2) 及表 4, 计算得出三相变压器工作失效率为 $0.496 8 \times 10^{-6}/h$ 。其中, 变压器开路故障、短路故障及参数漂移的发生比例分别为 40.2%、28.0%、8.40%。

2) 整流桥模块

航空 TRUs 的整流桥一般选择硅二极管, 参考《电子设备可靠性预计手册》^[13], 该二极管的工作失效率为

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_T \pi_S \quad (3)$$

式中: π_T 为温度系数; π_S 为电应力系数。

各参数数据如表 5 所示。

表 5 整流二极管工作失效率
Table 5 Failure rate of rectifier diode

参数	数值	参数	数值
$\lambda_b/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.001 17	$\pi_T/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	1.5
$\pi_E/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	5.8	$\pi_S/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.5
$\pi_Q/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	2	$\lambda_p/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.010 2

注: π_T 按最高工作环境温度 70 °C 选取。

结合式 (3) 及表 5, 计算得出单个主辅桥二极管失效率均为 $0.010 2 \times 10^{-6}/h$ 。整流桥模块的整体失效率与 TRUs 的脉冲数相关, 脉冲数越高, 失效率越高。其中, 12 脉 TRUs 中包含 2 组整流桥, 共 12 个整流桥二极管, 则整流桥模块的总工作

失效率为 $0.122 4 \times 10^{-6}/h$; 以此类推, 18 脉 TRUs 整流桥模块的总工作失效率为 $0.183 6 \times 10^{-6}/h$; 24 脉整流桥模块的总工作失效率为 $0.244 8 \times 10^{-6}/h$ 。另外, 整流二极管发生开路故障、短路故障及参数漂移的比例分别为 29.0%、51.0%、20%。

3) 平衡电抗器

平衡电抗器也称为相间变压器, 是一类特殊的变压器, 工作失效率模型与自耦变压器相同。平衡电抗器失效率的相关参数如表 6 所示, 计算得到单个平衡电抗器的工作失效率为 $0.248 4 \times 10^{-6}/h$ 。

表 6 平衡电抗器工作失效率
Table 6 Failure rate of balance reactor

参数	数值	参数	数值
$\lambda_b/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.013 8	$\pi_K/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	5
$\pi_E/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	12	$\lambda_p/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.248 4
$\pi_Q/(10^{-6} \cdot h^{-1})$	0.3		

受到温度、湿度及机械振动的影响, TRUs 输入端常出现电压不对称的情况。另外, TRUs 的输入电压会受到工作环境、前级工作负载等较多因素的影响, 输入电压幅值和相位出现 $\pm 10\%$ 的波动在 TRUs 的使用中较为普遍。但未查找到输入电压不对称的发生概率, 因此在计算中未考虑其失效率。

2.3 TRUs 的典型故障模式

由 TRUs 的 FMEA 和 FTA 可知, TRUs 各模块的结构性故障(硬故障)发生的概率均高于软故障(参数漂移)^[17], 硬故障一旦发生便不可自行恢复, 会对系统造成较为严重的影响。因此, 从 TRUs 四个主要部分出发, TRUs 的典型故障模式包括:

1) 输入端故障

① 输入电压幅值不对称(Amplitude Asymmetry of Input Voltage, 简称 In-Amp): 输入电压某相幅值波动超过 $\pm 10\%$;

② 输入电压相位不对称(Phase Asymmetry of Input Voltage, 简称 In-Ph): 输入电压某相相位波

动超过 $\pm 10\%$ 。

2) 主变压器故障

各相绕组间发生开路故障(Open-Circuit Fault between Windings,简称OCW)。

3) 整流模块故障

①单桥臂发生短路故障(Single-Diode Short,简称SDS);

②单桥臂发生开路故障(Single-Diode Open,简称SDO);

③双桥臂同时发生开路故障(Double-Diode Open,简称DDO)。

SDS为TRUs整流桥模块的主要故障之一,当单桥臂出现短路失效时,其压降将小于正常值或无限接近0,50%左右的失效二极管都呈现出短路或是阻性穿通的失效状态^[12]。整流器二极管开路故障相对短路故障较少见,常由过热或应力冲击引起。

4) 平衡电抗器故障

各相绕组间发生开路故障(Open-Circuit Fault in Balance Reactor,简称OCR)。

以上故障均为硬故障,在TRUs结构中普遍存在,且发生概率较大,一旦发生将造成较为严重的后果,因此,定义以上故障为TRUs的典型故障模式。

3 多类别TRUs的故障模式分析

3.1 不同故障模式下TRUs的信号波形比较

随着民用航空适航标准、国军标等对电流总谐波含量要求的提高,现阶段使用及研究较多的一般为12脉、18脉及24脉变压整流器。为了验证TRUs各模块的工作原理及故障模式,选取4种典型TRUs结构作为信号波形比较的研究对象:

1) 隔离式12脉TRUs(Iso-12)^[18]:其变压器原边为Y型联结,副边为D型和Y型联结;

2) 非对称式18脉ATRU(Asy-18)^[19]:其自耦变压器为DP型联结;

3) 对称式24脉ATRU(Sy-24)^[20]:其自耦变压器为Y型联结;

4) 非对称式24脉ATRU(Asy-24)^[21]:其自耦变压器为DP型联结。

采用MATLAB对以上4种TRUs结构搭建系

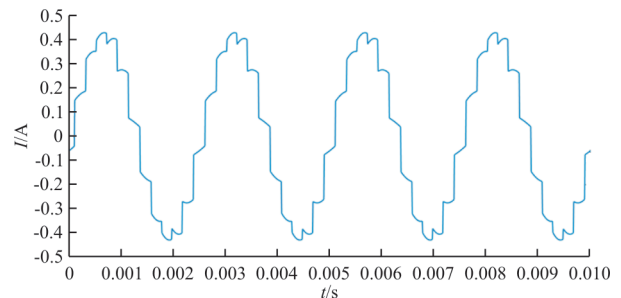
统仿真模型。其中,使用Simulink中的多绕组变压器模块按照原理图进行绕组连接。为了保证仿真波形的平稳和精确,设置仿真步长为0.2s,采样频率为50000Hz,对典型TRUs在不同故障模式下的典型信号波形进行比较。

