

# 基于MBD技术的配电变压器潜在故障风险控制系统设计

黄丹, 曹有霞, 刘单华, 高媛

(国网安徽营销服务中心, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 为降低配电变压器潜在风险, 确保故障风险控制性能, 设计基于模型的工程定义(model based definition, MBD)技术的配电变压器潜在故障风险控制系统。使用MBD技术描述系统主电路, 根据模块化原则将系统划分为表示层、控制层、业务逻辑层和信息访问层, 运用B/S结构实现系统硬件操作。使用Java开发语言, 利用在线监测、风险评价指标、故障风险控制等板块搭建系统软件, 引入事故链概念, 计算配电变压器失稳及支路过载故障后果, 根据核心决策节点, 完成潜在故障风险控制。实验结果表明, 设计系统具有较好的故障风险控制性能, 有效降低配电变压器潜在风险, 减小潜在故障风险控制延时。

**关键词:** MBD技术; 配电变压器; 潜在故障; 风险控制系统; 事故链风险

中图分类号: TP277; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)06-0038-05

## Design of Distribution Transformer Potential Fault Risk Control System Based on MBD Technology

HUANG Dan, CAO You-xia, LIU Dan-hua, GAO Yuan

(State Grid Anhui Marketing Service Center, Hefei 230000, China)

**Abstract:** To reduce the potential risk of distribution transformers and ensure the performance of fault risk control, a distribution transformer potential fault risk control system based on model based definition (MBD) technology is designed. It uses MBD technology to describe the main circuit of the system, divides the system into presentation layer, control layer, business logic layer and information access layer according to the principle of modularization, and uses B/S structure to realize the hardware operation of the system. Using Java development language, it builds system software using online monitoring, risk assessment indicators, fault risk control and other modules, introduces the concept of accident chain, calculates the consequences of distribution transformer instability and branch overload faults, and complete potential fault risk control based on core decision nodes. The experimental results show that the designed system has good fault risk control performance, effectively reducing the potential risk of distribution transformers and reducing the delay of potential fault risk control.

**Keywords:** model based definition technology; distribution transformer; potential failure; risk control system; accident chain risk

### 0 引言

配电网在电力系统中具有重要作用, 保证配电系统安全才能提升供电品质。电力系统中配电网产生故障事件的次数最多, 配电变压器故障尤为突出<sup>[1]</sup>。配电变压器是供电企业与客户之间的纽带, 一旦发生连锁故障将引起大面积停电, 及时发现配电变压器潜在故障风险并进行合理控制, 可最大限度降低电力系统经济损失<sup>[2]</sup>, 保证电网稳定运行。

针对变压器故障风险控制问题, 文献[3]设计了一种基于单母线分段的变压器风冷控制系统。分析变压器风冷控制系统故障类型和运行方式, 并给出对应的控制和配置方案, 通过相应的继电保护, 结合自备投动作原理, 对故障点进行定位并隔离。该系统具有一定的有效性,

但其控制效率较低。文献[4]结合虚拟现实技术, 设计了大型体育馆变压器运行状况及故障诊断系统。分析大型体育馆变压器负荷率数据, 探讨大型体育馆变压器的设计数据和计算系数。利用防火墙、专用交换机和信息数据库建立了系统硬件环境, 通过相关性分析、故障诊断和聚类推理实现了软件推理程序的设计, 完成了大型体育馆变压器故障推理系统的设计。但该系统操作实用性有待完善。

针对上述问题, 设计了基于MBD技术的配电变压器潜在故障风险控制系统。MBD即是使用一个集成化的三维数字化实体模型表达了完整的产品定义信息, 是三维数字化产品定义。MBD技术采用三维概念描述系统数据, 由此设计的系统构造更加符合控制需求, 更具智能化风格。设计系统为四层架构, 通过不同软硬件设备完成系统建造, 使用事故链理念进行潜在故障风险控制, 确

\*基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目资助(52120018004X)

