

GAOYA DIANQI SHEBEI
SHIYAN YU ZHUANGTAI ZHENDUAN

高压电气设备 试验与状态诊断

李景禄 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑 单芳
文字编辑 娄瑜

销售分类：电工技术 / 电气设备试验

北京瑞兴文化艺术中心 / 刘一桢
Tel: (010) 68311017 63202266-2701
E-mail: art@waterpub.com.cn
www.waterpub.com.cn / art

封面
设计

ISBN 978-7-5084-5609-6



9 787508 456096 >

定价：39.00 元

高压电气设 试验与状态诊

高压电气设备 试验与状态诊断

李景禄 等 编著

附录(续) 目录表

800 型, 通量出串水降水國中

ISBN 978-3-308-52602-2

D. 血 幸 高 - I

2.012MT.VF 测前一态林

香港中文大學圖書館

图例

Figure 10.10

... ..

12-00000

33. *Chen, Y. and J. H. Chen. 1999. The effects of the 1997 Asian financial crisis on the Chinese stock market. Journal of International Money and Finance 18: 39-52.*

100

1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 26

... ..

中國

www.1688.com

100

Scanned with CamScanner



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面阐述了高电压试验方法和试验技术,如电气设备的常规绝缘试验、在线检测、绝缘油的色谱分析和局部放电试验等。共十五章,第一~第四章介绍了各种绝缘试验的基本试验方法、原理和试验中应注意事项;绝缘油的气相色谱分析方法;电气设备的局部放电试验和在线检测方法。第五~第十五章则介绍了具体的电气设备和电网的试验、分析和判断。本着理论联系实际的原则,结合现场实际,着重介绍了基本的试验方法、现场注意事项、各种干扰的排除、误差分析和对试验数据的去伪存真,阐述了电气设备的试验数据的分析和试验结果的判别,强调了用信息融合的方法,对电气设备的真实状态进行诊断。

本书可供电力系统中从事现场试验和技术监督的工程技术人员阅读,亦可作为高等院校电力工程专业的本科生和硕士生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高压电气设备试验与状态诊断/李景禄等编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2008
ISBN 978-7-5084-5609-6

I. 高… II. 李… III. ①高压电器—试验②高压电器—
状态—诊断 IV. TM510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 075299 号

书 名	高压电气设备试验与状态诊断
作 者	李景禄 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言

高电压试验是高电压技术的一个重要组成部分,是判断电气设备状态的基本手段。电气设备定型要做型式试验,出厂要做出厂试验;发电厂、变电所建成后能否加入运行要做交接试验;电气设备在运行过程中要定期做预防性试验;实行状态检修要做在线检测和各种带电试验。有时为了对事故进行分析,或者为了判别设备的性能参数要对其进行特殊试验。高电压试验是制造厂、建设安装部门和电力生产部门都必不可少的一种技术手段。同时高电压试验还是科学研究的重要手段,因为高电压领域本身就是一个以试验为基础的领域,要论证各种过电压的机理、验证新的理论或者要考核某种新产品的性能都要通过试验来进行。在一些特殊运行条件下还需对电气设备或电网进行特殊试验。高电压试验是重要的技术监督手段,电气设备的运行状态,大修、小修是否达到要求,设备有没有潜伏性的故障,是否能够安全运行都要靠对电气设备的试验来确定。因而高电压试验在电力系统生产中占有举足轻重的地位。

电力系统目前正处在由计划检修向状态检修的一个过渡时期,但要真正地实行状态检修就要及时掌握电气设备的运行状态,就是要通过各种离线的、在线的试验把电气设备的状态量检测出来,并通过正确的数据融合、加权处理、状态分析对电气设备的真实的运行状态进行正确的评判,以确定设备是否需要检修或需进行的检修项目和检修方法。关于状态检修目前还处于一个探索的阶段,在检测项目、评判标准上还不健全,还有许多工作要做,但首先应做好的则是各种离线的、在线的试验项目和根据项目结果对电气设备的真实状态进行分析和判断,做好技术监督,保证电气设备的安全稳定运行。

