

国产500kV输变电设备运行 及事故分析



王世阁 编

资料详实

首次介绍500kV输变电设备运行情况

实例分析

全面总结国产设备运行经验



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

国产500kV输变电设备运行 及事故分析



王世阁 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了总结国产第一批 500kV 输变电设备运行情况,为国产输变电设备进一步提高产品质量提供资料,编者把这些设备运行以来发生的事故、故障和严重异常总结出来,并进行归类和简要分析,找出发生问题的原因及改进质量的措施。主要内容包括变压器运行情况及事故分析,电抗器电容式电压互感器运行情况及事故分析,高压空气断路器、电流互感器运行情况以及充油电缆运行情况及分析。

本书可供从事电力设备制造、试验和电力系统运行的技术人员及检修、管理人员使用,也可供有关专业院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

国产 500kV 输变电设备运行及事故分析/王世阁编.
北京:中国电力出版社,2006
ISBN 7-5083-4388-3

I. 国... II. 王... III. ①输电-电气设备-运行-事故分析-中国②变电所-电气设备-运行-事故分析-中国 IV. ①TM72②TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 060163 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 4.25 印张 92 千字
印数 0001—3000 册 定价 10.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



元锦辽海 500kV 输变电工程是我国第一个全部采用国产设备装备的输变电工程。它由元宝山电厂经锦州的董家变电所送到辽阳的辽阳变电所和鞍山海城的王石变电所，并形成董家、辽阳、王石的“闭合三角”供电网络。

该工程为配合元宝山电厂和锦州电厂建设，1978 年以国家计委 [1978] 514 号文件批准建设的。1979 年 2 月 12 ~27 日，原水电部东北电力设计院进行前期勘测工作。1980 年 1 月 28~2 月 2 日通过辽阳变电所设计方案的审查。

元、锦、辽线路全长 373km，其中以联络锦州董家变电所和辽阳变电所两个 500kV 变电所的锦辽（董辽线）段作为考核首批国产设备和部件的试验线段，全长 159km，杆塔 372 基，于 1981 年 9 月降为 220kV 运行，1984 年 1 月升至 500kV 运行。元锦（元董线）段长 214km，杆塔 492 基，1982 年 12 月降为 220kV 运行，1985 年 11 月升至 500kV 运行。

锦、辽、海线路全长 227km。其中锦海（董王线）段 168km，杆塔 402 基，1983 年 10 月降为 220kV 运行，1986 年 11 月升至 500kV 运行。辽海（辽王线）段长 58km，杆塔 146 基，1984 年 4 月竣工，1986 年升至 500kV 运行。

该工程涉及元宝山电厂和董家、辽阳、王石三个变电

所。元宝山电厂装有沈阳变压器厂生产的 DFP-240000/500 型主变压器 4 台、保定变压器厂生产的 ODFPS-120000/500 型联络变压器 4 台。董家变电所装有沈阳变压器厂生产的 DFPS-250000/500 型主变压器 4 台、西安变压器厂生产的 BKDFP-40000/500 型和 BKDF-50000/500 型油浸并联电抗器各一组。辽阳变电所装有西安变压器厂生产的 DFPS-250000/500 型主变压器 4 台。王石变电所装有沈阳变压器厂生产的 DFPS-250000/500 型主变压器 4 台。

1983 年 8 月~11 月,对锦辽(董辽)线段进行了全面调试。自 1984 年 1 月 27 日投入带电考核。运行初期,各类国产设备出现了不同程度的问题,停电次数较多,可用率不高。经过制造厂和运行部门的共同努力,消除了大量设备缺陷,对设备不合理部分进行了改进,逐步进入了设备运行的稳定期,可用率在不断提高。

为了总结国产第一批 500kV 输变电设备运行情况,为国产输变电设备进一步提高产品质量提供资料,我们把这些设备运行以来发生的事故、故障、严重异常总结出来,并进行归类 and 简要分析,找出发生问题的原因及改进质量的措施。我们既看到这些设备的问题给电网和运行单位带来了较大工作量和无可挽回的损失,又应充分看到这些国产设备为我国 500kV 输变电设备的迅猛发展所起到的无可替代的作用。各厂家的设备随着技术不断的成熟,目前已有长足的进步。