收稿日期: 2023-09-06

保系统风险控制优越性。在实验分析中也证实了设计系统的可靠性,为配电变压器的安全应用发挥应有作用。

## 1 MBD 技术开发

MBD 技术是将 MATLAB、Code Composer Studio 集成开发环境及微控制器融合为一个整体,实现复杂且高度集成的系统工程开发。MBD 技术使用 Simulink 模型定义系统物理原型,在开发时仅需采用模型板块,不需要编写主程序代码<sup>[5]</sup>,方便用户验证与系统维护,加强代码一致性和鲁棒性,更直观高效地让故障风险控制实现数字化控制。按照 MBD 技术操作的核心内容,其开发过程如图 1 所示。

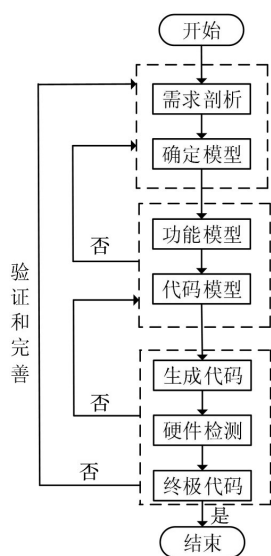


图 1 MBD 技术开发过程示意图

MBD 技术中,利用需求分析明确系统硬件电路架构,获取模型的输入/输出数量和参数,并创建功能模型。功能模型构建结束后,可消除主电路模型,以便获得控制程序代码,完成主电路控制,完善系统性能。

## 2 MBD 技术下配电变压器潜在故障风险控制系统设计

### 2.1 系统结构

为增强设计系统稳定性与可维护性,在 MBD 技术支持下依照模块化原则,把系统全局划分成 4 层架构,依次为表示层、控制层、业务逻辑层与信息访问层,多层结构布局如图 2 所示。

表示层是系统前端展示部分,完成和用户之间的交流互通,实现信息传递。例如用户录入配电变压器信息或自动接收故障信息<sup>[6-7]</sup>,均要利用表示层来展现,是和用户关联最密切的一层结构。控制层能处理用户上传的故障风险数据,通过该层连接业务逻辑层与表示层,让用户读取故障风险控制结果。业务逻辑层可实现和业务需求

相关的系统设计,在数据流中具备承上启下作用。信息访问层可完成业务层和数据库的信息交互,变换处理系统中的 Java 编程语言,实现数据储存、用户数据更新等工作。

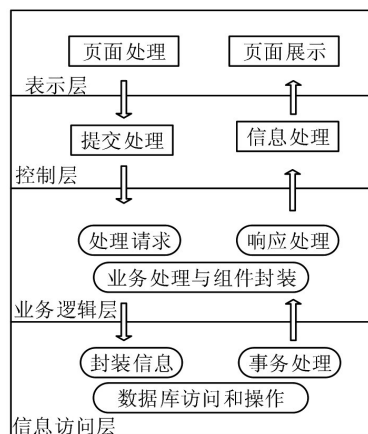


图 2 配电变压器潜在故障风险控制系统结构

### 2.2 硬件设计

网络架构合理性是创建配电变压器潜在故障风险控制系统的硬件保证,也是系统搭建的前提。设计系统使用 B/S(Browser/Server, 浏览器/服务器)结构,无需配备复杂电脑终端,就能实现系统操作,且此类网络硬件结构更便于系统升级与拓展,达到高带宽、低成本的使用需求。

为确保系统运行平稳性,在创建系统平台时要挑选被广泛应用的网络类型。在故障风险控制系统中搭建内网,终端通过内网和全球广域网服务器进行通信<sup>[8]</sup>。配电站外部终端可远程访问系统。经过系统中的信息交换和传输,配电变压器全部数据保存在数据库内。系统硬件中,一个完备的数据库存储体系能消除信息冗余,达到信息快速存储与共享,贴合不同用户处理故障风险信息的需求。设计数据库时,要考虑系统结构、任务与功能,从上至下归纳数据特征。系统硬件组成如图 3 所示。

