

DOI: 10.61369/NPS.2025030001

无损耗高速开断技术在新能源系统短路限流与节能优化中的应用研究

邵久柠¹, 刘海¹, 宋延良¹, 童雪燕², 杨新州³

(1. 华电新疆公司有限公司新能源分公司, 新疆 乌鲁木齐 832000;

(2. 安徽合凯电气科技股份有限公司, 安徽 合肥 231131;

(3. 上海昆拓电气科技有限公司, 上海 201612)

Application of High-Current Dual-Parallel Millisecond-Level Interruption Technology in Energy Optimization of the New Energy Industry

SHAO Jiuning¹, LIU Hai¹, SONG Yanliang¹, TONG Xueyan², YANG Xinzhou³

(1. Huadian Xinjiang Company Limited, New Energy Branch, Urumqi Xinjiang 832000;

(2. Anhui Hekai Electric Technology Co., Ltd., Anhui Hefei 231131;

(3. Shanghai Kuntuo Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

摘要:【目的】为解决新能源电站因变压器容量增大导致的35kV系统短路电流超标问题,并克服传统限流方案高能耗、电磁干扰等缺陷,研究新型节能限流技术。【方法】提出基于涡流驱动机构的无损耗限流方案:结合毫秒级高速开断技术(双并联结构 ≤ 10 ms动作)和快速识别技术(2 ms故障预判),通过智能切换机制使限流电抗器仅在短路时投入;正常运行时电流流经零阻抗通路,实现零损耗。

【结果】在800 MW风电项目中首次应用表明:短路电流由41.3 kA限制至28.2 kA(降幅31.7%),年节电312.4万kW·h;消除传统电抗器99%的电磁污染与结构振动风险,全生命周期成本降低42%。【结论】该方案攻克了大电流场景下毫秒级开断与无损耗运行的技术难题,为新能源电站提供了安全、低碳的短路电流治理路径,对支撑“双碳”目标具有推广价值。

关键词: 变压器; 限流电抗器; 短路电流超标; 双并毫秒级; 无损耗; 涡流驱动机构

ABSTRACT: [Introduction] In order to solve the problem that the short-circuit current of 35 kV system exceeds the standard caused by the increase of transformer capacity in new energy power station, and overcome the defects of high energy consumption and electromagnetic interference of traditional current limiting scheme, a new energy saving current limiting technology is studied. [Methods] A lossless current limiting scheme based on eddy current drive mechanism is proposed. Combined with millisecond high speed breaking technology (double parallel structure ≤ 10 ms action) and fast identification

technology (2 ms fault prediction), the current limiting reactor is only put into operation when short circuit occurs through intelligent switching mechanism. During normal operation, the current flows through the zero impedance path to achieve zero loss. [Result] The first application in the 800 MW wind power project shows that the short-circuit current is limited from 41.3 kA to 28.2 kA (a decrease of 31.7%), and the annual power saving is 3.124 M kW·h. The electromagnetic pollution and structural vibration risk of the traditional reactor are eliminated by 99%, and the life cycle cost is reduced by 42%. [Conclusion] This scheme overcomes the technical problems of millisecond breaking and lossless operation in high current scenarios, provides a safe and low-carbon short circuit current control path for new energy power stations, and has significant promotion value for supporting the 'dual-carbon' goal.

KEY WORDS: transformer; current limiting reactor; short-circuit current exceeds the standard; double and millisecond level; no loss; vortex drive mechanism

0 项目背景与需求分析

为落实国家“碳达峰、碳中和”战略目标,持续推进产业与能源结构转型,大力开发可再生能源,新疆维吾尔自治区发展改革委于2023年9月正式批复建设古尔班通古特沙漠基地80万kW(800 MW)风电项目。该项目旨在充分利用沙漠、戈

壁、荒漠地区的资源优势，助力实现区域能源体系的安全、高效、低碳转型。

该项目变电站主体电气架构设计如下：

主变压器：配置3台250 MV·A三相三卷有载调压变压器1[#]、2[#]、3[#]。

220 kV侧：采用双母线接线，规划4回出线；本期建设双母线及1回出线。

110 kV侧：采用双母线接线，规划6回出线；本期建设双母线，预留1回出线。

35 kV侧：按双受电断路器单母线分段接线设计。每台主变对应2段母线，共规划6段（I至VI段），总计42回出线。本期建设I-V段（每段接5回风电出线）及VI段（接7回风电出线），合计32回出线。