1) 输入端

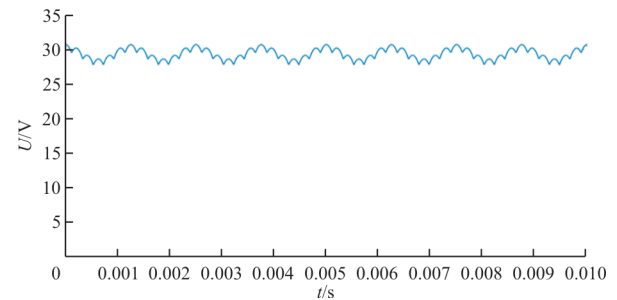
①输入电压幅值不对称(In-Amp),将A相电压峰值设置为正常峰值的90%;

②输入电压相位不对称(In-Ph),将三相输入电压的相位分别设置为 $0^\circ/124^\circ/240^\circ$ 。

Iso-12、Asy-18及Sy-24在两种情况下的A相输入电流及输出电压波形分别如图5~图10所示。



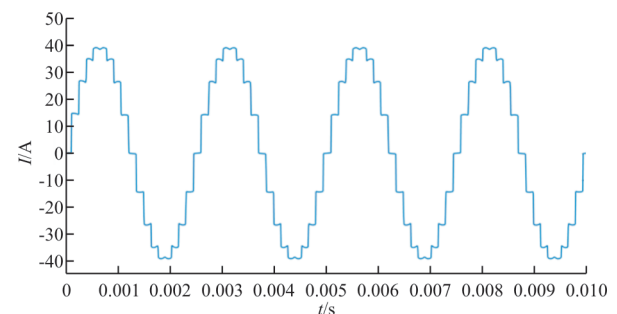
(a) A相输入电流波形



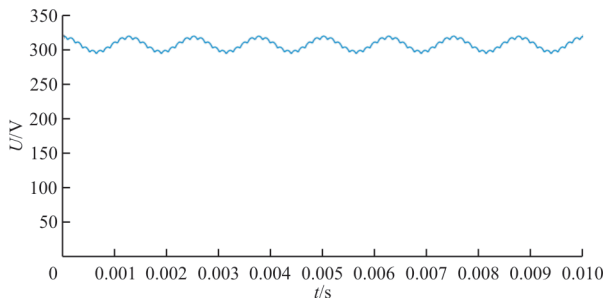
(b) 输出电压波形

图5 隔离型12脉TRUs电路波形(In-Amp)

Fig. 5 Circuit waveform of Iso-12 (In-Amp)

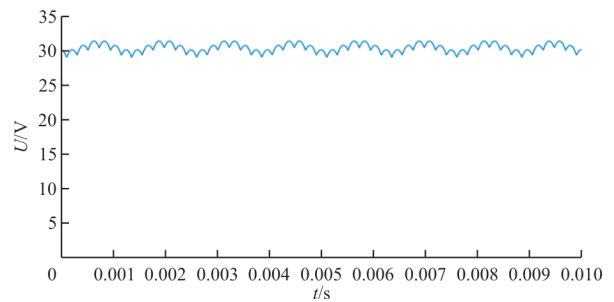


(a) A相输入电流波形



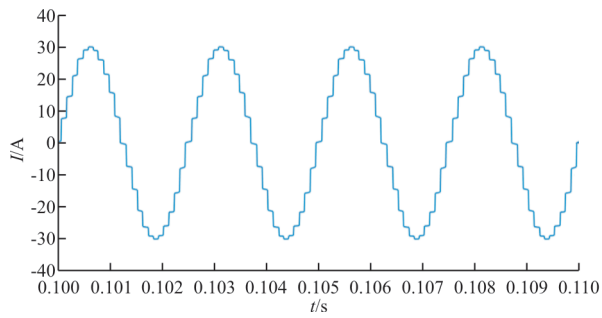
(b) 输出电压波形

图 6 Asy-18 电路波形 (In-Amp)
Fig. 6 Circuit waveform of Asy-18 (In-Amp)

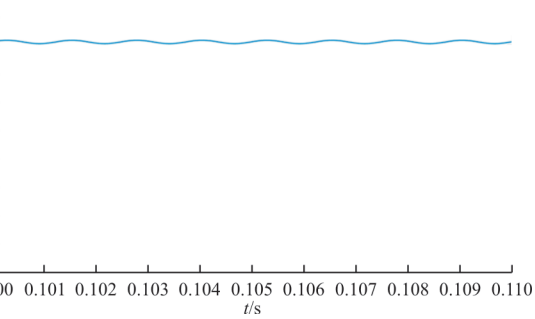


(b) 输出电压波形

图 8 Iso-12 电路波形 (In-Ph)
Fig. 8 Circuit waveform of Iso-12 (In-Ph)

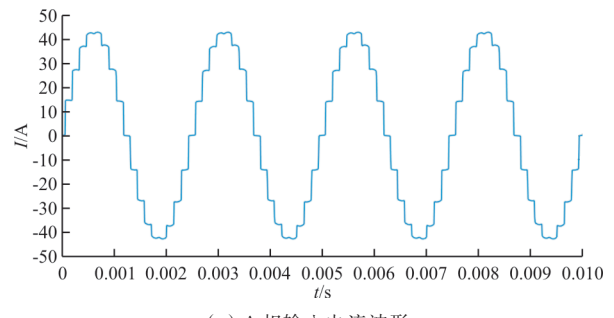


(a) A 相输入电流波形

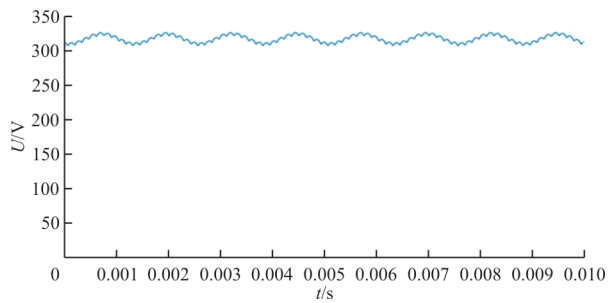


(b) 输出电压波形

图 7 Sy-24 电路波形 (In-Amp)
Fig. 7 Circuit waveform of Sy-24 (In-Amp)