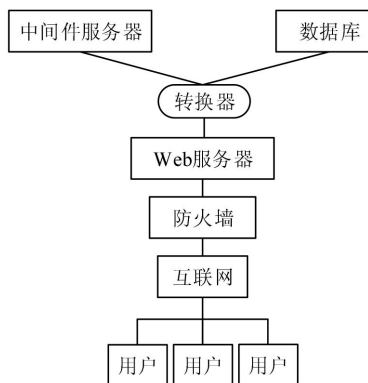


图 3 系统硬件组成

### 2.3 软件设计

系统软件采用 Windows 11 系统,系统功能编辑器为 MyEclipse<sup>[9]</sup>,开发语言为 Java,开发框架是 SSH 框架,此框架运用范围较广,维护效率较高。明确系统设计理念

后,将MBD技术下配电变压器潜在故障风险控制软件部分划分为7个模型板块,并进行具体分析。系统软件组成如图4所示。

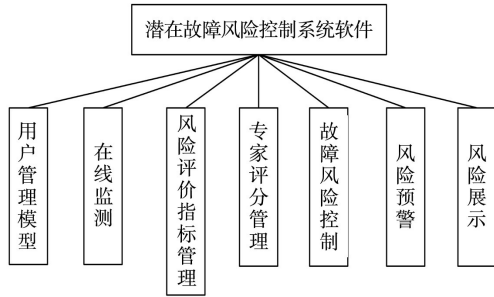


图4 系统软件组成

用户管理模型板块:涵盖个人信息修正、专家信息修正和修改密码几项功能,普通用户可在此记录变压器基础数据,专家则进入专家评分管理板块对变压器故障元素进行打分。

在线监测板块:储存变压器各类运行检测信息,利用内网传输至数据库,生成实时波形图。

风险评价指标管理板块:风险控制前要选择明确变压器故障影响元素,但因外部环境变化影响元素有可能产生改变,因此要管理风险评价指标,包含新增变压器、删减变压器、修改变压器等指标。

专家评分管理板块:涵盖专家评分、修改分数、专家查找自己分数等功能。

故障风险控制板块:推算专家评分和专家自身权重,输出各故障风险影响元素权值,将其与固定影响元素值进行综合运算,得到风险值,代入相关算法完成风险控制工作。

风险预警板块:若变压器风险值超出既定范围,系统使用短信群发模式向电力人员进行告警,降低电力成本损失。

风险展示板块:凭借时序顺序把变压器过往风险显示为折线图,直观查看配电变压器故障风险控制结果优劣。

故障风险控制板块中,引入事故链概念,提出基于事故链风险的故障风险控制算法。从负荷损失角度推算配电变压器失稳及支路过载的故障后果。设定事故链为 $A_k$ ,该事故链引发变压器失稳的后果为

$$a_{kC} = d(B_C | A_k)E(B_C) \quad (1)$$

式中, $B_C$ 是配电变压器失稳事件, $d(B_C | A_k)$ 是事故链 $A_k$ 诱发事件 $B_C$ 的概率, $E(B_C)$ 是事件 $B_C$ 造成的损失。

假设系统负荷裕度是 $\gamma_{A_k}$ ,倘若 $\gamma_{A_k} < 0$ ,证明系统负荷超出最高负载能力,变压器会产生电压失稳,由此得到等式:

$$d(B_C | A_k) = d(\gamma_{A_k} < 0) \quad (2)$$

变压器失稳损失为

$$E(B_C) = \overline{A_C} \times \overline{T_C} \times \overline{G_C} + E_C \quad (3)$$

式中, $\overline{A_C}$ 是变压器失稳事故负荷损失预期值; $\overline{T_C}$ 是变压器失稳事故修复时间均值; $\overline{G_C}$ 是停电负荷单位成本; $E_C$ 是附加损失。

事故链 $A_k$ 引发变压器支路过载后果计算公式为

$$a_{kF} = a_{kC} \sum_j d(B_j | A_k)E(B_j) \quad (4)$$

式中, $B_j$ 是支路 $j$ 产生的过载事件, $d(B_j | A_k)$ 是事故链 $A_k$ 诱发事件 $B_j$ 的概率, $E(B_j)$ 是事件 $B_j$ 产生的后果。

