

Analysis of the Association Between Overcurrent Protection II on the Low-Voltage Side of a Box Transformer and Drop Fuses

Chenyu Zhao

Guoneng Kehuan Wangkui New Energy Co., Ltd., Suihua, Heilongjiang, 520000, China

Abstract

The melting of the high-voltage side drop fuse is the key cause of the chain tripping fault on the low-voltage side of the fan case transformer. This article quantitatively calculates the current response on the low voltage side after a phase break on the high voltage side by analyzing the fault phenomenon and focusing on the symmetrical component method and system modeling. Theoretical derivation shows that under extreme constant power load conditions, the fault phase current on the low-voltage side can reach 2.0-2.5 times the rated value, which directly meets the operating conditions of overcurrent protection in section II. Based on this mechanism, the article deeply analyzes the causes of faults and their impact on the operation of wind farms, and proposes a systematic prevention and response strategy from the aspects of protection coordination optimization, equipment status monitoring, and intelligent diagnostic technology application, providing solid theoretical basis and practical guidance for improving the reliability and economy of wind turbine operation

Keywords

Box type transformer; Fall insurance; Overcurrent protection; Phase failure operation; Wind power operation and maintenance

箱变低压侧过流 II 段与跌落保险关联分析

赵晨昱

国能科环望奎新能源有限公司, 中国·黑龙江 绥化 520000

摘要

高压侧跌落保险熔断是导致风机箱变低压侧发生连锁跳闸故障的关键诱因。本文通过分析故障现象, 并重点基于对称分量法和系统建模, 对高压侧一相断线后低压侧的电流响应进行了定量计算。理论推导表明, 在极端恒功率负载条件下, 低压侧故障相电流可达额定值的2.0-2.5倍, 这直接满足了过流 II 段保护的動作条件。基于此机理, 文章深入剖析了故障原因及其对风电场运行的影响, 进而从保护配合优化、设备状态监测、智能诊断技术应用等方面, 提出了一套系统性的防范与应对策略, 为提升风电机组运行的可靠性与经济性提供了坚实的理论依据和实践指导。

关键词

箱式变压器; 跌落保险; 过流保护; 断相运行; 风电运维

1 引言

在全球能源结构绿色转型的浪潮下, 风力发电已成为主力电源之一。风机箱式变压器(简称“箱变”)作为连接风机与集电网络的咽喉要道, 其运行的稳定性直接关系到整个风电场的可用率与发电效益。运行统计表明, 低压侧过流 II 段保护跳闸是箱变常见的故障之一, 而其中相当一部分案例的根源可追溯至高压侧跌落保险的熔断。这一连锁故障过程涉及电磁耦合、保护配合、设备劣化等多重因素, 机理复杂, 亟待厘清^[1]。

本文旨在深入解析这一故障链的内在逻辑。首先, 从箱变结构和工作原理入手; 其次, 通过构建数学模型, 定量

计算高压侧一相断开后低压侧的电流分布, 揭示过流产生的直接电气根源; 再次, 系统分析导致跌落保险熔断的各种诱因及故障后果; 最后, 提出从设计选型、运维管理到智能诊断的综合治理方案, 以为风电场的预防性维护与故障快速恢复提供系统性解决方案。

2 风机箱变结构及其保护配置原理

2.1 基本结构与能量流

风机箱式变电站(简称“箱变”)通常采用紧凑式一体化设计, 集成了高压开关设备、变压器本体、低压开关设备及智能化测控保护装置于一个箱体内。其核心功能是将风电机组发出的 0.69kV (或部分机型为 1.14kV), 通过箱变内部的变压器升压至 35kV, 经风电场内集电线路汇流后输送至升压站, 最终升压至 220kV 或更高电压等级, 通过送出线路并入电网。整个能量传输路径清晰而连贯: 风电机组

