

励磁整流柜可控硅故障模拟及分析

杨玲,许其品,朱宏超,林元飞,谢燕军

(国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 211106)

摘要:发电机励磁系统整流柜是实现励磁调节的基本单元,故障后果将会很严重。整流桥故障是励磁整流柜最常见的故障之一,为了在发生故障前提前预判出故障以及故障发生后能够准确分析故障发生的原因,有必要研究整流桥故障发生的各种情况。文中归纳了整流桥的故障类型,通过 Matlab/Simulink 软件搭建模型,对桥臂短路、桥臂不导通、脉冲丢失、提前导通、延时触发等故障条件下的整流桥输入及输出电压、励磁变压器副边电流的仿真波形进行分析;通过对某电厂的实际故障录波波形进行验证,仿真波形与实际波形基本一致。当发电机励磁整流柜出现故障时,可通过所模拟的三相全控整流桥各种故障条件下的波形进行对比分析,确定故障类型并快速分析出故障点。

关键词:励磁系统;可控硅故障;Matlab 仿真;波形分析

中图分类号:TM 761 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)06-0085-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220613

Simulation and Analysis of Thyristor Fault in Excitation Rectifier Cabinet

YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, LIN Yuanfei, XIE Yanjun

(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: Rectifier cabinet of generator excitation system is the basic unit to realize excitation regulation, and rectifier bridge fault is one of the most common faults in excitation rectifier cabinet. In order to predict the fault in advance and accurately analyze the cause of the fault after the fault occurs, it is necessary to study various situations of rectifier bridge fault. The fault types of rectifier bridge are summarized, a model through Matlab/Simulink software is built, and the simulation waveforms of the input and output voltage of rectifier bridge and the secondary side current of excitation transformer are analyzed under several fault conditions such as short circuit and non-conduction of bridge arm, pulse loss, early conduction and delayed triggering. Through the verification of the actual fault recording waveform of a power plant, the simulation waveform is basically consistent with the actual waveform. When there is a fault occurred in excitation rectifier cabinet of generator, the fault type can be determined by analyzing and comparing the waveform under various fault conditions of the three-phase fully controlled rectifier bridge simulated by Matlab/Simulink software, and the fault point can be quickly analyzed.

Key words: excitation system; thyristor fault; Matlab simulation; waveform analysis

0 引言

励磁系统是电厂的核心控制设备之一,它提供励磁电流给发电机转子,并通过自动励磁调节器调节励磁电流控制发电机输出电压。在现代同步发电机励磁系统中,通常是将交流电整流成直流电供给转子绕组。整流回路一般采用三相桥式晶闸管整流电路。当三相全控整流桥发生故障时,除了可能导

致励磁电压的下降以外,还会造成励磁变压器的不对称或缺相运行,同时还可能产生直流磁化导致其他可控硅的过载等问题。

已有不少文献对励磁系统整流柜可控硅故障进行了分析,例如文献[1]对某调相机机组整流柜故障进行了分析;文献[2]对不同情况下的可控硅故障进行了分析,但是缺少励磁变压器低压侧的电流波形分析;文献[3]通过人工神经网络算法对励磁系统故障,包括功率柜故障,进行了分析和改进;文

献[4]设计了一套励磁系统控制及整流回路功能检验装置,通过直接观察励磁调节器输出信号、功率柜输出电压波形、脉冲变压器原边和副边波形,快速而有效地判断励磁系统控制及整流回路功能是否正常;文献[5-6]都是以某电站整流柜事故为例,分析励磁可控硅击穿导致整流柜烧毁事故起因、过程以及后续处理措施。

但上述文献都没有对各种整流桥故障进行全面分析。因为分析故障的主要波形一般为励磁变压器低压侧电流和励磁系统输出电压波形;但通常现场故障录波器中实录波形中励磁系统输出电压采样不够准确,因此提出还需要完整分析励磁变压器交流侧电流波形,才能为励磁系统的安全运行和故障分析提供理论依据。下面,在归纳分析三相全控整流桥故障类型的基础上,通过 Matlab/Simulink 软件模拟三相全控整流桥故障分析各种故障条件下的波形;最后,根据现场的试验波形验证仿真分析的准确性。

1 三相全控整流原理简述

三相全控整流桥接线如图 1 所示,图中: e_a 、 e_b 、 e_c 分别为交流供电系统的等值相电势; X_b 为阳极回路各相等效阻抗; L 为发电机转子回路等效电感。6 个桥臂的元件均为晶闸管。

当电路工作在非换相区时,共阴极组和共阳极组各有一元件导通,例如 V5 和 V6 两元件导通。当 V1 收到触发脉冲时,由于 $e_a > e_c$, V1 元件承受正向电压, V5 元件承受反向电压,元件 V5 向 V1 换相,共阳极组元件 V6 继续导通,其他元件截止。此时直流侧输出电压 $U_d = U_{ac}$ 。其他换相情况与此类似。