为使广大读者对我国 500kV 输变电设备发展的现状有所了解,对此也作了简要介绍。

在资料编撰过程中,得到了辽阳、两锦、鞍山等供电公司和锦州、沈阳超高压局的领导、技术人员的大力支持,提

供了大量有价值的珍贵资料，在此表示衷心谢意！

向花费巨大精力制造和运行了第一批国产 500kV 输变电设备的技术人员、工人和领导致以崇高的敬意！

编 者

2006 年 5 月



前 言

第一章	变压器运行情况及事故分析	1
第一节	变压器基本情况	1
第二节	设备发生的主要问题	3
第三节	变压器事故分析	14
第四节	变压器运行情况综述	53
第五节	500kV 变压器发展情况	58
第二章	电抗器运行情况及事故分析	66
第一节	电抗器的基本结构	66
第二节	设备发生的主要问题	68
第三节	电抗器的事故情况与分析	80
第四节	电抗器运行情况综述	85
第五节	500kV 电抗器发展情况	85
第三章	高压空气断路器运行情况	89
第一节	断路器的基本情况	89
第二节	设备发生的主要问题	90
第三节	运行情况综述	93
第四节	500kV 断路器发展情况	94
第四章	电流互感器运行情况	97
第一节	电流互感器的基本情况	97

第二节	设备发生的主要问题	98
第三节	电流互感器运行情况综述	100
第四节	500kV 电流互感器发展情况	100

第五章 电容式电压互感器运行情况事故分析 ... 104

第一节	电容式电压互感器的基本情况	104
第二节	设备发生的主要问题	105
第三节	电容式电压互感器事故分析	112
第四节	电容式电压互感器运行情况综述	116
第五节	500kV 电容式电压互感器发展情况	119

第六章 充油电缆运行情况 121

第一节	充油电缆的基本情况	121
第二节	电缆发生的主要问题	122
第三节	电缆的负荷和大负荷试验情况	125
第四节	电缆的退役	126
第五节	充油电缆运行情况综述	127

变压器运行情况及事故分析

20 世纪 70 年代末,我国确定输电电压升至 500kV 时,国内的沈阳、西安、保定三大变压器厂的技术人员根据国内、外超高压输变电设备的制造技术,结合自己的工艺、工装能力,设计制造了第一批国产 500kV 变压器。这批变压器的性能指标等与当时世界先进制造公司生产的变压器有一定差距,但这些设备基本上是我国工程技术人员自行设计和制造的,也适合于当时的工艺水平。在这批变压器设计制造过程中,各生产厂都进行了大量的试验研究,并进行了模型试验。沈阳变压器厂生产的变压器安装在 500kV 董家变电所,1983 年 11 月带电调试,1984 年 1 月 27 日投入试运行。西安变压器厂生产的变压器安装在 500kV 辽阳变电所,1983 年 11 月带电调试,1984 年 1 月 27 日投入试运行。保定变压器厂生产的变压器安装在元宝山电厂,用作 500kV 系统和 220kV 系统的联络变压器,1985 年 11 月 13 日投入试运行。这些变压器均为单相结构。由于资料所限,重点总结董家和辽阳两个变电所的变压器运行情况。

第一节 变压器基本情况

设备主要参数见表 1-1。

(1) 沈阳变压器厂和西安变压器厂生产的变压器调压方

式均为外附调压器（调压变），调压开关为长征电器一厂产品，型号为 ZYT-Ⅲ-500-600Ⅲ±13。

表 1-1 设备主要参数

安装地址	型 号	电压组合 (kV)	容量 (MVA)	接线组别	台数	制造/投 运日期	生产厂
锦州董家 变电所	DFPS-250000/ /500	$510/\sqrt{3} \pm 8\% /$ $235/\sqrt{3}/36.75$	250/250/30	YN yn d11	4	1980.7/ 1983.11	沈阳变 压器厂
辽阳 变电所	DFPSF- 250000/500	$500/\sqrt{3} \pm 8\% /230/$ $\sqrt{3}/15.75$	250/250/ 120	YN yn d11 d11	4	1980.5/ 1983.11	西安变 压器厂
元宝山 发电厂	ODFPSZ- 120000/500	$550/\sqrt{3}/242/$ $\sqrt{3}/63$	120/120/ 31.5	YN yn d11	4	1983.12/ 1986.6	保定变 压器厂

(2) 沈阳变压器厂生产的变压器为单相三绕组，第三绕组容量为 30MVA，电压为 36.75kV，铁心为单相四柱、铁轭穿孔，采用 Z11-0.35 型硅钢片。高压绕组双柱串联、纠结-内屏连续式绕组，中压为双柱并联螺旋式线圈，低压为连续式绕组。空载损耗为 243.6～290.5kW，负载损耗为 767～819.4kW。器身重 171.8t，铁心重 142.1t，油重 53t，总重 286t，充 N₂ 运输重 197t。

