

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.015

飞机 28.5V 直流环网汇流条保护研究

姜忠山, 刘艳平, 陈军青

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 飞机电气设备使用不当, 电机、电器、电线等电气设备的绝缘老化, 受机械损伤或战斗损坏等原因, 都有可能使电网线路发生短路或过载故障。在环形配电系统中, 环网汇流条发生短路等故障将对飞机产生致命性危害, 要提高配电系统的可靠性就要对环网汇流条进行保护, 即在发生接地故障后能进行有效隔离。对于环网汇流条的保护, 具体要求是故障时, 故障区间保护装置不拒动, 后备保护的装置不误动, 为了满足以上要求, 依靠 EMTP 对故障系统进行模拟, 分析故障时系统中出现的变化量。根据故障情况下配电系统中出现的电流突变和电压跌落等变化设置保护整定值及启动判据, 并依靠 Matlab 平台做相关的仿真试验。试验证明: 新的保护方法能实现环网故障时自动隔离, 确保飞机配电系统的安全性, 对提高飞机配电的可靠性具有重要意义。

关键词: 环形配电系统; 汇流条保护; EMTP 故障仿真; 电流突变; 电压跌落

中图分类号: TP306.3 **文献标志码:** A

Research on Aircraft 28.5V Direct Current Ring Bus-Bar Protection

Jiang Zhongshan, Liu Yanping, Chen Junqing

(Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Due to operation error of electrical equipment, insulation and aging of motors, electrical appliances, wires and other electrical equipment, mechanical damage, combat damage and other reasons, power lines are likely to encounter short-circuit or overload fault. In the annular distribution system, bus bar short-circuit fault will do fatal harm to aircraft, to improve the reliability of distribution system we have to protect the ring bus bars, and effectively isolate the fault bus bar. Simulating the fault system relay on EMTP, analyzing the variation of fault can meet the requirements that protection devices do not refuse operating and backup protect devices do not acting error. According to inrush current and voltage drop of the fault system, we can set protection setting value and criterion of starting, and do related simulation test relying on Matlab. It proved that the new method can achieve automatic isolation of fault bus bar, ensures the safety of aircraft electrical power distribution system, and it has importance to improve aircraft power distribution reliability.

Key words: aircraft annular power distribution system; bus-bar protection; EMTP fault simulation; current mutation; drop off voltage

0 引言

随着航空技术的高速发展, 现代飞机电气系统的组成也愈加复杂, 大功率的发电机、诸多的控制元件、大量的用电设备以及繁杂的输配电线路组成一个错综复杂的电气网络。飞机电气设备使用不当, 或者由于电机、电器、电线等电气设备的绝缘老化以及受机械损伤或战斗损坏等原因, 都有可能使电网线路发生短路或过载故障^[1]。电网短路时将出现很大的短路电流, 随之产生大量热量和大的机械力, 致使设备损坏和供电中断, 甚至造成事故; 如果故障处产生电弧, 将使故障处金属熔化或燃烧从而出现间歇性短路, 是极其危险的^[2]。因此, 必须采取有效措施, 在电网中设置电路保护装置, 当系统发生故障或处于非正常工作状态时, 可迅速切除故障^[3]。

根据飞机电路产生故障的类型, 电路保护装置可以分为 2 类: 一类是保护电源系统的反流、过压、欠压、过频、欠频等故障的保护装置, 此类保护装置常被列为电源(发电机)的一部分, 与电源控制设备组合在一起, 例如 GCU 内有专门的故障检测和保护电路; 另一类是最大电流保护装置, 主要发生在短路和过载故障时保护电路, 这些保护电器有熔断器、断路器等。在环网汇流条保护中, 环网故障时要求故障区间保护装置不拒动, 后备保护的装置不误动, 以此来提高配电系统的高可靠性^[4]。为此, 笔者设计可靠性较高的保护装置, 以提高飞机供电系统的可靠性。

1 概述

某型运输机电源系统由主电源、辅助电源、地

收稿日期: 2011-08-07; 修回日期: 2011-09-09

基金项目: 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室基金资助项目(SKLD09M32)

