

基于RTDS的远方备自投装置标准化测试

李煜¹,徐彪²,严亚兵²,王勇¹

(1. 国网湖南省电力有限公司郴州供电分公司,湖南郴州 423000;2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院,湖南长沙 410007)

摘要:远方备自投是提升变电站串联供电可靠性的重要手段。文中分析了远方备自投装置的功能原理,并基于其测试场景需求,利用实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)搭建了两站串联供电方式的远方备自投装置性能测试平台;通过仿真系统的各种运行和故障场景,从单体测试和整组传动测试两个方面,对远方备自投装置的性能测试方案进行了介绍,可作为现场测试的指导,有利于确保装置的各项逻辑功能满足规程规范的要求。相关生产厂家的装置测试及现场典型案例验证了远方备自投装置标准化测试的有效性,有效提高了装置的标准化应用水平。

关键词:远方备自投;RTDS;标准化;单体测试;整组传动

中图分类号:TM 762.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)01-0034-06

0 引言

随着电力系统的不断发展以及负荷水平的不断攀升,用户对于系统的供电可靠性要求越来越高^[1-2]。然而,在电网网架结构不断完善的过程中,往往基于工程建设的投入产出比考虑,变电站串联链式供电的运行方式在我国电网中还是较为普遍。在此背景下,备用电源自动投入装置(简称备自投)可以在判定主供电路径发生故障时,立即断开主供电源回路的供电开关,并根据设定的时间定值,快速合上备用电源的供电开关,可以充分利用串供方式下开环点两侧电源的互为备用关系,提高系统供电的可靠性^[3-4]。

实际上,常规的备自投装置往往仅适用于两个变电站互为备用的情况。对于现场存在的多个变电站手拉手串联链式供电的情况,若仍然采用常规的备自投装置,则各变电站内的备自投装置仅在该站作为开环运行变电站时,具有正确的备投功能;当其使用在非开环运行变电站时,由于正常运行时站内的两侧供电开关均为合上状态,无法直接通过本站备自投装置实现供电路径的切换^[5]。为此,通过相邻站备自投装置之间的相互通信,实现串供方式下的远方备自投功能,是当前提高配电网串供方式下供电可靠性的主流方向^[6]。

然而,现有的大部分远方备自投装置系统均是基于各地区电网特点进行定制的产品,厂家众多,且不

同厂家产品的备投逻辑差异较大^[7-8]。由于远方备自投功能是基于相邻变电站之间的通信功能实现,在现场缺乏开展多站远方备自投功能联调测试的条件,装置的有效性和可靠性难以保证^[9]。为此,文中基于实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS),以目前最为典型的两站串联供电方式为例,搭建了远方备自投装置性能测试平台,并通过仿真系统的各种运行和故障场景,对远方备自投装置的性能测试方案进行了介绍,确保装置的各项逻辑功能满足规程规范的要求^[10-11]。

1 远方备自投关键技术原理

典型内桥接线方式下,两站串联供电的系统接线方式如图1所示。其中两个运行站均采用内桥接线,各站的两段母线均配置有母线电压互感器(potential transformer, PT)用以检测母线的三相电压,判别母线是否失压;对于两条进线而言,则分别配置有线路电流互感器(current transformer, CT)和线路PT,其中线路CT检测线路的三相电流大小,从而判断是否满足线路的有流或无流条件,线路PT则与同期合闸原理类似,仅检测线路的单相电压,以判断备用电源是否有压。两个变电站均配置一台备自投装置,在实现站内本地备投功能基础上,通过两站备自投之间的通信,实现两站之间的互为远方备自投功能^[12-13]。

收稿日期:2025-08-25

作者简介:李煜(1997),女,本科,工程师,从事电力系统继电保护与控制研究。

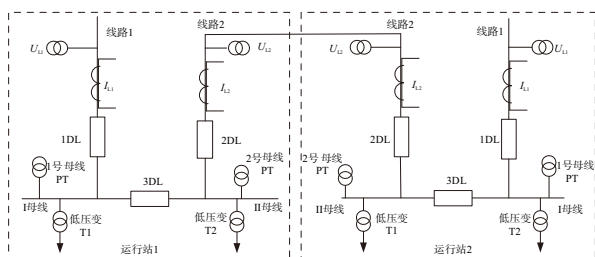


图1 两站串联供电的系统接线方式示意图

在描述远方备自投的逻辑时,以往需要结合两个运行站的运行方式,分别描述备自投装置的充放电条件及动作逻辑,方式多样且逻辑复杂。实际上,备自投装置的整体充放电条件和动作逻辑都是基于统一的出发点考虑,即在检测到系统发生故障后,快速进行主供电路径和备供电路径的切换。因此,可以从整体层面上,对备自投逻辑进行综合概括如下:

1) 备自投充电条件。当系统同时满足以下条件时:串联供电接线方式有且仅有一处开环位置、串联供电变电站内母线电压均大于有压定值、开环位置两侧电压均大于有压定值、非开环位置开关均在合位且无其它闭锁条件,各站备自投装置将按设定的时间进行充电。

2) 备自投放电条件。当满足以下条件中的任意一项时:开关位置异常、手跳/遥跳闭锁、电源进线过流闭锁、备用进线或备用母线电压低于有压定值延时15 s、闭锁备自投开,触发所有串联供电变电站的备自投装置立即放电。此外,考虑到串供方式下,备自投装置仅允许动作一次,开环站备自投装置在动作合上其位置开关后应放电,并发送备自投合闸信号至其他远方备自投;而对于非开环站而言,在其收到其他站备自投合闸信号后也应放电。

3) 备自投动作逻辑。根据故障场景的不同,备自投动作逻辑可以分为以下几种情况:

线路故障逻辑:开环位置至故障点之间的所有母线电压均低于无压定值,工作进线无流,备自投装置延时跳故障点相邻工作进线开关及失压母线联切出口,确认工作进线开关跳开后,延时合开环位置开关。

分段偷跳逻辑:若分段开关偷跳,备自投装置经设定的延时补跳分段开关及失压母线联切出口,在确认分段开关跳开后,延时合开环位置开关。

低压变压器(简称低压变)故障逻辑:当与开环位置直接连接的低压变保护动作跳进线和桥开关时,闭锁全部备自投;不与开环位置直接连接的工作进线处变压器

保护动作跳进线和桥开关时,经跳闸延时补跳桥开关及失压母线联切出口,确认桥开关跳开后,延时合开环位置处开关;不与开环位置直接连接的非工作进线处变压器保护动作跳进线和桥开关时,故障点所在处备自投应不动作,其他站点备自投应正确动作。

以图2所示运行方式为例,对上述逻辑进行说明。为了便于描述,以DL代表断路器,该方式下开环点位置在运行站1的2DL处。正常运行时,仅有站1的2DL一个开环点,两个运行站内的母线均有压、开环位置2DL两侧线路和母线也均有压、非开环位置开关均在合位、且无其它闭锁条件,满足备自投装置的充电条件,两站备自投装置均将充电,具备备投能力。

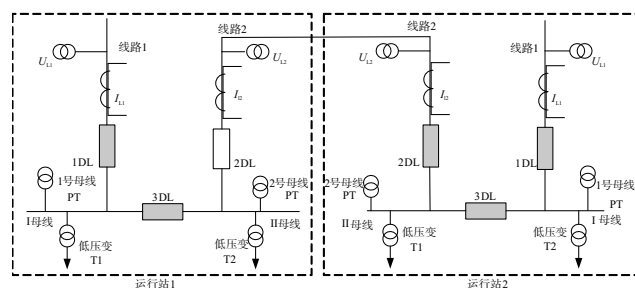


图2 站1进线2开环运行方式图

如果此时站2的线路1发生故障,开环点至故障点之间的所有母线,即运行站2的I母和II母均失压,其对应工作进线,也即运行站2的线路1无流,备自投装置将延时跳站2线路1两侧的开关及失压母线联切出口,确认站2的1DL开关跳开后,经延时合开环位置开关2DL,通过站1的电源保障站2两段母线供电。需要说明的是,站2在失电时,站1的备自投装置本身感受不到任何故障,需要接收站2发来的远方信号后才能动作。

同理,在正常运行时,若运行站2的分段开关3DL偷跳,此时站2的II母将失电,备自投装置经设定的延时补跳站2的分段开关3DL及失压母线联切出口,在确认分段开关跳开后,延时合开环位置开关,通过站1的电源保障站2的I母供电。

