

科学技术成果鉴定证书

中电联鉴字[2021]第 176 号

成果名称：多次短路冲击下的变压器绕组累积效应机理特性研究及工程应用

完成单位：国网山西省电力公司电力科学研究院

特变电工衡阳变压器有限公司

华中科技大学

国网天津市电力公司电力科学研究院

国网河北省电力有限公司电力科学研究院

鉴定形式：会议鉴定

组织鉴定单位：中国电力企业联合会

鉴定日期：2021 年 6 月 2 日

鉴定批准日期：2021 年 6 月 7 日

中国电力企业联合会

二〇二一年制

简要技术说明及主要技术性能指标

一、项目来源

多次短路冲击下绕组累积效应成为电网运维管理的重大难题，本项目依托于国网山西省电力公司电力科学研究所联合大学、制造厂在对抗短路能力不足变压器改造方面完成的仿真分析和真型试验测试，从而形成系列成果，用于指导山西电网变压器短路冲击治理问题。

二、项目主要应用领域及其技术特点

应用领域：本项目研究成果可应用于电网公司大型电力变压器的运维检修、变压器抗短路能力校核状态评估，可为电力变压器的运维部门提供评估、检修和治理的决策依据，提高大型电力变压器设备本质安全水平。避免大型变压器短路冲击烧毁，提早对抗短路能力不足的变压器开展综合治理，防止变压器故障引起的严重电网运行风险事。

技术特点：项目紧紧围绕变压器抗短路能力评估和实施提高变压器抗短路能力的运维改造为目标，开展了变压器抗短路能力的理论分析研究、计算机仿真研究和真型试验三方面的研究。三个方面内容相互独立，但又彼此联系紧密。在理论分析方面，结合现有成熟的变压器抗短路理论，研究了变压器短路冲击累积效应，包括：短路热效应累积和短路力效应累积；在短路力效应累积研究方面，把绕组的力累积和结构件的力累积作为主要研究对象，分析了辐向失稳的累积和轴向电动力的累积；并且对圆弧拱平面内非线性稳定进行了系统研究分析，重点包括：圆弧拱平面内非线性平衡方程、屈曲分析和圆拱失稳理论在变压器辐向稳定性判断的应用。在短路冲击累积效应仿真分析方面，利用 COMSOL 软件，针对变压器制造实际技术参数，建立了电磁场和结构场仿真模型，实现“电磁场-机械场”的耦合，分析获取了变压器多次短路后（对称短路、两相对地短路和单相对地短路）绕组位移突变点。在真型模型突发短路试验研究方面，完成了高低突发短路试验和高中突发短路试验，对短路试验数据进行分析，观察支撑件、导线类型以及导线厚度对辐向失稳的影响。综上研究，根据前述变压器抗短路可靠性指标，提出变压器现场、返厂的改造策略，实现变压器抗短路能力的评估。

在真型模型突发短路试验研究方面：短路试验研究采用逐渐增加短路电流的试验方式进行，试验研究紧紧围绕短路累积性效应、短路冲击下电量与非电量特征量特点、绕组抗短路能力临界点来进行。对 50MVA/110kV 三相三柱三绕组变压器对各绕组抗短路能力进行了特殊设计与制造，对比关键影响因素的权重，减少与研究无关的结构与配件，得出了绕组支撑、导线类型和导线厚度对辐向失稳影响规律，验证了变压器辐向稳定性判断方法。

在变压器状态评估技术方面：依据设备全寿命管理理念，综合变压器原厂家提供的设计能力、变压器安装地点短路水平、变压器运行老化状况、厂家制造水平等要素，进行评估。被评估变压器的设计结构、使用材质、制造工艺和出厂试验数据是评估的基础关键要素，结合变压器运外部短路累计次数的动、热稳定进行计算分析，以变压器各侧绕组耐受 2S 的动稳定短路电流值 I_D/I_C （有效值/峰值），及变压器耐受 2S 热稳定短路电流值 I_R （有效值）为计算参数值，根据短路类型，给出变压器高中低压辐向失稳系数和轴向力、辐向力校验结果。