将支路 $j$ 过载对变压器运行造成的后果进一步记作:

$$E(B_j) = \overline{A_{Fj}} \times \overline{T_{Fj}} \times \overline{G_{Fj}} + E_{Fj} \quad (5)$$

式中, $\overline{A_{Fj}}$ 是支路过载负荷损失量预期值, $\overline{T_{Fj}}$ 是支路过载事故修复时间均值, $\overline{G_{Fj}}$ 是支路过载下停电负荷单位成本, $E_{Fj}$ 是设备损坏成本。

故障风险控制对配电变压器运行影响是多方面的,但此类影响均能定义为运行风险变化量的模式<sup>[10-11]</sup>,且因控制举措需要额外成本,会对系统产生额外运行风险。若运行风险变化量在风险控制后为最大值,证明该举措的控制效果最好。在事故链风险前提下,将事故前、后的故障风险控制目标函数依次记作:

$$\min \Delta Risk = a_{kF} \sum_l (\Delta H_{lC} + \Delta H_{lV} + \Delta H_{lF}) + \Delta H_S \quad (6)$$

式中, $\Delta Risk$ 表示变压器风险变化量, $\Delta H_{lC}$ 是事故链对变压器失稳风险变化量, $\Delta H_{lV}$ 是电压平稳状态下事故链形成的低电压风险变化量, $\Delta H_{lF}$ 是事故链形成支路过载风险变化量, $\Delta H_{lS}$ 是风险控制举措对变压器形成的额外运行风险。

探寻最优的故障风险控制策略就是让系统内所有节点参与决策,但在大规模系统中,调节全部节点难度较高且成本较大<sup>[12]</sup>。因此,要挑选参与故障风险控制的核心决策节点,实现风险控制目标。将事故链中间环节比作产生大型变压器故障的必要环节,事故链通过此环节数量越多,此环节的危殆程度越高,是风险控制薄弱环节。

创建结构重要度概念,设计事故链环节结构重要度。如果配网变压器产生 $n$ 条事故链 $A_1, A_2, \dots, A_n$ ,事故链中间环节个数为 $p, Q_1, Q_2, \dots, Q_p$ ,则中间环节 $Q_i$ 的结构重要度为

$$\varphi(Q_i) = \Delta Risk \frac{\sum_{i=1}^r M_i}{\sum_{i=1}^p \sum_{i=1}^r M_i} \quad (7)$$

式中, $M_i$ 是中间环节 $Q_i$ 在事故链中出现的次数, $r$ 表示危殆事故链的数量。

核心决策节点挑选完毕,将最终故障风险控制计算公式定义为

$$\Delta H_w = \varphi(Q_i) \sum_{j \in Z_Q} (\mu \times \Delta P_i \times \bar{T}_p \times \bar{C}_L + \bar{C}_s \times \Delta g_{p,i}) + \sum_{j \in Z_T} (\bar{C}_T \times \Delta g_{T,j}) \quad (8)$$

式中,  $Z_Q$ 、 $Z_T$ 依次为无功补偿节点和变压器支路数据集,  $\mu$ 是补偿电容器组损耗系数均值,  $\Delta P_i$ 是无功补偿设备容量,  $\bar{T}_p$ 是无功补偿时间,  $\bar{C}_L$ 是系统电价,  $\bar{C}_s$ 是无功补偿设备调节代价,  $\Delta g_{p,i}$ 是投切数量,  $\bar{C}_T$ 是变压器调节代价,  $\Delta g_{T,j}$ 是变压器分接头切换数量。

