

现代飞机发电系统及差动保护误动的机理分析与优化策略

李红, 邓乐武, 吕素, 罗强

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川成都 610092)

摘要: 目前飞机常用的交流发电机仍采用三级式交流励磁同步发电机, 通过引入定速传动驱动装置可消除发动机转速对该结构的影响。通常需要在发电机侧和线路侧安装互感器元件用于检测电流差值大小, 并通过发电机控制器触发用于保护发电机与主汇流条供电线路间的接触器, 从而实现差动保护。有效的差动保护能确保发电机和发电馈线的安全, 但差动保护误动将会严重干扰飞机的正常运行。分析了飞机主交流发电系统结构及保护区内正常短路的差动保护方案, 进一步考虑当一次电流含直流分量、互感器两相误接、互感器接入方向反相对差动保护可能造成的影响。通过理论分析和图形模拟方法证明了三种情形均会造成主交流发电系统差动保护误动, 并通过 Matlab/Simulink 验证了分析的正确性, 并提供了改进方案实现了飞机电气系统的进一步优化, 同时为飞机整体的安全性能提供了思路和保障。

关键词: 飞机发电系统; 差动保护; 差动保护误动; 直流分量; 互感器

中图分类号: TM77 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0073-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.015

Analysis and Optimization Strategy of Power Generation System and Differential Protection in Modern Aircraft

Li Hong, Deng Lewu, Lv Su, Luo Qiang

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, Sichuan, China)

Abstract: Nowadays, the aircraft using a three-stage wound-field synchronous generator has received more and more attention. In this system, the constant speed drive (CSD) adopted for AC power systems is used to eliminate the influence caused by the rotational speed of engine. Usually, the current transformers (CT) of the generator and lines are used for ensuring the proper operation of electrical system, which can avoid severe damage due to a defect. However, the mal-operation of differential protection will seriously interfere the security of aircraft. The structure of main AC power generation system of the aircraft and the differential protection scheme are discussed. In addition, the effect of differential protection caused by the primary current with DC component, the wrong connection of two phases of CT and the different join order of CT are all considered, which are further discussed by the theoretical analysis and graphical simulation. Finally, Matlab/Simulink simulation results are utilized to validate the correctness of the proposed analysis, and an improved scheme to optimize the effectiveness of differential protection of the system are provided, which can be further used to improve the security of aircraft.

Key words: power generation system of aircraft; differential protection; mal-operation of differential protection; DC component; current transformers

0 引言

目前波音、空客的新型飞机系列及国内外主要的军用飞机, 大多都采用恒速恒频(constant speed constant frequency, CSCF)交流电源系统^[1]。恒速恒

频交流电源系统最重要的是恒速传动(constant speed drive, CSD)装置。利用恒速传动装置可将发动机变速输出转换为发电机恒速输入, 并进一步驱动交流发电机输出恒频交流功率^[2-4]。恒速传动结构存在结构复杂、成本高、维护困难、能量利用率低等缺点, 虽然在近几十年的发展中性能得到了很好

的提升^[5-7],但针对发电系统的故障隐患仍时常出现,严重影响飞机性能和飞行安全。

飞机上设备所需的电能大多离不开主交流发电系统。为了保证飞机可靠运行,除了需对主交流发电系统结构和系统进行优化,还需在系统安全性和保护上进行改善。为保护在区域内发生短路故障时的主交流发电机和系统馈线,需通过检测保护电路部分两侧互感器的差动电流,通过发电机控制器触发线路接触器,实现差动保护。但电流互感器(current transformers, CT)饱和、选型错误,互感器负荷不平衡等因素都会影响电流差值检测精度,并进一步影响差动保护性能^[8]。文献[9]提到长时间的直流分量、大的交流分量、混合交直流电流都易导致互感器的饱和,从而影响互感器电流检测的精度。