作者简介: 姜忠山(1963—), 男, 山东人, 博士研究生, 副教授, 从事飞机电源及电气设备研究。

面电源和应急电源 4 部分组成。如图 1 所示, 某型飞机的主电源由 4 台发动机驱动的 8 台发电机 ($F_1 \sim F_8$) 构成, 辅助电源是环网开关 6 连接的辅助发电机 APU, 地面电源由 1 号和 2 号插座接入, 应急电源由 4 组航空蓄电池构成。飞机环形配电系统主电源采用分组并联方式接入, 环网汇流条被环网开关^[5-6]1、2、3 和 4 分成 4 组, 每组 2 个电源并联接入汇流条, 如发电机 F_2 和 F_5 分别连接在 AB 汇流条上。分组并联的飞机环形配电系统有利于增强配电系统故障隔离和容错重构能力, 对提高飞机可靠性有着重要意义。

配电系统的故障隔离和重构由继电保护装置实现。飞机环网配电系统中的继电保护装置分为 2 类: 保护发电机到环网汇流条之间供电线的保护装置 1^[3]

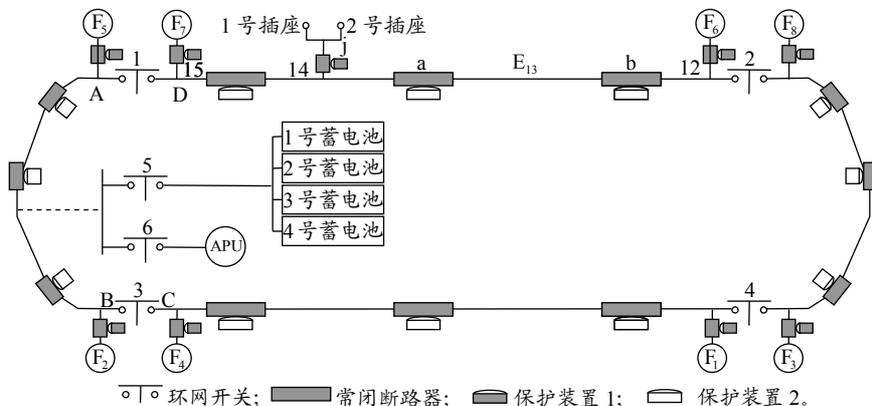


图 1 飞机环形配电系统总体方案

2 故障分析

环网汇流条故障可分为短路和开路。由于开路故障时, 整个配电系统不会因为开路故障而遭受大的影响, 因而针对环网汇流条而设计保护装置时, 可以忽略开路故障这种情况。在设计汇流条保护装置时, 根据短路在配电系统中产生的变量作为分析对象, 再根据具体情况设置判据, 在环网拓扑结构不变的情况下, 做出故障分析如下:

2.1 双端供电情况

双端供电环网故障时, 如图 2 所示, 将发电机 F_6 和 F_7 所在的右配电系统分开, 进行具体分析。对于汇流条的保护, 具体要求是故障区间保护装置不拒动, 后备保护的装置不误动, 即当区间汇流条 13 出现故障, 故障区间所在保护装置 3 和 4 立即跳闸进行保护, 不能拒动; 后备保护装置 2 和 5 不能误动; 当保护装置 3 和 4 拒动后, 后备保护装置 2 和 5 才跳闸进行保护。

和环网中的保护装置 2。发电机故障现象有过压、欠压、短路和开路等, 其中前 3 类故障, 发电机控制保护装置可以保护, 发电机与环网汇流条之间的供电线由保护装置 1 对其保护。环网故障包括短路和开路故障。短路故障时, 故障区间两端的保护装置 2 感应到电气量变化。如图 1 所示, 如果汇流条 E 出现短路故障, 两端的保护装置 a 和 b 启动跳闸, 将故障隔离。开路故障时, 对环网其它用电设备影响不大。对于被隔离的故障区间上的负载和处于开路上的负载的供电, 由其负载的优先级决定, 优先级低就切除负载不再供电, 优先级高由临近的 ELMC 或应急电源进行供电。在本研究中, 主要就环网汇流条发生短路等故障设计保护装置 2, 以实现故障区间有效隔离, 以及非故障区间的正常工作。