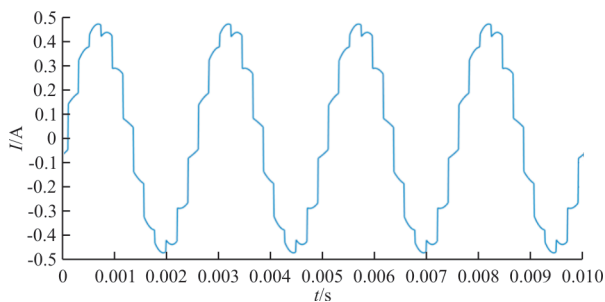


(a) A 相输入电流波形

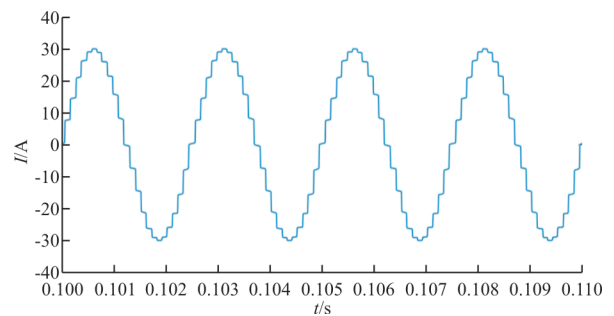


(b) 输出电压波形

图 9 Asy-18 电路波形 (In-Ph)
Fig. 9 Circuit waveform of Asy-18 (In-Ph)



(a) A 相输入电流波形



(a) A 相输入电流波形

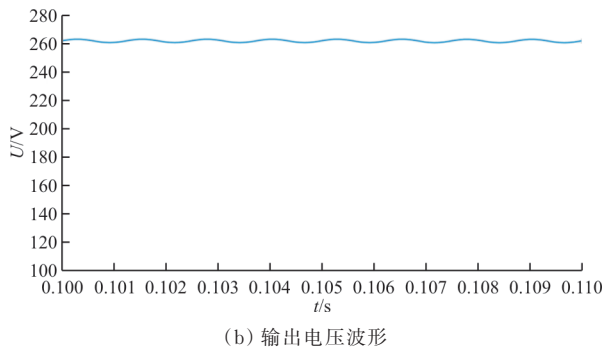


图 10 Sy-24 电路波形(In-Ph)
Fig. 10 Circuit waveform of Sy-24 (In-Ph)

从图 5~图 10 可以看出:不同类别 TRUs 在输入端故障下的波形具有以下特点:

- ①输入电流波形发生畸变,输出电压纹波增大。
- ②12 脉 TRUs 的波形畸变最为明显;TRUs 的脉冲数越高,畸变越小;高脉冲 TRUs 在输入电压不对称的情况下,输入电流波形仍具有较好的对称性。
- ③输入端不对称程度增加,电流畸变和电压纹波更明显,谐波含量增加,将影响直流负载供电。

2) 主变压器

主变压器各相绕组间发生开路故障(OCW),将断开变压器绕组某处引脚进行仿真。Iso-12、Asy-18 及 Sy-24 某处绕组发生相间断开情况的输入电流及输出电压波形分别如图 11~图 13 所示。

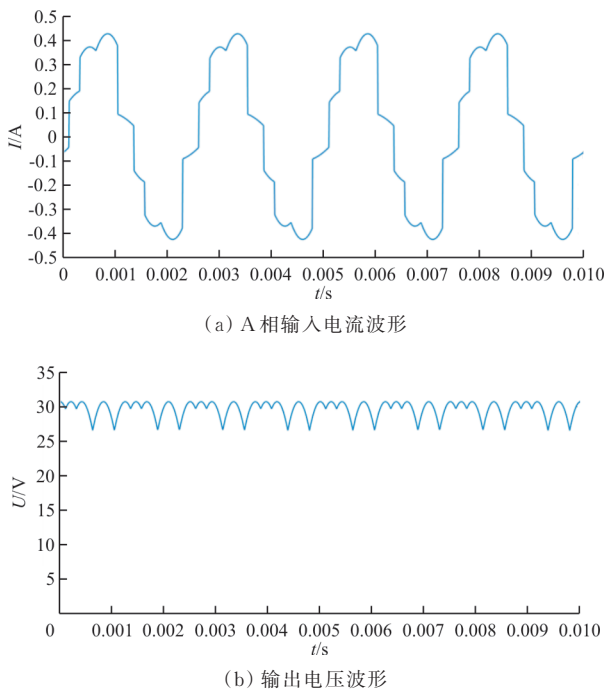


图 11 Iso-12 电路波形(OCW)
Fig. 11 Circuit waveform of Iso-12 (OCW)

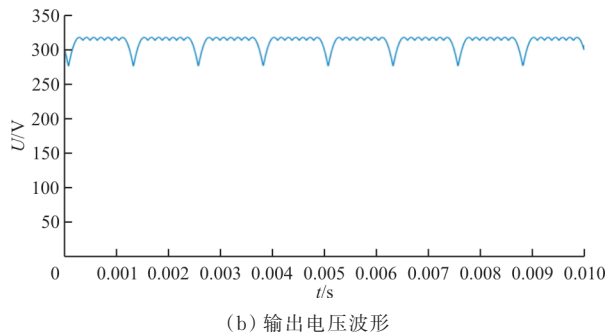
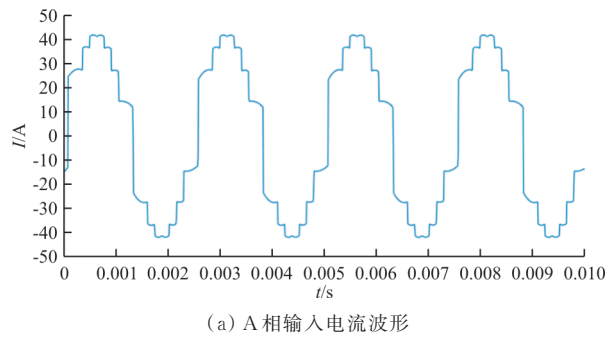


图 12 Asy-18 电路波形(OCW)
Fig. 12 Circuit waveform of Asy-18 (OCW)