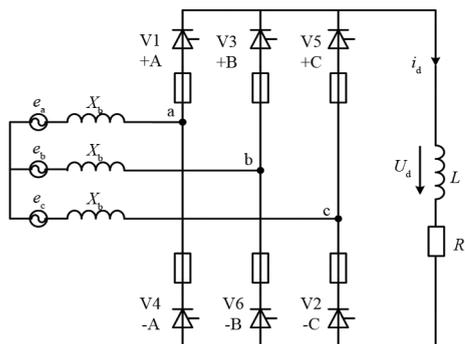


图 1 三相单个全控整流桥接线

2 故障类型分析

每套励磁系统包含至少两个三相全控整流桥,故障时刻可能是多桥并联单桥故障、多桥并联多桥故障的情况。多桥并联时,如发生单桥晶闸管击穿发生短路,那么通过励磁变压器低压侧即整流桥交流侧波形可分析出故障,直到该晶闸管的快熔发生熔断。此时由于非故障桥的作用,整流桥交流侧及直流侧波形恢复正常,为方便分析,下面仅考虑单桥情况。

整流桥的故障类型如图 2 所示。单个三相全控可控硅整流柜的故障主要包括晶闸管故障及脉冲故障两大类,其中:晶闸管故障分为晶闸管击穿、晶闸管不导通、晶闸管变为二极管故障^[7];脉冲故障包括脉冲丢失、提前触发、延时触发。这些故障还对应单桥臂故障,双桥臂故障及多桥臂故障。



图 2 三相全控可控硅整流桥的故障类型

3 仿真分析

3.1 仿真模型

依据三相全控整流桥的原理,基于 Matlab/Simulink 工具箱搭建三相全控整流桥模型。该模型包括机端电压部分、三相励磁变压器 (three-phase transformer)、三相全控整流桥 SCR、六路双窄脉冲 pulse、转子等效负载以及各测量回路^[8-10],如图 3 所示。电动机的励磁线圈负载属于电感性负载,为便于分析,通常将其等效为电阻与电感串联^[10]。

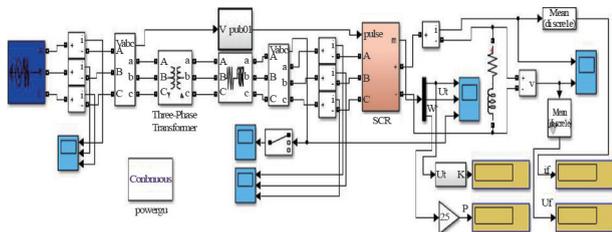


图 3 三相全控整流桥 Simulink 模型

仿真所使用的参数如下:整流桥交流侧电压 $U_2 =$

580 V,额定负载励磁电流 $I_f = 1100$ A,额定负载励磁电压 $U_f = 280$ V,额定空载励磁电流 $I_{f0} = 590$ A,额定空载励磁电压 $U_{f0} = 120$ V,转子负载等值电路中电阻 $r_f = 0.098 \Omega$, $r_L = 0.9 \text{ H}$,模型采用有名值并以直流输出为额定空载励磁电压条件进行仿真。

3.2 正常状态仿真分析

正常状态下,整流桥交流侧电压和电流、直流侧电压、触发脉冲的仿真波形如图 4 所示。由于每周期有 6 次换相,整流装置交流侧电压电流波形中换相过电压共有 6 个。整流装置交流侧电流波形即为励磁变压器低压侧波形,根据各相电流波形可以分析出可控硅的导通顺序,正常情况下导通顺序为



根据 $\dot{U}_d = 1.35 U_2 \cos \alpha$ 计算,可得此时触发角度约为 81° ,因此以下仿真均设定模型的触发角度为 81° 。图 4(a)为晶闸管触发脉冲仿真波形,触发脉冲为双窄脉冲。图 4(b)为整流桥交流侧电压波形,尖峰为换相过电压。图 4(c)为整流桥交流侧电流波形,以 A 相为例:电流为正对应的是整流装置的 +A 晶闸管导通,根据三相全控整流桥的原理, +A 晶闸管导通 120° ,时间为 6.667 ms ;接着, A 相电流为 0,说明此时 +A 晶闸管截止于 60° ;然后, A 相电流为负,此时 -A 晶闸管导通于 120° ;最后, A 相电流再一次为 0,此时 -A 晶闸管截止于 60° ,到此一个周期结束。因此可通过整流桥交流侧电流判断某时刻晶闸管的导通顺序及导通时间。图 4(d)为整流桥直流侧输出电压波形,每个周期有 6 个脉波,由于负载是电感性负载,因此波形中有负半波。