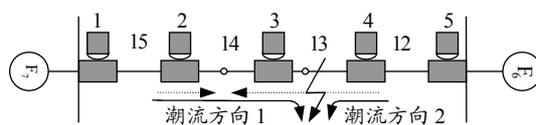


图 2 双端供电环网故障示意图

如果该组配电系统的电流平衡点在保护装置 2 和 3 所在的区间内, 汇流条上的电流流向如图中虚线箭头所示。此时, 如汇流条 13 上发生故障, 电流方向的流向将变化为图中实线箭头所示。由虚线变化到实线, 保护装置 3 可以检测到电流方向的变化, 这是故障瞬间系统中能检测到的变化量。如果整个系统的原始电流平衡点不在保护装置 2 和 3 之间, 而是刚好在汇流条 13 上, 则这时配电系统中将不会有潮流的变化, 因而可有认为电流变化是故障时可能存在的故障特征。此外, 当汇流条 13 出现故障, 这会导致大电流由发电机流向故障点, 通过一定的判据可以检测故障瞬间和故障后电流的突变情况, 这是故障特征之一。当汇流条 13 发生了故障, 保护

装置 3 和 4 能检测到故障区间的电压跌落为零(理论上为零,实际可能为一个很小的数值),电压的变化将是保护装置跳闸的判据之一。

在 EMTP 上搭建模型, MRS、RS、LFS、TRS 和 HS 分别为由发电机 F_6 和 F_7 供电的气象雷达系统、无线电系统、右燃油系统、天霸雷达系统和液压系统。故障点在汇流条 13 上,故障时刻设置为 0.5,通过仿真曲线观察故障时刻汇流条 15、14、13 和 12 上电流大小、方向以及电压的变化情况,如图 3。

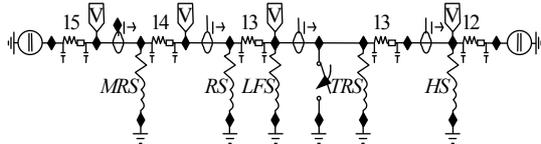


图 3 双端供电故障情况下 EMTP 模型

汇流条上的电压变化情况如图 4。从上到下,曲线分别是汇流条 15、14、12 和 13 上的电压变化情况,汇流条 13 上发生故障,4 条汇流条上的电压都出现了跌落,但汇流条 13 上的电压跌落幅度最大,最后稳定值几乎为零(理论上为零)。汇流条上的电流变化情况如图 5。汇流条 13 故障时,各个汇流条上都能检测到突变电流,汇流条 15、14 和 12 上检测到的突变电流处于同一等级上,而汇流条 13 上的突变电流跃变得特别明显。

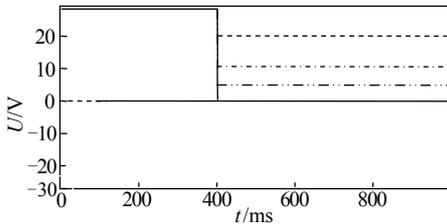


图 4 各汇流条的电压变化情况

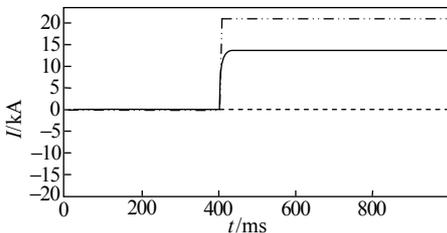


图 5 各汇流条的电流变化情况

2.2 单端供电情况

单端供电环网故障时,具体情况如图 6 所示。在汇流条发生故障前,发电机 F_7 因自身故障而被发电机保护装置 GCU 隔离,整个配电系统由发电机 F_6 进行供电。故障前,汇流条中的电流方向如图中虚线箭头所示;故障后,汇流条中的电流如图中实

线箭头所示。在这一故障过程中,保护装置 1、2、3 原本能检测到电流流过,故障后检测到电流为零,这是单端环网故障后检测到的变量之一。此外,保护装置 1、2、3 检测到的电压也将有一个跌落过程,保护装置 4 能检测到一个电流突变的过程,根据这些变化量可以设置单端环网故障时保护装置跳闸的启动判据。

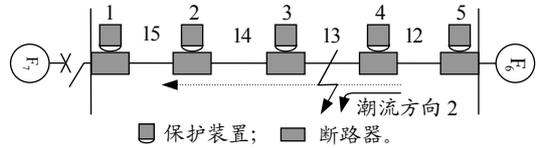


图 6 单端供电环网故障示意图

搭建单端供电环网故障 EMTP 模型,可得如下结论:故障后,汇流条 15、14 和 13 上电压跌落为零,汇流条 12 上电压跌落,但跌落后的稳定值不为零;汇流条 15、14 没有了电压,也就没有了电流,而汇流条 12 上能检测到剧烈突变的电流。