作者在高电压试验的岗位上工作了多年,以后虽然工作岗位有所变动但仍长时间兼任高压专责工程师职务,长期主管高电压方面的技术监督工作,之后又调到高校从事教学与科研工作,从未脱离高电压试验工作,并在电网试验、接地试验和科研开发、试验方面有所发展和创新。因为高电压技术本身是以试验为基础的领域,而高电压试验又是主要的技术监督手段,对电网的安全运行起着举足轻重的作用,因而,无论是在技术监督、技术管理岗位上工作,还是后来在高校从事教学与科研工作,作者对高电压试验技术进步始终不敢放弃。在高电压试验技术方面作者的体会是,要做好高电压试验工作应从以下几个方面做起:

首先应能熟练的掌握试验方法,正确地使用试验仪器,能对被试品进行正确的试验,并能对试验中的环境条件、被试品外部状况、试验中的各种干扰对试验结果的影响进行分析排除,能对试验结果做到去伪存真,从而得出被试品的真实

状况及结果。

第二应了解被试设备的内部结构和材料组成,除了对电气设备在原理上了解掌握外,还要对常见的被试品有较深入的感性认识,如电气设备的内部结构、绝缘材料、导电材料、主要部件及其在运行中的工作状况进行了解。这就要求我们在理论上除了熟练的掌握电气设备的原理及结构组成外,还要在设备解体大修时或到制造厂对电气设备的内部结构进行熟悉和了解,要对电气设备的内部结构和材料组成做到心中有数。特别是对发生故障而解体大修的设备要给予充分的关注,关注容易出问题的部件及故障原因,这些故障与哪些试验参数相关,会引起哪些参数发生变化,可以通过哪些试验手段、项目检测出来。

第三应将各种试验项目、方法及其试验数据的综合分析,判断电气设备的真实状态,因为电气设备的实际状态往往靠一种试验项目的实验数据并不能真实地反映出来,需要多个试验项目、多个数据的融合及综合分析,有时还需要了解电气设备的运行条件才能做出准确的分析和判断。

本书共十五章。第一~第四章介绍了各种绝缘试验的基本试验方法、原理和试验中应注意事项;绝缘油的气相色谱分析方法;电气设备的局部放电试验和在线检测方法。第五~第十五章则介绍了具体的电气设备和电网的试验、分析和判断。本着理论联系实际的原则,结合现场实际,着重介绍了基本的试验方法、现场注意事项、各种干扰的排除、误差分析和对试验数据的去伪存真、对试验结果的综合分析。本书是作者20多年来在电力系统中从事技术监督和技术管理的经验总结和科研成果的总结,为了能够紧跟电力生产技术发展和技术进步的步伐,在编写过程中同时参考了国内外近年来在高电压试验和技术监督领域的大量的书籍、资料、研究成果和相关的国家标准和电力行业标准,力求最大限度地、全面地反映在高电压试验方面的研究成果和技术进步。同时本书还根据实用性、通俗性,为现场服务、为电力生产服务的原则,尽可能地反映生产实际,争取能使该书成为现场试验和技术监督人员手中的一本工具书。

本书由长沙理工大学的李景禄教授编著,并指导研究生李超、陶蓉、杨鑫、黄欣、李志娟、李李、马福、何娜、唐正森、崔林、秦晔晔、敬亮兵、颜喜平、李德超、宋萍进行了资料收集、编写和校对工作,特别是李超、陶蓉同学为该书的资料整理,修改和校对做了大量的工作。福建省电力公司基建部林冶副主任、湖南省电力公司的副总工程师曹志煌高工、生产技术部周冠东高工,河南信阳电业局的赵国喜总经理、张海峰总工,河南焦作电业局的郑瑞臣局长,安徽池州电业局的许根养总工、江龙才主任,长沙理工大学的杨廷方博士等参与了本书部分章节的编写。

由于成书时间仓促,再加上作者水平有限,其中缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2008年3月于长沙