3.3 晶闸管回路故障仿真分析

3.3.1 晶闸管击穿

图 5 为 +A 晶闸管在 0.03 s 时发生击穿造成 A 相与 B 相短路的仿真结果。由图 5(a)整流桥交流侧电流波形可以看出:在 0.03 s 时由 +A-C 晶闸管向 +B-C 晶闸管换相,由于 +A 晶闸管发生击穿, +B 晶闸管导通的瞬间经 +A+B 晶闸管桥臂发生 AB 相短路;当换相到 -A 晶闸管导通时,除了 AB 相短路, +A-A 晶闸管直通短路,此时直流侧电压约为 0;当换相到 +C-A 晶闸管时经 +A+C 晶闸管桥臂发生 AC 相短路。由此得出的交流侧电流和直流侧电压如图 5(b)、(c) 所示。故障特征为励磁变压器低压侧出

现较大短路电流,且励磁电压波形中有为 0 的情况。

图 6 为 +A、-A 晶闸管在 0.03 s 时击穿,造成 ABC 三相短路的仿真结果。由于 +A、-A 晶闸管击穿,使得 A 相一直产生直通短路,直流侧电压约为 0。故障特征为励磁变压器低压侧出现较大短路电流,且励磁电压波形中有为 0 的情况。

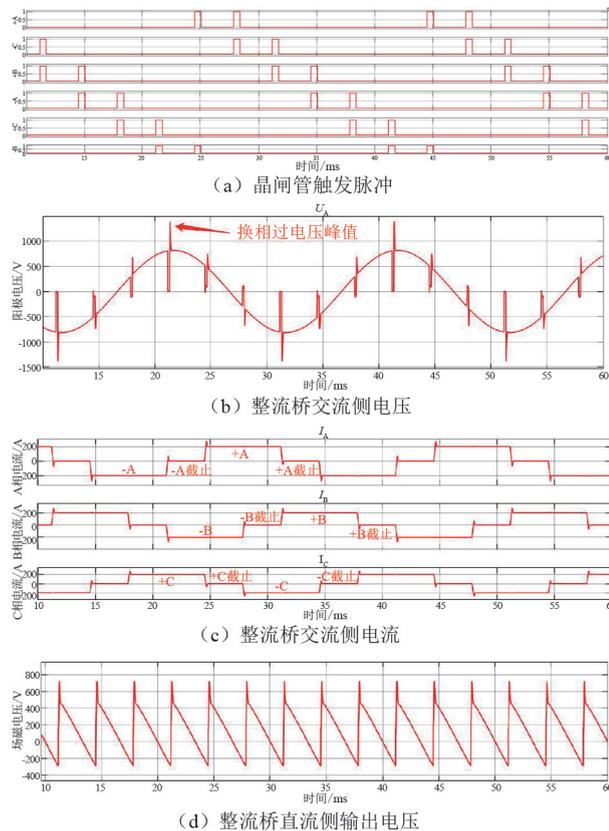


图 4 三相全控整流桥正常情况仿真波形

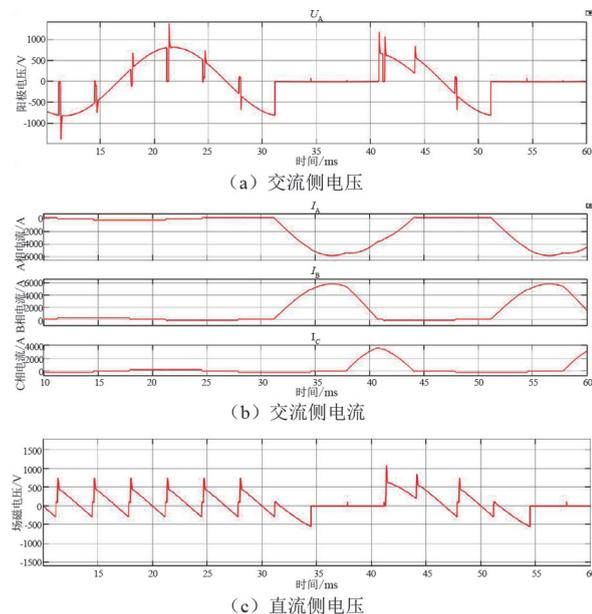


图 5 单桥臂晶闸管击穿仿真波形

图 7 为 +A、-B 晶闸管在 0.03 s 时击穿的仿真结果。在 0.03 s 时 -C 晶闸管导通, 造成 BC 相经过 -B-C 晶闸管桥臂短路。随后 +B 晶闸管导通, 发生 AB 短路, 且 B 相直通短路, 直流侧电压约为 0。