关于低压变故障的处理,若是站1的低压变T2故障,由于其与开环位置直接相连,因此在其保护跳开站1的3DL后闭锁全部备自投,避免备自投动作合于故障导致站2无故障失电;若是站1的低压变T1故障,由于其是开环站工作进线所处变压器,且不与开环位置直接连接,因此,备自投装置经延时补跳站1的分段开关3DL及失压母线联切出口,确认3DL跳开后,延时合开环点

的2DL,此时,可由站2电源保障站1的I母供电。

可以看出,本节综合概括了远方备自投装置的整体逻辑,可以作为备自投装置的设计框架,对于装置的逻辑开发和程序管理可以起到提纲挈领的作用。

2 基于RTDS的远方备自投测试平台

RTDS是实时数字仿真系统的简称,具备实时、闭环、连续开展数字仿真的能力,可通过输入输出板卡和功率放大器装置,与各类保护及自动化装置构成硬件在环的实时动态测试系统。基于RTDS的远方备自投测试平台示意图如图3所示^[14]。

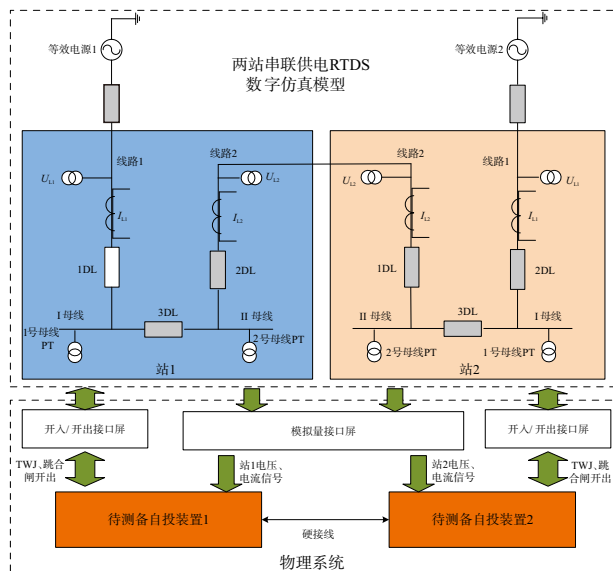


图3 基于RTDS的远方备自投测试平台

首先,在RTDS仿真系统中建立了110 kV 两站串联运行的电网仿真模型,可模拟两个运行站的七种串联运行方式,并仿真不同进线、变压器的单相接地、相间短路、三相短路接地等故障场景,并可以考虑系统所配置保护和重合闸装置动作逻辑下的开关动作过程。

在此基础上,搭建了RTDS系统与备自投装置的模拟量和开入、开出量之间的接口。其中,对于每个运行站而言,模拟量接口主要包括I母、II母的三相电压、进线1和进线2的A相电压、以及进线1和进线2的三相电流,这些信号经过RTDS的GTAO板卡输出至功率放大器,再经过功率放大器输出模拟量直接加到待测试的备自投装置上,用于备自投装置的相关电气条件判据;开入量主要包括进线开关1DL位置、进线开关2DL位置、分段开关3DL位置、以及I母低压变保护动

作信号和II母低压变保护动作信号,这些信号通过GT-FPI板卡的HV面板输出,并提供给备自投装置,实现备自投装置的运行方式和动作逻辑判断;其开出量主要包括进线开关1DL、进线开关2DL以及分段开关3DL的跳闸出口信号,这些信号由备自投装置开出,并通过GTFPI板卡的I/O面板输出并提供给RTDS仿真系统,实现备自投装置动作出口的实时闭环模拟。

此外,需要说明的是,在本测试平台中,两站备自投装置之间的通信方式与现场情况有所不同。在现场一般是将信号通过远传装置转化为光信号后进行传输;而在本次测试的实验室环境下,两台装置是在一起进行测试,因此是直接通过硬接线方式进行通信。基于此软硬件闭环实时仿真测试平台,能够方便地对备自投装置进行单体测试和整组传动逻辑测试。