目 录

前言

第一章 电气设备的绝缘试验	1
第一节 绝缘电阻、吸收比试验	1
第二节 泄漏电流和直流耐压试验	7
第三节 电气设备的介质损耗角正切值试验	15
第四节 绝缘油试验	22
第五节 交流耐压试验	24
第六节 冲击电压试验	30
第七节 试验记录、试验报告和试验结果分析	36
第二章 绝缘油的气相色谱试验与分析	38
第一节 充油电气设备内部主要绝缘材料的性能	38
第二节 变压器油中气体的产生机理	42
第三节 电气设备内部故障与油中特征气体的关系	45
第四节 三比值法的基本原理及方法	46
第五节 无编码比值法的基本原理及方法	50
第六节 以油中气体分析为依据综合诊断故障	54
第三章 局部放电试验	57
第一节 局部放电特征及原理	57
第二节 局部放电测试方法	61
第三节 局部放电波形分析及图谱识别	65
第四节 局部放电测试中的干扰及抗干扰措施	69
第五节 局部放电信号特征分析	71
第四章 电气设备在线监测	74
第一节 绝缘电阻及泄漏电流的在线监测	74
第二节 介质损耗角正切值的在线监测	75
第三节 局部放电的在线监测	77
第四节 绝缘油溶解气体的在线色谱分析	79
第五节 MOA 避雷器在线监测	82
第六节 电气设备在线监测与离线测试的综合判别	84
第五章 电力变压器的试验与状态分析	87
第一节 电力变压器的绝缘性试验	87

第二节	电力变压器的油色谱分析	97
第三节	电力变压器的电压比、极性和组别试验	101
第四节	电力变压器的直流电阻试验	104
第五节	电力变压器的短路和空载试验	107
第六节	电力变压器的综合分析与诊断	110
第六章	高压开关设备的试验与状态诊断	121
第一节	高压开关设备的绝缘预防性试验	121
第二节	高压开关设备的动作特性试验	125
第三节	SF ₆ 断路器的检查与诊断	131
第四节	高压开关的综合分析与诊断	131
第七章	GIS 的试验与监测	137
第一节	GIS 的回路电阻测量	137
第二节	GIS 元器件试验及连锁试验	138
第三节	GIS 的绝缘试验	139
第四节	SF ₆ 气体检测	143
第五节	GIS 的异常及故障分析	146
第八章	互感器的试验与诊断	150
第一节	互感器的绝缘试验	150
第二节	互感器的油色谱分析	154
第三节	互感器的特性试验	154
第四节	互感器的故障分析与诊断	161
第九章	避雷器的试验与状态诊断	165
第一节	避雷器试验	165
第二节	避雷器的红外诊断和在线监测	169
第三节	避雷器性能分析及故障诊断	171
第十章	电力电缆的试验与状态分析	177
第一节	电力电缆的绝缘试验	177
第二节	电力电缆的运行状态分析	182
第三节	电力电缆的故障诊断	188
第十一章	套管和绝缘子的状态分析与诊断	191
第一节	套管和绝缘子的绝缘试验	191
第二节	绝缘子的电位分布实验	193
第三节	套管和绝缘子故障诊断	196
第十二章	输电线路试验与检测	200
第一节	输电线路绝缘试验	200
第二节	输电线路阻抗测量	201

第三节	线路导线接头试验·····	203
第四节	输电线路杆塔接地电阻和回路电阻试验·····	204
第五节	输电线路杆塔劣质绝缘子检测·····	205
第十三章	配电网试验·····	210
第一节	配电网中性点不对称电压试验·····	210
第二节	配电网相序及相位试验·····	211
第三节	配电网电容电流测量·····	218
第十四章	配电网消弧线装置试验·····	231
第一节	接地变压器零序阻抗试验·····	231
第二节	自动跟踪补偿消弧装置自动测量及跟踪试验·····	232
第三节	自动跟踪补偿消弧装置单相接地试验·····	234
第四节	自动跟踪补偿消弧装置弧光接地试验·····	235
第五节	多台自动跟踪补偿消弧装置自动并联试验·····	236
第十五章	接地装置试验·····	238
第一节	土壤电阻率测试·····	238
第二节	工频接地电阻试验·····	240
第三节	电位分布、跨步电压和接触电压试验·····	249
第四节	架空地线分流阻抗测试·····	252
第五节	连通试验和开挖检查·····	253
参考文献	·····	255



第一章 电气设备的绝缘试验

由于电气设备的制造工艺、材料特性及运输、保管以及在运行中受到电、热、机械、不良环境等各种因素的影响，其绝缘性能会逐渐劣化，以致出现缺陷，造成故障。因此，必须对设备的进行绝缘试验，了解设备的运行工况，减少设备的事故率。

