

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.04.070

胡元海, 陈松, 杨利华, 等. 基于故障录波的风力发电用箱变的故障诊断与分析 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (04): 321-324.

基于故障录波的风力发电用箱变的故障诊断与分析

胡元海¹, 陈松², 杨利华², 袁乐心²

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041; 2. 明珠电气股份有限公司, 广州 511400)

摘要: 并网风力发电系统中, 箱变是将风力发电机组连接到风电场电力网的主要设备, 网络复杂, 潜伏着各类电力故障隐患, 分析困难。某风力发电用箱变高压熔断器熔断后经更换, 再次投运时又发生故障。针对此故障进行了解剖和故障分析, 利用故障录波准确捕捉故障时刻的电量变化, 结合元器件动作特性, 判断故障来源, 指出了外部短路是变压器故障的直接原因, 并提出了相应的改进措施。研究结果为完善箱变的短路保护和二次投运程序提供了参考, 对预防风力发电用箱变运行事故有一定借鉴意义。

关键词: 风力发电用箱变; 短路; 累积效应; 绕组变形; 故障录波

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492 (2024) 04-0321-04

Fault Diagnosis and Analysis of Box Transformer for Wind Turbine Based on Fault Recording

Hu Yuanhai¹, Chen Song², Yang Lihua², Yuan Lexin²

(1. Guodian Dadu River Drainage Area Hydroelectricity Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Pearl Electric Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: In grid connected wind power systems, box transformers are the main equipment that connects wind turbines to the wind farm grid. The network is complex and contains various hidden risks of power failures, making analysis difficult. A box transformer for wind turbine fails again when the high voltage fuse is replaced after fuse failure. The transformer case is dissected and analyzed. Using fault recording to accurately capture the changes in electrical quantity at the time of the fault, combined with the operational characteristics of the components, to determine the source of the fault. It is pointed out that external short circuit is the direct cause of the fault of the transformer, and the corresponding improvement measures are put forward. The research results can provide reference for improving the short-circuit protection and secondary operation procedures of box transformer, and have certain reference significance for preventing operational accidents of box transformer or wind turbine.

Key words: box transformer for wind turbine; short circuit; cumulative effect; winding deformation; fault recording

0 引言

并网风力发电系统是指风力发电机组与电网相连, 向电网输送有功功率, 同时吸收或者发出无功功率的风力发电系统, 并网型的风力发电系统规模较大, 风电场装机容量大约为数十兆瓦到数百兆瓦, 由几十台甚至成百上千台风力发电机组构成。并网运行的风力发电场可以得到大电网的补偿和支撑, 更加充分地利用风力资源, 是国内外风力发电的主要发展方向^[1-2]。

并网风力发电系统主要是由发电机组、机侧变流器、网侧变流器、并网变压器、并网开关等组成。风能通过风力发电机转化为幅值和频率变化的交流电, 变换的交流电通过整流器变换为直流电。再通过并网型逆变器将直流电转化为与电网同频率、同相位的正弦波电流, 馈入电网。风力发电用箱变将风力发电机组连接到风电场电力汇集网络, 其内有一台升压变压器, 是实现风电电能向用户输送功能的重要设备。通常风力发电机-箱变

组合采用“一机一变”的接线方式, 箱变从 0.69 kV 升压至 35 kV 后通过电缆“T”接至架空线终端塔, 再通过集电线路架空线接入主变电站^[3-5]。由于网络复杂, 潜伏着各类电力故障隐患, 其中短路风险尤为严重, 威胁其安全运行^[6-10]。风电场升压站一般配备综合监控系统, 采集的集电线路信号主要包括各相电压、电流、零序电压和电流等, 并通过设定启动条件提供对应的故障录波功能。本文对一起风力发电用箱变的二次投运故障进行故障录波分析, 找出造成事故的主要原因, 并提出了改进建议。

1 一起箱变短路损坏案例

某风电场一条集电线路路上共接入 8 台风力发电用箱变, 故障录波显示 03:47 左右, 该集电线路电流突变量启动。经现场运维人员巡检发现, 5#箱变 YBP-40.5/0.69-2200 (其内变压器型号: S11-2200/37/0.69, Dyn11, $U_k = 6.5\%$) 配套的高压熔断器 B、C 两相熔断,

低压断路器跳闸。运维人员更换熔断器、测量高低压侧绝缘电阻合格后,再次对箱变送电时,随后高压 B 相熔断器熔断、负荷开关跳闸,压力释放阀喷油。随后设备检修人员到现场检验变压器油样发现变压器油发黑,安排箱变送厂维修。值得注意的是,故障过程中位于塔筒内的风机侧断路器也跳闸,后续排查发现 5# 风机内母线槽烧毁。