3 远方备自投装置测试方案

3.1 远方备自投的单体测试

单体测试测试的对象是单台备自投装置,主要考察单个装置的采样、开入开出、以及不同方式下的定值逻辑的正确性。因此,主要包括模拟量采样测试、开入开出量测试、以及单体定值和逻辑测试。

对于模拟量采样而言,包括测试装置I母、II母的三相电压、进线1和进线2的A相电压、以及进线1和进线2的三相电流的零漂检查、采样精度及线性度检查。检查零漂时,要在断开电流采样回路,短接电压采样回路条件下,验证电流零漂应在 $0.1 I_n$ 范围内;电压回路应在 $0.2 V$ 范围内。对于采样精度及线性度而言,要求电流采样精度在 $0.1 I_n \sim 10 I_n$ 范围内相对误差不大于2.5%或绝对误差不大于 $0.02 I_n$,电压采样精度在额定电压附近的相对误差不大于2.5%或绝对误差不大于 $0.002 U_n$ 。对于电压电流的相位则要求其误差小于 3° 。

备自投装置的开入检查包括合分段出口压板监视、跳分段出口压板监视、合电源1出口压板监视、跳电源1出口压板监视、合电源2出口压板监视、跳电源2出口压板监视、对侧启动自投、启动对侧自投出口压板、1号变保护动作、2号变保护动作、电源1合后位置、电源1跳位、电源2合后位置、电源2跳位、分段合后位置、分段跳位、远方操作硬压板、备自投总闭锁、检修状态硬压板、信号复归,需要利用短接线短接相应接点,查看装置开

入报文是否正确。开出量一般包括备自投动作信号、跳分段、合分段、跳电源、合电源、跳闸出口、启动对侧自投等,需对备自投装置加量并触发相应状态,用万用表在背板上测量是否出现开出信号。

至于单体定值和逻辑,由于其单台装置的运行方式可以根据其在远方备自投系统中的运行场景分为如图4所示的4种接线方式,因此,需要针对不同方式验证其对应定值和逻辑。

对于备自投的上述备投方式而言,其基本的定值判据有:无压、线路无流、有压、过流闭锁、过负荷联切、备投动作时间、PT断线、CT断线等。其中,检无压条件为判断元件确实失去与电源之间的联系;线路无流同样为确认元件与电源之间的开关确实断开,需要备投动作转供电;检有压条件为确认备供侧确实有备电源可转供电;过流闭锁为备投动作前,判断备供电源侧出现过流情况时,闭锁备自投装置动作继续转带其它负荷;过负荷联切为备投动作后,判断备供电源侧出现过流情况时,联切母线上所带的主变负荷;备投动作时间为自满足备投动作条件到备投动作的时间;PT断线、CT断线判据为发生断线时发出异常告警。这些判据是备自投装置正确实现不同方式下备投功能的前提,因此需要对相关定值的有效性进行测试,如对于判母线无压定值而言,需检测当母线电压在0.95倍无压定值时,满足无压条件可以动作,而当母线电压在1.05倍整定值时,不满足无压条件装置不能动作。

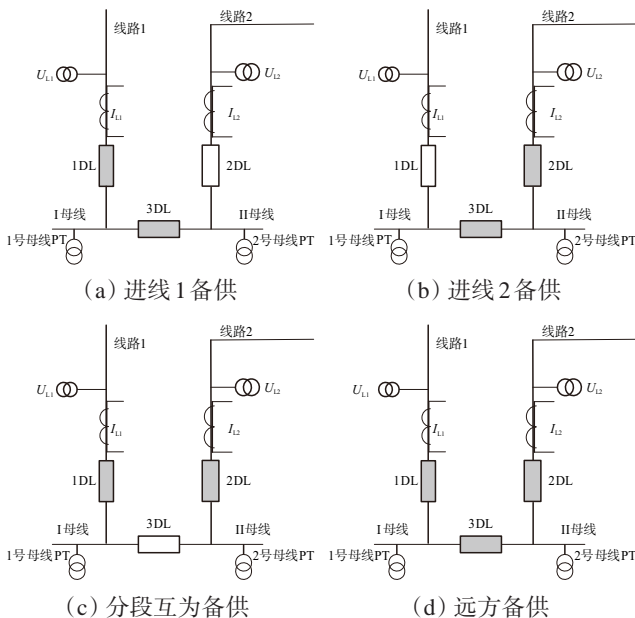


图4 备自投的单装置运行方式

此外,需验证备自投装置在不同方式下的充电条件和放电闭锁条件。充放电概念沿用自继电保护自动重合闸,充电完成表示装置具备了备投动作的能力,但是否动作要看装置是否满足动作检定条件。放电闭锁表示装置不满足备投所需的基本条件,即使满足动作检定条件也禁止装置动作。对装置的充放电逻辑进行测试也是保证备自投装置功能有效的关键。