非破坏性试验包括：绝缘电阻试验、吸收比试验、介质损耗角正切试验、局部放电试验、绝缘油的气相色谱分析等。绝缘耐压试验的项目主要有：交流耐压试验、直流耐压试验、雷电冲击耐压试验及操作冲击耐压试验。本章主要介绍这些基本的试验方法。

第一节 绝缘电阻、吸收比试验

一、绝缘电阻试验使用范围

绝缘电阻试验是电气设备绝缘试验中一种最简单、最常用的试验方法。当电气设备绝缘受潮、表面变脏、留有表面放电或击穿痕迹时，其绝缘电阻会显著下降。根据绝缘等级的不同、测试要求的区别，常采用的兆欧表输出电压有 100V、250V、500V、1000V、2500V、5000V、10000V 等。由于绝缘电阻试验所施加的电压较低，对于一些集中性缺陷，即使可能是很严重的缺陷，但在测量时会显示绝缘电阻仍然很大的现象，因此，绝缘电阻试验只适用于检测贯穿性缺陷和普遍性缺陷。

二、绝缘电阻试验的主要参数及技术指标

电气设备的绝缘，不能等值为单纯的电阻，其等值电路往往是电阻电容的混合电路。很多电气设备的绝缘都是多层的，例如电机绝缘中用的云母带，变压器等绝缘中用的油和纸，因此，在绝缘试验中测得的并不是一个纯电阻。图 1-1 为双层电介质的一个简化等值电路。

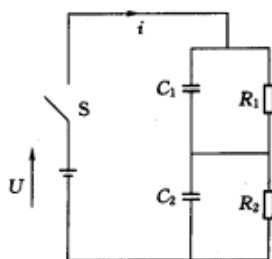


图 1-1 双层电介质简化等值电路

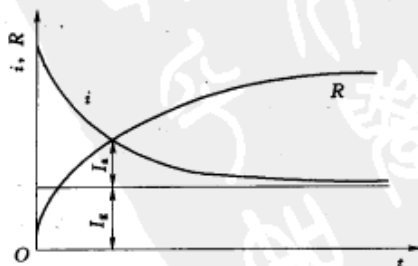


图 1-2 吸收曲线及绝缘电阻变化曲线

当合上开关 S 将直流电压 U 加到绝缘上的瞬间，回路主要由电容分量 I_c 组成。等值电路中电流 i 的变化如图 1-2 中曲线所示，开始电流很大，以后逐渐减小，最后趋

近于一个常数 I_g ；这个过程的快慢，与绝缘试品的电容量有关，电容量越大，持续的时间越长，甚至达数分钟或更长时间。图 1-2 中曲线 i 和稳态电流 I_g 之间的面积为绝缘在充电过程中从电源“吸收”的电荷 Q 。这种逐渐“吸收”电荷的现象就称为“吸收现象”。

从图 1-2 曲线可以看出，在绝缘电阻试验中，所测绝缘电阻是随测量时间变化而变化的，只有当 $t=\infty$ 时，其测量值为 $R=R_\infty$ ，但在绝缘电阻试验中，特别是电容量较大时，很难测量 R_∞ 的值，因此，在实际试验中，规程规定，只需测量 60s 时的绝缘电阻值，即 R_{60s} 的值，当电容量特别大时，吸收现象特别明显，如大型发电机，可以采用 10min 时的绝缘电阻值。

对于不均匀的绝缘试品，如果绝缘状况良好，则吸收现象明显，如果绝缘受潮严重或内部有集中性的导电通道，这一现象则不明显。工程上用“吸收比”来反映这一特性，吸收比一般用 K 表示， K 在工程上亦称为极化指数其定义为