经核算，设计阶段的短路电流系统存在显著安全隐患：35 kV侧母线及馈线短路电流有效值超过41 kA，远超系统35 kV开关柜中断路器31.5 kA的额定开断能力。若未采取有效限流措施，一旦发生两相或三相短路故障，将直接危及35 kV开关的正常开断，构成重大安全运行风险。

因此，该项目亟需应用一种技术成熟、经济可靠、符合节能减排理念的短路电流限制解决方案，以确保电力设备安全可靠运行，有力支撑“绿色”发展与“双碳”目标的实现。

1 常规限流方案技术经济性分析

1.1 常规限流电抗器方案^[1-4]

为抑制系统35 kV侧短路电流至开关额定开断能力（31.5 kA）以下，经计算，需在主变压器低压侧（35 kV）加装限流电抗器。该电抗器参数为：额定电流5 000 A，额定电压35 kV，额定电抗率20%。然而，电抗器的长期运行可能带来一系列技术挑战。

1.1.1 常规限流电抗器的潜在缺陷

运行压降与电压调节受限：流经电抗器的负荷电流会产生不可忽略的压降（ $\Delta V = I * X_L$ ），且此压降随负荷波动而变化。该特性对供电电压的精细调节构成显著障碍，增加了维持电压稳定在合格范围内的难度。

大容量电机起动冲击影响：在系统内大功率电动机的起动瞬间，其启动涌流导致流过电抗器的电流剧增。这加剧了电抗器两端的压降，造成母线电压瞬时跌落，可能对连接于同一母线的其他敏感负

荷（如精密设备、控制系统或照明）的正常运行产生不利影响^[5]。

漏磁场负面效应：电抗器的邻近构件会附加耗与过热风险。电抗器产生的强漏磁场会在其周边金属框架（如支撑结构、围栏）和钢筋混凝土结构内的钢筋中感应出涡流，形成附加损耗。这不仅造成无功能量浪费，更可能引发金属构件局部异常发热，加速材料老化。

结构振动与长期可靠性隐忧：电抗器漏磁场与感应电流相互作用，会诱发邻近混凝土结构（如楼板、基础）内部钢筋产生周期性机械振动。持续的振动荷载易引发混凝土结构的累积性微损伤和疲劳，长期运行下潜在地削弱建筑基础及厂房的结构完整性与服役寿命。

电磁兼容性（EMC）干扰：电抗器的强漏磁场是显著的电磁干扰（EMI）源，对邻近的弱电系统构成严重威胁，可能导致通讯信号失真、监控数据异常或误报警，甚至造成计算机监控系统功能紊乱或瘫痪。需投入额外成本进行电磁屏蔽/隔离。

持续性运行损耗：电抗器作为串联于主回路中的恒阻抗元件，其绕组电阻阻抗（R）和感抗（ X_L ）在承载负荷电流时均会产生 I^2R 或 I^2X 形式的电能损耗（主要为铜耗和铁耗）。这些持续性的有功和无功损耗累积可观，直接降低了整个供电系统的运行效率并增加运营成本。

1.1.2 电抗器运行能耗计算与经济性分析

为评估限流电抗器长期运行的经济性影响，本节对其年电能损耗及其对应的经济损失进行计算分析。计算对象为拟选用的某型号XKK-35-5000-20限流电抗器，依据工程经验及系统实际运行情况，设定如下关键计算条件：

负荷率（ β ）：取值为0.5，表示电抗器在计算期内承载的平均运行电流为其额定电流的50%。此设定基于对系统典型负荷水平的估算，反映了电抗器并非始终满载运行的实际工况。

年运行时间（T）：按每年4 000 h计。该值考虑了设备必要的停运检修时间；电价（元）：采用0.2元/kW·h。此电价参考当地或项目适用的工业用电价格。

基于上述型号参数和计算条件，对该电抗器的年电能损耗进行计算。计算的核心在于确定其在负载电流（2 500 A）下的有功损耗（直接转换为热能的损耗）和无功损耗（用于建立磁场的能量，虽