3.2 远方备自投的整组传动逻辑测试

前述单体测试是以单个装置为单位进行测试,确保装置自身逻辑没有问题。整组传动逻辑测试则是将两套远方备自投装置组成远方备自投系统,测试装置之间的通信及功能配合。在考虑整组运行时,远方备自投装置根据开环点所在的位置,主要可以分成7种方式,如表1所示。

表1 备自投的整组运行方式

方式编号	方式说明
方式1	开环点位于站1进线1断路器
方式2	开环点位于站1桥断路器
方式3	开环点位于站1进线2断路器
方式4	开环点位于站1进线2和站2进线2断路器
方式5	开环点位于站2进线2断路器
方式6	开环点位于站2桥断路器
方式7	开环点位于站2进线1断路器

当站1和站2为相同厂家的备自投装置时,根据对称性,仅需对方式1至方式4进行测试。只有在站1和站2为不同厂家的备自投装置,需要测试其逻辑配合能力时,需要对全部7种方式均开展整组测试,验证备自投装置的逻辑功能。此处仅以图2所示的方式2为例,开展整组传动逻辑测试时,需要考虑的测试场景如表2所示。

表2 方式2整组测试项目及标准

方式2整组项目	测试判断标准
站1线2瞬时故障重合成功	两站均不动作
站1线2永久故障重合不成功	站1跳2DL、合1DL;站2不动作
站1分段断路器偷跳	站1补跳3DL、合1DL;站2不动作
站1的I母保护动作	两站均不动作
站1的II母保护动作	站1补跳3DL、合1DL;站2不动作
站2线1瞬时故障重合成功	站1合1DL;站2跳1DL
站2线1永久故障重合不成功	站2发II母PT断线,不应动作
站2分段断路器偷跳	站1合1DL;站2跳3DL
站2拉线1对侧开关	站1合1DL;站2跳1DL
站2的I母保护动作	站1合1DL;站2补跳3DL
站2的II母保护动作	站1跳2DL、合1DL;站2闭锁

对于其它方式而言,同样需要利用RTDS仿真测试平台仿真模拟系统可能出现的故障及异常情况,验证备自投装置能否按照既定的逻辑功能动作,起到本地备投和远方备自投功能兼顾的作用。

3.3 远方备自投的安自闭锁逻辑测试

对于远方备自投装置而言,考虑在上一级系统的安稳自动装置采取切负荷措施后,其需要有效闭锁备自投

的动作功能,避免安自切负荷不成功对系统的运行稳定性造成危害。因此,装置设置了“安自切负荷闭锁备自投”控制字定值供整定。当该定值整定为“1”时,装置需至少满足以下任一条件方可动作:1) 装置检测到主供单元的开关位置与合后位置继电器信号不对应;2) 母线电压满足重合闸波形特征,即母线电压应满足“有压→无压→有压”的过程,典型的无压定值为30 V,有压定值为70 V(均按线电压整定,整定范围为10~100 V);3) 至少40 ms内满足相应母线的负序电压大于“故障下母线负序电压门槛值 U_2 ”,典型母线负序电压门槛值定值为10 V(按相电压整定,整定范围为1~57 V);4) 至少40 ms内满足相应母线的零序电压大于“故障下母线零序电压门槛值 $3U_0$ ”,典型的母线零序电压门槛值定值为12 V(按线电压整定,整定范围为1~100 V)。