$$K = R_{60s} / R_{15s} \quad (1-1)$$

式中 R_{60s} —— $t=60s$ 时测得的绝缘电阻值；

R_{15s} —— $t=15s$ 时测得的绝缘电阻值。

对于电容量较大的绝缘试品，可用 K_2 表示：

$$K_2 = R_{10min} / R_{1min} \quad (1-2)$$

式中 R_{10min} —— $t=10min$ 时测得的绝缘电阻值；

R_{1min} —— $t=1min$ 时测得的绝缘电阻值。

当绝缘状况良好时， K 值较大，其值远大于 1；当绝缘受潮时， K 值将变小，一般认为如 $K < 1.3$ 时，就可判断绝缘可能受潮。

从上面的分析可知，对电容量较小的绝缘试品，可以只测量其绝缘电阻，对于电容量较大的绝缘试品，不仅要测量其绝缘电阻，还要测量其吸收比。

三、试验设备

工程上进行绝缘电阻试验所采用的设备为兆欧表，兆欧表有三个接线端子：线路端子

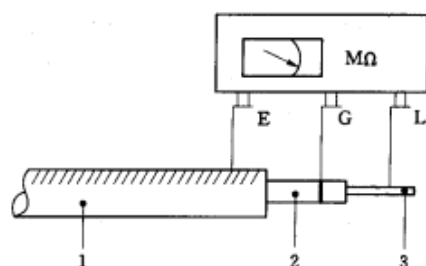


图 1-3 绝缘电阻试验原理接线示意图

1—电缆金属铠装；2—电缆绝缘；3—导电芯

(L)，接地端子 (E)，屏蔽 (或保护) 端子 (G)，被试品接在 L 和 E 之间，G 用以消除绝缘试品表面泄漏电流的影响，其试验原理接线如图 1-3 所示。

在绝缘试验中，如不接屏蔽端子，测得的绝缘电阻是表面电阻和体积电阻的并联值，因为这时沿绝缘表面的泄漏电流同样流过兆欧表的测量回路。如果在表面上缠上几匝裸铜线，并接到端子 G 上，则绝缘表面泄漏电流不流过兆欧表的测量回路，这时测得的结果便是消除了表面泄漏电

流影响的真实的体积电阻。

兆欧表种类较多，根据测量对象的不同，采用的测量电压不同，如前所述。根据电压产生方式的不同，分为手摇式兆欧表和电子式兆欧表，其原理图如图 1-4 和图 1-5

所示。

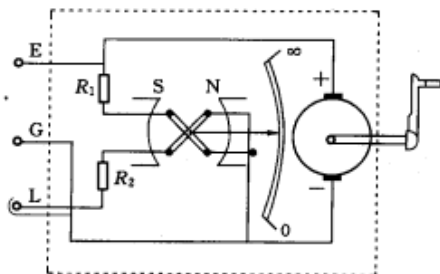


图 1-4 手摇式兆欧表原理接线图

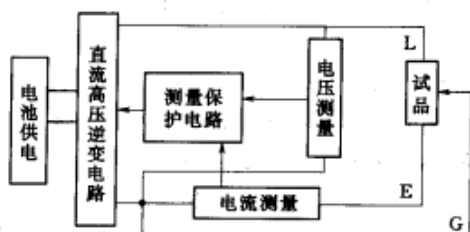


图 1-5 电子式兆欧表原理接线图

手摇式兆欧表采用了流比计的测量机构，仪表的读数与手摇式发电机的端电压或转速绝对值的关系不大，一般只要使得手柄的转速达到额定转速（通常为 120r/min）的 80% 以上即可，重要的是必须保持转速的恒定。需要注意的是，当试品电容较大时，测量后须先将兆欧表从测量回路中断开，然后才能停止转动发电机，以免试品电容电流反充损坏仪器。

电子式兆欧表测量原理与手摇式兆欧表的测量原理一样，只是电源的产生方式不一样。由于电力电子技术的发展，开关电源技术已比较成熟，因此，工程上大量采用了电子式兆欧表。与手摇式兆欧表相比，电子式兆欧表不仅试验工作量降低，测量吸收比时更容易，而且电源容量可以做得较大，同时，一台兆欧表还可以将几种不同电压集成在一台设备中，适用面更广。

四、绝缘电阻试验结果判断的基本方法

在绝缘电阻试验中，绝缘电阻的大小与绝缘材料的结构、体积有关，与所用的兆欧表的电压高低有关，还与大气条件有关，因此，不能简单地用绝缘电阻的大小或吸收比来判断绝缘的好坏。在排除了大气条件的影响后，所测绝缘电阻值和吸收比应与其出厂时的值比较，与历史数据相比较，与同批设备相比较，其变化不能超过规程允许的范围。同时，应结合绝缘电阻值与吸收比的变化结合起来综合考虑。