为了提高发电机差动保护的可靠性,有部分学者提出采用偏置技术和高阻抗技术^[10]。偏置技术即随故障电流增加,动态设置继电器值。高阻抗技术即设定继电器阻抗值为高阻抗值。因此,通过限制差动元件的电流小于继电器动作电流,在一定程度上提高了差动保护的可靠性。然而,上述方法在现代飞机领域使用中的效果不佳^[10-13]。研究表明 CT 具有线性区域和饱和区域^[10]。在线性区域内,CT 能较准确地将一次电流转换到差值检测控制器中。但在实际飞机故障发生时,需考虑故障发生时刻与读取偏差电流及其作用于继电器时刻间存在的时间差值^[12]。为了避免在外部故障发生时差动保护误动作,文献[13]提出了一种基于大电流约束的差值判定方法,但当发生内部故障时,差动保护灵敏度较差。文献[14]对发电机差动保护中电流互感器饱和问题进行了探究。文献[15]对大容量发电机差动保护用电流互感器的选型作了分析。文献[16]分析了电厂大型发电机组中互感器检测一次和二次电流发生了相位变化的原因。文献[14-16]对电流互感器分析及差动保护研究,对飞机的发电系统保护有一定的启示,但对飞机差动保护误动原因以及存在的隐患并未作出明确的解释和分析。目前国内对外对飞机发电系统差动保护的研究并不完善,若不能提前发现供电系统的安全隐患,一旦发生事故将会造成无法挽回的后果,严重影响国内民生及飞机的发展。

下面详细描述飞机主交流发电系统及其差动保护原理,并分析了典型的短路故障及差动保护策略。

提出了 3 种可能会造成差动保护误动作的情形,并提出相应的改进措施。然后,通过电路方程和图形模拟证明了所提理论分析的正确性,为飞机电气系统的设计和改善整体安全性能提供了思路和保障。

1 飞机发电系统原理

目前飞机上最常用的交流发电机仍为三级式交流励磁同步发电机,其原因是该结构可对励磁进行直接控制,并能实现在发电机断开电源的瞬间移除激励信号,确保发电机内部的安全^[1-3]。

1.1 飞机三级式交流发电机结构

图 1 为简化的三级同步交流发电机示意图,包括副励磁机、主励磁机和主发电机。在图 1 所示的发电机系统中:由第 1 级的副励磁机产生电能,该部分的永磁铁在运动过程中产生固定电枢中所需的三相电压;进一步可通过发电机控制单元,调整交流电压后作用于第 2 级主励磁机部分,以产生稳定的直流磁场;永磁铁励磁级产生足够的能量在转子中形成磁场,通过对主励磁级磁场的控制调节主转子的磁场强度,即可产生恒压 115 V 输出。

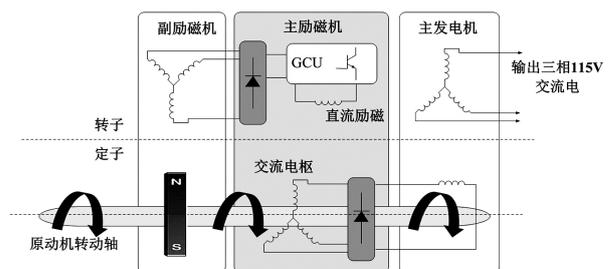


图 1 三级式交流励磁同步发电机结构

发电机控制单元需保证:控制直流电压幅值,调节第 3 级主发电机的励磁电流;在发电机异常运行时(如过载、短路等故障),断开直流电路的电源。直流场通过第 2 级主励磁机运动的电枢产生三相交流电压,该交流电压随后转换为直流电压再反馈给第 3 级主发电机的运动的磁场电路。随原动机同步旋转的整流器再将交流电压转换为直流电压。最终可在主发电机电枢的输出端得到飞机供电系统所需求的 115 V/200 V 三相交流电压,该电压的频率由主发电机的极对数(p)和原动机轴的机械转速共同决定。