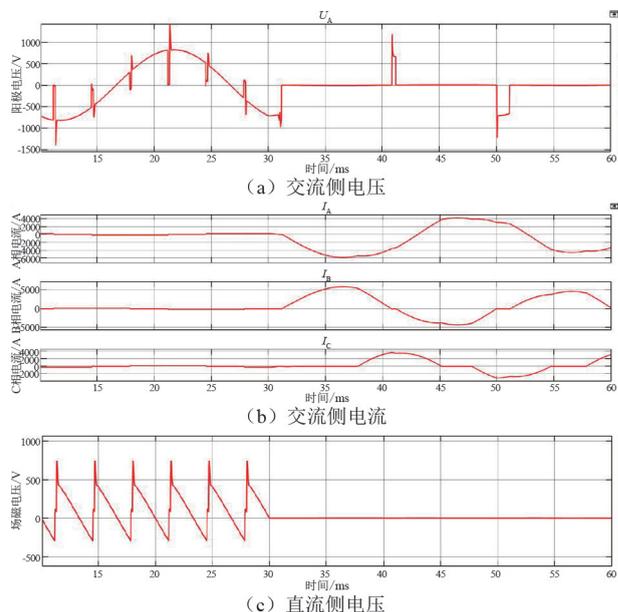


图 6 同相双桥臂晶闸管击穿仿真波形

晶闸管击穿故障特征为励磁变压器低压侧出现较大短路电流, 且励磁电压波形中有为 0 的情况。

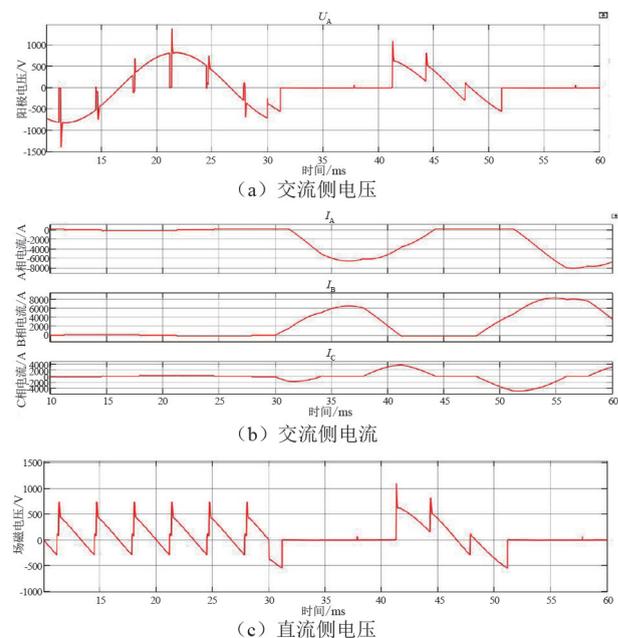


图 7 非同相双桥臂晶闸管击穿仿真波形

3.3.2 晶闸管不导通

造成晶闸管不导通的原因主要包括晶闸管元件损坏不通、该桥臂快熔熔断、该晶闸管对应脉冲丢失。下面主要分析单个晶闸管不通、同一相的两个桥臂晶闸管不通、不同相的两个桥臂晶闸管不通。

1) 单桥臂晶闸管不导通, 换相过电压每周期减少一个。例如 +A 晶闸管不导通, 仿真波形如图 8 所示。正常情况下, 当换相到 +A-B 晶闸管导通时, 直流侧输出电压为 A、B 相之间的线电压 U_{ab} , 由于 +A 晶闸管不通, 因此只能保持 +C-B 晶闸管继续导通, 此时直流侧输出电压为 U_{cb} 的负半波。而相应地, 交流侧电流表现为无 +A 相电流, 而 +C 晶闸管一直导通 180°, 导致 +C 晶闸管和 -C 晶闸管出现直通短路, 此时直流侧输出电压约为 0, 交流侧电流出现三相均为 0 的情况。

