

基于低压物理仿真的馈线自动化系统测试平台构建及验证

徐经民¹,程佳欣²,刘 洋³,邓才波³,郭 亮³

(1.南昌科晨电力试验研究有限公司,江西 南昌 330096; 2.国网江西省电力有限公司南昌市红谷滩区供电分公司,江西 南昌 330038; 3.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘 要:针对传统数字仿真下馈线自动化系统功能测试中缺乏精准智能配电网数学模型的问题,文中基于低压一次设备,搭建了一套完整的仿真分析数据平台。该平台采用分层结构与功能单元模块化思想,提出了利用物理设备低电压带电运行(380 V)方式动态模拟配电网真实故障,通过自动化控制系统,高效率调节网络拓扑与系统参数,构建了网架灵活多变,适应多态故障与分布式电源接入的测试环境,实现了主动配电网暂态特征发掘及配电终端闭环性能测试。在此基础上,通过该平台开展典型运行方式下,就地隔离自愈式馈线自动化系统的仿真测试试验,验证了测试平台的有效性。

关键词:配电网;馈线自动化;低压物理仿真;测试平台;故障处理

中图分类号:TM 727 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0047-05

0 引言

馈线自动化(feeder automation, FA)作为配电自动化的重要组成部分,其动作逻辑的正确与否将直接影响到配电自动化系统的故障处理与自愈能力^[1-2]。由于配电网停电检修可控时间较少,而针对带负荷运行的配电线路开展馈线自动化试验时,不仅难以同步注入故障信息,在馈线自动化系统发生现场异动时,还可能造成事故停电范围的扩大,从而严重影响配电网安全运行^[3-5]。

为确保馈线自动化控制策略的正确性及主站配合的协调性,降低配电网运行的安全隐患,亟需构建高效的馈线自动化系统仿真测试平台。目前采用的馈线自动化仿真测试方法以基于数字仿真器构建电网模型,并进行故障模拟为主。文献[6-7]通过短路计算及数据传输接口(message passing interface, MPI)并行计算模拟电气量变化,进而建立了配电系统及FTU通信仿真环境,但只局限于主站集中型FA动作逻辑验证;文献[8]设计了基于实时数字仿真系统(real-time digital simulation, RTDS)的馈线自动化测试平台,提出利用虚拟终端系统建立与主站及RTDS间的信息交互实现配网数据

的采集与故障处理,但是无法验证复杂网架下负荷转供等环网FA控制策略;文献[9-10]针对馈线自动化故障定位、隔离和供电恢复算法的可靠性进行量化评估,并通过实际网架对智能分布式FA的动作策略进行了验证,但无法满足复杂区域性配电网的可靠性要求;文献[11]建立了RTDS平台下的馈线自动化系统集成测试环境,并结合生产实际梳理了测试需求及方案,但是只局限于智能分布式FA的动作逻辑验证。

因此,文中建立了一套基于低压物理仿真的馈线自动化系统测试平台。该平台采用分层结构和功能单元模块化建设思想,通过低压一次设备搭建的物理仿真系统与配电主站进行通讯,能够实现主动配电网带配电终端闭环性能测试。对于不同类型的馈线自动化系统,提供主动干扰功能测试系统,可实现不同开关工况、网络架构下的配电网故障暂态特征发掘,为配电自动化系统的故障运行分析及馈线自动化系统的功能逻辑验证提供了有效的技术方案与检测平台。

1 物理仿真测试平台整体架构

1.1 测试平台设计思路

为了构建满足配电网故障分析及各种类型FA 覆

收稿日期:2025-06-13

作者简介:徐经民(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为供用电技术。

辑校验的数据仿真平台,需要设计一个具有智能配电网功能的配电自动化系统,在具备配网主站数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)与配电自动化(distribution automation, DA)功能的同时,能够模拟不同中性点接地方式、不同网络架构、不同开关运行工况下配电网的故障暂态过程及潮流稳态运行过程,同时实现满足大容量分布式电源接入情况下的多点故障模拟。