1.2 飞机恒速交流发电机结构

通常情况飞机的原动机为主发动机,在发动机

从空转到全功率过程中,发动机轴转动速度变化范围较大,原动机的变速特性严重影响了三级式励磁同步交流发电机性能的发挥。为了解决三级式同步交流发电机变速的问题,引入定速传动驱动装置,将发动机和三级发电机轴通过变速传动齿轮箱机械耦合^[1-5]。恒速驱动将驱动交流发电机的变速输入量转换为恒速输出量,从而消除发动机转速大范围变化对三级式发电机造成的影响。目前有不少机型的飞机采用这种改进的恒速恒频交流发电机结构,以产生稳定的 115 V/200 V、400 Hz 的三相交流电为飞机上的交流负荷供电,或通过整流器转换为直流电后为直流负载提供电能。

2 系统差动保护原理

与飞机发电机直接相连的主交流汇流条上,通常需安装接触器与线路互感器(current transformers of lines, CTL)。通过比较线路互感器采集的电流与发电机内部互感器(current transformers of generator, CTG)采集的电流的差值,用于触发保护发电机与主汇流条供电线路的差动保护^[16-20]。

2.1 差动保护基本要求

在保护区内发生馈线短路等故障时,在不影响飞机设备和其他功能前提下,差动保护的速度应越快越好。考虑实际发电机励磁控制继电器(generator control relay, GCR)和发电机控制断路器(generator control breaker, GCB)从命令发出到跳闸所需的延迟时间,以及 GCR 跳闸到励磁机励磁电流降到 0 所需的动作时间,通常需在 60 ms 内发出断开 GCR 和 GCB 的命令,确保在含额外的延迟和动作期的整段时间内,防止发生馈线短路等故障导致火灾等事

故情况。

若保护区外发生短路等故障,保护电路不应产生故障信号,此时若发电机控制器控制 GCR 和 GCB 跳闸产生保护,属于差动保护误动作,应防止该情况发生。

2.2 典型的短路故障差动保护

根据差动保护基本要求,建立如图 2 所示的含线路和发电机互感器的主交流供电电路。

假设互感器 CTG 接于发电机侧,互感器 CTL 放置于接触器与负载间、GCB 的外侧。两互感器间为保护区,包括发电机定子绕组和发电机馈电线。图 2 中两组电流互感器 CTG 与 CTL 之间的部分,为差动保护区,由 GCR 和 GCB 触发差动保护动作。

如图 2 所示,改变电流电压转换电路中电阻 R_1 和 R_2 可改变流向整流滤波电路的电压和电流。将输入的交流电通过整流滤波后,可以滤掉电流中部分谐波并转换输出直流电;最终利用电压检测电路部分,协调 R_{k1} 、 R_{k2} 和 R_{k3} 阻值,当差动值过大后将击穿二极管 DW,最终触发 GCR 故障信号放大器,断开线路解除器实现差动保护。

在飞机主交流发电系统中,通常使用电流互感器测量各相电流,即线路上 A、B、C 相各放置一个电流互感器,发电机侧 A、B、C 相也各有一个电流互感器。忽略互感器间材料差异以及线路损耗,系统正常运行时保护区内没有短路点。以 A 相为例,若 a 点没有短路电流,则流过 CTG 的原边电流 i_{ga} 和 CTL 的原边电流 i_{la} 相同,即 $i_{ga} = i_{la}$ 。忽略互感器导出误差时,互感器各副边电流为