2.3 故障变量分析

双端环网故障时产生的变化量有:电流突变、电压跌落以及可能存在的电流方向的改变;单端环网故障时产生的变化量有:电流突变、电压跌落以及电流的跌落至零。两者的共同变化量有电压跌落和电流突变。电压跌落是在短路故障时产生的变量,能在故障区间内检测到变化特别明显的变化量。电压跌落设置判据时要考虑短路线路上的电压降。电压跌落不能单独作为保护装置的启动判据,因为在单端供电故障情况下,能检测到电压跌落至零的保护装置不是唯一的,如图 6 所示。单端供电情况下汇流条 13 内发生故障,发电机 F_6 流出的电流涌向故障点,没有电流流过的汇流条 15 和 14,其电压等于故障点的电压,其大小几乎为零。这时需要跳开的保护装置是故障区间的保护装置 4,保护装置 3 无需跳开,1 和 3 之间的负载将由环网开关 1 重构后由发电机 F_2 和 F_5 进行供电。

对于电流突变,在短路过程中电流会产生很大的变化,可根据 2 个周期内电流差跟保护整定值进行比较,根据电流的突变情况判断是否需要跳开保护装置。短路故障电流突变情况是比较激烈的,因而必须启动保护装置将故障区间隔离。根据电流突变可设置双重判据,减少误动作,具体是设置 2 个保护整定值,2 个值的差距较大,当突变电流大于较小的保护整定值,又小于较大的保护整定值时,电流突变就不能单独作为启动判据,需要跟电压跌落、电流方向变化等一起设置判据;当突变电流大

于较大的那一个保护整定值, 保护装置就跳闸, 对汇流条进行保护。

对于双端供电故障时有可能产生的电流方向变化, 亦不能独立作为保护装置的启动判据, 原因是如果发电机出现故障被隔离时也将产生电流方向的变化。如图 2 所示, 假设电流平衡点在保护装置 2 和 3 所在的区间内, 如果发电机 F₇ 发生故障被隔离, 整个配电系统经过瞬间的小幅度波动后恢复平衡状态, 这一过程不会对系统中的负载产生多大影响, 因而无需启动保护装置。但在发电机 F₇ 被隔离后, 汇流条中的电流将全部由发电机 F₆ 供电, 保护装置 1 和 2 检测到的电流方向也将是从左到右变化为从右到左, 因而电流方向变化不能单独作为保护装置的启动判据, 但可以电压跌落和电流突变共同设置判据, 增加保护装置的可靠性, 减少保护装置误动的可能。

3 启动判据

3.1 判据设置

1) 电流突变判据^[5]:

$$I_s = RMS[i(n-N) - i(n)] > I_{setting}$$

其中: $i(n-N)$ 和 $i(n)$ 分别为非故障相电流一周波前的采样值和当前的采样值; n 为当前时刻, N 为周期; RMS 为求有效值; I_s 为电流突变量; $I_{setting}$ 为保护整定值。

2) 电压跌落判据:

$$U < U_{setting}$$

U 和 $U_{setting}$ 分别为故障后故障点处的采样电压和电压保护整定值。 $U_{setting}$ 是一个很小的值, 是根据短路情况下可能存在的极小电阻跟流过短路线路最大电流的乘积所得的电压降。

3) 电流方向变化判据:

电流方向变化的检测可以通过间接的办法进行检测, 通过将二次回路的电压差信号送给零比较器, 零比较器输出信号为高低电平, 再通过检测突变的元件检测高低电平的变化, 一旦变化可以判断为电流的方向发生了改变。