(3) 西安变压器厂生产的变压器为单相三绕组，第三绕组容量为 120MVA，电压为 15.75kV，铁心为双柱带旁轭、半直半斜、铁轭穿孔，采用 Z11-0.35 型硅钢片。高压绕组双柱并联（H 形接线）、纠结-内屏连续式绕组，中压为纠结式绕组，低压为螺旋式绕组。空载损耗为 265kW，负载损耗为 967～969kW。器身重 169.2t，铁心重 142.1t，油重 59.8t，总重 282.8t，充 N₂ 运输重 196t。

(4) 保定变压器厂于 1975 年开始对超高压变压器的绝缘技术、绕组结构等课题进行研究，通过电场计算、电场模

拟、模型试验等方法取得了一些成果，基本解决了设计制造 500kV 变压器的技术问题。保定变压器厂于 1981 年开始对元宝山发电厂的变压器进行设计。在设计中，着重对连接于 220kV 自耦连接的线端调压绕组和 500kV 引线进行了研究，还制作了 1:1 的模型进行测量和试验。该变压器为单相有载调压自耦联络变压器，采用 220kV 线端调压，调压范围为 $\pm 8\%$ ，调压开关为德国 MR 产品。第三绕组容量为 31.5MVA，电压为 63kV，铁心为三柱双框、全斜无孔、绝缘油道，采用 Q9G-0.35 型硅钢片。高压为纠结式绕组，中压为内屏连续式绕组，低压为连续式绕组。空载损耗为 77.8~81.3kW，负载损耗为 303.9~319kW。器身重 86t，铁心重 60t，油重 64t，总重 193t，充 N_2 运输重 160t。

(5) 董家变电所 1 号主变压器于 2002 年 12 月 15 日停运，由重庆 ABB 变压器有限公司生产的单相 250MVA 变压器所代替。辽阳变电所 1 号主变压器于 2003 年 6 月由常州东芝公司生产的单相 250MVA 变压器所代替。

第二节 设备发生的主要问题

(一) 董家变电所 1 号主变压器及调压变压器

1. A 相变压器 500kV 魏德曼结构故障

1989 年 3 月 23 日对变压器本体油进行定期色谱分析，发现总烃为 41.2×10^{-6} ，乙炔为 17.5×10^{-6} ；500kV 出线魏德曼处色谱分析总烃 114.4×10^{-6} ，乙炔 78.9×10^{-6} ，初步判断故障发生在魏德曼部分。经解体检查发现：由于穿缆铜绞线在套管的导管中较长，运行一段时间后，其重量造成水平部位下沉，使扩径波纹铝管端部脱离了套管均压球的电

场屏蔽,在该处出现了较大场强,造成放电(详见第三节)。

2. C相变压器静电隔屏脱落故障

1984年1月28日,变压器投运前色谱分析总烃为恒量,运行24h后总烃达 164×10^{-6} ,乙炔为 9×10^{-6} ;投运8天总烃为 620×10^{-6} ,乙炔为 36×10^{-6} ,当即停电。现场吊检未发现明显故障,在继续带电考核中,总烃和乙炔继续增长。1984年10月在现场吊检发现,500kV线圈引出线与套管软电缆连接处有放电烧焦痕迹,面积约 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$,深约10mm。处理后投运,色谱仍快速增长,1985年1月30日,总烃达 788×10^{-6} ,乙炔为 6.2×10^{-6} 。1985年2月返厂进行彻底处理。经检查发现“X”铁心柱下轭铁被围在旁轭上的最下一条0.05mm厚、80mm宽的铜带(静电隔屏)脱落后短接下轭约130mm,铜片烧成两个 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 孔洞,造成铁心短路,下轭对应位置烧约豆粒大的痕迹。

3. B相变压器悬浮电位放电故障

1990年3月3日变压器本体投入空载运行后,色谱分析发现乙炔上升速度快,1991年元月乙炔达 9.21×10^{-6} ,1992年元月增至 17.5×10^{-6} ,退出运行。经检查发现:6个铁心压钉松动,铁心顶部有金属残屑,产生悬浮电位放电。分析原因是:线圈压紧采用刚性压钉,由于温度变化,运行一段时间后绝缘干缩下沉,压钉和压钉碗之间产生可以造成悬浮电位放电的小间隙,造成乙炔持续缓慢增长。

4. 油箱中腰螺栓漏磁发热故障

1985年3月27~3月31日进行大负荷试验,试验共进行了63h,其中500~530MVA运行27h,640~710MVA(最大电流840A)运行36h。当负荷超过500MVA以后时,