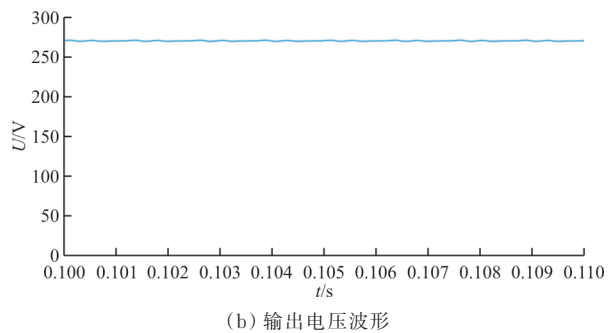
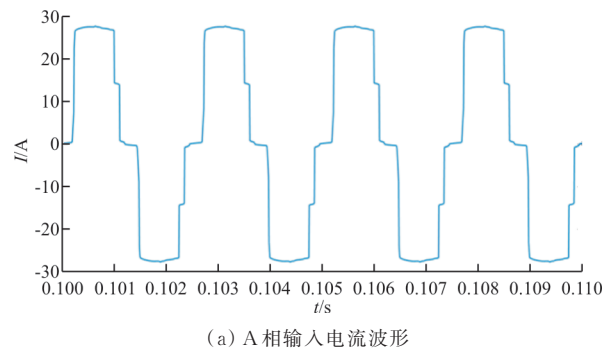


图 13 Sy-24 电路波形(OCW)
Fig. 13 Circuit waveform of Sy-24 (OCW)

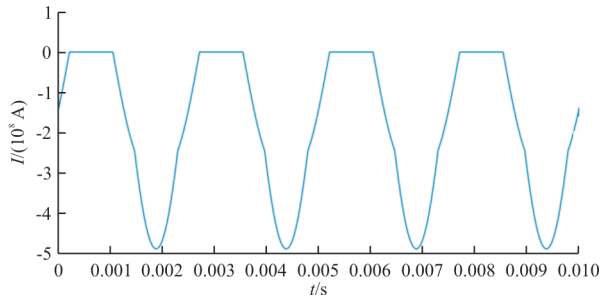
从图 11~图 13 可以看出:不同类别 TRUs 在主变压器相间开路下的波形具有以下特点:

- ①各类 TRUs 的输入电流均无法形成规则的阶梯波,且电流畸变较为严重。

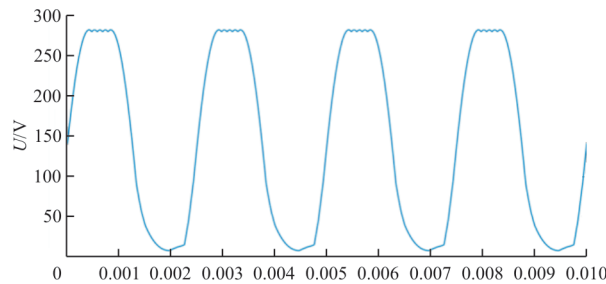
② 输出电压纹波较大,不能直接用于航空直流负载的供电。

3) 整流模块

a) 对于单桥臂发生短路故障(SDS),Asy-24主桥单桥臂短路及辅桥单桥臂短路的信号波形如图14~图15所示。



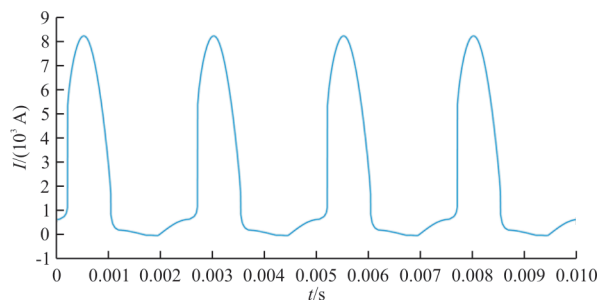
(a) A相输入电流波形



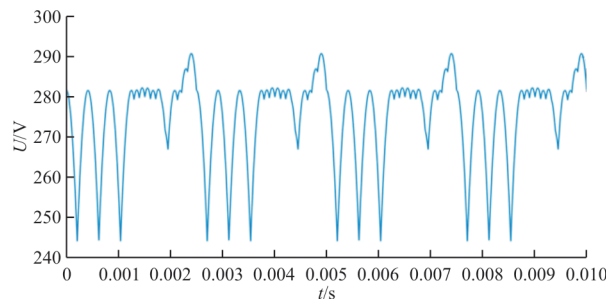
(b) 输出电压波形

图14 Asy-24电路波形(SDS-主桥)

Fig. 14 Circuit waveform of Asy-24 (SDS-main bridge)



(a) A相输入电流波形

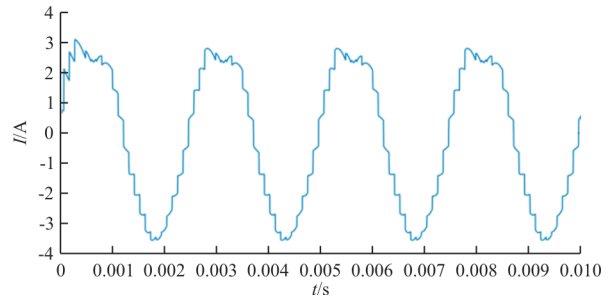


(b) 输出电压波形

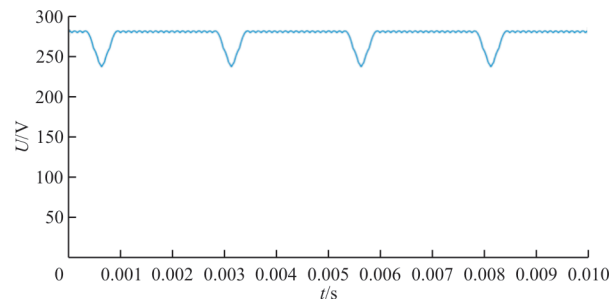
图15 Asy-24电路波形(SDS-辅桥)

Fig. 15 Circuit waveform of Asy-24 (SDS-auxiliary bridge)

b) 单桥臂发生开路故障(SDO),Asy-24主桥单桥臂开路和辅桥单桥臂开路的信号波形如图16~图17所示。



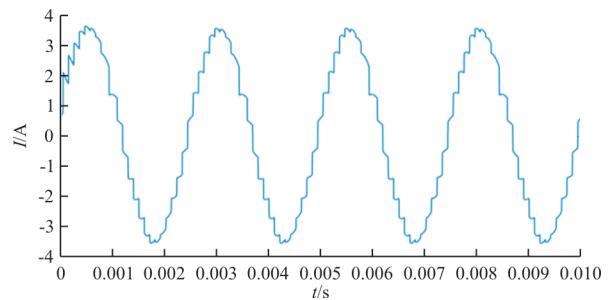
(a) A相输入电流波形



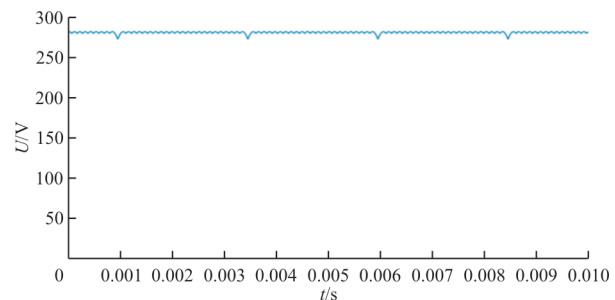
(b) 输出电压波形

图16 Asy-24电路波形(SDO-主桥)