$$\frac{1}{k_g} i_{ga} = \frac{1}{k_l} i_{la} \quad (1)$$

式中 k_l 和 k_g 为互感器变比。由于两互感器副边首

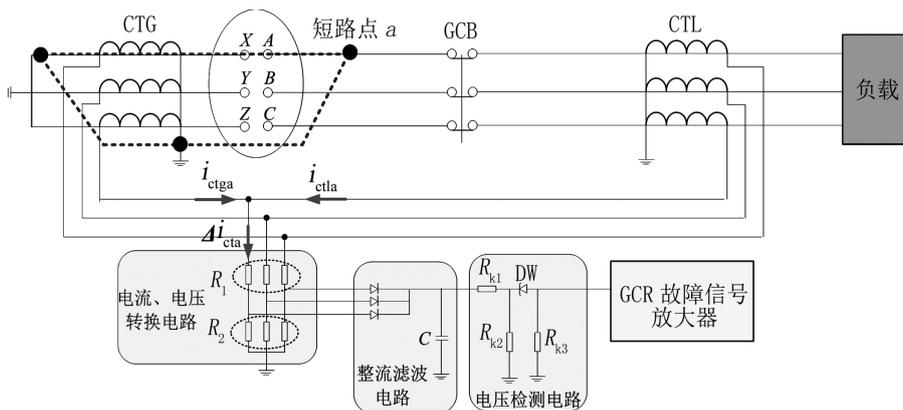


图 2 飞机主交流发电系统差动保护电路

尾相接,另一端共同接地,则此时没有电流流入电阻 R_1 和 R_2 ,即有

$$\Delta i_{cta} = \frac{1}{k_g} i_{ga} - \frac{1}{k_1} i_{la} = 0 \quad (2)$$

式中 Δi_{cta} 为流入电压电流转换电路的电流。

若 a 点短路时,将短路点 a 接地,此时流入电阻 R_1 、 R_2 的电流为

$$\Delta i_{cta} = i_{cta} - i_{cta} = \frac{1}{k_g} i_{ga} - \frac{1}{k_1} i_{la} = \frac{1}{k} (i_{ga} - i_{la}) \quad (3)$$

式中: i_{cta} 为流过 CTG 的二次侧电流; i_{cta} 为流过 CTL 的二次侧电流。

因此过大的短路电流,在 R_2 上产生足够大的压降以击穿稳压管 DW。此时系统输出短路故障信号,并断开 GCR 和 GCB。保护区内任一点短路时的短路电流超过系统设定的限制电流时,发电机控制器则在短时间内会向 GCR 和 GCB 发出跳闸命令,如 B747 飞机规定,当判断短路电流达到 $(20 \pm 5) A$ 时,40 ms 内将向 GCR 和 GCB 发出跳闸命令,以达到短路保护的目的。

3 差动保护误动作

下面分析一次电流含直流分量、互感器两相误接与互感器接入方向相异对差动保护的影响。

3.1 一次侧电流含有直流分量

忽略发电机侧和线路侧的两组互感器材料差异,当飞机主交流发电系统正常运行时,根据图 4 可以写出线路侧电流互感器的一次和二次侧电流关系式为

$$\frac{L_{CTL}}{R_1} \frac{di_{La}}{dt} + i_{La} = i_{la} \frac{1}{k_1} i_{la} - i_{La} = i_{cta} \quad (4)$$

式中: i_{la} 、 i_{La} 、 i_{cta} 分别为一次侧电流、互感器上电流与二次侧电流; L_{CTL} 、 R_1 、 k_1 分别为互感器电感值、忽略漏抗的二次绕组侧电阻、互感器一次侧和二次侧匝数之比。

由于故障发生后的一次电流可表示为^[19]

$$i_{la} = I_{la} [e^{-\frac{t}{T_1}} \cos\theta - \cos(\omega t + \theta)] \quad (5)$$

式中: I_{la} 为一次电流的幅值; T_1 为系统的一次时间常数; θ 为短路初始时 ($t=0$) 电压相角; ωt 为电流相角。

假设主交流发电系统发生的短路为馈线上常规短路,则正常电压波形过零时刻发生短路,能使得短路电流非周期分量达到最大值。即当 $\theta=0$ 时,假设

L_{CTL} 为恒定常数,互感器一次二次绕组匝数相同,联合式 (4) 和式 (5) 可以求解得到如下方程:

$$\begin{cases} i_{La} = I_{la} \frac{(L_{CTL}/R_1)}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} (e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{L_{CTL}/R_1}}) - I_{la} \frac{1}{\omega T_1} \sin\omega t \\ i_{cta} = I_{la} \frac{T_1}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} e^{\frac{t}{L_{CTL}/R_1}} - I_{la} \frac{(L_{CTL}/R_1)}{T_1 - (L_{CTL}/R_1)} \cdot e^{\frac{t}{T_1}} - I_{la} \frac{(\omega L_{CTL}/R_1)}{\sqrt{2\omega^2 L_{CTL}^2 + 2R_1^2}} \cos\omega t \end{cases} \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出,励磁电流 i_{La} 与二次侧电流均由非周期直流分量与交流分量组成。励磁电流 i_{La} 随等式右侧第一项的直流分量增加,易导致铁心饱和,而互感器铁心饱和后将对测量带来极大的干扰和误差。二次侧电流 i_{cta} 随等式右侧第一项直流分量的引入,波形将产生畸变,若将畸变后的电流再作为差动保护的判据,易导致差动保护误操作;甚至可能在系统短路时,检测的畸变电流与发电机侧电流未达到保护设定值不触发差动保护,将烧坏馈线与发电机。

以上表明,保护区内短路产生的直流分量会影响互感器电流检测精度,影响系统差动保护性能;同样地,若负载侧发生短路且向线路侧引入了直流分量,未知的直流分量值可能造成互感器铁心饱和,最终导致互感器二次侧的电流畸变,其值严重偏离真实值会导致差动保护误动(负载侧短路应为过电流保护或负载断路器断开,而非触发主交流发电机电线路上的差动保护)。

3.2 互感器方向反向串接

如图 3 所示,以 A 相电流为例,在互感器反向连接时,线路侧采电流波形的正半周波形,而发电机侧仍采取负半周波形。考虑互感器检测为交流电流绝对值,对于系统和设备运行正常时,反向连接时,正半波检测的最大值与负半波检测最大值相等,考虑通信延时和误差情况下,电流差值不会出现连续 6 拍均超过差动门限的情况下。

但飞机上负载种类繁多,功率范围较大,特别是大功率设备和常用设备会出现异常短路。如图 3 所示为非线性负载短路异常的一种可能情况,若电路中 A 相正半轴出现了高频率震荡的非线性电流,会在电流中产生间歇性震荡电流尖峰;而由于短路为间歇性负载短路导致负半轴影响较小。

飞机上互感器间存在差异,线路存在阻抗,发电

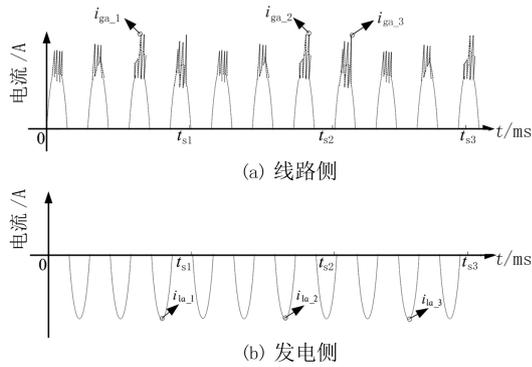


图3 互感器方向反向串接各互感器测试电流

机和线路侧电流检测始终存在一定的差异性;而方向反接后,则很可能出现连续6次的差值均超过差动范围,若系统判定连续6个变量差值满足式(7),发电机控制器将会触发差动保护。

$$\begin{aligned} & \|i_{ga_1} - i_{la_1}\| > i_{ctmax}, \|i_{ga_2} - i_{la_2}\| > i_{ctmax}, \\ & \|i_{ga_3} - i_{la_3}\| > i_{ctmax}, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

式中 i_{ctmax} 为预设差动保护的差值上限。

由于该电流异常属于负载侧短路,而非保护区域内引起,因此系统正确执行的逻辑应为触发过电流保护或断开负载断路器,发电机触发的差动保护属于误动作,应杜绝该误动保护发生。

3.3 互感器两相误接,负载短路将引起差动误保护

飞机实际运行过程中,负载设备繁多,线路复杂,电流很可能在外界干扰下产生瞬时波动,因此若仅仅比较单次瞬时电流差值与门限值就作为差动保护判定依据并不可靠。通常,在飞机实际差动保护触发的条件为:在20~30个电流周期内(约50~75ms),由两侧互感器检测出任意一相电流差连续6~9次超过差动电流值,则通过发电机控制器触发线路继电器断开线路。