考虑到搭建配电自动化系统物理模型,在对配电网仿真的真实性方面具有不可替代的优势,结合现有场地及设备运行环境的条件限制,选用低压一次设备搭建配电网系统,利用集中参数单元,模拟系统分布式参数,通过物理设备低电压带电运行(380 V)来实现 10 kV 配电网运行的物理动态模拟。为实现典型配电自动化系统功能,利用自动化控制系统模拟真实配电网网络拓扑及运行工况,通过高精度故障录波及后台自动化控制,实现各节点模拟量及开关量全数据采集,可作为智能配电网终端设备的试验与检测及多套终端设备的 FA 控制策略研究与测试。

1.2 测试平台整体架构

根据上述分析,文中设计的馈线自动化系统测试平台整体架构如图 1 所示。

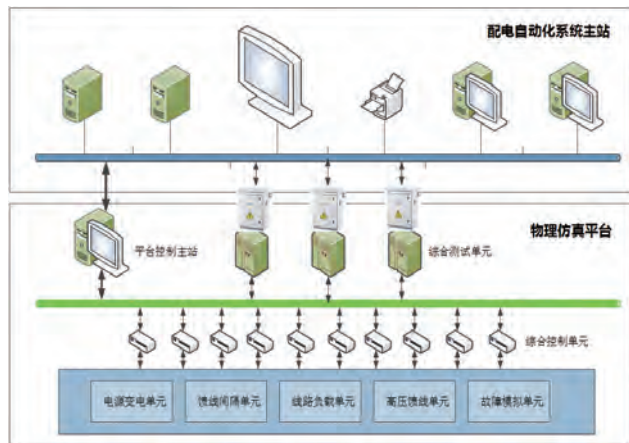


图 1 测试平台整体架构

由配电自动化系统主站、物理仿真平台、综合测试单元共同构成了完备的馈线自动化测试系统。仿真平台通过电源进线模块、中性点成套模块、负载模块、高压馈线模块、故障模拟模块,搭建了3分段3联络的系统网架,如图 2 所示,可以动态模拟短路故障及单相接地故障,同时与配网主站联动,能够实现物理仿真平台的“四遥”及 FA 功能,形成完整的闭环测试系统。

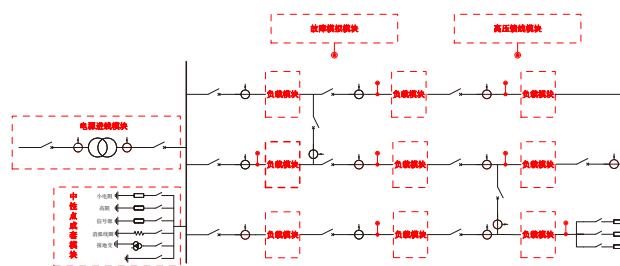


图 2 物理仿真平台系统网架

2 物理仿真测试平台层次组成及模块功能

2.1 物理仿真系统层

基于测试平台的总体架构,仿真一个 35 kV/10 kV 变电站及 3 回 10 kV 出线形成的配电系统,采用三相 380 V 电源进线配置 50 kVA 隔离变压器,可实现系统电压及短路阻抗 $\pm 2.5\%$ 的偏差调节;变压器副 5 边中性点外接中性点成套模块,可满足中性点不接地、经消弧线圈、小电阻、高阻接地等多种运行方式下的物理仿真;同时,配置单相、三相外施信号源自动投切控制逻辑,可按标准信号源频率输出脉冲序列用于单相接地故障波形识别与分析。

由于物理仿真系统必须具备良好的可扩展性与可操作性,负载单元、故障模拟单元、高压馈线单元均采用模块化设计,可根据测试需求无缝连接仿真系统;馈出线网架上配置有 4 组接入转接口,同一接入点能够实现多个模块单元同时接入。