2 产品故障后的检查情况

2.1 直流电阻测量

首先对箱变进行直流电阻测量,高压侧绕组直流电阻异常,低压侧绕组直流电阻无异常,如表 1 所示。电压比无法测量,初步分析认为高压线圈内发生断线。

表 1 绕组直流电阻测量

绕组	电阻值/ Ω				不平衡率/%
	R_{AB}	R_{BC}	R_{CA}	平均值	
高压 线电阻	9.576	19.062	9.567	12.735	74.56
低压 相电阻	R_{a0}	R_{b0}	R_{c0}		
	0.001 001	0.000 996	0.000 995	0.000 997	0.63

注:环境温度 18.2℃,相对湿度 69%。

2.2 外观及元器件检查

箱变外观有污渍;熔断器 B 相撞针弹出,用万用表测量 A、C 相熔断器未熔断;箱变内其他元器件未见损坏。

2.3 器身吊芯检查

器身吊芯后发现,变压器油呈黑色;B 相高压线圈上下两段之间变形,导线外露断线,端绝缘移位,并有大量碳化物附着;铁心上铁轭移位,与心柱之间有明显离缝,如图 1 所示。

2.4 线圈拆解

解剖发现 B 相线圈主油道发生严重变形,出现较大不均匀缝隙;高压线圈最外层的导线断线,层间绝缘烧穿;接着退线至倒数第 3 层(第 3 个油道处)每一层均发现线匝移位,层间绝缘受挤压破损且有局部烧黑现象,导线被挤压堆在一起,线匝扭曲移位,越靠近最外层,受损越严重,累计有 3 处断线,如图 2 所示。

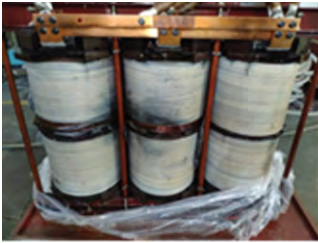


图 1 B 相高压线圈变形、断线



图 2 导线被挤压变形

3 故障分析

3.1 低压断路器保护整定分析

低压断路器控制器为 PTU2.1,系智能型电子脱扣

器,无液晶或数码管显示,面板显示的整定值如图 3 所示。断路器型号:HNW3-20H1 PTU2.1。现场整定值与出厂整定值对比如表 2 所示。

表 2 现场整定值与出厂整定值对比

保护特性	现场整定值	出厂整定值	备注
过载长延时保护	$I_r = 1.0 I_n = 2\,000\text{ A}$, $t_r = 240\text{ s}$	$I_r = 1.0 I_n = 2\,000\text{ A}$, $t_r = 15\text{ s}$	现场整定的短延时保护和瞬时保护值大于出厂设置值,灵敏度低于出厂值。
短路短延时保护	$I_{sd} = 5 I_n = 10\,000\text{ A}$, $t_{sd} = 0.1\text{ s}$	$I_{sd} = 3 I_n = 6\,000\text{ A}$, $t_{sd} = 0.1\text{ s}$	
短路瞬时保护	$I_i = 10 I_n = 20\,000\text{ A}$	$I_i = 5 I_n = 10\,000\text{ A}$	
接地保护	$I_g = 0.5 I_n = 1\,000\text{ A}$, $t = 0.2\text{ s}$	$I_g = 0.8 I_n = 1\,600\text{ A}$, $t = 0.8\text{ s}$	

该型号的断路器无法记录短路瞬时跳闸电流峰值,但从低压断路器现场值整定来看,短路瞬时保护值为 20 000 A。从图 4 可看出,低压断路器瞬时保护动作,可以判断短路电流不低于该值。