Fig. 16 Circuit waveform of Asy-24 (SDO-main bridge)



(a) A相输入电流波形



(b) 输出电压波形

图17 Asy-24电路波形(SDO-辅桥)

Fig. 17 Circuit waveform of Asy-24 (SDO-auxiliary bridge)

c) 双桥臂同时发生开路故障(DDO), Asy-24 主桥和辅桥各有一桥臂同时断开的信号波形如图 18 所示。

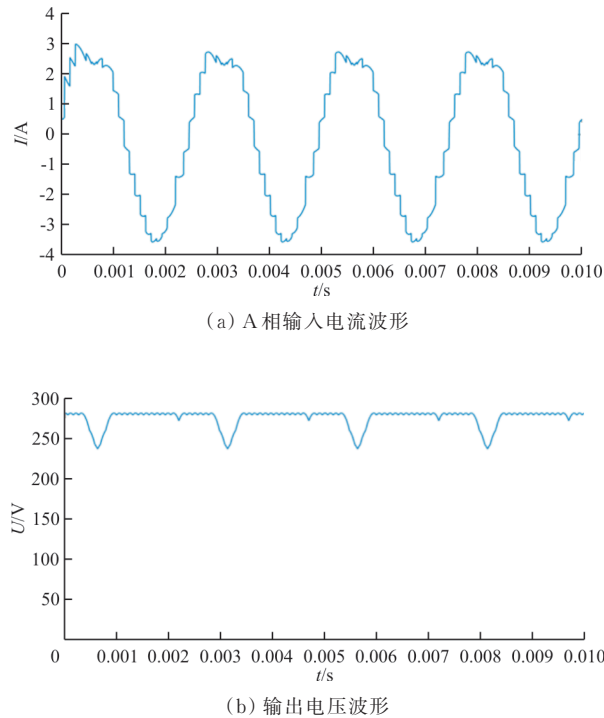


图 18 Asy-24 电路波形(DDO)
Fig. 18 Circuit waveform of Asy-24 (DDO)

从图 14~图 15 可以看出:当 TRUs 的整流模块出现单桥臂短路时,输入电流脉冲可达兆安级,输出电压波形也严重不规则,不能用于直流供电。

从图 16~图 18 可以看出:正常情况下,24 脉 TRUs 的输出电压每一周期包含 24 个均匀的脉冲波头。当 TRUs 整流模块出现桥臂开路故障时,其波形具有以下特点:

- ①当整流二极管发生开路时,输入电流发生畸变,输出电压缺失相应波头;
- ②对于不对称 TRUs,主桥桥臂发生开路时,输入电流和输出电压发生的畸变比辅桥桥臂发生开路时更严重;
- ③整流桥多桥臂发生故障时,输出电压波形一般变为单桥臂故障波形的叠加。

4) 平衡电抗器

平衡电抗器的相间开路故障(OCR)与主变压器类似,Sy-24 平衡电抗器绕组出现单点断路时的信号波形如图 19 所示。

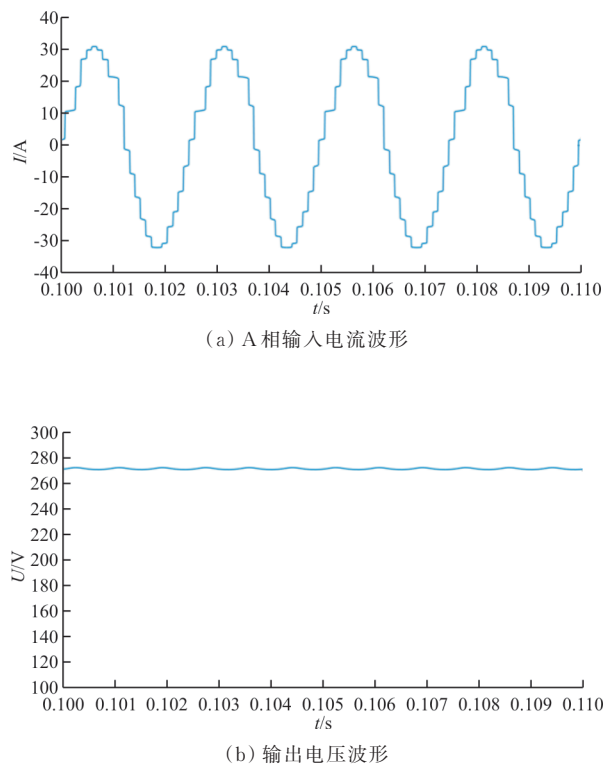


图 19 Sy-24 电路波形(OCR)
Fig. 19 Circuit waveform of Sy-24 (OCR)

从图 19 可以看出:OCR 的故障信号波形与主变压器相间开路故障的波形类似,但是,OCR 所引起的输入电流波形畸变和输出电压纹波较小。

3.2 TRUs 的试验波形

在仿真的基础上,搭建某一非对称式 24 脉 ATRU 样机试验台,如图 20 所示,主要包括自耦变压器、4 组整流桥、散热器、输入输出端以及系统内部引线。

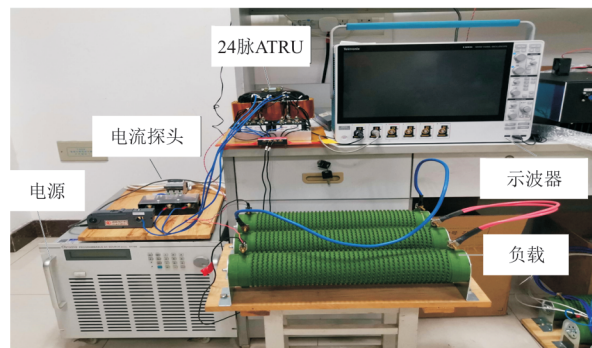
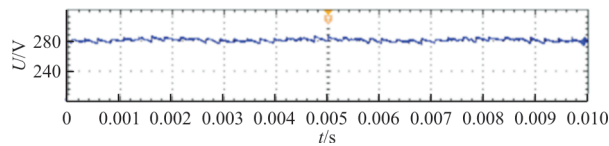
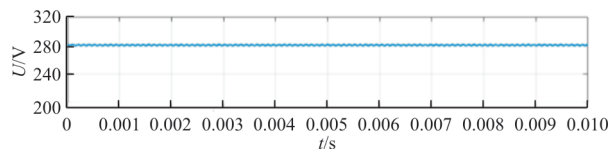