五、测量绝缘电阻的规定

（一）测试规定

- （1）试验前应拆除被试设备电源及一切外连线，并将被试物短接后接地放电 1min，电容量较大的应至少放电 2min，以免触电。
- （2）校验兆欧表针指在短路时是否指零，在开路时是否指无穷大。
- （3）用干燥清洁的柔软布擦去被试物的表面污垢，必要时可先用汽油洗净套管的表面积垢，以消除表面的影响。
- （4）接好线，如用手摇式兆欧表时，应用恒定转速（120r/min）转动摇柄，兆欧表指针逐渐上升，待 1min 后再读取其他绝缘电阻值。
- （5）在测量吸收比时，为了在开始计算时就能在被试物上加上全部试验电压，应在兆欧表达到额定转速时再将表笔接于被试物，同时计算时间，分别读取 15s 和 60s 的读数。

(6) 试验完毕或重复进行试验时, 必须将被试物短接后对地充分放电。这样除可保证安全外, 还可提高测试的准确性。

(7) 记录被试设备的铭牌、规范、所在位置及气象条件等。

(二) 测试时注意事项

(1) 对于同杆双回架空线或双母线, 当一路带电时, 不得测量另一回路的绝缘电阻, 以防感应高压损坏仪表和危及人身安全。对于平行线路, 也同样要注意感应电压, 一般不应测其绝缘电阻。在必须测量时, 要采取必要措施才能进行, 如用绝缘棒接线等。

(2) 测量大容量电机和长电缆的绝缘电阻时, 充电电流很大, 因而兆欧表开始指示数很小, 但这并不表示被试设备绝缘不良, 必须经过较长时间才能得到正确的结果。使用手摇式兆欧表测量大容量设备的绝缘电阻时, 试验结束时手不能停, 要先断开 L 线与被测设备之间的连接, 再停止转动摇表, 并立即对被测设备放电和接地, 防止被试设备对兆欧表反充电损坏兆欧表和被测设备所带高电压伤人。

(3) 如所测绝缘电阻过低, 应进行分解试验, 找出绝缘电阻最低的部分。

(4) 一般应在干燥、晴天、环境温度不低于 5°C 时进行测量。在阴雨潮湿的天气及环境湿度太大时, 不应进行测量。

(5) 测量绝缘的吸收比时, 应避免记录时间带来的误差。由上述可知, 变压器、发电机等设备绝缘的吸收比 $K = \frac{R_{60s}}{R_{15s}}$, 是用兆欧表在加压 15s 和 60s 时记录其绝缘电阻值后计算求得的。测量时, 流过绝缘的电流分量中漏导电流不随时间变化, 其值很小, 分析时可以略去; 充电电流在很短时间 (小于 1s) 内衰减到零, 也可以略去。随时间变化的主要分量是吸收电流 $I_x(t)$, 它与测量时间 t 的关系为

$$I_x(t) = At^{-n} \quad (1-3)$$

式中 A ——常数, 决定于被试品绝缘材料;

n ——指数。

由于 $R_{60s} = \frac{U}{A \times 60^{-n}}$, $R_{15s} = \frac{U}{A \times 15^{-n}}$, 则

$$K = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{\frac{U}{A} \times 60^n}{\frac{U}{A} \times 15^n} = 4^n$$

故

$$n = \frac{\lg \frac{R_{60s}}{R_{15s}}}{\lg 4} \quad (1-4)$$

试验时, 记录时间往往不是实际加压时间, 设记录时间与加压时间的绝对误差为 δ_t , 则此时测得的绝缘电阻 R' 为

$$R' = \frac{U}{A(a + \delta_t)^{-n}} = \frac{U}{A} (t + \delta_t)^n \quad (1-5)$$

而实际的绝缘电阻 R 为

$$R = \frac{U}{At^{-n}} = \frac{U}{A} t^n$$

由式 (1-4) 和式 (1-5) 计算出的绝缘电阻测量值的相对误差 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{R' - R}{R} = \frac{(U/A) (t + \delta_t)^n}{(U/A) t^n} - 1 = (1 + \frac{\delta_t}{t})^n - 1 = (1 + \Delta t)^n - 1 \quad (1-6)$$