不直接消耗有功功率，但会增加系统容量需求，通常也需进行经济当量化)。表1 汇总了电抗器能耗计算的详细结果：

表1 常规电抗器（型号：XKK-35-5000-20）年运行能耗及经济损失计算表

Tab.1 Annual energy consumption and economic loss calculation table of reactor (Model : XKK-35-5000-20)

参数 / 项目	数据
电抗器参数	35kV / 5 000A / 20%
计算运行时间 / h · 年 ⁻¹	4 000
计算电价元 / kW · h	0.2
计算负荷率 / %	50
三相有功损耗 / kW	344
三相无功损耗 / kVar	909.3
年有效电能损耗 / kW · h	1 376 000
年无效电能损耗 / kVar · h	3 637 200
年总电能损耗费用 / 万元	100.3

经济损失计算说明：电抗器的有功损耗费用：年有功电能损耗为 $344 \text{ kW} \times 4\,000 \text{ h} = 1\,376\,000 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；其对应电费为 $1\,376\,000 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0.2 \text{ 元} / \text{kW} \cdot \text{h} = 275\,200 \text{ 元}$ （即27.52万元）。

无功损耗费用：虽然无功损耗本身不直接消耗有功电能，但其增大了电抗系统的视在功率和线路损耗，增加了电网的负担。工程上常通过“无功经济当量”或将其折算为等效的有功损耗进行经济评价。根据计算结果，该电抗器年无功损耗为 $909.3 \text{ kVar} \times 4\,000 \text{ h} = 3\,637\,200 \text{ kVar} \cdot \text{h}$ 。基于设定电价及对无功损耗的经济性折算（如按系统无功补偿成本或等效损耗系数折算），该部分年损耗费用折算为72.78万元。

年经济损失合计：上述2项费用（有功损耗电费 + 无功损耗折算费用）之和为27.52万元 + 72.78万元 = 100.3万元/年。

结论：根据以上计算，安装一台XKK-35-5000-20型限流电抗器，在设定条件下（50%负荷率，年运行4 000 h，电价0.2元/kW·h），其每年产生的直接和间接电能损耗费用合计约为100.3万元人民币。此部分运行成本在方案比较和技术经济分析中应予以充分考虑。

1.2 高阻抗变压器方案^[6]

为将系统35 kV侧短路电流限制在开关设备额定开断电流（31.5 kA）以内，经计算需将主变压

器高低压绕组间阻抗电压提升至40%。然而，如前述方案一样，高阻抗变压器在正常运行条件下存在显著弊端^[7-10]：

（1）成本与能效问题：相较常规阻抗变压器，其制造成本显著增加，且运行损耗明显提升，通常难以满足国家现行变压器能效标准（如GB 20052等）^[11]中规定的较高级别（如一级、二级能效）要求。

（2）电压降问题：该方案的高阻抗特性导致电压调整率增大，在额定负载时低压侧母线电压降幅显著。为确保低压侧供电设备能在额定电压下安全运行，必须通过主变高压侧过电压调压策略（在高压侧施加高于额定值的电压）进行补偿，增加了系统运行控制的复杂性。

2 创新解决方案

基于上述2种方案（串联电抗器、高阻抗变压器）的分析，常规限流电抗器在长期运行中存在显著的能效损失、电磁干扰、漏磁、压降、噪声及发热等问题，且均未能彻底解决系统短路电流超标问题。综合考量现场安装空间、施工周期、工程实施可行性、维护便利性及投资效益比等因素，本文提出了无损耗深度限流方案（SHK-ZLB）。

2.1 系统架构

合凯电气的SHK-ZLB-35-5000/50-20%型无损耗深度限流装置基本原理框图见图1。

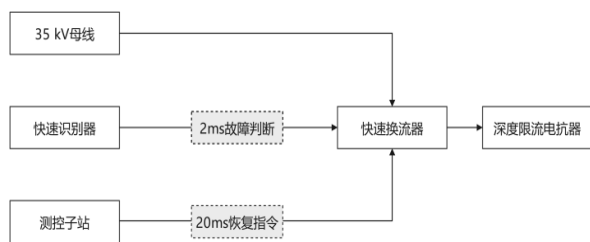


图1 优化后的一次系统（SHK-ZLB）原理框图

Fig. 1 Optimized primary system block diagram (SHK-ZLB)