图 20 24 脉 ATRU 试验样机
Fig. 20 24-pulse ATRU test prototype

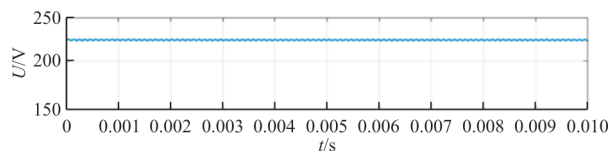
样机输出端为 2.8 kW 纯电阻负载,给系统输入 115 V/400 Hz 三相交流电,在额定负载情况下测量系统的波形。两种 24 脉 ATRU 仿真及该 24 脉 ATRU 结构的样机在正常情况及桥臂开路、输入电压幅值不对称等故障模式下的输出电压波形如图 21 所示。



(a1) ATRU-24 实验样机的波形

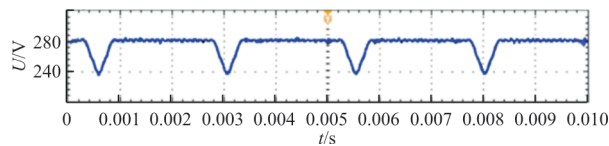


(a2) Sy-24 的仿真波形

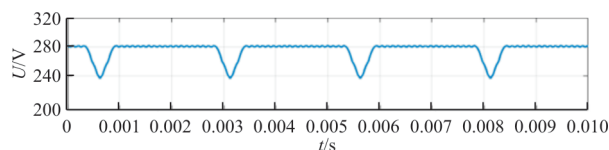


(a3) Asy-24 的仿真波形

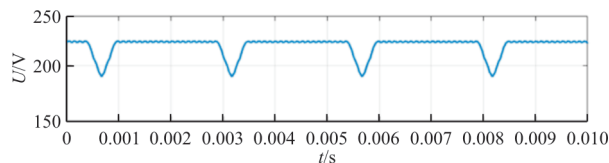
(a) 正常工作状态



(b1) ATRU-24 实验样机的波形

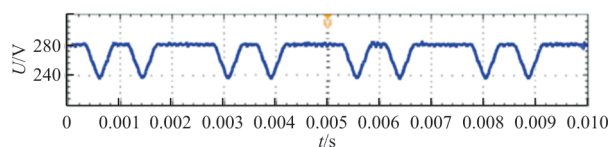


(b2) Sy-24 的仿真波形

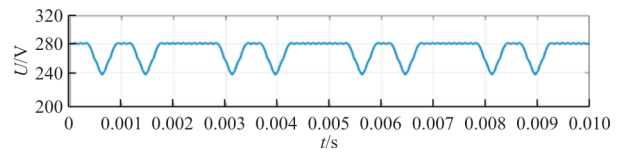


(b3) Asy-24 的仿真波形

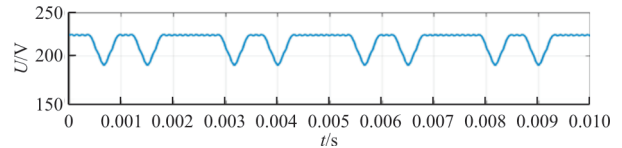
(b) 主整流桥模块中单一桥臂开路



(c1) ATRU-24 实验样机的波形

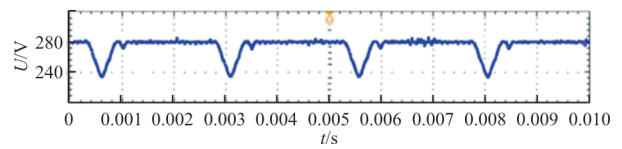


(c2) Sy-24 的仿真波形

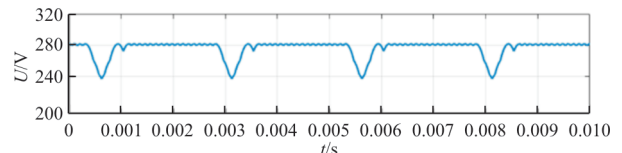


(c3) Asy-24 的仿真波形

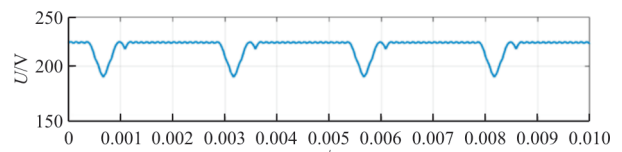
(c) 两个主桥臂发生开路故障



(d1) ATRU-24 实验样机的波形

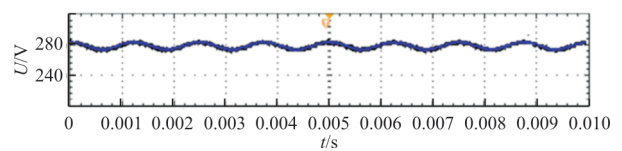


(d2) Sy-24 的仿真波形

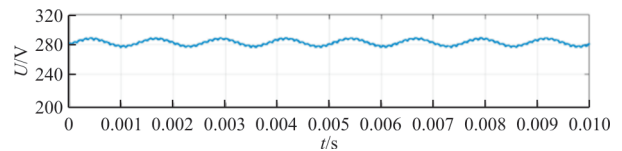


(d3) Asy-24 的仿真波形

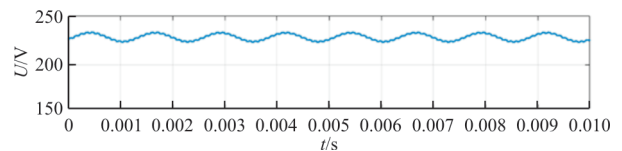
(d) 各一主辅桥臂开路故障



(e1) ATRU-24 实验样机的波形



(e2) Sy-24 的仿真波形



(e3) Asy-24 的仿真波形

(e) 输入电压幅值不对称

图 21 输出电压实验波形

Fig. 21 test waveform of output voltage

从图 21 可以看出:在正常情况下,24 脉 ATRU 样机测得输出电压平均值为 280.8 V,在一个交流周期 2.5 ms 内有 24 个脉波,波形较平滑,电压纹波为 2.3 V,与仿真结果一致;在其他故障模式下,通过样机得到的电压波形中存在较多噪声,但整体波形与仿真得到的波形极为相似。

