

适用于全适应综合备自投装置的仿真测试模型设计

喻寅龙¹,张 韬¹,丁 凯¹,郑 潇²,王广生³

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;2. 国网江西省电力有限公司,江西 南昌 330077;3. 国网江西省电力有限公司九江供电分公司,江西 九江 332000)

摘 要:全适应综合备自投装置是适配高比例新能源接入场景的新型装置,其可区分无压无流状态是由故障导致还是由异常工况导致,能够避免由于新能源大量接入而造成的备自投装置误动、拒动等行为。传统的继电保护测试仪无法模拟新能源接入的复杂工况,难以全面测试其功能,且工作量大、效率低下。基于 RTDS 实时仿真平台,设计了一套能复现“新能源电压支撑”“主供电流平衡”“PT 断线”等特殊工况的仿真测试模型,搭建了适用于全适应综合备自投装置的硬件在环测试平台,并针对高比例新能源的特殊场景完成了整机功能测评。测试结果表明,该仿真模型能完整复现真实电网工况,提升装置调试效率,为其在江西电网的试点应用提供技术保障,也为其他适配新能源的备自投装置测试提供参考。

关键词:新能源;备自投;测试模型;实时仿真

中图分类号:TM 762 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0045-04

0 引言

为贯彻“能源转型、绿色发展”理念,聚焦“碳达峰、碳中和”目标,江西电网新能源并网数量与日俱增^[1]。同时,备用电源自动投入装置的应用规模不断扩大^[2],在高比例新能源电力系统建设背景下,分布式新能源、小水电及用户机组上网规模不断增长,现有备自投装置的功能适应性、运行可靠性面临诸多问题,电网供电可靠性面临挑战^[3-5]。传统的备自投装置已经难以适应高比例新能源接入的场景,误动的情况明显增多^[6-8]。全适应综合备自投装置可适配高比例新能源接入场景,具备故障特征判别、快切新能源、负荷功率自适应联切等功能,可区分故障与新能源导致的异常工况,避免由于新能源大量接入而造成的备自投装置误动、拒动等行为,大大提升供电可靠性。

全适应综合备自投装置模拟量输入(如多路负荷间隔电流、新能源间隔电流)和开关量交互(如自适应联切、负荷功率过载联切)通道数量多,因此,传统继电保护测试仪存在测试工作量大、复杂场景模拟能力不足的问题。基于电力系统实时仿真平台(RTDS)设

计,适用于全适应综合备自投装置的一次系统仿真模型,包括虚拟保护模块与故障触发模块,可实现高比例新能源场景及复杂故障的模拟;同时,该模型可同步输出多组模拟量及开关量,结合模型内的虚拟保护模块,可完整测试备自投装置的动作逻辑,为全适应综合备自投装置的整机功能测试奠定基础。

1 全适应综合备自投装置的主要功能

全适应综合备自投装置具备传统备自投的功能,可适用于单母线、单母线分段、内桥接线的变电站,能够在因故障导致全站失压的情况下及时投入备用电源。为适配高比例新能源入网的场景,还增加了故障特征判别、快切新能源、负荷功率自适应过载联切/告警/闭锁功能,能够在各类新能源导致的异常工况例如主供电流被平衡、PT 断线的情况下避免备自投装置误动或拒动。

故障特征判别功能是为了避免主供空载无流或主供电流被平衡时因异常工况(如 PT 空开跳开)满足母线无压导致备自投误动,在备自投充电完成后实时进行故障特征判别。满足以下任一故障特征判别条

收稿日期:2025-12-23

作者简介:喻寅龙(2000),男,硕士,助理工程师,从事电力系统继电保护与控制研究。

件:1) 主供电电源开关位置与合后位置不对应;2) 任一非检修母线电压满足“有压-无压-有压”的重合闸波形;3) 任一非检修母线的负序电压大于“故障下母线负序电压门槛值”;4) 任一非检修母线的零序电压大于“故障下母线零序电压门槛值”。开放备自投无流启动,备自投动作结束后重新对该功能条件进行判别,如图1所示。

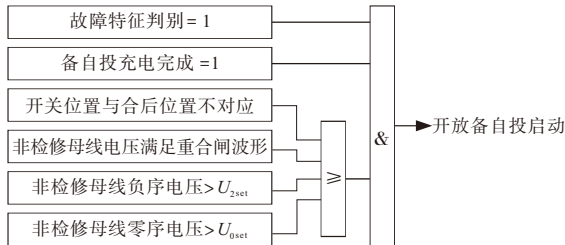


图1 备自投故障特征判别逻辑

快切新能源功能:可在主供线路断开后快速切除新能源线路,防止长时间孤网运行。新能源接入后,当主供电电源故障时,会造成母线有压,若主供电电源线路对侧保护动作,本侧开关未跳开时,新能源还会向故障点返送电流,造成主供有流的假象,备自投无压无流启动条件不满足,直到防孤岛保护动作切除新能源后备自投启动,延长了备自投的动作时间和电源恢复时间。当三相线电压最大值小于母线有压定值,且最大值大于母线无压定值时,则满足母线电压支撑条件,此时若1) 主供开关合位且潮流方向改变;2) 检测频率小于整定值;3) 主供开关跳位且无流。满足任一条件,备自投经整定延时快切动作,切除新能源间隔,如图2所示。