这里考虑判定条件为连续25个电流周期,单个周期为8.5ms,连续采样6次共计51ms,此时电流运行20.4个电流周期。互感器每次检测的电流值为该段时间内的电流最大值,考虑涵盖约3.5个正常电流的周期。因此,即使A相、B相连接错误,在系统正常运行情况下,测量时间段内最大值之差也不会超过差值范围。

如图4所示,当负载端A相短路时,A相电流近乎为0,而B相仍存在电流值。此时A、B相差值在数值上接近B相的电流值,进而满足差值大于差动电流门限。

从图4可以看出,在持续20.4个电流周期后,

理论上完全满足差动要求,发电机控制器会直接触发差动保护。但实际负载短路产生大电流,理过电流或断路器断开保护,但由于差动保护时间远远高于过电流和断路器保护时间。因此此时为差动保护误动作,且在系统正常运行情况无法通过数据发现(正常情况下互感器接错,不会产生故障情况,没有故障数据无法判断互感器是否接错)。

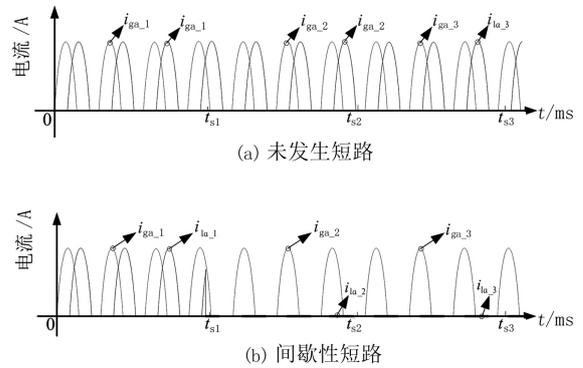


图4 互感器两相误接时二次侧电流

因此,一次电流含直流分量、互感器两相误接与互感器接入方向相异均会对差动保护的精确度造成影响,甚至会产生差动保护误动作,严重影响飞机的安全运行。

4 仿真验证

为了验证所提理论分析的正确性,在Matlab/Simulink仿真平台,结合图1和图2搭建飞机交流电源系统仿真模型,进行了交流供电系统仿真。

图5和图6为负载与系统正常运行情况下,输出电压和频率仿真测试图。其中各相电压幅值为115V,频率为400Hz,满足GJB572A-2006飞机外部电源供电特性及一般要求的标准。

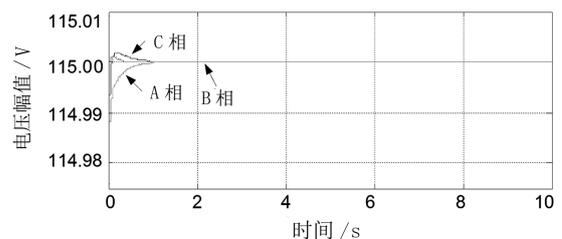


图5 飞机正常运行时输出电压幅值波形

图7和图8为互感器相序误接且发生单相短路时电源系统输出电流和电压波形,其中线路互感器CTL采集A相电流波形,发电机端电流互感器CTG采集B相电流波形。

从图7可以看到在5.985 s时,A相发生单相短路。根据差动保护定义,连续6个脉冲电流差值超过差动保护限值时,差动保护动作,主交流发电机断电。如图8所示,电压在6.000 s逐渐跌落至0 V。然而,此时系统理应作出断路保护而非断开主交流电源(因实际主交流电源端正常),由于未正确检测出负载故障,未断开断路器而直接进行差动保护,属于差动保护误动作行为。