钟罩螺栓则严重发热。其中董家变电所 3 台主变压器有 13 个螺栓温度高达 $100\sim 130^{\circ}\text{C}$ ；辽阳变电所 3 台主变压器共 19 个螺栓发热，最高温度达 160°C 。发热原因是由于此处有大电流引线产生漏磁引起严重发热。

5. 变压器油含气量超标

变压器油含气量较高，达不到小于 1% 的标准要求，是国产变压器普遍存在的问题。国外一些变压器制造公司对变压器含气量要求很高：如日立公司规定小于 0.5%，瑞典阿西亚公司要求小于 0.2%，加拿大要求小于 0.1%，法国阿尔斯通公司要求小于 2%~3%，我国标准暂定为小于 1%。从董家变电所和辽阳变电所变压器运行实践中表明：这一标准很难达到，董家变电所变压器投运前为 3.22%~4.19%，投运两年后高达 5.02%~9.09%；辽阳变电所变压器投运前为 1.63%~2.59%，运行两年后最高为 3.81%。董家变电所将开放式储油柜改为全密封结构后，含气量增长速率有所下降。一段时间内，我们对该指标按运行中不超过 2% 的标准掌握是适宜的。

6. 高低压套管故障

这批变压器套管均采用了国产南京电瓷厂和西安电瓷厂生产的电容型充油套管，运行中发生故障比较突出，主要有：

(1) B 相变压器：1988 年 12 月 1 日 110kV 北侧套管油中甲烷含量超标，达到 339.3×10^{-6} ，1989 年 1 月将其更换。1996 年 6 月 11 日，B 相变压器 110kV 南侧套管油中甲烷为 106×10^{-6} ，10 月进行了大修，未见明显异常。

(2) C 相变压器：1986 年 5 月 28 日，发现 220kV 北侧套管油中甲烷达 47×10^{-6} ，乙炔为 11.6×10^{-6} ，将其更换；

1987年9月8日110kV南侧套管油中甲烷达 100.8×10^{-6} ，及时进行了更换。1987年8月9日，三次侧36.75kV X侧套管渗漏油严重，被迫退出运行，检查发现铜杆折断。1990年7月15日，C相调压变压器36.75kV A相套管渗油严重，被迫停运。

(3) 1985年3月30日进行变压器大负荷试验时（一次电流840A，有功700MW），A相三次36.75kV端子套管过热发红，造成胶垫老化、漏油；备用相三次X端套管漏油严重，当即进行处理。2000年6月25日14时，备用相调压变压器A相套管顶部渗油严重，大约每秒一滴，被迫停运处理。低压套管多次发生漏油问题的主要原因是套管引出线结构不合理，引出线线夹与套管导杆接触压力不够，致使接触不良，从而引起发热，密封胶垫受热后失去弹性，导致渗漏油。在环境温度较高或负荷较大时，更易发生此类事故。

(4) 2000年8月10日7时45分，运行人员特巡时发现A相主变压器三次36.75kV X端套管渗漏油，用红外测温，该处温度为 34°C ，其他相为 29°C ，被迫停运处理。此类套管在1985年3月大负荷试验时（有功700MW，一次电流840A）也曾发生过热、漏油问题。主要原因是引出线线夹与套管导杆接触压力不够，引起发热。

(5) 高压套管发生雨闪：2001年5月24日16时05分，天气为有雾和雷雨。A相变压器500kV侧分差动保护动作，经检查发现500kV套管下数第一个瓷沿对套管底座法兰有放电痕迹见图1-1，均压环与瓷套的其他瓷沿也有放电痕迹，套管发生雨中闪络。此套管为1980年南京电瓷厂生产的普通型瓷套，泄漏比距为 1.7cm/kV ，董家变电所处

于三级污区，泄漏比距远远满足不了污秽等级的要求。泄露比距不足加之瓷套外形不佳是造成此次闪络的主要原因。

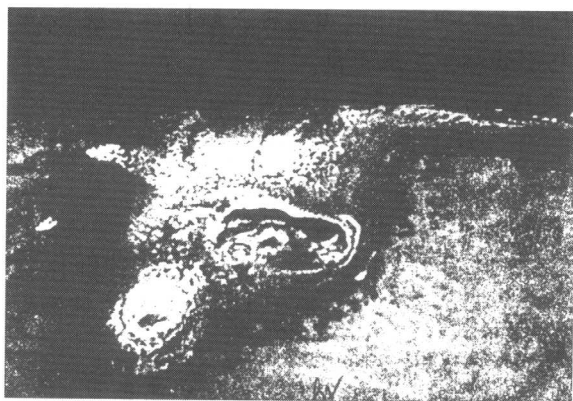


图 1-1 董家 1 号主变 A 相 500kV 套管底均压罩烧痕

(6) 高压引线端子接触不良。2001 年 4 月 17 日油色谱月检发现，变压器油中乙炔气体含量高达 23.67×10^{-6} ，总烃含量为 669.97×10^{-6} ，进行铁心接地电流测试未见异常。4 月 18 日再次取样分析，发现故障发展较快，变压器退出运行。色谱变化情况见表 1-2。