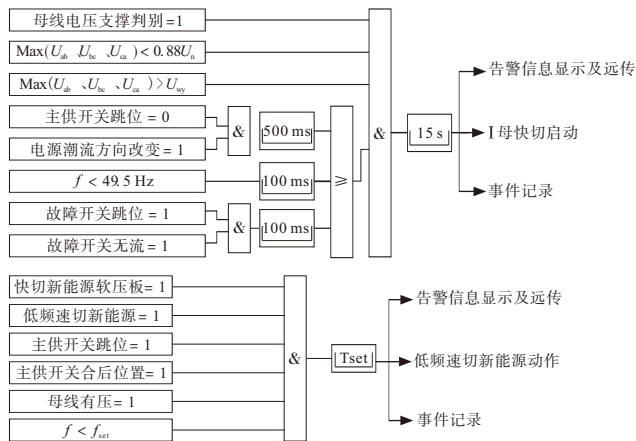


图2 备自投快切、速切新能源动作逻辑

负荷功率自适应过载告警、联切、闭锁、过负荷

减载功能,传统备自投的切负荷功能简单粗暴,会将所有整定在跳闸矩阵的负荷全部切除。全适应备自投装置会计算可投容量与负荷的差额,从而实现自适应联切负荷,即联切与过载差额相近的负荷间隔。

2 模型设计

2.1 一次系统建模

为全面测试全适应综合备自投装置,依据《10 kV ~ 110(66) kV 线路保护及辅助装置标准化设计规范》(Q/GDW 10766—2015),参照典型测试系统一次接线图搭建 RTDS 仿真模型,如图3所示。该模型为典型单母分段接线方式的 110 kV 变电站,该站 110 kV 侧有两条电源线路和一条新能源线路,可实现进线备自投、分段备自投的模拟;10 kV 侧通过 10 kV 联络线接于另一 110 kV 变电站,可实现区域备自投功能的模拟。

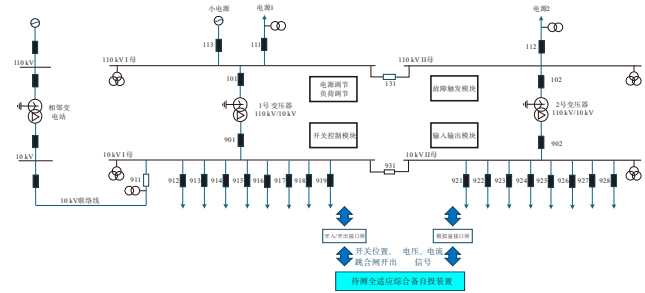


图3 典型测试系统RTDS仿真模型

电源1、电源2为两条 110 kV 线路的电源,小电源为模拟接于 110 kV I 母的新能源,10 kV 联络线连接区域备自投的相邻变电站。10 kV 侧支持 16 路负荷的输出,分别接于 10 kV I、II 母。此外,该模型还包括开关控制模块,用于模拟手动分闸、手动合闸、保护分闸、保护合闸等操作;保护模块用于模拟发生瞬时故障时自动重合闸、永久故障时自动重合闸后永久跳开等行为;故障触发模块用于模拟触发类型、时间可调的故障;输入输出模块用于将仿真系统的电流、电压、开关量等信号输入备自投装置及接收备自投装置发出的动作信号。

模型中采用的均为可调电源与可调负荷,电源支持调节电源电压、电源频率、电源相角,负荷支持调节无功与有功。仿真模型支持实时交互面

板,可实现在仿真运行过程中实时调节电源参数、控制开关通断、改变运行方式等,还可实时监视电压电流、开关量、输入输出量等,便于测试人员开展仿真实验,监测备自投动作行为是否正确,提高测试效率。

2.2 开关控制

线路开关受保护跳闸、自动重合闸以及人工手动控制,该模型的保护动作逻辑支持模拟故障下的开关跳闸及重合闸逻辑。一个典型的开关控制模块如图4所示,通过SR触发器来实现断路器的手动合闸与分闸。当手动合闸S有高电平输入时,SR触发器会将断路器位置Q置1,即使断路器合闸;当手动分闸R有高电平输入时,SR触发器会将断路器位置Q置0,即使断路器分闸。