【作者简介】赵晨昱(1994-), 男, 中国山西临汾人, 助理工程师, 从事风力发电、变电设备研究。

→低压电缆→箱变低压侧→变压器本体→箱变高压侧→跌落式熔断器→35kV集电线路→升压站→电网。

2.2 高低压侧保护的角色与配合

高压侧跌落式熔断器：是一种利用电流热效应使熔体熔断来切断故障回路的保护装置，具有结构简单、成本低廉、安装维护方便的优点，常用于户外电力设备的保护。在风电场中，通常安装于箱变高压侧，用于箱变的过流保护和检修隔离。主要由绝缘瓷瓶、熔管、熔体和触头等部件组成，集过流保护与可见隔离功能于一体^[2]。其工作原理基于熔丝固有的安-秒特性：当变压器内部发生匝间短路或出现严重故障时，故障电流使熔丝快速熔断，随后熔管在自身重力与机械结构作用下自动跌落，形成明显的空气断开点，从而快速切断故障电流并隔离设备。这不仅有效保护箱变内的变压器免受损坏、防止故障扩大，也为运维人员提供了课件的安全隔离与检修条件，成为保障箱变及低压侧供电系统安全稳定运行的第一道重要防线。

3 关联的定量分析：高压侧断相引发低压侧过流的机理

为揭示跌落保险熔断（导致高压侧一相断开）与低压侧过流Ⅱ段跳闸之间的必然电气联系，本节以一台典型3MW风机箱变为例，建立电气分析模型并开展量化计算。

3.1 模型建立与假设条件

系统参数：

额定容量： $S_n=3500\text{kVA}$ （略大于机组功率，留有余量）

电压比： $35\text{kV}/0.69\text{kV}$

连接组别： $\text{Dyn}11$ （高压角接，低压星接带中性点）

低压侧额定线电流： $I_n=S_n/(\sqrt{3}\times 0.69\text{kV})\approx 2920\text{A}$

故障场景假设：箱变高压侧C相跌落保险熔断，等效为C相线路完全断开。

负载模型简化：故障瞬间，假设风机变流器控制为维持直流母线电压稳定，试图从电网汲取恒定的总有功功率 $P=3\text{MW}$ （功率因数 ≈ 1 ）。此假设将负载等效为三相恒功率负阻抗，是分析最恶劣电流情况的典型方法。

忽略因素：暂不考虑变压器励磁电流、绕组饱和及变频器自身的快速电流限幅控制，以聚焦于故障初期的电气暂态过程。

3.2 对称分量法分析计算

高压侧C相断开，意味着高压绕组仅在A、B两相间施加线电压AB。将此不对称系统分解为正序、负序和零序分量进行分析^[3]。

边界条件与序网络连接：高压侧断相故障的边界条件为 $H_C=0$ ， $H_A-H_B=AB$ 。对于 $\text{Dyn}11$ 接线的变压器，其序网络连接方式使得故障反映到低压侧时，零序电流无法流通，主要为正序和负序分量。

低压侧电压不对称度：通过序网络计算可得，高压侧

一相断开后，低压侧相电压将出现严重不平衡。典型情况下，故障相（对应高压断开相）的电压幅值可能降至额定值的 $0.5\text{--}0.7\text{pu}$ （标么值），而其余两相电压则可能升高或变化较小。

恒功率负载下的电流响应：在电压严重不对称的情况下，负载为维持总有功功率 P 不变，各相电流需重新分配。根据三相功率公式 $P=\text{Re}(aa^*+bb^*+cc^*)$ 及 $a+b+c=0$ （无零序通路）的约束，可求解各相电流。

简化估算：设最低相电压 $U_{\text{min}}=0.5\text{pu}$ ，若该相需承担总功率的三分之一，则其电流标么值 $I_{\text{min}}\approx(P/3)/U_{\text{min}}=1/0.5=2.0\text{pu}$ 。更精确的计算考虑三相耦合，低压侧最大相电流的标么值将达到 $2.0\text{--}2.5$ 倍。