2.1.1 负载单元模块设计

不同导线型号规格、截面的架空与电缆线路阻抗及对地电容值之间存在较大的差异^[12],在设计线路参数分布时,应使各参数单元可根据网架结构灵活变化,确保模拟故障产生的电容电流与真实网架一致,有关架空线路导线参数的计算可通过式(1)确定。

$$\begin{cases} R = \frac{\rho}{s} & (\Omega/\text{km}) \\ L = (4.6 \lg \frac{D_m}{r} + \frac{\mu_r}{2}) \times 10^{-4} & (H/\text{km}) \\ C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} & (F/\text{km}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为导线标称截面积; ρ 为导线的电阻率; r 为导线的几何平均半径; μ_r 为导线材料的相对导磁系数; D_m 为三相导线的几何平均距离。

个联络开关的开入开出接口、24 V 及 48 V 电源接口，能够满足集中测试所需的各种遥信、遥测、遥控信号采集与上送，实现被测终端的高效接入和联调测试，如图 4 所示。

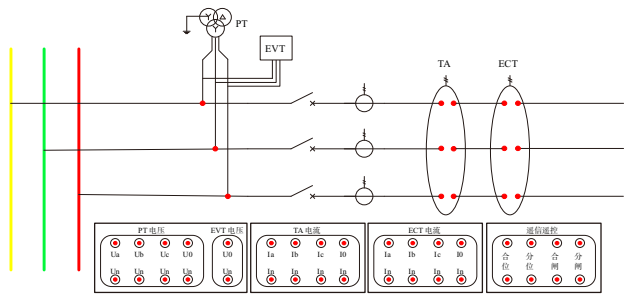


图 4 配电终端测试单元模块结构

3 物理仿真测试平台通信实施

为确保测试平台的真实性，该平台利用物理仿真系统发掘故障特征，制造和现场故障接近的电压、电流信号，通过合理配置电源主变进出线、馈出线的保护及测量装置参数精确记录故障信息；利用现场总线将开关的开/合状态、加压设备的启/停状态、线路电流电压等数据汇集至综合控制系统，实现一次设备运行状态的可视化管理及配电网故障情况的数据分析。整个物理仿真系统内部通讯网络如图 5 所示。

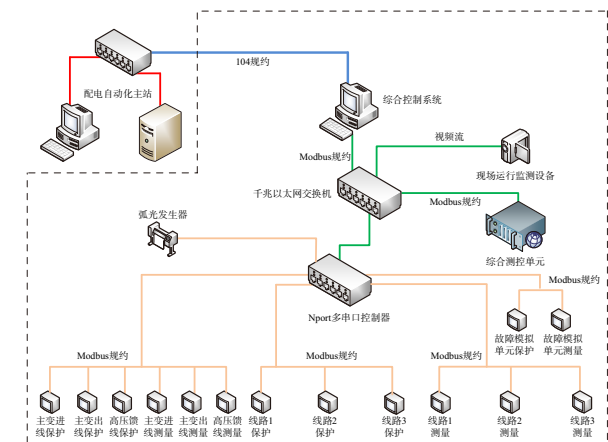


图 5 物理仿真系统内部通讯网络

4 典型测试算例验证

4.1 测试案例

为了验证低压物理仿真系统功能的正确性和馈线自动化测试平台的有效性，通过设置就地隔离自愈式

FA 终端分闸与重合闸时间配合，以及相应的闭锁条件，在仿真系统网架运行拓扑正常的情况下，触发系统馈线单元发生故障，考察主站辅助决策功能及被测终端故障区段隔离和非故障区段快速恢复供电的能力。

如图 6 所示馈线自动化系统测试系统网架包括 3 个出线开关 CB1—CB3，6 个分段开关 D01—D06 及 3 个联络开关 LS1—LS3。通过在开关 CB2、D02、D03、D04、LS2 位置接入被测配电终端，实现电压、电流、开入信息的采集与上送，被测终端配置表 2 所示的自适应综合型与继电保护相配合的馈线自动化策略。