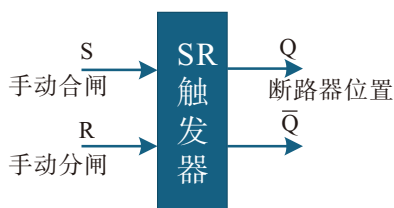


图4 典型开关控制逻辑

备自投装置需接入合后位置及手跳开入,模型中设计了合后位置继电器KKJ及手跳开入信号,如图5所示。当手动合闸S有高电平输入时,KKJ会被置1,而手跳开入信号ST会被置0;当手动分闸R有信号时,KKJ会被置0,同时手跳开入信号ST会被置1,从而模拟实际的合后位置与手跳开入信号。

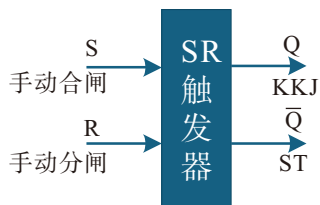


图5 KKJ及手跳开入逻辑图

为模拟开关偷跳,该模型设计了测试人员可控制的偷跳信号。当开关偷跳信号发出时,断路器位置信号会由1变0,但合后位置信号不会改变,实现模拟实际开关偷跳的情形。

2.3 数字采样的二次电气量和开关量输出建模

对于采用数字采样的智能站装置,其电压、电流采样需要SV(采样值)报文,保护、开关位置等开入量需要GOOSE(面向通用对象的变电站事

件)报文。采用GTFPGA板卡,通过数字化接口拓展装置KPF1B,将RTDS仿真数据和外部装置数字采样数据进行实时转换和双向传输,图6展示了模型数据与实际装置数据之间的交互模型。

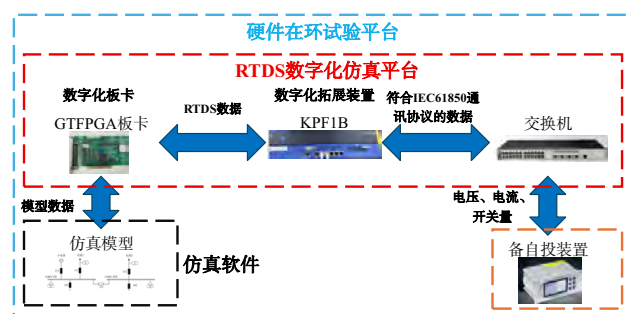


图6 数字采样的二次电气量和开关量模型示意图

RTDS模型使用GTFPGA元件进行输入输出的控制,通过KPF1B装置将数据转换为符合ICE 61850通讯协议的变电站数据并发送给交换机,再由交换机与待测装置进行数据传输。在该模型中,可通过人为中断电压信号的传输回路来模拟PT断线,进线无流的特殊工况,当PT断线信号为1时,模型会切断电压数据与GTFPGA之间的链接,从而实现PT断线的模拟。

3 装置测试

依托在RTDS实时仿真平台上搭建的仿真测试模型,配合交换机等设备完成了全适应综合备自投装置测试环境的建设,并着重针对高比例新能源上网的几个特殊场景开展了测试。

在常规测试中,主要对备自投装置的GOOSE/SV采样及动作逻辑进行了测试。测试结果表明,备自投基本的采样及动作逻辑良好,但仍然存在一些跳闸矩阵设置错误,告警信息显示错误等问题。

在特殊场景测试中,主要针对备自投装置升级的功能进行测试,使用RTDS模型进行特殊场景的模拟。特殊场景一的运行工况如表1所示。

表1 特殊场景一典型运行工况

特殊场景一	运行状态	故障现象
主供线路断开,新主供线111开关、小电源能源支撑导致电113开关、分段131开关、路向110 kV I、II母供电,容量不足以接带全站负荷,发生系统频率下降,母线电压高于无压定值。	主供线111线路发生永久性故障,等待主供线重合闸期间,小电源113开关、分段131开关、路向110 kV I、II母供电,容量不足以接带全站负荷,发生系统频率下降,母线电压高于无压定值。	主供线111线路发生永久性故障,等待主供线重合闸期间,小电源113开关、分段131开关、路向110 kV I、II母供电,容量不足以接带全站负荷,发生系统频率下降,母线电压高于无压定值。

备自投装置动作情况统计如表2所示。

表2 备自投装置动作情况统计

序号	故障现象	动作情况
1	母线电压满足有压,频率降低;线路速切延时40 ms出口,切除I母、II母新能源永久性故障,重合闸不成功。	速切延时40 ms出口,切除I母、II母新能源,3 s重合闸失败后,备自投动作成功。
2	母线电压满足有压,频率降低;线路速切延时40 ms出口,切除I母、II母新能源瞬时性故障,重合闸成功。	速切延时40 ms出口,切除I母、II母新能源,3 s重合闸成功,备自投不动作。
3	母线电压低于有压定值、高于无压定值,频率降低;线路瞬时性故障,重合闸成功。	速切不动作,3 s重合闸成功,备自投不动作。
4	母线电压低于有压定值、高于无压定值,频率降低;线路瞬时性故障,重合闸成功。	速切不动作,3 s重合闸不成功。满足电压支撑,延时10 s快切新能源动作,切除后母线无压,经5 s备自投成功动作。