2.2 方案原理

如图2所示在3台主变的低压侧（35 kV）加装3套SHK-ZLB无损耗深度限流装置，正常时快速换流器处于合闸状态将与之并联的深度限流电抗器短接，实现无损耗运行；短路时装置中的快速识别器可在2 ms内控制快速换流器分闸，将深度限流器串入到回路中实现深度限流，若故障切除线路恢复送电，则快速换流器自动合闸。

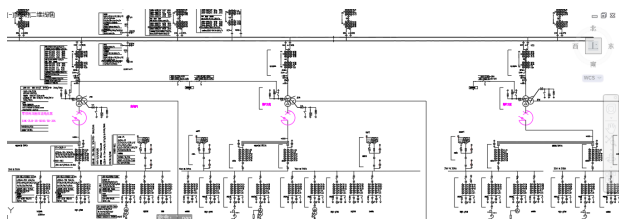


图2 一次主接线图

Fig. 2 Single-line Diagram of Primary Electrical Connection

装置组成：无损耗深度限流装置主要由快速换流器、深度限流器、高保真电流采集器、快速识别器及测控子站等构成（如图3所示）。

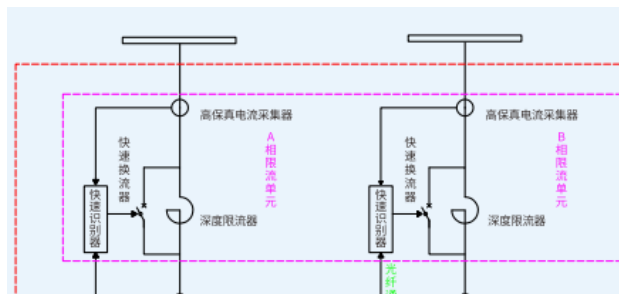


图3 SHK-ZLB装置一次原理接线图

Fig.3 The primary principle wiring diagram of SHK-ZLB device

本装置正常运行时，快速换流器将深度限流器短接，使整个装置处于低阻状态，对系统影响极小。

监控系统：本系统的快速识别器与主控室的测控子站通过光纤通信，测控子站与监控后台通过485通信传输数据，共同构成监控系统。

在故障限流过程中，各运行情况如下：

实时监测：本设计的高保真电流采集器持续监测系统电流，并将数据通过光纤/通信线传送至测控子站及监控后台。

快速识别与计算：当检测到电流超过设定值时，本设备的快速识别器利用高速DSP技术及专用算法，在极短的2 ms内精确计算出短路电流及其过零点时刻。

精准动作：在电流过零点之前，本方案的快速识别器发出动作信号，驱动快速换流器在过零点精确切断电路，确保燃弧时间最短。

限流执行：在7 ms~15 ms内，本无损耗深度限流装置将首开相短路电流引入深度限流电抗器，实现深度限流效果。

状态反馈：本装置动作后的开关状态信息通过

光纤/通信线传送给测控子站及监控后台。

故障后恢复：故障被切除后，本限流装置可自动恢复到无损耗的低阻状态运行，显著减少维护工作量并降低运维成本。

2.3 技术突破

设计实施的 SHK-ZLB 无损耗深度限流装置实现了多项技术突破：

突破1：并联开断技术首创应用。

本方案于华电风电新疆古尔班通古特沙漠基地项目首次实现涡流驱动机构大电流（额定/开断电流大）快速并联开断，攻克自均流时间短（ ≤ 2 ms）与低分闸分散性（ ≤ 0.5 ms）技术难题。

突破2：首台套户外高等级限流装置。

作为政府示范工程，本装置在国内风电光伏领域首次实现35 kV/5 000 A+户外应用。本装置可耐受恶劣环境，通过继电保护协同与智能投退策略，20 ms内完成短路电流转移，最大限度降低电网冲击。

突破3：毫秒级故障隔离与自恢复。

本设计首创“限流-非限流”模式智能切换：故障时10 ms投入电抗器；故障切除后，基于电流检测20 ms内合闸退出限流，系统恢复常态（全程 ≤ 30 ms）。

突破4：2 ms级故障特征精准预判。

本方案突破故障全周期快速诊断技术，在系统短路后2 ms内完成电流起始点、上升率、峰值及自然过零点等四维特征判断，为精准限流提供核心支撑。

SHK-ZLB无损耗深度限流装置的核心优势见表2：

表2 无损耗深度限流装置（SHK-ZLB）的核心优势

Tab. 2 Core advantages of lossless deep current limiting device (SHK-ZLB)