表 2 被测终端馈线自动化策略配置

开关序号	继电保护投入	FA 策略	失电延时分闸时限/s	重合闸时限/s
CB2	过流 I 段	/	/	15
D03	过流 I、II 段	自适应综合型	0.5	2
D04	过流 I、II 段	自适应综合型	0.5	2
LS2	/	自适应综合型	0.5	/

针对不同的开关运行工况，开展终端馈线自动化功能逻辑测试，分别在 CB2 和 D03 之间线路上、D03 和 D04 之间线路上、D04 和 LS2 之间线路上模拟短路与接地故障，结合开关变位顺序、时间及故障区段的隔离与恢复供电结果，验证馈线自动化故障处理性能。

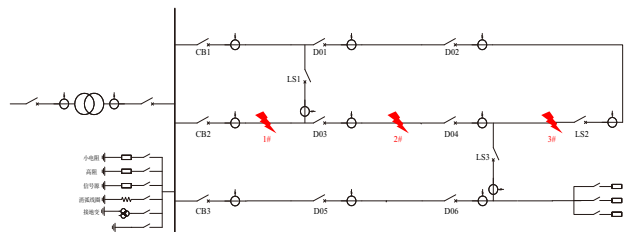


图 6 馈线自动化系统测试案例

4.2 案例验证结果

4.2.1 正常运行工况下的故障处理

考察包含瞬时故障、永久故障、短路故障、接地故障等故障类型下，测试平台故障定位、隔离与环间负荷转移的决策过程。配置方法如表 3 所示。

表 3 正常运行工况下故障配置

序号	故障区域	故障类型	故障性质	中性点接地方式
1	开关 CB2~D03 之间	短路故障	瞬时性故障	不接地
2	开关 D03~D04 之间	短路故障	永久性故障	不接地
3	开关 D04~LS2 之间	接地故障	永久性故障	不接地
4	开关 D04~LS2 之间	接地故障	永久性故障	经消弧线圈接地

1) CB2 与 D03 之间发生瞬时性短路故障，CB2 检测到过流信息并动作跳闸，CB2 供电区域内分段开关失电分闸；CB2 重合闸成功后 D03(21 s)、D04(7 s) 依次得电合闸恢复供电，具体故障波形见图 7。

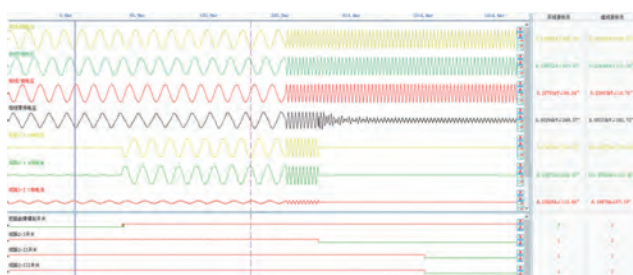


图7 CB2-D03间瞬时性短路故障波形图

2) D03与D04之间发生永久性短路故障, CB2、D03检测到过流信息, D03动作跳闸, D03供电区域内分段开关失电分闸; D03重合闸于故障后加速跳闸并闭锁正向合闸, D04闭锁反向合闸; LS2开关转供成功, 具体故障波形见图8。

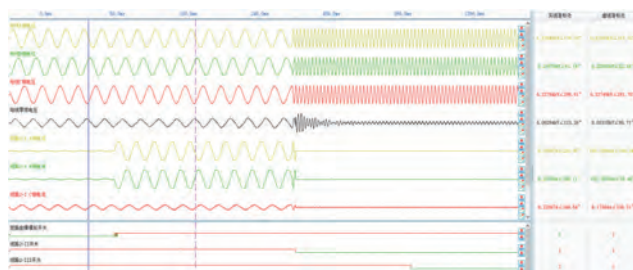


图8 D03-D04间永久性短路故障波形图

3) D04与LS2之间B相经6 000 Ω 电阻发生永久性接地故障, D04研判接地并动作跳闸; D04重合闸于故障后加速跳闸并闭锁正向合闸, LS2闭锁反向合闸, 具体故障波形见图9、10。