3.2 判据逻辑

为了减少误动作, 增加保护的可靠性, 对电流突变设置双重判据, 前面已有过详细分析。分析双端供电情况如图 1, 当汇流条 13 发生短路故障, 保护装置能检测到的是电压跌落, 并且会跌落到一个很小值, 虽然后备保护 2 和 5 也能检测到电压跌落, 但跌落值远远小于保护装置 3 和 4 检测到的电压跌落值, 可以通过设置保护整定值避开后备保护。此外, 短路故障时系统明显变化的是突变电流, 因而用电压跌落和电流突变共同作为保护装置的启动判据。单端供电情况, 汇流条 13 故障时, 保护装置 4 检测到的情况与双端供电情况类似, 保护装置 4 跳闸, 将故障区隔离。保护装置 1、2、3 在故障瞬间检测不到信号, 故不能跳开, 在保护装置 4 跳开后, 汇流条 13、14 和 15 都将没有电压, 这时环网开关 1 闭合, 汇流条 13、14 和 15 上的负载由发电机 F₂ 和 F₅ 供电。汇流条 13 上任然存在短路故障, 这是保护装置 3 能检测到电压跌落和电流突变, 跳开, 完全将故障区隔离。

4 建立模型

根据图 2 搭建供配电系统模型, 汇流条两端分别设置汇流条保护模块, 对所在汇流条进行保护。保护模型如图 7, 保护模型是基于突变电流、电压跌落和电流方向变化设置相应的启动判据。根据突变电流设置双重保护, 突变电流+电压跌落, 突变电流+电流方向变化, 具体分析情况如上文分析。

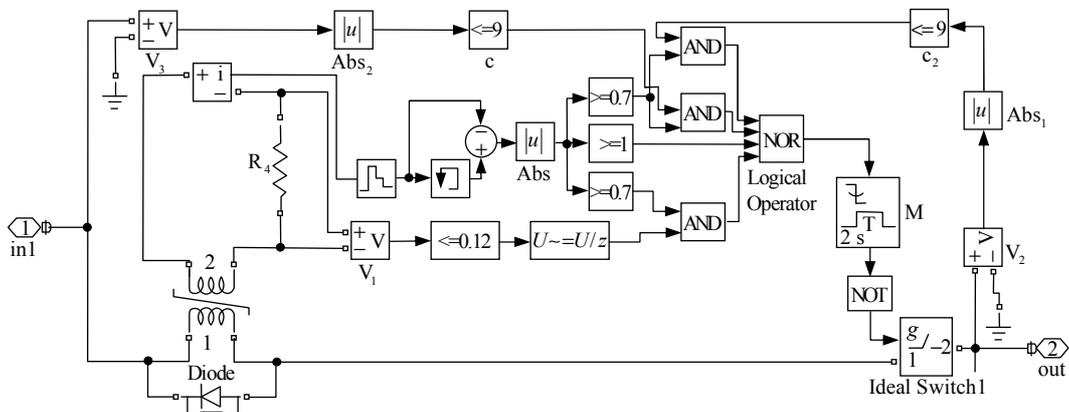


图 7 环网汇流条保护模型

5 试验结果

当汇流条 13 发生短路故障，保护装置 1 到 5 的跳闸信号如图 8 所示，保护装置 1、2、5 未出现跳闸信号，而汇流条 13 两端的保护装置 3 和 4 有跳闸信号，验证了保护装置能够正确动作。当故障发生在其他汇流条上，汇流条两端的保护装置也都可靠动作，完全满足故障区间保护装置不拒动，后备保护的装置不误动的要求，这是符合设计要求的。