维度	本方案	传统方案
运行损耗	零损耗（0 kW/台）	≥ 344 kW/台（有功）+909.3 kW/台（无功）
电磁干扰	无电磁干扰，EMC全达标	干扰严重，影响系统稳定
维护成本	免维护（自愈功能）	定期检修（ ≥ 2 次/年）

3 工程应用验证

3.1 设备部署情况

部署位置：华电新疆风电项目在3台主变35kV侧部署了无损耗深度限流装置（SHK-

ZLB)，直接作用于变压器低压侧，有效抑制短路电流冲击，保障主设备安全，现场布置实景见图4。

设备型号：采用 SHK-ZLB-35-5000/50-20% 型双并快速开断装置，核心参数如下：

电压等级：35 kV；额定电流：5 000 A；开断能力：50 kA（毫秒级响应）；限流电抗率：20%；

本方案的设备采用紧凑模块化设计，与继保系统联动，支持远程监控与故障诊断。功能特点：本设备可实现毫秒级开断，基于电力电子技术实现故障电流快速截断（ ≤ 2 ms），且可实现显著降低短路电流热稳定与动稳定的要求。设备的双并联结构，其冗余设计保障装置的高可靠性，单支路故障时仍可维持限流功能。装置可实现自适应调控：实时监测系统电流，智能投切限流电抗，减少正常运行损耗。



图4 ZLB 装置实景现场

Fig.4 The real scene of ZLB device

3.2 功能特点与性能指标

本深度限流方案集成了先进的技术，实现了无损耗运行、快速可靠限流、智能运维与显著经济效益，具体特点与性能如下：

（1）无损耗运行与自动切换。

限流装置投入后，控制电源待储能电容充满电，快速换流器自动合闸。

正常工作状态下，电流仅流经阻抗接近零的快速换流器通路，限流电抗器无电流通过，实现无电能损耗、无压降、无漏磁场的运行。

在故障限流时，设备实测将短路故障电流由原 41.3 kA 有效限制至 28.2 kA，降幅达 31.7%，可显

著降低短路电流对电网及主变压器等关键设备的冲击损害风险。

（2）快速精准限流。

本设备的快速识别器实时监测工作电流，能在 2 ms 内迅速识别短路故障。在 10 ms 左右控制快速换流器分闸，投入深度限流电抗器。

利用涡流驱动机构快速开关（三相独立动作）及对触头刚分时间的精确控制，本方案可实现各相临界过零开断，燃弧时间极短，开断能力高达 80 kA，极大提升灭弧室可靠性与开断余量。

（3）智能恢复与自愈。

自动恢复：短路故障切除且工作电流恢复正常后，本方案的测控子站立即控制快速换流器合闸，使深度限流电抗器退出，装置自动恢复到无损耗运行状态。

故障自愈：本设计若任何一相快速换流器发生误分闸，快速识别器与测控子站将立即控制其合闸，防止系统因不平衡运行而出现故障，提升系统稳定性与可靠性。

（4）智能运维与信息管理。

通信互联：本设计支持 MODBUS-RTU 通信协议，可无缝接入厂站监控系统。

远程监测：通过配备专用手机 APP 及云端平台（如图 5 云为该平台的监控界面），用户可随时随地实时远程监控限流电抗器状态（如电流、温度）、开断事件记录及告警日志。