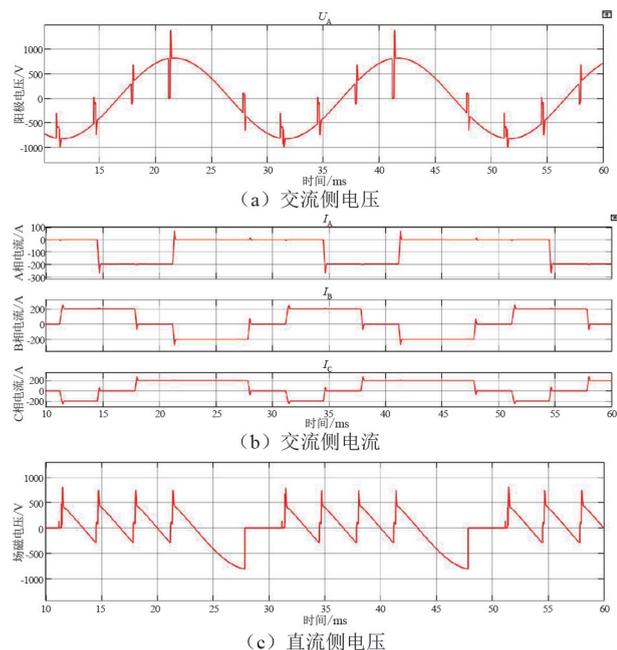


图 8 单桥臂晶闸管不导通仿真波形

2) 同相双桥臂晶闸管不导通, 每个周期出现 2 次同相直通, 换相过电压每周期减少 2 个。例如 +A、-A 晶闸管不导通, 造成 A 相不通, 仿真波形如图 9 所示。

3) 非同相双桥臂晶闸管不导通, 与之构成回路的电压均不能输出。例如 +A、-B 晶闸管不导通, 仿真波形如图 10 所示。开始 +B-C、+B-A、+C-A 晶闸管导通正常输出波形; 接下来应该是 +C-B 晶闸管导通, 但是由于 -B 晶闸管不导通继续维持 +C-A 晶闸管导通, 因此输出 C 相与 A 相的线电压 U_{ca} 的负半波; 然后, 应当是 +A-B 晶闸管导通, 由于 +A 晶闸管不导通继续维持 +C-A 晶闸管导通, 因此继续输出 C 相与 A 相的线电压 U_{ca} 的负半波。

以上几种晶闸管不导通的故障特征为交流侧电流出现三相均为 0 的情况, 励磁电压波形中有为 0

的情况,且励磁电压有效值变小。

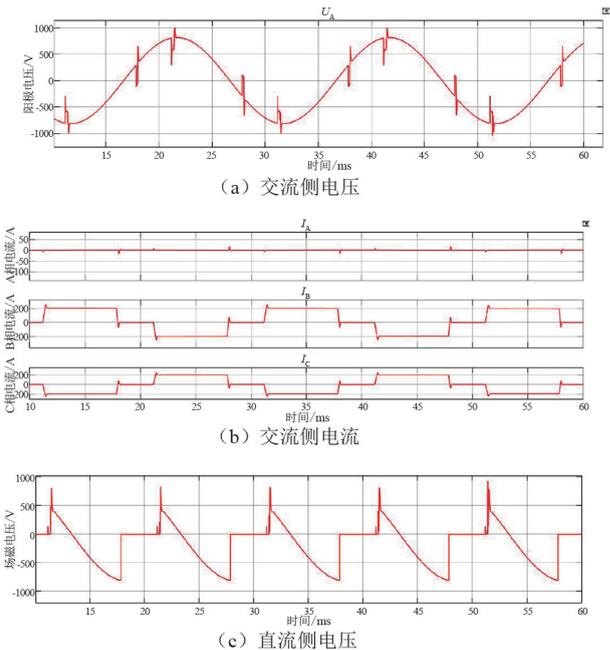


图9 同相双桥臂晶闸管不导通仿真波形

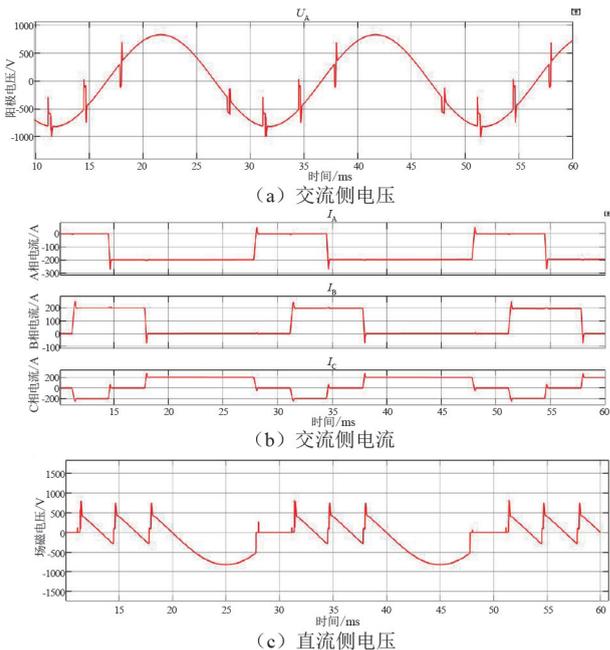


图10 非同相双桥臂晶闸管不导通仿真波形

3.3.3 晶闸管变二极管

工程中,由于晶闸管G、K极绝缘不好可能导致G、K间的PN结损坏,使得晶闸管变为二极管。图11为晶闸管二极管仿真波形。在图11中,设定+A由晶闸管变为二极管,由交流侧电流可知,+A晶闸管导通180°,当由+B-A晶闸管向+C-A晶闸管换相时,+B晶闸管还没有完全换到+C晶闸管,由于+A晶闸管一直导通,因此+A晶闸管此时与-A晶闸管形成短暂的同相直通,对应直流输出电压约为0。且