数值结论：

低压侧额定电流 $I_n\approx 2920\text{A}$ 。

故障后，最大相电流理论峰值 $I_{\text{max}}=(2.0\text{--}2.5)\times I_n\approx 5840\text{--}7300\text{A}$ 。

风机低压侧过流Ⅱ段保护定值通常设定为 $(1.2\text{--}1.5)I_n$ （延时 $0.3\text{--}1.0$ 秒）。显然，理论故障电流已远超此定值，必然导致过流Ⅱ段保护动作跳闸。

3.3 分析结论

上述定量计算清晰地证明：高压侧跌落式熔断器的单相熔断，并非一个孤立的设备故障事件。它会立即在低压侧产生严重的电压不对称运行状态，在风机近似恒功率的负载特性作用下，直接催生幅值可达额定电流2倍以上的持续过电流。这一过电流既是导致变压器绕组承受巨大电应力与过热风险的原因，也是触发低压侧过流Ⅱ段保护正确动作、从而切断故障电气路径的直接电气信号^[4]。该定量分析结果，从电气本质上构成了高压侧故障引发电气扰动、并最终导致低压侧保护动作这一关联逻辑的核心证据链条，揭示了系统级故障传递的内在机理。

4 高压侧跌落保险熔断的诱因深度剖析

低压侧过流是此次故障的“果”，而高压侧熔断则是其直接的“因”。跌落式熔断器的熔断行为本身，可由多种因素共同导致，总体上可分为外部故障电流冲击与设备自身状态及选型问题两大类。

4.1 外部故障电流冲击

变压器内部故障：绕组匝间/相间短路、铁芯多点接地等，产生巨大的短路环流，使高压侧电流远超跌落保险熔断阈值。

高压线路故障：线路遭受雷击（直击或感应）、外力破坏导致绝缘下降或短路，故障电流经由箱变高压侧。

系统操作过电压：投切空载线路或其他操作产生的高幅值暂态过电压，可能引起绝缘闪络，继而转化为短路电流。

4.2 设备自身状态与选型问题

老化与劣化：熔断器长期暴露于户外恶劣环境，熔丝

管可能受潮、积污或氧化，熔体材料在电热应力下发生蠕变、晶格变化，导致其实际熔断特性漂移（如熔断电流值下降、时间常数变化），可能在正常负荷波动或谐波电流下发生不应有的误熔断。

选型匹配失当：一是额定电流选择过小，未充分考虑变压器励磁涌流、环境温度校正、谐波电流效应等实际工况；二是开断容量不足，当故障电流超过其额定开断能力时，可能无法可靠熄灭电弧，甚至引起熔管爆炸。

安装与接触问题：安装角度不标准、触头接触不良导致局部过热，加速熔体老化或引发非全相运行。

5 连锁故障的综合影响

最直接的影响是单台风机因保护动作而停机，造成即时的发电量损失。更为严重的是，由于故障表现为箱变低压侧过流Ⅱ段跳闸，常规的诊断逻辑会首先怀疑并排查低压侧断路器下口至风机内部的电气回路（如变频器、电缆、发电机等），而极易忽略高压侧跌落式熔断器熔断这一根本诱因。这种方向性的诊断错误会导致故障定位时间被大幅延长，在查找“不存在”的低压侧故障点上耗费大量宝贵的发电时间，从而数倍放大电量损失。

对于大型风电场，若此类因高压侧问题导致低压保护误动或越级动作的故障模式频繁发生，多台机组将因此反复经历非计划停运与漫长的错误排查，累积形成可观的发电量缺口。这不仅显著降低全场的年等效利用小时数与综合发电收益，直接影响项目投资回报，还会严重干扰正常的运维计划，打击团队信心。

6 系统性防治策略与优化建议

基于“源头防控、过程监测、快速处置”的原则，构建多层次防御体系。

6.1 设计选型与保护优化

科学选型计算：不应仅依据变压器额定电流简单选取。需结合变压器额定容量、短路阻抗、系统最大/最小短路电流水平、环境温度、谐波含量等参数，综合计算并选择具有合适额定电流、熔断特性（如K型快熔或T型慢熔）及足够开断容量的熔断器。