事件记忆：本装置的测控子站持续监视系统电流，短路事故发生时快速响应，同时自动记录短路时刻的各种关键电气参数，为故障分析提供详实数据。

通过云平台和数据中心，本装置的电气参数可推送至手机 APP，大幅提升企业电气人员对设备安全状态的掌控力与工作效率。

（5）经济效益。

降低设备选型成本：本方案可有效限制短路电流，降低了系统中断路器、开关柜等下游设备的遮断容量要求，减少项目初期投资。

节约运行能耗：得益于本设计的无损耗运行特性，以及限流后系统损耗降低，年均可减少电能损耗 501.32 万 kW·h。

（6）可靠性设计。

延长设备寿命：本设计大幅降低短路电流冲击，有效提高主变压器的抗短路能力和预期使用

寿命。

结构优化长寿命：本设计的涡流驱动机构相比传统弹簧机构，运动部件减少80%，采用简单直线运动，磨损极小，机械寿命显著提高。



图 5 云平台大数据中心界面
Fig.5 Cloud platform big data center interface

3.3 限流方案综合优势分析（经济性、环保性与应用效果）

为优选经济高效、节能环保的短路电流限制方案，项目在可研阶段经多轮技术论证与厂商调研，详细对比了限流电抗器、高阻抗变压器等常

规方案与合凯自主研制的无损耗深度限流装置（SHK-ZLB）的性能及运维成本。方案对比涵盖了投资成本、空间占用、运行能耗、环保安全、运维便捷性以及实际应用效果等关键维度（关键指标对比如表3所示）。

表 3 限流方案核心指标对比表			
Table 3 Comparison table of core indicators of current limiting scheme			
评估维度	无损耗深度限流方案 (SHK-ZLB)	限流电抗器方案	高阻抗变压器方案
投资成本	限流装置购置费	电抗器购置费 + 高额年能耗费用	变压器购置费 + 高额年能耗费用
现场空间	小	较大	适中
运行能耗	无电能损耗（正常工况电流流经零阻抗换流器）	有且很大（长期串联运行）	有且很大（高阻抗设计致额外铜损 / 铁损）
环保安全	无漏磁场 / 电压降（仅短路时投入）	存在漏磁干扰风险	漏磁与温升问题显著
故障后处理	自动恢复，无需人工干预	无需处理	无需处理
运维成本	无额外成本	无成本	无成本

无损耗深度限流（SHK-ZLB）方案的核心优势表现在：首先，其经济效益显著：显著降低短路电流（限制至31.5 kA以下），从而减小对主变压器的冲击、提高其抗短路能力和寿命；本设计提升

馈线开关开断可靠性及寿命；因其减小馈出电缆及母线截面积，本设备可大幅降低项目整体投资。特别是，该设备运行零能耗，较之传统方案，年减少电能损耗高达501.32万 kW · h/套。按当地工业电价0.2元 /kW · h计算，年节约电费100.3万元 /套，投资回报率高。其次，其具有很好的空间与环保优势：本装置体积紧凑，较电抗器方案节省50%空间，完美适配厂站紧凑布局需求。本设备运行零损耗、零压降、无漏磁场，彻底规避了传统方案带来的电磁污染与温升等问题，绿色环保。其三，在设备的运维方面表现出出色的便捷性：故障后自动恢复，无需人工复位。本设备的全生命周期免维护设计（涡动机构磨损减少80%），长期运维成本为零。其四，本设备具备先进的智能化功能：支持标准 MODBUS 规约通信。可选配手机 APP，提供实时运行数据、历史故障记录、故障录波及故障信号报警功能。本设计具有微信推送功能，可向授权用户发送故障告警信息。依托合凯云平台及物联网大数据技术，本设计可实现实时监测用户系统的电气运行状态（如图6）。

总之，无损耗深度限流方案（SHK-ZLB）凭借其低初始投资、零运行能耗、最小空间占用、卓越的环保安全性、极简的运维以及先进的智能监测等功能，在抑制短路电流、保障设备安全、降低综合成本、推动绿色电网建设等方面展现出全面优势，是该领域技术经济最优解。



图 6 现场测控子站的照片
Fig. 6 Photos of field measurement and control sub-station

4 结语

无损耗深度限流装置成功解决了新能源行业面临的变压器容量大导致的短路电流超标（如成功应对 41 kA 超标案例）和开关遮断容量不足（开断裕度提升 30%）的核心难题。该方案通过“双并毫秒级开断技术”实现了新能源大电流场景的可靠保护，显著提升了变压器的抗短路能力，并有效避免了系统的敏感性负荷因短路或电压暂降导致的大面积停机、停运和停产事故。

相较传统电抗器或高阻抗变压器方案，本装置彻底消除了由其带来的高能耗、电压损失、电磁干扰、发热、噪声等一系列问题（消除 99% 电磁污染与结构振动风险），并实现了全生命周期成本大幅降低 42%，显著优化了设备投资与运维效率。