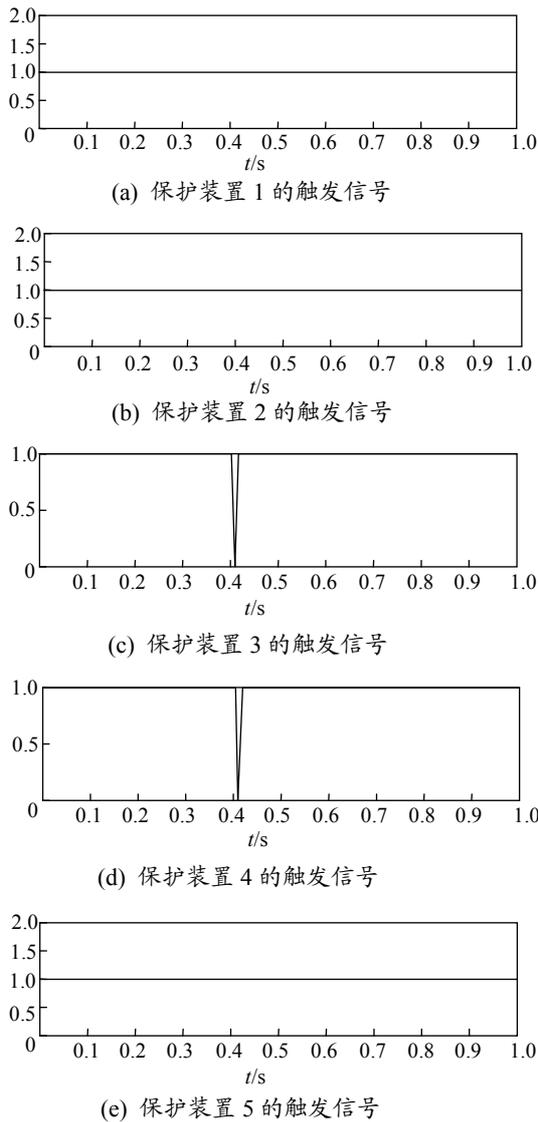


图 8 保护模型跳闸信号

图 9(a)反映了故障线路电流变化情况，当故障时电流发生剧烈突变，保护装置动作后，电流经过短暂跃变后恢复正常状态，由于短路线路原本开路，因而电流的正常状态为零。图 9(b)、9(c)分别反映的是汇流条 14 上保护装置动作和未动作情况下电压、电流的变化情况；图 9(d)、9(e)分别反映的是

汇流条 12 上保护装置动作和未动作情况下电压、电流的变化情况。整体情况是：保护装置不动作时电压出现跌落，动作后电压出现短暂突变后又恢复常态，保护装置不动作时电流出现突变，动作后电流经过短暂波动后恢复常态。

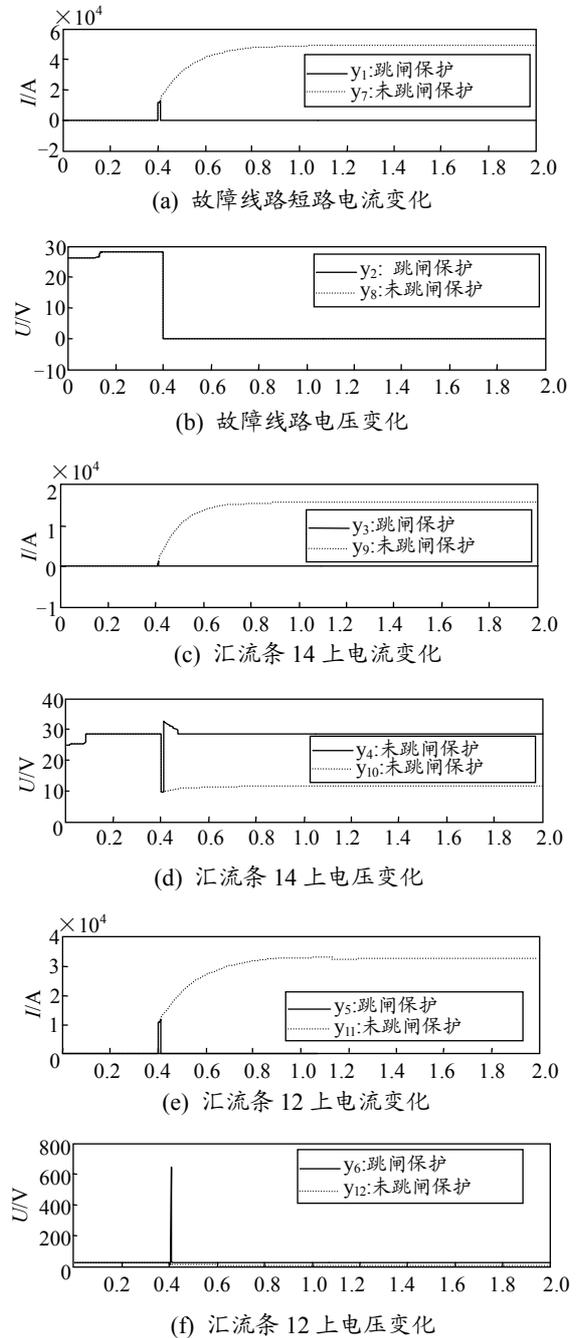


图 9 电压电流变化情况

6 结束语

环网汇流条是配电系统的基本单元，对汇流条保护就是对配电系统保护，