由于+A晶闸管一直导通,导致+C晶闸管提前截止。

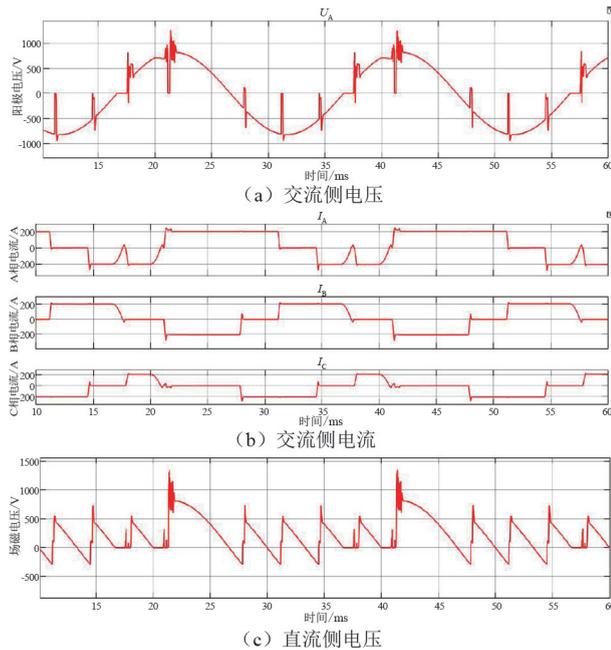


图11 晶闸管变二极管仿真波形

晶闸管变为二极管的故障特征是交流侧电流中出现导通接近55°后截止10°又继续导通55°的情况,且励磁电压每个周期有5个波头。

3.4 脉冲故障仿真分析

针对脉冲回路故障进行模拟仿真,并对仿真波形进行分析。

1) 脉冲丢失

脉冲丢失与晶闸管不导通的情形一致,在此不再赘述。

2) 提前触发

图12为+A晶闸管脉冲提前仿真波形。图中+A晶闸管脉冲提前触发20°,造成+C晶闸管提前截止,由原来的导通120°缩短为导通100°,导通时间变短;同时+A晶闸管提前导通,由原来的导通120°延长为导通140°,+A晶闸管导通时间变长。励磁直流电压波形如图12(c)所示,正常时是均匀分布的锯齿波,现在其中一个锯齿波缩短,紧接着的锯齿波提前输出 U_{ac} 的部分。

3) 延时触发

图13为+A晶闸管脉冲延时触发仿真波形。图中+A晶闸管脉冲延时触发20°,由于本该+A晶闸管导通时,+A晶闸管脉冲没有到,使得+A晶闸管没有导通,所以+C晶闸管继续维持导通,原来的导通120°延长为导通140°,导通时间变长,直流电压