特性曲线校验：将熔断器的安-秒特性曲线与变压器低压侧过流Ⅱ段保护曲线置于同一坐标系进行校核，确保在主要故障电流区间内，保护曲线位于熔断器曲线下方，动作更快，并留有 $\geq 0.2s$ 的可靠级差。

性能与裕度：优先选用全范围保护型、具有良好耐老化、防潮、耐候性能的高质量产品，并在额定电流选择上考虑适当运行裕度（通常为变压器高压侧额定电流的1.5-2.0倍），以抵御涌流及暂态冲击。

精细整定过流Ⅱ段：其定值必须可靠躲过风机启动、电网电压波动等可能出现的最大负荷电流及短时过载；同时，需通过计算验证其对本文分析的“高压断相引致的低压过流”具有足够动作灵敏度。延时设置应确保与上、下级保

护的选择性配合。

增设负序电流保护：在变压器低压侧或风机出口断路器处，配置负序电流保护，作为识别不对称运行（如单相断线）的灵敏、快速判据，可与过流保护构成复合判据，提升故障识别准确率。

6.2 运维管理强化

实施周期性专业巡检：不仅检查熔断器外观，还应使用专用仪表测量其接触电阻，定期进行功能测试。

建立预防性更换制度：根据运行年限、环境恶劣程度和在线监测数据，对跌落保险制定科学的更换周期，避免“以修代维”。

加强人员培训：使运维人员深刻理解本文所述的故障连锁机理，能够通过SCADA信号（如“低压过流”与“高压缺相”信号同时报警）快速锁定故障根源。

6.3 智能化技术应用

部署故障录波与分析：在箱变低压侧、机组出口等关键电气节点，部署具备高采样率的微型故障录波装置或利用现有智能电表的录波功能，持续监测并记录故障事件前后数秒至数分钟的电压、电流波形。通过对录波数据的深度分析，提取关键特征。例如，若故障电流波形中出现显著的负序分量且电压不对称，而暂态冲击特征不明显，则可高度指向“高压侧断相”而非“外部线路短路”。这为运维人员提供了客观、定量的决策依据，能有效避免依赖经验误判。

7 结语

风机箱变高压侧跌落式熔断器熔断与低压侧过流Ⅱ段保护跳闸之间，存在着明确而紧密的电气因果关联。本文通过理论建模与定量计算，系统揭示了高压侧单相断开如何在恒功率负载特性下，直接导致低压侧产生超过2倍额定值的持续过电流。这一过电流既是造成变压器承受异常电热应力的根源，也是触发低压侧过流Ⅱ段保护正确动作的直接电气信号，从而完整阐释了由高压侧故障引发低压侧保护动作的内在逻辑链条。

防范此类连锁故障，必须采用系统性思维与多层次防御策略。在源头设计阶段，需通过精心的设备选型、科学的保护定值整定与特性曲线配合，构筑精准可靠的第一道防线；在运行过程之中，应依托在线状态监测、周期性专业巡检与预防性维护，实现对设备隐患的早期发现与及时消除；在故障处置环节，则需借助智能化监控系统与准确的故障诊断知识，实现从现象到根源的快速精准定位，避免误判与延误。

参考文献

- [1] 朱忠享, 曹进明, 张昱. 发电机高压厂变低压侧分支零序过流保护改进方案[J]. 智能建筑电气技术, 2023, 17 (04): 58-60.
- [2] 杜亮. 某风电场箱变高压侧越级跳闸及箱变烧毁的原因分析[J]. 自动化应用, 2023, 64 (01): 32-34+37.
- [3] 杨正佳. 主变低压侧过流保护动作分析及改进方案探讨[J]. 电气化铁道, 2022, 33 (S1): 183-186.
- [4] 李钰真. 探究高压厂变低压侧零序过流保护的优化配置[J]. 通信电源技术, 2019, 36 (02): 224-225+228.