可以看出:上述四个条件主要是利用元件故障导致保护跳闸一般会出现开关位置不对应,伴随重合闸的开关动作过程,发生不对称故障情况下会存在负序和零序电压分量等典型特征,来区分“安自动作”和“系统故障”两种情况。所以,需要在投入“安自切负荷闭锁备自投”控制字的情况下,对拉线路对侧开关的情况进行重点测试,看装置是否满足安自闭锁的逻辑。如对于图2所示方式2而言,重点测试的场景如表3所示。

表3 方式2安自闭锁测试项目及标准

方式2 整组安自闭锁测试	测试判断标准
站1 拉开线路1对侧开关	两站均不动作
站2 拉开线路1对侧开关	两站均不动作

可以看出,在投入“安自切负荷闭锁备自投”控制字时,直接模拟拉开线路对侧开关时,备自投装置的动作情况应和表3中不同,以此来验证装置的安自闭锁功能是否有效。

4 主流厂家测试及现场动作典型案例

4.1 远方备自投的RTDS测试

基于所搭建的RTDS远方备自投装置测试平台,对当前主流保护厂家A、厂家B、厂家C三个主流厂家的标准化备自投装置进行测试。通过功率放大器引出RTDS仿真的电压电流模拟量至备自投装置,并反馈装置动作信号至RTDS系统,形成硬件在环完整系统,如图5所示。通过本方案的测试,解决了不同厂家的多项共性和个性问题,对于备自投装置的标准化和互联互通应用意

义重大。

解决的共性问题包括:1) 装置告警逻辑不一致:原各厂家告警逻辑不一,现统一要求备自投装置应支持接入远传装置故障告警开入,通道故障告警应通过装置面板的异常告警灯显示,并上送报文至监控后台;2) 出口压板监视功能未统一:部分厂家未能实现出口压板的实时在线监测,已针对具体运行方式,实现“压板投退不一致”自适应告警功能;3) 方式5下充放电逻辑不合理:各厂家适配远方备自投的逻辑不一致,已统一要求各厂家备自投工作于方式5时,若2DL分位,备自投应放电,满足条件再自动充电;方式5下,若2号主变差动范围内故障,备自投装置不应发送启动对侧远方备自投信号。



图5 远方备自投装置测试接线

解决的个性问题包括:1) 厂家A装置设置有收发信延时,无法与另外两家装置互联互通。要求其取消远方备自投收发信延时,且采用优先响应本地备自投后响应远方备自投的逻辑顺序;2) 厂家B装置采用安自闭锁作为启动条件不合理,应修改为出口条件;3) 厂家C装置在被安自动动作判断逻辑闭锁后,未能够正确响应远方备自投启动信号并正确动作,在完成本地备自投动作响应后,未等待有限时间后对远方备自投功能放电,在方式5充电情况下,收到对侧启动远方备自投信号后,不应发送合2DL命令。已要求各厂家进行相应的整改并复测合格。

4.2 现场动作典型案例

装置检测合格后,在某省电网现场110 kV站A和站B所构成的串供网络中进行了远方备自投装置的试点应用。某日110 kV A1线C相故障跳闸,故障前110 kV 两站运行方式为:A站通过110 kV A1线供带;B站通过110 kV B1线供带;110 kV AB线充电运行,B侧508开关热备状态,如图6所示。

故障发生后,110 kV A1线两侧纵联差动保护于08

:12:19.205动作跳闸,A1线对侧经3.5 s延时重合闸动作,A侧重合闸未启动(需检线路压),重合118 ms后A1线对侧线路距离加速保护动作跳开断路器。A站远方备自投装置于08:12:22.880动作,经8 s延时跟跳A1线502,并启动对侧B站备自投;B站备自投收到A站启动备自投信号后经100 ms延时动作合上AB线508断路器。保护和备自投动作时序如图7所示。