继续输出 U_{cb} 的部分;同时+A 晶闸管的脉冲由于延迟了 20° ,使得+A 晶闸管导通 100° 后换相,导通时间变短。

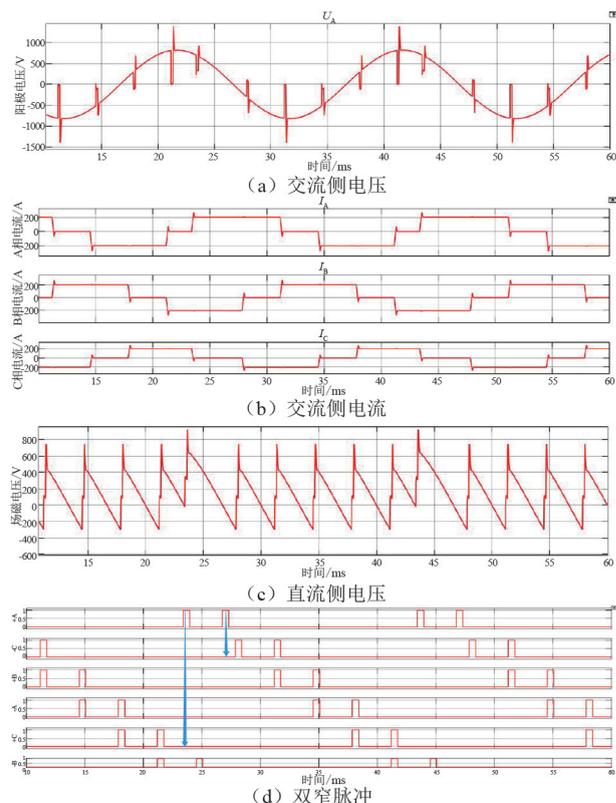


图 12 +A 晶闸管脉冲提前仿真波形

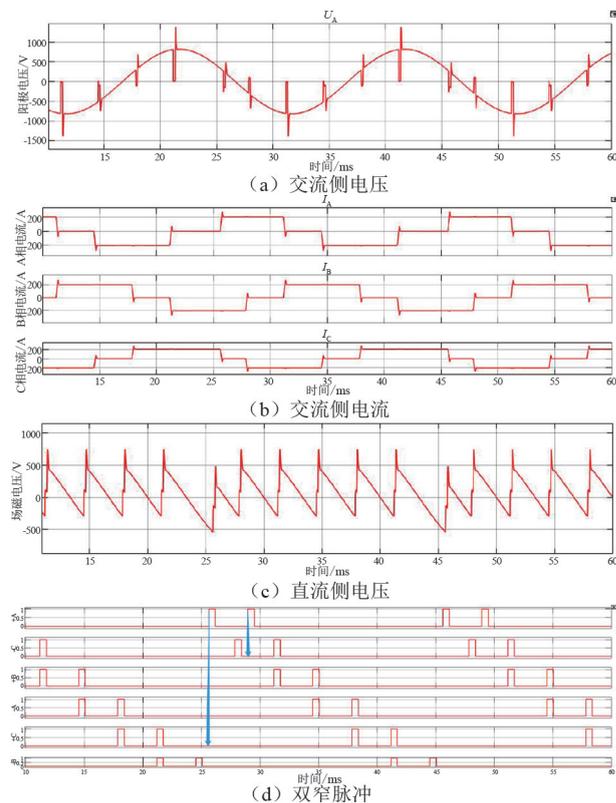


图 13 +A 晶闸管脉冲延时触发仿真波形

脉冲故障的故障特征为交流侧电流中出现导通角度过大或者过小的问题,且励磁电压 6 个波头不一致。

4 故障特征验证

根据第 3 章波形分析,总结出晶闸管在不同故障情况下的故障特征如表 1 所示。一般来说发生晶闸管击穿,势必会造成励磁变压器低压侧出现较大短路电流,具体是哪一相的晶闸管击穿,需要结合波形来分析。晶闸管不导通的时候不易被发现,需要看波形才能识别。晶闸管变为二极管的波形比较有特征,很容易识别。脉冲故障时,如果是脉冲丢失,那么将出现与晶闸管不导通一样的波形,而提前触发或者延时触发可结合交流侧电流和励磁电压波形进行识别。

表 1 晶闸管故障特征汇总

故障类型	故障特征
晶闸管击穿	1) 励磁变低压侧出现较大短路电流 2) 励磁电压波形中有为 0 的情况
晶闸管不通	1) 交流侧电流出现三相均为 0 的情况 2) 励磁电压波形中有为 0 的情况,且励磁电压有效值变小
晶闸管变二极管	1) 交流侧电流中出现导通接近 55° 后截止 10° 又继续导通 55° 的情况 2) 励磁电压每个周期 5 个波头
脉冲故障	1) 交流侧电流中出现导通角度过大或者过小的问题 2) 励磁电压 6 个波头不一致

4.1 现场波形验证

图 14 为某电厂故障录波器所录的励磁变压器低压侧电流波形。图中 t_1 时刻即将由+B-C 晶闸管向+B-A 晶闸管换相时,正常情况下-C 晶闸管还没有完全换到-A 晶闸管,且共阳极没有其他导通通路的话,-C 晶闸管截止不了,直到有通路。但从波形来看: t_1 时刻-C 晶闸管已经截止而-A 晶闸管还没有导通,说明共阳极有其他导通通路,因此判断-B 晶闸管一直导通,+B 晶闸管此时与-B 晶闸管形成短暂的同相直通,出现短暂的三相电流为 0 的情况;同时,-A 晶闸管提前截止,-B 晶闸管提前导通并导通 180° ,推测-B 晶闸管桥臂晶闸管不受控制,有变为二极管的可能。对比第 3.3.3 节图 11(b)晶闸管变二极管仿真波形 A 相电流,波形基本一致。由此分析出该厂整流柜出现的问题是某台功率柜的-B 晶闸