图 3 低压断路器整定情况



图 4 低压断路器跳闸指示

3.2 变压器短路耐受电流计算

变压器两相短路时,短路电流一般计算公式如下:

$$I_{d2} = \sqrt{3} U_1 / 2 Z_d \tag{1}$$

式中: I_{d2} 为两相短路时短路电流,A; U_1 为一次相电压,V; Z_d 为折算到一次侧的短路阻抗, Ω 。

式(1)可转化为式(2),如下:

$$I_{d2} = I_n / 2 U_k \tag{2}$$

式中: I_n 为一次侧额定线电流,A; U_k 为变压器短路阻抗,%。

此台变压器实际阻抗为 6.51%,高压侧线电流为 34.3 A,可按式(2)计算两相短路时变压器设计高压侧最大耐受短路电流为:

$$I_{d2} = 34.3 \div (2 \times 6.51\%) = 263.4\text{ A}$$

实际高压侧最大短路电流 4 387 A,为正常值 263.4 A 的 10 多倍,远超变压器的设计短路承受能力。

3.3 风电场故障录波分析

故障当天 03:47:48.762,37 通道变量启动,A/B 相电压明显波动(图 5)。该 35 kV 集电线路 I_A/I_B 电流突变(图 6),故障电流范围是 0.946~7.311 A(二次值),持续时间约从 16~50 ms。高压侧 CT 变比 600/1,可知故

障电流范围是 568~4 387 A^[11-12], 是由较低的短路电流持续发展成严重短路的过程, 最大短路电流 4 387 A。该集电线路所带风机共计 8 台箱变, 除故障箱变外, 其余均正常工作, 按其余箱变满载运行计算, 分流电流不大于 240.1 A (34.3×7), 因此仍有绝大部分的短路电流作用于 5#故障箱变上, 远大于变压器低压侧外部发生最大短路时穿越到高压侧的短路电流 263.4 A, 这说明由低压短路发展到高压侧也发生了短路。

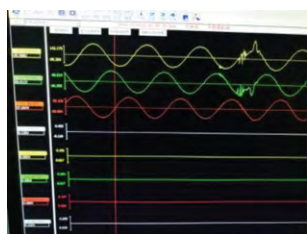


图 5 A/B 相电压波动

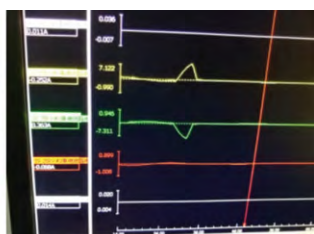


图 6 I_A/I_B 电流突变

受变压器阻抗的影响, 单纯的低压侧短路故障无法产生 263.4 A 以上的故障电流。如图 6 所示, 在并网型集电线路路上出现如此大的故障电流, 因此可以推断, 最终故障已发展到高压线圈内部, 且该故障电流由集电线路提供, 能量来自风电场的其他发电机组和 110 kV 主变。

3.4 风机侧监控设备的故障记录分析

如图 7 所示, 风机侧主断路器于 02:41 断开, 故障提示有电网电压欠频、机侧模块硬件过流等现象 (经风机制造商与现场运维班组确认, 风机监控设备时钟滞后主控后台监控时钟约 64 min, 即故障记录时间与后台故障录波显示时间为同一时间段)。

序号	事件序号	时间	事件ID	数据ID	事件类型	事件描述	备注
46	20616	2018-12-28 02:41:40.907	42	(000.000)	故障事件	主断路器跳闸	
47	20609	2018-12-28 02:41:40.956	44	(000.000)	故障事件	故障事件	
48	20608	2018-12-28 02:41:40.955	27	(000.000)	故障事件	机侧模块硬件过流	
49	20607	2018-12-28 02:41:40.955	23	(000.000)	故障事件	机侧模块硬件过流	
50	20606	2018-12-28 02:41:40.953	244	(000.000)	故障事件	故障事件	
51	20605	2018-12-28 02:41:40.951	47	(000.000)	故障事件	故障事件	
52	20604	2018-12-28 02:41:40.949	2	(000.000)	故障事件	故障事件	
53	20603	2018-12-28 02:41:40.944	47	(000.000)	故障事件	故障事件	
54	20602	2018-12-28 02:41:40.942	531	(000.000)	故障事件	故障事件	
55	20601	2018-12-28 02:41:40.940	1037	(000.000)	故障事件	故障事件	
56	20600	2018-12-28 02:41:40.940	1036	(000.000)	故障事件	故障事件	
57	20599	2018-12-28 02:41:40.937	47	(000.000)	故障事件	故障事件	
58	20598	2018-12-28 02:41:40.933	46	(000.000)	故障事件	故障事件	
59	20597	2018-12-28 02:41:40.932	43	(000.000)	故障事件	故障事件	
60	20596	2018-12-28 02:41:40.931	539	(000.000)	故障事件	故障事件	
61	20595	2018-12-28 02:41:40.931	539	(000.000)	故障事件	故障事件	
62	20594	2018-12-28 02:41:40.931	45	(000.000)	故障事件	故障事件	
63	20593	2018-12-28 02:41:40.931	34	(000.000)	故障事件	故障事件	
64	20592	2018-12-28 02:41:40.931	537	(000.000)	故障事件	故障事件	
65	20591	2018-12-28 02:41:40.931	47	(000.000)	故障事件	故障事件	
66	20590	2018-12-28 02:41:40.931	536	(000.000)	故障事件	故障事件	
67	20589	2018-12-28 00:40:20.358	29	(000.000)	故障事件	故障事件	