式中 Δt ——测量时间的相对误差。

试验时, 时间记录往往不易准确, 兆欧表刻度展开时间一般 1~2s。若记录时间有 2s 误差, 则对 15s 而言, Δt 为 $\frac{2}{15} = 14\%$; 对 60s 而言, Δt 为 3% 左右。

若取吸收比 $K=2$, 则 $n=0.5$ 。因此, 当记录时间的相对误差为 2s 时, 对 15s 绝缘电阻的相对误差 $\Delta R_{15s} = (1 + 0.14)^{0.5} - 1 = 17\%$; 对 60s 绝缘电阻的相对误差 $\Delta R_{60s} = (1 + 0.03)^{0.5} - 1 = 1.5\%$ 。

由于 R_{60s} 和 R_{15s} 的相对误差引起的吸收比计算结果的误差可达 5%~9%, 这样, 在现场测量吸收比时, 往往导致测量结果重复性较差, 给测试结果分析带来困惑。因此, 应准确地自动记录 15s 和 60s 的时间。

若用极化指数来监测吸收过程, 上述误差可以忽略。

(6) 屏蔽环装设位置。为了避免表面泄漏电流的影响, 测量时应在绝缘表面加等电位屏蔽环, 且应靠近 E 端子装设。

(7) 兆欧表的 L 和 E 端子接线不能对调。用兆欧表测量电气设备绝缘电阻时, 其正确接线方法是 L 端子接被试品与大地绝缘的导电部分, E 端子接被试品的接地端。

(8) 兆欧表与被试品间的连线不能绞接或拖地, 否则会产生测量误差。

(9) 采取兆欧表测量时, 应设法消除外界电磁场干扰引起的误差。在现场, 有时在强磁场附近或在未停电的设备附近使用兆欧表测量绝缘电阻, 因为电磁场干扰也会引起很大的测量误差。引起误差的原因有:

1) 磁耦合。由于兆欧表没有防磁装置, 外磁场对发电机里的磁钢和表头部分的磁钢的磁场都会产生影响。当外界磁场强度为 400A/m 时, 误差为 $\pm 0.2\%$; 外界磁场愈强, 影响愈严重, 误差愈大。

2) 电容耦合。由于带电设备和被试设备之间存在耦合电容, 将使被试品中流过干扰电流。带电设备电压愈高, 距被试品愈近, 干扰电流愈大, 因而引起的误差也愈大。

消除外界电磁场干扰的办法是: ①远离强电磁场进行测量; ②采用高电压级的兆欧表, 例如使用 5000V 或 10000V 的兆欧表进行测量; ③利用兆欧表的屏蔽端子 G 进行屏蔽。

(10) 为便于比较, 对同一设备进行测量时, 应采用同样的兆欧表、同样的接线。当采用不同型式的兆欧表测绝缘电阻, 特别是测量具有非线性电阻的阀型避雷器时, 往往会出现很大的差别。

当用同一只兆欧表测量同一设备的绝缘电阻时, 应采用相同的接线; 否则将测量结果放在一起比较是没有意义的。

六、影响测试绝缘电阻的主要因素

(一) 湿度

随着周围环境的变化, 电气设备绝缘的吸湿程度也随着发生变化。当空气相对湿度增

大时,由于毛细管作用,绝缘物(特别是极性纤维所构成的材料)将吸收较多的水分,使电导率增加,降低了绝缘电阻的数值,尤其是对表面泄漏电流的影响更大。

(二) 温度

电气设备的绝缘电阻随温度变化而变化,其变化的程度随绝缘的种类而异。富于吸湿性的材料,受温度影响最大。一般情况下,绝缘电阻随温度升高而减小。这是因为温度升高时,加速了电介质内部离子的运行,同时绝缘内的水分,在低温时与绝缘物结合得较紧密。当温度升高时,在电场作用下水分即向两极伸长,在纤维质中,呈细长线状的水分粒子伸长,其电导增加。此外,水分中含有溶解的杂质或绝缘物内含有盐类、酸性物质,也使电导增加,从而降低了绝缘电阻。