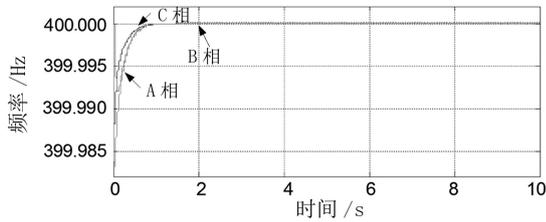


图6 飞机正常运行时输出电压频率波形

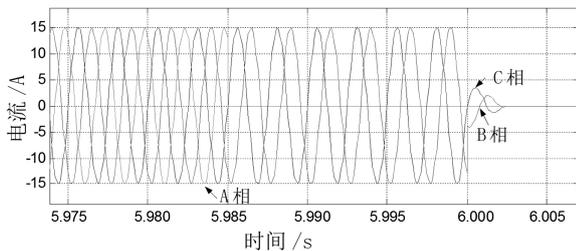


图7 互感器相序误接且发生单相短路时输出电流波形

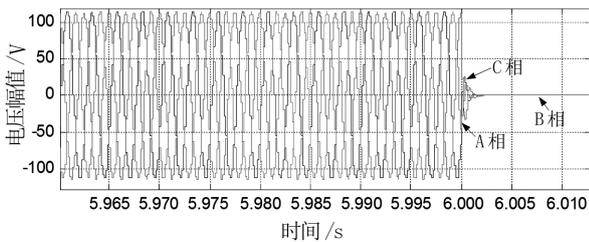


图8 互感器相序误接且发生单相短路时输出电压波形

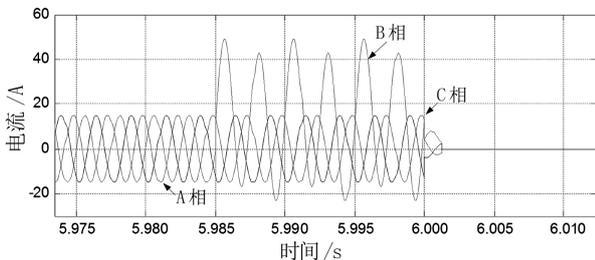


图9 负载电流异常且互感器检测电流正负半波不同时输出电流波形

图9和图10为负载出现异常电流(不满足飞机供电兼容性)时电源系统输出的电流和电压波形,其中线路互感器CTL采集B相正半波电流波形,发电机端电流互感器CTG采集B相负半波电流波形。从图9中可以看到在5.985 s时,B相正半波发生畸变,但该畸变在负半波无法测出。同理,在6次采样后差

动保护动作,主交流发电机断电。如图10所示,由于正负半波最大值大于差动门限,电压在6.000 s逐渐跌落至0 V。由于实际主交流电源端正常,但因未正确检测出负载故障,未断开断路器而直接进行差动保护,属于差动保护误动作行为。

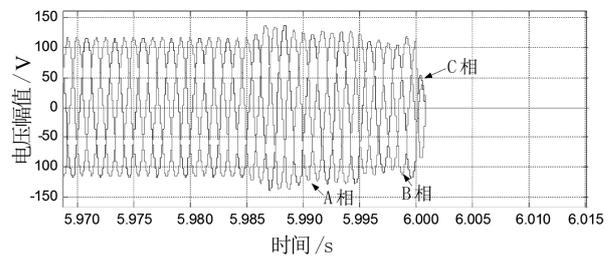


图10 负载电流异常且互感器检测电流正负半波不同时输出电压波形

5 互感器差动保护误动作解决方案

针对前述问题,对飞机的差动保护系统给出以下建议:

1) 使用抗直流分量互感器。当一次侧电流还有大量直流分量时,受直流分量的影响易使测量回路的电流互感器出现偏磁饱和,造成常规互感器测量不准。但选择抗直流分量互感器后,由于磁心采用具有极佳线性且易激磁的非晶合金做成,在原边通过一定直流分量时磁心不会饱和,在一定程度上可以提高检测精度,减少差动保护误动概率。

2) 飞机安装前,需反复确认互感器方向,保证线路侧和发电机侧采样的是相同半轴的波形,即同为正半波或者负半波。目前国内外飞机大多将发电机侧互感器集成在恒速传动装置内,可让发电机厂家严格检测互感器方向,并给出发电机内互感器材料、规格等详细数据,以便线路侧CTL能尽可能选用匹配发电机侧互感器的材料。

3) 飞机安装时,需确认互感器各相是否连接正确。在确认发电机侧互感器的连接方向是否正确后,再根据发电机侧互感器CTG的各相标识,一一匹配接入线路侧各相互感器。最后通过人工检查、系统通电检查等保证飞机线路连接正确,进一步保证飞机运行安全。