在变压器绕组累计冲击效应治理及工程应用方面：根据变压器抗短路评估结果的不同，提出了现场改

造和返厂改造方案。在现场改造方案中，提出了以强化压板结构和基于等效电流分析的限抗改造方案；在返厂改造方案中，以材料升级和设计优化为主，提出了8项改造措施，包括：采用自粘性换位导线、导线采用半硬铜导线、采用高强度绝缘纸板、增加特硬纸板绝缘筒、器身压板增加副压板结构、线圈绕制过程使用带张紧装置的立绕机、套装紧固采取整体套装工艺、器身压紧采用机械轴向压紧机。

三、项目的主要技术指标

- (1) 基于变压器绕组在短路情况下辐向、轴向以及复合铰链作用的多维分析，揭示了以元件物理特性为表征的短路累计冲击影响效应。通过建立电场-磁场-结构场多物理耦合变压器仿真模型，得到了各种类型短路电流作用下短路次数与绕组形变量关系曲线，获取了各种短路工况下绕组发生位移突变的关键点。
- (2) 提出基于圆拱失稳理论的变压器辐向稳定性判断方法，通过真型模型突发短路试验完成累积效应的状态监测，揭示了绕组支撑、导线类型和导线厚度对辐向失稳影响规律，为后期抗短路不足变压器改造提供有效依据。
- (3) 提出了考虑短路累计冲击影响的变压器运行状态评估技术，形成以强化压板结构为主的现场改造、基于等效电流分析的限抗改造和以材料升级为主的返厂改造等差异化治理策略，综合提升了变压器抗短路能力水平。

四、项目与国内外同类技术比较

相比国内外在变压器短路冲击方面的技术问题而言，主要依据 GB 1094.5-2008 对变压器进行短路冲击试验，同时在多次短路冲击累积方面从定性角度对其进行了笼统的分析，而本项目从机械角度出发，采用更贴合实际工况的研究理论和手段对其进行指标化分析研究，提出多维度的变压器绕组稳定性评价方法，同时结合生产实际提出相应的治理应用方案。

研究方向	本项目	国内外同类技术	结论
短路冲击累积效应分析方法方面	辐向力与轴向力复合铰链多维分析	单方向作用力分析	传统技术并没有考虑辐向作用力与轴向作用力之间的相互影响关系，本项目更真实地反映了变压器在短路冲击下的累积效应。
短路冲击效应方面	揭示短路冲击与变压器物理元件之间的关系	变压器元件在热效应与力效应的定性分析	传统技术只是在定性方面分析了绕组的变化，本项目揭示了变压器绕组形变量与冲击次数等的定量关系。
变压器辐向稳定判断方面	圆拱失稳理论	GB 1094.5	传统技术以 2%阻抗变化为标准，本项目结合各种变压器类型，以阻抗变化量和变化率为判断标准。
短路冲击累积真型试验方面	多次不同短路电流的冲击	只对新变压器进行抽检试验	传统技术只是根据国标对新入网变压器进行抽检冲击试验，本项目定制专门真型试验变压器，揭示导线类型、短路电流、短路次数、导线支撑等对绕组稳定的影响。
变压器运行状态评估方面	考虑变压器多次累积冲击	不考虑之前受到的冲击影响	传统技术只以新变压器短路冲击标准为依据，精度差。本项目结合变压器实际运行工况，考虑之前受到的冲击次数。
变压器抗短路能力提升方面	考虑不同变压器运行工况	考虑不同变压器运行工况	根据变压器实际运行工况形成差异化治理策略。

五、取得的成果和推广应用

项目研究形成实用化研究成果，并在山西电网完成了多项工程应用。

针对山西电网在运变压器短路冲击频繁的问题，通过建立电场-磁场-结构场多物理耦合变压器仿真模型，得到了各种类型短路电流作用下短路次数与绕组形变量关系曲线，获取了各种短路工况下绕组发生位移突变的关键点，同时基于圆拱失稳理论利用真型试验揭示了绕组支撑、导线类型和导线厚度对辐向失稳影响规律。以此为基础，项目提出了考虑短路累计冲击影响的变压器运行状态评估技术，形成以强化压板结构为主的现场改造、基于等效电流分析的限抗改造和以材料升级和设计优化为主的返厂改造等差异化治理策略，为山西电网变压器抵御短路冲击提供了有效保障。