管发生故障变为二极管造成,需要立即处理。

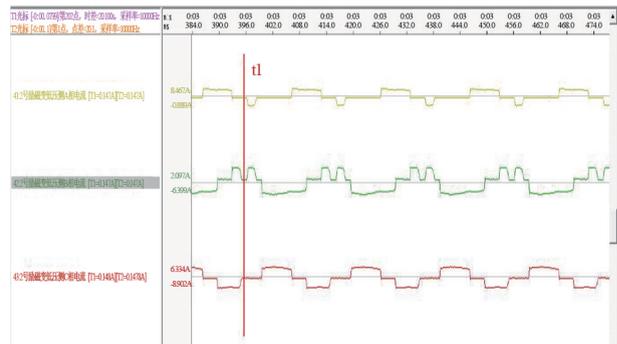
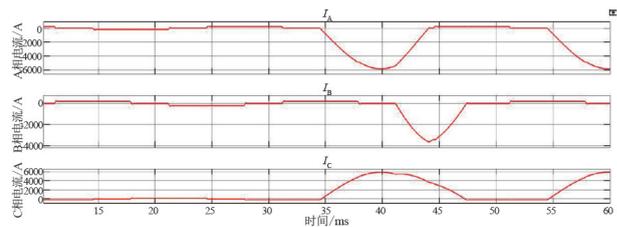


图 14 某电厂故障录波器录波

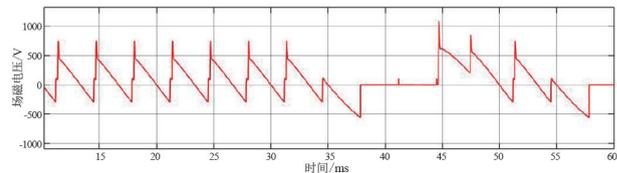
4.2 仿真数据验证

通过模型仿真一组波形数据,如图 15 所示,根据表 1 的故障特征,推测判断发生故障原因及部位。

从仿真故障波形数据中的交流侧电流可以看出,故障发生时 A、B、C 三相先后均出现短路电流,且出现一段直流侧励磁电压为 0 的情况。通过表 1 故障特征可以判断,这是发生了晶闸管击穿。从交流侧电流可以推断出,故障发生前+A-C 晶闸管导通换相到+B-C 晶闸管,正当-C 晶闸管向-A 晶闸管换相时,A、C 两相出现短路电流。前两次换相过程中共阳极侧只有-C 晶闸管导通,当共阳极侧出现另一通路-A 晶闸管时,AC 发生短路,可以推测-C 晶闸管发生击穿,击穿时间发生在短路前-C 晶闸管导通期间。



(a) 交流侧电流



(b) 直流侧电压

图 15 仿真故障波形

5 结论

上面归纳了整流桥的故障类型,并通过 Matlab/Simulink 软件搭建模型,对相应故障条件下的整流

桥输入及输出的电压、电流仿真波形进行分析。通过某电厂的故障实例及仿真实例进行波形验证,结果表明:仿真波形与实际录波波形一致,并能通过总结的故障特征基本准确地分析出故障发生原因及部位。

因此,当发电机励磁整流柜出现故障时,可根据所总结的故障特征及仿真波形判定故障类型,快速分析出故障点。所研究的成果对于开发励磁整流故障诊断、研发智能化励磁整流具有重要意义,也可用于电厂运行人员对励磁系统整流桥进行分析。

参考文献

- [1] 赵强,徐浩原. 300 Mvar 空冷调相机励磁整流柜故障分析及改进[J]. 电工技术,2021(11):146-148.
- [2] 张凯. 同步发电机励磁系统可控硅故障分析与研究[J]. 水电站机电技术,2022,45(2):67-71.
- [3] 李大焱. 水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究[J]. 计算机测量与控制,2021,29(1):10-13.
- [4] 张超,武永恒,赵举. 励磁系统控制及整流回路功能检验装置的设计及应用[J]. 水电与新能源,2022,36(2):45-48.
- [5] 陈伟坚. 励磁整流柜故障引起跳机的分析处理[J]. 电力安全技术,2009,11(9):52-53.
- [6] 庞争争,王刚,侯飞,等. 某大型机组励磁系统整流柜烧毁分析[J]. 水电与新能源,2015(1):51-53.
- [7] 吴龙. 发电机励磁设备及运行维护[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [8] 许其品,朱晓东,许其质. 可控硅整流桥故障对励磁系统的影响[J]. 水电厂自动化,2005(3):16-20.
- [9] 郝勇,许其品,曾继伦,等. 晶闸管换相过电压的 MATLAB 仿真[J]. 水电厂自动化,2007(4):195-199.
- [10] 王兆安. 电力电子技术(第 5 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

作者简介:

杨玲(1988),女,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作;

许其品(1967),男,硕士,研究员级高级工程师,从事励磁系统控制工作;

朱宏超(1981),男,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作。

(收稿日期:2022-04-23)