6 结论

有效的差动保护能保护发电机、主交流发电馈

线及飞机供电的安全,但差动保护误动作将会严重干扰飞机的正常飞行和安全。分析了一次电流含直流分量、互感器两相误接、互感器接入方向对差动保护的影响,通过理论分析和图形模拟方法对发电机特性及差动保护误动作进行了分析,并证明了以上3种情形均会造成主交流发电系统差动保护误动。通过 Matlab/Simulink 验证了所提出分析的正确性,并提供了改进方案,优化了飞机电气系统的设计,为改善飞机整体的安全性能提供了思路和保障。

参考文献

- [1] 李冰洁,张晓斌,吴小华,等. 基于 Dymola 及 Modelica 语言的飞机三级发电机的建模与仿真[J]. 微电机, 2016, 49(3): 40-44.
- [2] Rosero J A, Ortega J A, Aldabas E, et al. Moving towards A More Electric Aircraft[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 2007, 22(3): 3-9.
- [3] Cao W, Mecrow B C, Atkinson G J, et al. Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA) [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3523-3531.
- [4] Sarlioglu B, Morris C T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54-64.
- [5] Zhang H, Mollet F, Saudemont C, et al. Experimental Validation of Energy Storage System Management Strategies for A Local DC Distribution System of More Electric Aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3905-3916.
- [6] Eid A, El-Kishky H, Abdel-Salam M, et al. On Power Quality of Variable-speed Constant-frequency Aircraft Electric Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 55-65.
- [7] El-Kishky H, Ibrahim H, Dakka M A, et al. Modeling and Characterization of VSCF Aircraft Electric Power Systems with Nonlinear Loading [C]. 18th IEEE International Pulsed Power Conference, 2011: 1482-1485.
- [8] Moscoso M, Lloyd G. J., Liu K., et al. Improvements to Transformer Differential Protection — Design and Test Experience [C]. Developments in Power Systems Protection, 11th International Conference on, 2012: 1-6, 23-26.
- [9] Hunt R. Dimensioning CTs for Small Generator Differential Protection [C]. Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for, 2010: 1-14.
- [10] Zhu J, Tai N, Chen C. A Novel Differential Protection Scheme for the Generator [C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007: 1-6.
- [11] Protective Relays Application Guide [M]. GEC Measurements, 1985.
- [12] 邵能灵, 吴宏晓, 候志俭, 等. 基于小波滤波器的单元件横差保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 49-53.
- [13] B Kasztenny, D Finney. New Algorithm for Generator Differential Protection. [C]. 2004 Eight IEE International Conference on Developments in Prrey System Protection, 2004, 1: 144-147.
- [14] 朱琳. 变压器及发电机差动保护应用中电流互感器饱和问题探讨 [J]. 科技信息: 科学·教研, 2007(22): 367.
- [15] 白忠敏. 关于大容量发电机-变压器组差动保护用电流互感器的选型问题 [J]. 电气应用, 1983(3): 7-13.
- [16] 陈尚发. 大型发电机电流互感器的误差研究 [J]. 上海大中型电机, 2005(4): 20-21.
- [17] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 44-49.
- [18] 毛安澜, 王欢, 王晓琪, 等. 直流偏磁对电流互感器性能影响的研究 [J]. 电测与仪表, 2013, 50(10): 69-72.
- [19] 束洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学建模及其仿真的比较研究 [J]. 电网技术, 2003, 27(4): 11-14.
- [20] 赵永福, 焦彦军, 姚进岐. 基于 EMTP-ATP 的电流互感器饱和特性仿真 [C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会, 2009.

作者简介:

李红(1993), 助理工程师、硕士, 研究方向为飞机电气系统及供电保护;

邓乐武(1982), 研究员, 研究方向为飞机总体系统及飞机机载综合系统测试;

吕素(1965), 高级工程师, 研究方向为供电系统测试及系统维护;

罗强(1966), 高级工程师, 研究方向为飞机机电系统测试。

(收稿日期: 2019-01-08)