成果已经成功应用于国网山西省电力公司110千伏及以上变压器抗短路治理工作中。累计完成18台220千伏变压器返厂改造、9台变压器低压侧加装限流电抗器和4台变压器低压限抗实现动态调整，同时，对6台变压器实现加装副压板的现场改造。在项目实施之后，对已经发生低压短路冲击的43次故障（含220kV变压器16台和110kV变压器27台）案例中，无一台变压器因短路冲击导致烧毁。单台变压器短路烧毁停电时间约10天，220kV变压器平均容量按150000KVA，110kV变压器平均容量50000KVA，以每度电经济损失0.1元、变压器负载率为60%计算，避免损失 $(16 \times 24 \times 10 \times 150000 \times 0.1 + 27 \times 24 \times 10 \times 50000 \times 0.1) \times 0.6 = 5400$ 万元。同时，220kV变压器短路烧毁后维修费用约200万元/台，110kV变压器短路烧毁后维修费用约100万元/台，通过项目实施，节约因变压器烧毁带来的维修费用开支 $200 \times 16 + 100 \times 27 = 5900$ 万元。

通过项目实施，综合提升了山西电网变压器抗短路能力水平，避免了变压器经多次短路冲击后导致烧毁故障，产生经济效益约1.13亿元，有效保障了电网安全稳定运行。

推广应用前景与措施

项目成果的实施一方面在对变压器进行运行状态评估时，将其受到的短路冲击次数作为评估的重要参数之一，有利于对变压器运行状态更加准确、有效地进行评估；另一方面，根据评估结果，同时结合变压器型号参数、所带负荷、运行方式等参数，形成以强化压板结构为主的现场改造、基于等效电流分析的限抗改造和以材料升级和设计优化为主的返厂改造等差异化治理策略，综合提升了变压器抗短路能力水平，从而保障电网的安全稳定运行。项目成果的应用对完善变压器抗短路能力评估起到了有很好的促进作用，为输变电工程的建设、运行和发展提供了坚实的技术支撑，有利于保障国民经济的发展，促进社会的进步。

本项目研究成果促进了我国大型变压器的设计、制造和运行性能的大幅提升，有利于推动相关变压器制造厂家的产品技术升级，对提高变压器采购质量和运行技术维护水平有重要的作用，在保障电力系统安全稳定运行方面具有重要意义。



主要技术文件目录及来源

- | | |
|-------------------|---------------------------------|
| 1、《鉴定大纲》 | 鉴定委员会 |
| 2、《项目计划任务书》 | 国网山西省电力公司电力科学研究院 |
| 3、《技术研究报告》 | 国网山西省电力公司电力科学研究院等 |
| 4、《技术经济分析报告》 | 国网山西省电力公司电力科学研究院等 |
| 5、《国内外同类技术对比分析报告》 | 国网山西省电力公司电力科学研究院等 |
| 6、《检测、试验报告》 | 国家变压器质量监督检验中心
国家电器产品质量监督检验中心 |
| 7、《用户使用报告》 | 国网山西省电力公司 |
| 8、《科技查新报告》 | 江苏省科技查新咨询中心 |

资料审查意见

受鉴定委员会委托，资料审查组对国网山西省电力公司电力科学研究院、特变电工衡阳变压器有限公司、华中科技大学、国网天津市电力公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院提交的“多次短路冲击下的变压器绕组累积效应机理特性研究及工程应用”项目鉴定资料进行了审查。审查意见如下：

1、提交的鉴定资料完整、规范，符合科技成果鉴定要求。

2、该项目研制的 SSZ-240000/220 和 SSZ11-31500/110 两台变压器通过沈阳变压器研究院、苏州电器科学研究院第三方机构检测，检测结果符合相关标准要求。

3、经用户使用，反映良好。

结论：可以提交科技成果鉴定。

资料审查组组长：

王森

成员：

汲胜昌

2021 年 6 月 2 日

鉴 定 意 见

2021年6月2日,中国电力企业联合会通过视频会议的形式组织召开了由国网山西省电力公司电力科学研究院、特变电工衡阳变压器有限公司、华中科技大学、国网天津市电力公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院共同完成的“多次短路冲击下的变压器绕组累积效应机理特性研究及工程应用”项目科技成果鉴定会。鉴定委员会听取了项目技术研究报告、技术经济分析报告、测试报告、科技查新报告等汇报。审查了相关资料,经质询与讨论,形成鉴定意见如下:

1. 提交的鉴定材料完整、规范,符合科技成果鉴定要求。

2. 该项目针对多次短路冲击下变压器绕组累积效应开展了仿真分析和真型试验,主要研究成果及创新点如下:

1) 建立了磁场-应力场物理耦合变压器仿真模型,研究了以形变量突变点为表征的短路累积冲击影响效应,得到了短路次数与绕组形变量关系曲线,获取了各种短路工况下绕组形变的短路次数阈值。

2) 提出基于圆拱失稳理论的变压器辐向稳定性判断方法,通过真型模型突发短路累积试验,验证了该方法的有效性,为抗短路能力不足的变压器改造提供了依据。

3) 提出了考虑短路累积冲击影响的变压器承受短路能力评估技术,形成以强化压紧系统为主的现场改造、基于等效电流分析的限流电抗器改造(增加)和以材料升级为主的返厂改造等差异化治理措施,综合提升了变压器承受短路能力的水平。

3. 该项目研制的 SSZ-240000/220 和 SSZ11-31500/110 两台变压器通过沈阳变压器研究院、苏州电器科学研究院第三方机构检测,检测结果符合 GB 1094.5 的要求。

4. 为避免大型变压器短路冲击烧毁,成果在国网山西省电力公司全面推广,防止变压器故障引起的严重电网运行风险事故,具有显著的社会意义。

鉴定委员会认为:项目成果在变压器短路冲击累积效应评估方面达到国际领先水平。同意通过科技成果鉴定。

鉴定委员会主任:

韩肖清

副主任:

杨建

2021 年 6 月 2 日

主持鉴定单位意见

同意鉴定意见

主管领导签字：_____(盖章)
2021年6月7日
成果鉴定专用章

组织鉴定单位意见

同意鉴定意见

主管领导签字：_____(盖章)
2021年6月7日
成果鉴定专用章

完成单位情况

序号	完成单位名称	邮政编码	所在省市	详细通信地址	联系人	电话（传真）
1	国网山西省电力公司电力科学研究院	030001	山西省太原市	山西省太原市青年路 6 号	刘宏	18935129195
2	特变电工衡阳变压器有限公司	421007	湖南省衡阳市	湖南省衡阳市雁峰区特变电工衡变厂	欧强	18573410411
3	华中科技大学	430074	湖北省武汉市	湖北省武汉市洪山区珞瑜路 1037 号	臧春艳	18971693759
4	国网天津市电力公司电力科学研究院	300384	天津市	天津市西青区海泰华科四路 8 号	姜宁	18102008925
5	国网河北省电力有限公司电力科学研究院	050021	河北省石家庄市	河北省石家庄市体育南大街 238 号	刘宏亮	13932126969
6						
7						
8						

- 注： 1. 完成单位序号超过 8 个可加附页。其顺序必须与鉴定证书封面顺序完全一致。
2. 完成单位名称必须填写全称，不得简化，与单位公章完全一致。
3. 详细通信地址要写明省（自治区、直辖市）、市（地区）、县（区）、街道和门牌号码。
4. 联系人指该项目申请鉴定的经办人。
5. 联系电话，请注明地区号码。

主要研制人员名单

序号	姓名	性别	年龄	所学专业	技术职称 (职务)	文化程度 (学位)	工作单位	对项目创造性贡献
1	刘宏	男	35	电力系统及其自动化	高级工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	项目总体设计
2	欧强	男	38	高电压与绝缘技术	高级工程师	硕士	特变电工衡阳变压器有限公司	完成真型试验验证
3	臧春艳	女	43	高电压与绝缘技术	副教授	博士	华中科技大学	设计仿真模型
4	王欣伟	男	41	电力系统及其自动化	高级工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	分析变压器短路故障
5	刘宏亮	男	41	高电压与绝缘技术	高级工程师	本科	国网河北省电力有限公司电力科学研究院	参与风险概率模型研究
6	马昊	男	31	高电压与绝缘技术	工程师	硕士	国网天津市电力公司电力科学研究院	参与累积效应仿真分析
7	李冰阳	男	30	高电压与绝缘技术	高级工程师	硕士	华中科技大学	完成仿真数据分析
8	李国栋	男	31	高电压与绝缘技术	工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	参与现场应用
9	俞华	男	40	高电压与绝缘技术	教授级高工	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	项目指导
10	邢明路	男	33	高电压与绝缘技术	高级工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	负责项目实施
11	李帅	男	31	高电压与绝缘技术	工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	参与变压器返厂治理
12	梁基重	男	37	高电压与绝缘技术	高级工程师	硕士	国网山西省电力公司电力科学研究院	参与变压器现场改造