此优化解决方案不仅具有很高的投资回报率，更为新能源大容量电站提供了“零碳限流”关键技术路径。其作为无源限流装置，能够有效支持清洁能源高比例接入电网，在解决短路电流超标、保障系统安全稳定（提升安全性与环境兼容性）的同时，较好地契合能源企业“双碳”目标和节能低碳要求，为电力系统短路超标问题提供了独特思路，具有极高的参考价值和推广价值，有力推动电网低碳转型。

参考文献

- [1] 殷可,高凯.应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析[J].华东电力,2004,32(9):7-10.
YIN Ke,GAO Kai.Analysis of Using Series Reactor to Limit 500 kV Short-Circuit Current[J].East China Electric Power,2004,32(9):7-10.
- [2] 宋洋.500 kV 线路串联电抗器的应用研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [3] 张亚杰,刘洪文,周连发.高阻抗变压器中内置式串联电抗器的仿真研究[J].变压器,2014,51(12):19-22.
ZHANG Yajie,LIU Hongwen,ZHOU Lianfa.Simulation Study on Built-in Series Reactor in High Impedance Transformer[J].Transformer,2014,51(12):19-22.
- [4] 孙秋霞,韩强.高阻抗变压器串联电抗器的接线方式浅析[J].变压器,2015,52(9):66-67.
SUN Qiuxia,HAN Qiang.Analysis on Connection Mode of Series Reactor of High Impedance Transformer[J].Transformer,2015,52(9):66-67.
- [5] 曹文斌.高速限流保护开关的原理分析及应用探讨[J].电气传动自动化,2009,31(5):57-60.

- CAO Wenbin.Principle Analysis and Application Discussion about High-Speed Current Limiting Protection Switch[J].Electric Drive Automation,2009,31(5):57-60.
- [6] 侯义明,黄英晓,张亚杰,等.高阻抗变压器的附加损耗分析及仿真应用[J].变压器,2013,50(6):1-4.
HOU Yiming,HUANG Yingxiao,ZHANG Yajie,et al. Analysis and Simulation of Auxiliary Loss of High Impedance Transformer[J].Transformer,2013,50(6):1-4.
 - [7] 蒋平,茅嘉毅,胡伟.考虑暂态稳定约束的串联电抗器优化配置[J].电力自动化设备,2011,31(11):38-42,55.
JIANG Ping,MAO Jiayi,HU Wei.Optimal Allocation of Series Reactors with Transient Stability Constraint[J].Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):38-42,55.
 - [8] 陈丽莉.大电网限流措施的优化配置研究[D].杭州:浙江大学,2011.
 - [9] 洪健山,关永刚,徐国政.大电网中故障限流器安装位置的选择及参数计算[J].高压电器,2010,46(11):62-66.
HONG Jianshan,GUAN Yonggang,XU Guozheng.FCL Location Selection and Limiting Reactance Calculation in Large Scale Power Grid[J].High Voltage Apparatus,2010,46(11):62-66.
 - [10] 宋晓博.短路电流限制措施的选择和限制器的优化配置[D].杭州:浙江大学,2013.
 - [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.电力变压器能效限定值及能效等级 GB 20052—2024[S/OL].<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?heno=B0CE4A3FBCC4501211A25E3E10F75498>.
State Administration of Market Supervision and Administration, National Standardization Management Committee.Minimum Allowable Values of Energy Efficiency and the Energy Efficiency Grades for Power Transformershttps GB 20052—2024[S/OL].<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?heno=B0CE4A3FBCC4501211A25E3E10F75498>.

收稿日期:2025 年 2 月 25 日

作者简介:

邵久柠(1987),男,工程师,研究方向为电力工程施工,电气设备自动化技术,shaojiuning@126.com



邵久柠



刘海

刘海(1973),男,研究方向为电力工程建设及与之相关的新技术、新工艺、新材料研发及其运用,108865297@qq.com



宋延良

宋延良(1991),男,工程师,研究方向为工程建设管理,289641728@1qq.com



童雪燕

童雪燕1976(),女,高级机电工程师、高级电气工程师、BIM高级工程师、装配式高级工程师、二级机电建造师。企业研究生导师。深耕中压配电网故障防控及电能质量治理领域,在短路电流超标治理、电压暂降治理等复杂技术难题上具备深厚的理论分析与系统优化能力。13866778709@126.com



杨新州

杨新州(1974),男,硕士,工程师,工程师,研究方向为过电压过电流保护、快速识别与判断测控技术以及快速开关、连续稳定供电和项目管理。