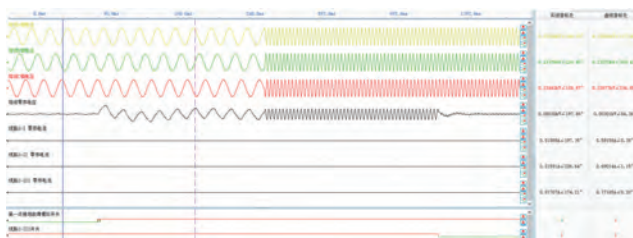


图9 中性点不接地系统下D04-LS2间永久性接地故障波形图

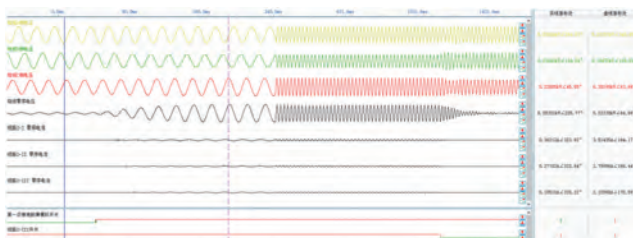


图10 中性点经消弧线圈接地系统下D04-LS2间永久性接地故障波形图

4.2.2 异常运行工况下的故障处理

考察在开关拒动、母线电压暂降等异常情况下,

FA能否正确处理馈线故障以及测试平台的决策过程。配置方法如表4所示。

表4 异常运行工况下故障配置

序号	故障区域	故障类型	故障性质	运行工况
1	开关D03~D04之间	短路故障	永久性故障	开关D03拒动
2	线路母线侧	电压暂降	瞬时性故障	母线电压暂降

1) D03与D04之间发生永久性短路故障, CB2、D03检测到过流信息, D03开关拒动 CB2越级跳闸, D04开关失压分闸; CB2重合闸于故障后加速跳闸, D04闭锁反向合闸; LS2开关转供成功, 具体故障波形见图11。

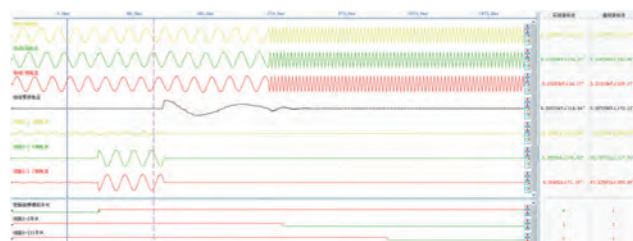


图11 D03-D04间永久性短路(D03开关拒动)故障波形图

2) 母线侧电压发生瞬时性电压暂降, 线路开关失电延时分闸时限躲过电压暂降时长, 具体故障波形见图12。

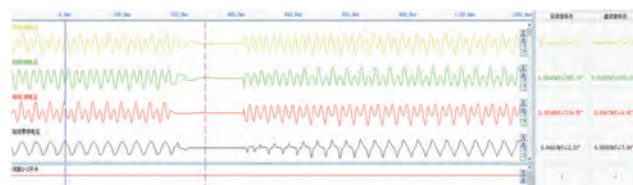


图12 母线电压暂降故障波形图

5 结语

文中提出了一套物理仿真馈线自动化测试平台, 采用低压一次设备建立配电网模型, 设计了适应于多态故障与分布式电源接入的测试环境, 相比于其他仿真系统, 能够实时不同开关工况、网络架构下的配电网正常及故障运行特征动态挖掘, 能够同时接入多台配电终端, 有效提高了主动配电网下终端馈线自动化功能测试能力。

通过对就地隔离自愈式馈线自动化系统进行物理仿真, 结果验证了该测试平台能够实现物理仿真系统、主站、配电终端之间的数据交互与逻辑配合, 有效开展馈线自动化系统仿真与测试, 实现标准化、规范化和高效化配电终端闭环性能测试。(下转第56页)