表 1-2

色 谱 变 化

单位: $\mu\text{L/L}$

时 间	成 分							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	CO	CO ₂
3 月 14 日	10.07	13.6	2.08	6.51	0	22.19	661	3037
4 月 17 日	112	178.1	33.58	434.59	23.67	669.97	412	2808
4 月 18 日	139	231.3	42.77	502.96	30.46	807.49	568	3343
12 月 28 日	0	1.78	0	2.84	0.62	5.33	39	595

4月25日安排进入检查,未发现明显故障点,局部放电试验也未见异常。在进行高压绕组直流电阻试验发现电阻值较出厂值大8.96%,严重超标。后检查发现500kV套管将军帽与引线端子接触不良。

7. 变压器主油管路严重漏油

1992年5月1日,主油管路渗漏油严重,被迫退出运行。

8. 调压变压器轻瓦斯频繁动作故障

1987年11月3~9日,A相调压变压器轻瓦斯连续动作4次,色谱分析无异常,原因未查清,后自然消失,分析为变压器内存有空气。

(二) 辽阳1号主变压器及调压变压器

1. 变压器的两次绕组烧损事故

(1) 1989年2月21日,在气候正常(气温 -10°C)、系统无波动、5天前色谱分析无异常的情况下,1号主变压器(A、B、C三相)在正常运行中,轻、重瓦斯保护动作跳闸,两套大差动保护动作,防爆筒喷油,变压器油箱变形,三角加强筋开裂8处,最长达400mm,500kV中性点套管上部喷油。事故前变压器所带有功负荷220MW,无功负荷140Mvar;系统一次电压500kV,二次电压240kV,系统无操作。变压器由试运行至发生事故运行小时为36389h。从事故录波图上测得500kV侧故障电流为6960A,故障时间70ms。

经现场测试和解体检查发现,故障发生在C相变压器高压左柱线圈下部的线段内(连续插内屏结构),在检查中还发现该柱各线段间的导线立面有压紧时造成的硬伤痕(在

垫块下的导线立面有较深的压缩沟痕)，变压器返厂修理。在厂家解体时发现：在起吊线圈时用四点吊钩，吊点间距离达2m，使线圈发生较大变形，故障点恰在起吊时吊点附近。

与厂家共同分析造成此次事故的原因：一是线圈压紧时承力过大，从而损伤了导线立面的匝绝缘；二是起吊线圈方式为4点起吊（至少应为6点起吊），损伤了吊点处的匝绝缘，形成了严重隐形缺陷，运行后在热和振动等作用下，导致突发事故〔详见第三节事故分析（二）〕。

（2）1990年7月20日，1号主变压器（A、B、D三相组）正常运行中，由于低压侧（15.75kV）A分支干式电压互感器爆炸，造成三相弧光短路，A相变压器轻、重瓦斯保护动作、接地信号表示，B、D相轻瓦斯及大差动保护动作，故障持续时间为440ms。事故后检查：围屏拉带断裂，引线木支架多根劈裂，低压汇流铜排有不同程度的扭曲变形。其中A相损坏最严重，其低压侧左柱线圈凸出变形，线圈与铁轭连通，已不能恢复运行。B、D两相在油箱内对汇流铜排进行整形、修补并更换木支架后，通过额定电压及常规试验后运行，未见异常。

先后对A、D相进行返厂修理，都发现低压绕组已严重变形，呈“八卦”状，紧抱在铁心柱上，绕组中部导线“翻转”，导线多处匝绝缘破损、漏铜。D相变压器在事故后仍坚持运行了一段时间，直到安排大修时才发现绕组变形。B相变压器进行了绕组变形试验，认为未产生明显变形，一直运行到变压器退役更换，未发生异常。

变压器事故的根本原因是绕组抗短路的能力不足，在电动力的作用下，绕组发生了“失稳”〔详见第三节（三）〕。

2. 变压器的铁心多点接地