### 3 实验分析

为验证设计的基于MBD技术的配电变压器潜在故障风险控制系统的有效性,将图5的IEEE 33节点系统拟作电网系统,系统配备1个变压器。

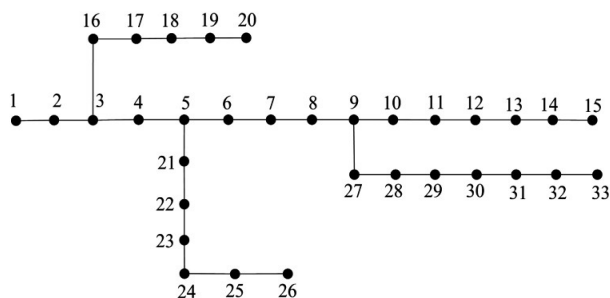


图5 IEEE 33节点系统

将单母线分段的控制系统、虚拟现实技术的诊断系统作为对比系统,对MBD技术的控制系统进行实验分析,验证其在配网变压器潜在故障风险控制方面的优越性。实验指标分别为负荷削减、发电功率调控、开断率和控制延时。

负荷削减表示变压器即将产生故障时,可自动或手动地断开更多线路负荷,降低电压负荷,减少系统电力损失。设定IEEE 33节点系统中的L10线路为待控制目标,共进行70次实验,观察相同潜在故障情况下,3种系统负荷削减量变化趋势,结果如图6所示。

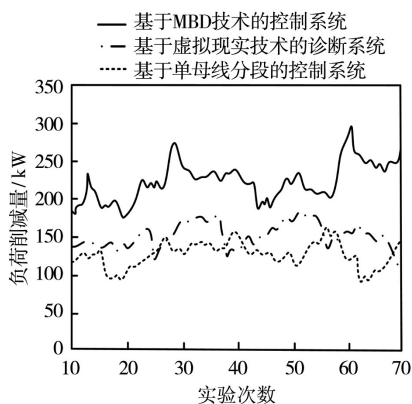


图6 潜在故障风险控制负荷削减水平分析

从图6中可知,基于MBD技术的控制系统在各实验

周期中,电力负荷削减数值均高于单母线分段的控制系统和虚拟现实技术的诊断系统,降低配电网变压器潜在故障风险的同时,预防连锁故障事故的发生。

将线路L28作为待控制目标,以变压器发电功率调控为控制变量,对比变压器即将具备故障风险时,3种系统与正常运行下发电功率值。与正常发电功率值越接近,证明潜在故障风险控制效果越好。假设共实验8次,结果如图7所示。

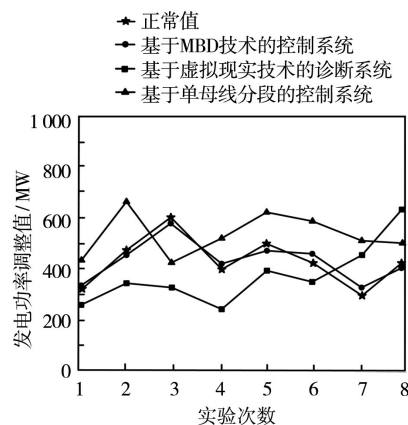


图7 潜在故障风险控制发电功率调控水平分析

根据图7可知,因外部环境差异,正常发电功率调控值为不规则变化,不同故障风险控制策略中,基于MBD技术的控制系统发电功率调控值与正常值最为相近,证明其在外部扰动下依旧能抵抗各类干扰,让变压器尽可能地接近正常值,潜在故障风险概率更低。

设定IEEE 33节点系统保持正常运行,面对当前运行情况,以线路开断率作为变压器潜在故障评估标准,开断率越低,证明系统故障风险控制性能越好,实验结果如图8所示。

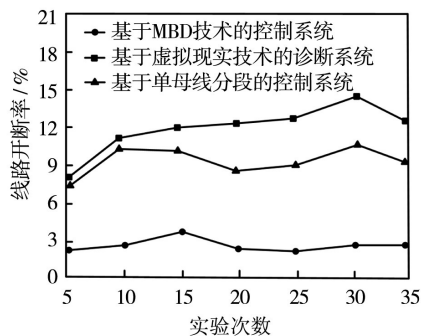


图8 变压器潜在故障开断率对比

从图8中可以看出,相同运行情景下,与单母线分段的控制系统和虚拟现实技术的诊断系统相比,MBD技术的控制系统计算下的线路开断率是最低的,表明其能将配电变压器失稳状况及支路过载等潜在故障降到最小,优化变压器安全性能。

(下转第55页)