结合备自投动作逻辑及动作情况分析,可知全适应综合备自投装置在高比例新能源入网的情况下,能够结合实际情况对新能源进行切除,并在电压电流满足无压无流条件或新能源长时间支撑条件后,经一定延时动作,恢复正常供电。

特殊场景二的运行工况如表3所示。

表3 特殊场景二典型运行工况

特殊场景一	运行状态	故障现象
主供线路电流被平衡导致无流,PT断开导致无压的特殊工况。主供线路断开,新能源支撑导致电压未下降,形成孤网。	主供线111开关、小电运维人员断开110 kV母线保测装置PT电压空开,此时110 kV开关、1号主变、2号主保测装置相电压二次值0.02 V,变运行,备供线112开110 kV主供线负荷电流低于无压未下降,形成孤网。关热备用。	110 kV母线保测装置PT电压空开,此时110 kV主供线负荷电流低于无压未下降,形成孤网。关热备用。

备自投装置动作情况统计如表4所示。

表4 备自投装置动作情况统计

序号	故障现象	动作情况	备注
1	I母、II母PT空开跳开,电源一进线无流。	无压无流启动,备自投动作。	故障特征判别未投入
2	不接入空开信号,I、II母PT空开跳开,电源一进线无流。	备自投不动作,不满足故障特征判别,15 s备自投闭锁放电。	故障特征判别投入
3	接入空开信号,I、II母PT空开跳开,电源一进线无流。	备自投不动作,I、II母PT断线告警,不满足故障特征判别,15 s备自投闭锁放电。	故障特征判别投入
4	I母PT空开跳开,电源一进线无流,II母PT正常,此时电源一进线发生永久性故障。	故障特征判别开放,备自投动作。	故障特征判别投入

从实验结果可知,当故障特征判别功能投入时,可有效避免备自投装置在主供无流、PT断线的情况下误动作。

特殊场景三的运行工况如表5所示。

表5 特殊场景三典型运行工况

特殊场景一	运行状态	故障现象
电源1故障跳闸,110 kV母线采用分列运行方式。1号主变、2号主变运行,备自投充电。	电源1故障跳闸,电源2功率不足以带动全站负荷,需对负荷进行联切后再投入备用电源。	电源1故障跳闸,电源2功率不足以带动全站负荷,需对负荷进行联切后再投入备用电源。

备自投装置动作情况统计如表6所示。

表6 备自投装置动作情况统计

序号	故障现象	动作情况
1	电源1故障跳闸,电源2过载告警、过载联切。	备自投方式3动作,负荷自适应联切正确间隔。
2	电源1故障跳闸,电源2过载闭锁。	电源2过载闭锁,备自投方式3、4放电。负荷不过载后重新充电。

从实验结果可知,备自投动作时能够正确计算并切除与功率缺额相近的负荷,若计算出所有可切负荷切除后仍大于备投电源功率,则会闭锁备自投,避免发生过载。

4 结语

文中设计的仿真测试模型,通过RTDS平台实现了高比例新能源场景、复杂故障的模拟,解决了传统测试无法复现“电压支撑”“主供电流被平衡”等真实工况的问题,为全适应综合备自投装置提供了友好、全面的测试环境。测试结果表明,仿真测试模型有效可行,能够全面测试备自投装置并及时发现装置所存在的问题,大大提高装置的测试效率,为后续开展更多复杂场景及其它备自投装置的测试奠定基础。

参考文献:

[1] 张帆,曹林锋,杨超,等.江西电网灵活调节能力规划研究[J].江西电力,2025,49(05):36-40.

[2] 杨琰冲,高研,张胜利,等.备自投装置的实际应用问题与解决方案[J].电工电气,2012(06):44-46.

[3] 李荡荡,屈晗炜.分布式新能源并网下变电站备自投误动风险分析[J].农村电工,2025,33(10):39-40.

[4] 王悦,唐天笑.带分布式电源接入的备自投方案简述[J].电气开关,2025,63(02):111-113.

[5] 辛谢兵,钟著辉,郑权国.备自投异常动作案例分析与逻辑优化[J].山东电力高等专科学校学报,2025,28(04):1-5.

[6] 雷庆山,秦金锋,陈朋辉.10 kV备自投动作逻辑隐患分析及优化研究[J].电工技术,2025(18):125-127.

[7] 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.

[8] 郭楠,屈晗炜.110 kV备自投装置未正确动作事故分析及防范[J].大众用电,2025,40(10):54-55.