- [3] 罗旭恒,蔡志文,曾光辉,等.基于共模功率的交直流混合配电网单极接地故障识别方法[J].广东电力,2023,36(02):66-75.
- [4] 岳一石,周年光,邹妍晖,等.酒一湖线对湖南电网变压器的直流偏磁影响研究[J].湖南电力,2016,36(03):5-8.
- [5] 李华,朱一民,陈琳,等.小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J].广东电力,2022,35(12):56-65.
- [6] 陈文涛,周利兵,李山,等.基于探地雷达对变电站接地网的成像检测技术[J].电瓷避雷器,2018(03):54-59.
- [7] Yu C,Fu Z,Hou X, et al.Break-Point Diagnosis of Grounding Grids Using Transient Electromagnetic Apparent Resistivity Imaging[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(06):2485-2491.
- [8] 赵广茂.纵横地震波成像在路基无损检测中的应用研究[J].铁道工程学报,2016,33(10):25-28,60.
- [9] 杨兴华.柘溪水电厂接地网降阻改造[J].湖南电力,2011,31(03):60-62.
- [10] 曹小龙.电力设备接地引下线导通测试方法的探讨[J].湖南电力,2010,30(04):40-42,48.
- [11] 周挺,周卫华,黄福勇,等.导通性测量在线路工作中的应用[J].湖南电力,2008(05):11-13.
- [12] 王成,王峰,王宜强,等.输电线路杆塔接地电阻的测量方法分析[J].湖南电力,2012,32(02):39-42.
- [13] 谷相宏,张程,卫志农,等.基于状态空间分析的整流侧极母线接地故障清除方案评估[J].广东电力,2022,35(10):109-116.
- [14] 杨兴华.柘溪水电厂接地网降阻改造[J].湖南电力,2011,31(03):60-62.

(上接第 51 页)

参考文献:

- [1] 赵江河,陈新,林涛,等.基于智能电网的配电自动化建设[J].电力系统自动化,2012,36(18):33-36.
- [2] 王良.智能配电自动化应用实践的几点探讨[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):12-16.
- [3] 陈雪琨,王科龙,高原.基于物理模拟的配电自动化仿真试验系统研究与实现[J].自动化与仪器仪表,2024(05):127-131.
- [4] 刘健,张小庆,赵树仁,等.配电自动化故障处理性能主站注入测试法[J].电力系统自动化,2012,36(18):67-71.
- [5] 刘健,赵树仁,张小庆.中国配电自动化的进展及若干建议[J].电力系统自动化,2012,36(19):6-10.
- [6] 姜炜超,沈冰,李昀,等.基于 5G 的含分布式电源智能分布式馈线自动化实现方法[J].供用电,2021,38(10):57-63.
- [7] GUAN S,FAN W,LEI H, et al.Realization of simulation test method for feeder automation of power distribution automation system[C]//International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, November 26-29, 2015, Changsha, China: 2710-2714.
- [8] 吴栋蓑,杨涛,黄晓明,等.虚实结合的馈线自动化系统测试平台设计[J].电力系统保护与控制,2018,46(19):137-143.
- [9] 凌万水,刘东,陈新,等.馈线自动化算法可靠性的量化评价方法及其应用[J].电力系统自动化,2012,36(07):71-75.
- [10] 关石磊,邓宏芬,刘岚,等.馈线自动化功能仿真测试实现[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(12):91-96.
- [11] 陈冉,陆建,沈冰,等.馈线自动化系统的集成测试方案分析[J].电力系统自动化,2016,40(20):121-125.
- [12] 马啸宇,陈卓,杨超,等.基于 RTLAB 虚实结合的馈线自动化测试[J].电子科技,2024,37(05):25-31.
- [13] 刘健,张志华,吴水兰,等.一二次融合的配电网故障处理[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):1-6.