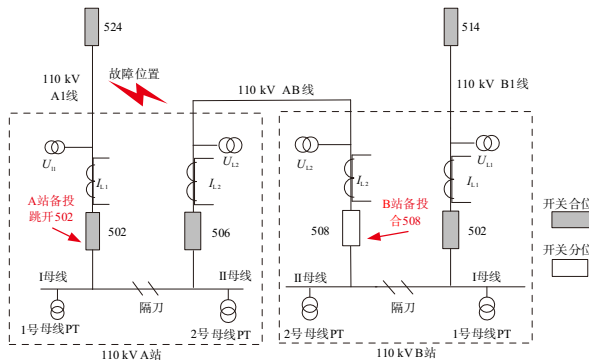


图6 现场故障前系统运行方式图

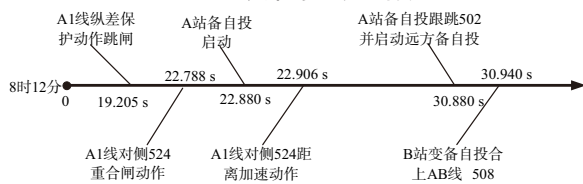


图7 现场保护和备自投动作时序图

经现场检查,110 kV A1线对站和110 kV A站站内一、二次设备正常,110 kV A1线路保护和A站、B站两侧远方备自投均按设计逻辑和整定定值正确动作。最终查明,C相故障跳闸重合不成功的原因该线路62-63号杆气球挂线,通过110 kV A站和B站的远方备自投装置相继动作,B站通过110 kV B1线恢复A站供电,避免负荷损失21 MW,防止了A站内110 kV运行母线跳闸全停的六级电网事件发生。

据统计,远方备自投装置推广应用以来,有效化解该省电网28项五级电网风险、211项六级电网风险、267项七级电网风险,累计挽回负荷损失1 310.98 MW,较传统新建线路的解决方案动辄百万级别投资,本技术仅需十万级别投资即可实现电网运行风险降级,并提高供电可靠性,真正实现了“花小钱,办大事”,提升了电网安全稳定运行水平。

5 结语

远方备自投功能的性能测试是保障入网设备可

靠性和有效性的重要手段。文中从远方备自投功能的原理分析出发,基于RTDS实时数字仿真系统搭建了远方备自投装置性能测试平台,并从装置单体测试和整组逻辑测试的功能需求角度,对远方备自投装置的性能测试方案进行了介绍,对于开展远方备自投装置的性能测试具有指导意义,有利于确保装置的各项逻辑功能满足规程规范的要求;主流厂家测试及现场动作典型案例验证了本方案的有效性。

参考文献:

- [1] 邹德虎,王仲达,徐柳飞,等.网络备自投系统在地调EMS中的应用[J].电力系统自动化,2013,37(17):106-111.
- [2] 杨合民,路小俊,王军,等.一种适用于串联电网接线的远方备自投装置[J].电力系统自动化,2011,35(20):94-97.
- [3] 郑涛,王洪炳,于晓军,等.适应于新能源接入的新型备自投方案[J].电网技术,2022,46(11):4296-4304.
- [4] Yang Ziqian, Zhan Meng, Liu Dan, et al. Small-signal synchronous stability of a new-generation power system with 100% renewable energy[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2023,38(05):4269-4280.
- [5] 孙鸣,许航.含分布式电源接入的变电站备自投应用问题[J].电力自动化设备,2010,30(04):144-146.
- [6] Kochukov O, Mutule A. Network-oriented approach to distributed generation planning[J].Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2017,54(03):3-12.
- [7] 陈志峰,沈娜,王珩,等.高渗透率水电接入的变电站备自投逻辑优化研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(04):157-164.
- [8] 古卫婷,刘晓波,古卫涛.变电站备自投装置存在问题及改进措施[J].继电器,2007,51(10):70-71,75.
- [9] 叶远波,王吉文,王贺,等.考虑高比例新能源接入的变电站备自投方案改进[J].浙江电力,2025,44(02):75-83.
- [10] 单永梅,王磊.数字式远方备自投装置[J].电力自动化设备,2005,23(09):77-79.
- [11] 李俊格,刘育权,高强,等.备自投投退策略在线分析与实时闭环控制系统[J].电力系统自动化,2017,41(10):123-128.
- [12] 周伊琳,孙建伟,陈炯聪.区域网络备自投及其测试关键技术[J].电力系统自动化,2012,36(23):109-113.
- [13] 江维,胡晓斌,蒋易雄,等.一起110 kV备自投装置延时动作造成负荷损失的案例分析及应对措施[J].江西电力,2025,49(05):68-71.
- [14] 蔡乾,于晓军,吴建云,等.一种适用于大型光伏电站的新型备自投方案[J].电力工程技术,2023,42(06):91-99.