3.3 TRUs 的故障模式细化

为了在故障诊断中精确定位 TRUs 发生故障的位置,可在 7 类故障模式的基础上,对 TRUs 的故障种类进一步细分。结合 3.1 节中 4 种 TRUs 典型结构,另选取 4 种 TRUs 结构,对多类别 TRUs 的故障种类进行分析。

- 1) 对称式 12 脉 ATRU(Sy-12)^[6]:其自耦变压器为 D 型联结;
- 2) 非对称式 12 脉 ATRU(Asy-12)^[22]:其自耦变压器为 D 型联结;
- 3) 对称式 18 脉 ATRU(Sy-18)^[23]:其自耦变压器为 P 型联结;
- 4) 隔离式 24 脉 TRUs(Iso-24)^[24]:其变压器原边为 Y/D 联结,4 条副边为延边三角形联结。

TRUs 的脉冲数、主变压器的绕制方式以及是否使用平衡电抗器等均影响 TRUs 结构的复杂程度。依据 TRUs 的结构特点,对 8 种 TRUs 的复杂程度进行总结,如表 7 所示。其中,TRUs 结构的整体复杂程度由高到底分为 3 个等级:高(High,简称 H),中(Middle,简称 M),低(Low,简称 L)。

表 7 变压器结构比较
Table 7 Structure comparison of TRUs

TRUs	脉冲数	对称性	变压器结构	变压器每相绕组数	平衡电抗器数量/个	复杂程度
Iso-12	12	是	Y-D/Y 型	7-3/7	1	L
Sy-12	12	是	D 型	3	2	L
Asy-12	12	否	D 型	3	无	L
Sy-18	18	是	P 型	5	4	L
Asy-18	18	否	DP 型	5	无	M
Iso-24	24	是	Y/D-D 型	7/3-6	无	M
Sy-24	24	是	Y 型	7	6	H
Asy-24	24	否	P 型	5	无	M

结合 TRUs 的结构特点,以 Sy-24 为例(如图 22 所示),对 TRUs 的故障类别进行细分,如表 8 所示。

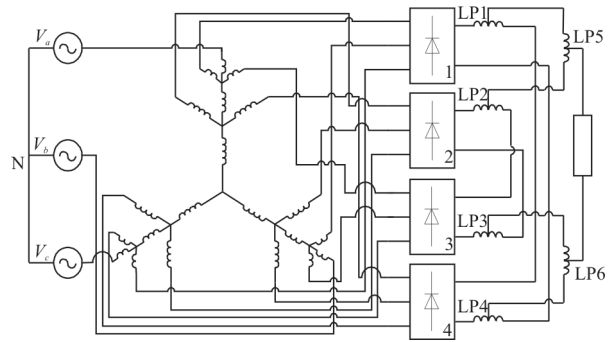


图 22 对称式 24 脉自耦变压整流器(Sy-24)^[17]
Fig. 22 Symmetrical 24-pulse autotransformer rectifier (Sy-24)^[17]

表 8 Sy-24 的故障类别
Table 8 Fault category of Sy-24

序号	TRUs 主要组成	故障类别
1	输入端	In-Amp
2		In-Ph
3	主变压器	OCW
4	整流模块-SDS	整流桥模块 1(RF1)-SDS
5		RF2-SDS
6		RF3-SDS
7		RF4-SDS
8	整流模块-SDO	RF1-SDO
9		RF2-SDO
10		RF3-SDO
11		RF4-SDO
12	整流模块-DDO	RF1-RF1-DDO
13		RF1-RF2-DDO
14		RF1-RF3-DDO
15		RF1-RF4-DDO
16		RF2-RF2-DDO
17		RF2-RF3-DDO
18		RF2-RF4-DDO
19		RF3-RF3-DDO
20		RF3-RF4-DDO
21		RF4-RF4-DDO
22	平衡电抗器-OCR	LP1-OCR
23		LP2-OCR
24		LP3-OCR
25		LP4-OCR
26		LP5-OCR
27		LP6-OCR

从表 8 可以看出:依据整流桥二极管所处的整流模块和平衡电抗器的位置对 TRUs 的故障模式进行细化,Sy-24 共包括 27 种故障类别,其中与整流模块相关的有 18 种,与平衡电抗器相关的

有 6 种。

采用此种方法对 TRUs 故障模式进行细分,可
有效提高 TRUs 故障诊断的精确性。类似的,其余
7 种典型 TRUs 的故障类别划分情况如表 9 所示。

表 9 不同类别 TRUs 的故障类别划分
Table 9 Fault categories of different TRUs

TRUs 结构	主要组成	故障类别数量	总计
Iso-12	输入端	2	11
	主变压器	1	
	整流模块-SDS	2	
	整流模块-SDO	2	
	整流模块-DDO	3	
Sy-12	平衡电抗器	1	12
	输入端	2	
	主变压器	1	
	整流模块-SDS	2	
	整流模块-SDO	2	
Asy-12	整流模块-DDO	3	10
	平衡电抗器	2	
	输入端	2	
	主变压器	1	
	整流模块-SDS	2	
Sy-18	整流模块-SDO	2	19
	整流模块-DDO	3	
	平衡电抗器	2	
	输入端	2	
	主变压器	1	
Asy-18	整流模块-SDS	3	15
	整流模块-SDO	3	
	整流模块-DDO	6	
	平衡电抗器	4	
	输入端	2	
Iso-24	主变压器	1	21
	整流模块-SDS	4	
	整流模块-SDO	4	
	整流模块-DDO	10	
	输入端	2	
Asy-24	主变压器	1	21
	整流模块-SDS	4	
	整流模块-SDO	4	
	整流模块-DDO	10	
	输入端	2	