注：主要研制人员超过 15 人可加附页。

鉴定委员会名单

序号	鉴定会职务	姓名	工作单位	所学专业	现从事专业	职称	签名
1	主任委员	韩肖清	太原理工大学	电力系统及其自动化	电气工程	教授	韩肖清
2	副主任委员	杨迎建	国网电力科学研究院有限公司	高电压	高电压	教高	杨迎建
3	委员	毕建刚	中国电力科学研究院有限公司	控制科学与工程	电力设备状态检测	教高	毕建刚
4	委员	贾志东	清华大学	高电压与绝缘技术	高电压与绝缘技术	教授	贾志东
5	委员	汲胜昌	西安交通大学	电气工程	高电压技术	教授	汲胜昌
6	委员	汪金刚	重庆大学	电气工程	电气工程	教授	汪金刚
7	委员	朱学成	国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院	高电压	高电压	教高	朱学成
8	委员	陶风波	国网江苏省电力有限公司电力科学研究院	高电压绝缘	高电压绝缘	教高	陶风波
9	委员	王森	国网陕西省电力公司电力科学研究院	高电压技术	高电压技术	教高	王森
10	委员	杨晓辉	国网河南省电力公司电力科学研究院	电气工程	输变电设备检测与评价	教高	杨晓辉

填写说明

1. 《科学技术成果鉴定证书》，规格一律为标准 A4 纸，竖装，必须打印，字体为 5 号字。

本证书为中国电力企业联合会制定的标准格式，任何部门、单位、个人均不得擅自改变内容、增减证书中栏目。

2. 编号：指组织鉴定单位科技成果管理机构按年度组织鉴定的顺序编号。

3. 成果名称：申请鉴定时经组织鉴定单位审查同意使用的成果名称。

4. 成果完成单位：指承担该项目主要研制任务的单位。由二个以上单位共同完成时，按技术合同研制单位顺序排列（与《科技成果鉴定申请表》中成果完成单位排列一致）。

5. 组织鉴定单位：组织此项成果鉴定的单位。

6. 鉴定形式：指该项成果鉴定所采用的鉴定形式，即会议鉴定、函审鉴定或检测鉴定。

7. 鉴定日期：指该项成果通过专家鉴定的日期。

8. 鉴定批准日期：组织鉴定单位签署意见的日期。

9. 简要技术说明及主要技术性能指标：应包括如下内容

(1) 任务来源：计划项目应写清计划名称及其编号，计划外的应说明是横向或自选项目。

(2) 应用领域和技术原理。

(3) 性能指标（写明合同要求的主要性能指标和实际达到的性能指标）。

(4) 与国内外同类技术比较。

(5) 成果的创造性、先进性。

(6) 作用意义（直接经济效益和社会意义）。

(7) 推广应用的范围、条件和前景以及存在的问题和改进意见。

10. 主要技术文件目录及来源：指按照规定由申请鉴定单位应递交的主要技术文件资料，并注明文件和技术资料提供单位。

11. 测试报告：指采用会议鉴定形式时，根据需要由组织鉴定单位聘请的专家测试组到现场进行测试结果的报告。

12. 鉴定意见：会议鉴定是鉴定委员会形成的鉴定意见；函审鉴定是函审专家组正副组长根据函审专家函审意见汇总形成的意见；检测鉴定是检测机构出具的“检测结论”（含必要时聘请 3 至 5 名专家提出的综合评价意见）。

13. 主要研制人员名单：由成果完成单位填写，填写内容与《科技成果鉴定申请表》中的主要研制人员名单相同。

14. 鉴定委员会名单：采用会议鉴定时，由参加鉴定会的专家亲笔签名；采用函审鉴定时，由组织鉴定单位根据函审专家填写的《科技成果函审表》中有关内容填写；采用检测鉴定时，由组织鉴定单位根据专家在《检测鉴定检测报告》中的“专家评价意见”填写。

15. 主持鉴定单位意见：由受组织鉴定单位委托，具体主持该项成果鉴定工作的单位填写，单位领导签字，并加盖公章。

16. 组织鉴定单位意见：由负责该项成果鉴定工作的单位填写，由主管领导签字，并加盖公章。

17. 组织鉴定单位对鉴定证书所有栏目审查无误后，方可加盖“中国电力企业联合会成果鉴定专用章”，鉴定证书生效。