图 7 监控设备的故障记录

3.5 变压器故障线圈分析

拆解发生故障的 B 相线圈, 线圈内没有发现明显的短路故障点。如果线圈内部发生短路故障就会因局部如匝间等严重过热而逐步烧熔成一个较大面积的大洞, 中间过程会触发熔断器熔断保护, 一般不波及到整个线圈; 拆解的线圈整体挤压扭曲变形, 因此初步判断事故主因并非变压器本身故障引起。合理解释是箱变器身遭受外部短路, 由于短路线路无法及时恢复正常, 导致大电流

流过变压器高低压绕组并经历了较长时间, 变压器绕组在大电流的作用下产生巨大的电动力, 导致铁轭与心柱分离并造成线圈和绝缘受挤压变形, 致使高压导线受损断线; 同时大电流导致内部绕组热量聚集, 热量无法及时散出, 高温导致变压器油裂解, 绝缘材料碳化, 产生固体碳颗粒, 使变压器油变黑。

3.6 风机侧母线槽故障现象分析

本风电场风机塔筒内配置的母线槽为密集母线槽, 防护等级 IP54^[13-14]。在本次事故后, 经仔细检查, 发现本体机组塔筒内的母线槽发生严重烧蚀, 由此判断该处出现短路故障 (图 8)。查看相关记录, 运行期间该母线槽已出现 6 次烧毁事故。从电气接线图上看, 该故障点位于变压器低压侧外部, 推断此处为变压器外部短路点。上文变压器故障线圈分析中提到的箱变器身遭受外部短路, 获得了实物证据支持。



图 8 风机侧母线槽故障

4 故障讨论与预防措施

4.1 故障讨论

4.1.1 故障起始点

综合箱变外观无明显故障点、低压侧断路器动作、风机侧断路器动作以及风机侧故障现象分析, 判断故障起始点发生在箱变低压断路器下端与风机连接侧, 即一次系统图中的 A 点至风机之间的位置 (图 9)。多次的低压侧短路故障冲击导致高压线圈内部导体不当受力, 最终损坏高压线圈绝缘, 高压线圈故障一触即发。如果故障发生在断路器上端 B 点, 其故障电流大部分没有流过断路器, 一般不会导致断路器动作, 而是由高压侧熔断器熔断来保护或者由更上一级的集电线路断路器来保护, 不会使故障波及到低压风机侧。

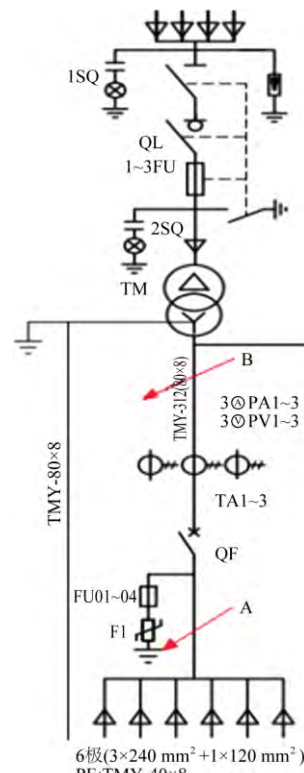


图 9 箱变一次接线图

4.1.2 箱变二次投运故障现象及原因

箱变更换熔断器后再次投运又发生故障, 分析相关数据和现象, 认为是由于外部多次短路产生的短路电流对变压器造成了破坏性冲击, 其累积效应使变压器线圈产生变形。再次进行高压侧合闸时, 由于故障未排除,

又对变压器产生二次冲击，加剧了变压器线圈绝缘结构的损坏，导致绕组严重变形甚至发生断线，最终变压器彻底损坏，无法再次投运。

根据现场故障现象，箱变器身遭受外部短路，由于短路故障无法及时恢复，导致短路故障电流流过变压器绕组较长时间，变压器绕组在大电流的作用下产生巨大的短路电力，其轴向分量导致铁轭与心柱分离并造成线圈和绝缘受挤压变形，致使高压导线受损断线；同时绕组附近温度急剧升高，高温导致变压器油裂解，产生碳的固体颗粒，使变压器油变黑。