从表 9 可以看出:TRUs 的故障类别数量主要
受整流模块及平衡电抗器数量的影响。相对于低
脉冲 TRUs,24 脉 TRUs 脉冲数高、结构复杂,其可
能发生的故障种类更多。表 8~表 9 为多类别
TRUs 定义了详细的故障类别划分方式,可为
TRUs 的故障诊断研究提供有益参考。

4 结 论

1) TRUs 的变压器及整流器模块的硬故障发
生概率高,对系统的影响较为严重。

2) 相对于低脉冲 TRUs,高脉冲 TRUs 在发生
故障时的电信号波形更稳定,畸变更小。

3) 在不同故障模式下,TRUs 的输入电流和
输出电压波形均具有明显特点,可作为 TRUs 故障
诊断的主要指标。

4) 高脉冲 TRUs 的结构复杂,故障类别多,更
难进行准确的故障识别及定位。

5) 后续 TRUs 的故障诊断研究,可直接参考
本文表 8~表 9 进行 TRUs 的故障模式确定。

参 考 文 献

- [1] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More electric aircraft: re-
view, challenges, and opportunities for commercial transport
aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrifi-
cation, 2015, 1(1): 54-64.
- [2] ABU-RUB H, MALINOWSKI M, AI-HADDAD K. Power electronics for renewable energy systems, transporta-
tion and industrial applications [M]. USA: Wiley-IEEE
Press, 2016: 365-386.
- [3] SONG Y, WANG B. Survey on reliability of power elec-
tronic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electron-
ics, 2012, 28(1): 591-604.
- [4] HARDAS R G, MUNSHI A P, KADWANE S G. Reli-
ability of different levels of cascaded H-bridge inverter: an
investigation and comparison [C]// International Conference
on Advanced Communication Control and Computing Tech-
nologies. Ramanathapuram: IEEE, 2014: 349-354.
- [5] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An industry-
based survey of reliability in power electronic converters [J].
IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3):
1441-1451.
- [6] JIANG F, GE H, DONG X. Research on a new 12-pulse
step-up and step-down aviation auto-transformer rectifier
technology [J]. JPE, 2018, 18(1): 266-276.
- [7] 李男,葛红娟,张璐,等. D 不对称 24 脉自耦变压整流器
设计 [J]. 电工技术学报, 2018, 34(4): 1-9.
LI Nan, GE Hongjuan, ZHANG Lu, et al. Design of D-

- type asymmetric 24-pulse auto-transformer rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 34(4): 1-9. (in Chinese)
- [8] 杨光, 葛红娟, 陈思. 降压式18脉自耦变压整流系统研究[J]. 电子测量技术, 2016(9): 4-7.
YANG Guang, GE Hongjuan, CHEN Si. Research on buck 18-pulse auto-transformer rectifier system [J]. Electronic Measurement Technology, 2016(9): 4-7. (in Chinese)
- [9] 石旭东, 徐海义, 吴东华, 等. 基于SDAE-PSOSVM的航空变压整流器故障诊断方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(10): 1069-1083.
SHI Xudong, XU Haiyi, WU Donghua, et al. Fault diagnosis method for aviation transformer rectifier unit based on SDAE-PSOSVM [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(10): 1069-1083. (in Chinese)
- [10] LIN Y, GE H, CHEN S, et al. Two-level fault diagnosis RBF networks for auto-transformer rectifier units using multi-source features [J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20(3): 754-763.
- [11] CHEN S, GE H, LI J, et al. Progressive improved convolutional neural network for avionics fault diagnosis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 177362-177375.
- [12] RTCA. Environmental conditions and test procedures for aircraft equipment: RTCA DO-160G—2011[S]. Washington USA: TRCA, 2011.
- [13] 中国人民解放军总装备部. 电子设备可靠性预计手册: GJB299C—2006[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2006.
General Armament Department of Chinese People's Liberation Army. Reliability prediction manual for electronic equipment: GJB299C—2006 [S]. Beijing: General Armament Department of Chinese People's Liberation Army, 2006. (in Chinese)
- [14] YANG S, XIANG D, BRYANT A T, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 25(11): 2734-2752.
- [15] 张璐. 无平衡电抗器升降压24脉ATRU设计与安全性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
ZHANG Lu. Design and safety analysis of step-up and step-down 24-pulse ATRU without interphase reactors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [16] 林怡. 航空自耦变压整流器故障诊断方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- LIN Yi. Research on fault diagnosis method of aviation auto-transformer rectifier unit [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [17] 范士海. 半导体器件失效案例统计与综合分析[J]. 环境技术, 2010, 30(5): 50-54.
FAN Shihai. The statistics and analysis of the failure cases of semiconductor components [J]. Environmental Technology, 2010, 30(5): 50-54. (in Chinese)
- [18] CHENG K W E. Comparative study of AC/DC converters for more electric aircraft [C]// 1998 Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. London, UK: IET, 1998: 704-710.
- [19] CHIVITE-ZABALZA F J, FORSYTH A J, TRAINER D R. Analysis and practical evaluation of an 18-pulse rectifier for aerospace applications [C]// Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Edinburgh, UK: IET, 2004: 383-390.
- [20] 牛兰, 葛红娟, 张璐, 等. 升压/降压式24脉自耦变压整流器: CN105375792B[P]. 2018-01-30.
NIU Lan, GE Hongjuan, ZHANG Lu, et al. Step up/step down 24-pulse auto-transformer rectifier: CN105375792B [P]. 2018-01-30. (in Chinese)
- [21] ZHANG L, GE H, JIANG F, et al. Step-up and step-down asymmetrical 24-pulse autotransformer rectifier [J]. Journal of Power Electronics, 2018, 18(5): 1536-1544.
- [22] MA S, CAO Y, ZHU G. Study of winding construction in asymmetric autotransformer based on 12-pulse rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(1): 107-118.
- [23] Uan-Zo-li, BURGOS R P, ZHU H, et al. Analysis of new 18-pulse direct symmetric autotransformer rectifiers with dual AC-voltage feeding capability [C]// 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Raleigh, NC, USA: IEEE, 2005: 9252-9255.
- [24] MA X, CHAO L, BAI L, et al. Analysis and Matlab simulation of 30-pulse rectification system based on stretch triangle transformer [C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2010: 1-8.

作者简介:

陈舒文(1990—),女,博士,讲师。主要研究方向:民用航空器适航技术与管理。

喻拿仑(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用航空维修工程分析。

(编辑:马文静)