4.2 预防措施

4.2.1 针对短路保护的改进措施

鉴于箱变侧发生外部短路的风险总是存在的，为了更好提高保护灵敏度，可以调整断路器保护定值。建议箱变低压主开关保护定值调整如表 3 所示。

表 3 低压主开关保护定值调整

保护特性	现场整定值	建议调整值
短路短延时保护	$I_{sd} = 5 I_n = 10\,000\text{ A}$,	$I_{sd} = 3 I_n = 6\,000\text{ A}$,
	$t_{sd} = 0.1\text{ s}$	$t_{sd} = 0.1\text{ s}$
短路瞬时保护	$I_i = 10 I_n = 20\,000\text{ A}$	$I_i = 5 I_n = 10\,000\text{ A}$

调整后，瞬时保护和短路短延时保护启动电流均变小，可以避免线圈遭受更大的故障电流冲击。

4.2.2 针对二次投运的改进措施

建议对风机发电机侧的故障因素做仔细检查和故障排除处理，避免重复出现类似问题。需要特别指出的是，当首次出现低压线路故障跳闸时，应查明故障原因并确实消除隐患后再投运，切不可急于求成，未找出故障点就立即尝试二次投运，否则会造成更为严重的设备损坏^[15-16]。

5 结束语

本文从一起箱变二次投运发生故障的案例出发，查看故障录波图形，识别、计算短路电流，并结合故障现象和元器件动作特性判断故障时的电流能量来源逻辑，分析得出以下结论。

（1）此台箱变故障的主要原因是遭受外部短路，多次短路的累积效应对变压器线圈造成的破坏不可忽视。

（2）箱变侧发生外部短路的风险总是存在的，为了更好提高保护灵敏度，可以调整断路器保护整定值。

（3）运行后的箱变发生高压熔断器熔断、低压侧断路器跳闸后，故障排查范围不能局限在变压器本身，还要对风机发电机侧的故障因素做仔细检查，应查明故障原因并确实消除隐患后再投运。

参考文献：

[1] 魏东辉,房俊龙. 风电在电力系统恢复规划中的应用[J]. 高电压技术,2022(1):398-408.

[2] 张祥宇,朱正振,付媛. 风电并网系统的虚拟同步稳定分析与惯量优化控制[J]. 高电压技术,2020(8):2922-2932.

[3] 宇卫,涂玲英,陈健. 风电场集中接入对集电线电流保护的影响[J]. 湖北工业大学学报,2020(4):29-33.

[4] 周启峰. 风电双分裂变压器半穿越状态下的绕组热点研究与优化[J]. 机电工程技术,2021(11):247-250.

[5] 杨明,袁乙专,赵红,等. 平原型风电机组用箱变雷击损坏探讨[J]. 机电工程技术,2022(12):297-300.

[6] 李亦伦. 风电场风机箱变低压侧短路故障原因分析[J]. 电工技术,2010(9):50-51.

[7] 吴天霞,王欣,田盛华. 风力发电系统故障建模与仿真[J]. 分布式能源,2019(4):24-29.

[8] 包能胜,朱瑞丹,倪维斗. 大型风电场电网三相短路故障暂态分析[J]. 太阳能学报,2008,29(9):1161-1166.

[9] 李林达,李正绪,孙实源,等. 电力变压器短路累积效应研究综述[J]. 变压器,2017,54(2):24-31.

[10] 李正绪,李林达,孙实源,等. 电力变压器短路微形变累积效应试验[J]. 广东电力,2017,30(5):92-95.

[11] 诸葛军,张全元,亢歆童. 风电场综合故障录波分析探讨[J]. 农村电气化,2022(12):10-12.

[12] 吴旭涛,邢琳,胡旭光,等. 故障录波信息在变压器绕组变形诊断中的应用[J]. 变压器,2017,54(9):25-29.

[13] 赵奇来. 风电专用母线槽的技术探讨[J]. 低压电器,2013(22):32-34.

[14] 黄新波,张杰,田毅,等. 风电母线槽热故障状态在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):130-137.

[15] 隋新世. 两相熔断器熔断后的变压器不允许再送电[J]. 农村电工,2016,24(10):24.

[16] 杜一波. 风电场集电线路重合闸功能的探索与应用[J]. 电气时代,2017(11):42-45.

第一作者简介：胡元海（1978—），男，重庆永川人，硕士，工程师，研究领域为发电站电气一次设备检修调试。