由于温度对绝缘电阻值有很大影响,而每次测量又不能在完全相同的温度下进行,所以为了比较试验结果,我国有关单位曾提出过采用温度换算系数的问题,但由于影响温度换算的因素很多,如设备中所用的绝缘材料特性、设备的新旧、干燥程度、测温方法等,所以很难规定出一个准确的换算系数。目前我国规定了一定温度下的标准数值,希望尽可能在相近温度下进行测试,以减少由于温度换算引起的误差。

(三) 表面脏污和受潮

由于被试物的表面脏污或受潮会使其表面电阻率大大降低,绝缘电阻将明显下降,因此必须设法消除表面泄漏电流的影响,以获得正确的测量结果。

(四) 被试设备剩余电荷

对有剩余电荷的被试设备进行试验时,会出现虚假现象,由于剩余电荷的存在会使测量数据虚假地增大或减小。

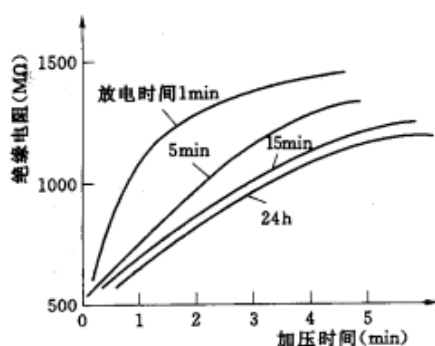


图 1-6 不同的放电时间后绝缘电阻与加压时间的关系曲线

因此,要求在试验前先充分放电 10min。图 1-6 示出了不同放电时间后,绝缘电阻与加压时间的关系。

剩余电荷的影响还与试品容量有关,若试品容量较小时,这种影响就小得多了。

(五) 兆欧表容量

实测表明,兆欧表的容量对绝缘电阻、吸收比和极化指数的测量结果都有一定的影响。兆欧表容量愈大愈好。考虑到我国现有一般兆欧表的容量水平,推荐选用最大输出电流 1mA 及以上的兆欧表,这样可以得到较准确的测量结果。

七、测量结果

各种电力设备的绝缘电阻允许值,见相关规程规定。

将所测得的结果与有关数据比较,这是对实验结果进行分析判断的重要方法。通常用来作为比较的数据包括:同一设备的各相间的数据、出厂试验数据、耐压前后数据等。如发现异常,应立即查明原因或辅以其他测试结果进行综合分析、判断。

电气设备的绝缘电阻不仅与其绝缘材料的电阻系数 ρ 成正比,而且还与其尺寸有关。

它们的关系可用 $R = \rho \frac{L}{S}$ 来表示。即使是同一工厂生产的两台电压等级完全相同的变压器，绕组间的距离 L 大致相等，其中的绝缘材料相同，但若它们的容量不同，则会使绕组表面积 S 不同，容量大者 S 值大。这样它们的绝缘电阻就不相同，容量大者绝缘电阻小。因此，即使是同一电压等级的设备，简单地规定绝缘电阻允许值也是不合理的，而应采用科学的“比较”方法，所以在规程中一般不具体规定绝缘电阻的数值，而强调“比较”，或仅规定吸收比与极化指数等指标。

对于吸收过程较长的大容量设备，如大型变压器、发电机、电缆等，有时用 R_{60s}/R_{15s} 吸收比值不足以反映绝缘介质的电流吸收全过程，为更好地判断绝缘是否受潮，可采用较长时间的绝缘电阻比值进行衡量，称为绝缘的极化指数，表示为

$$K_2 = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} \quad (1-7)$$

式中 K_2 ——极化指数；

R_{10min} ——加压 10min 时测的绝缘电阻， Ω ；

R_{1min} ——加压 1min 时测的绝缘电阻， Ω 。

极化指数测量加压时间较长，用手摇兆欧表很难控制转速稳定，一般采用电动兆欧表测量。测定的电介质吸收比率与温度无关，变压器的极化指数一般应大于 1.5，绝缘较好时其值可达 3~4。

第二节 泄漏电流和直流耐压试验

一、泄漏电流

由于绝缘电阻测量的局限性，所以在绝缘试验中就出现了测量泄漏电流的项目。关于泄漏电流的概念在第一节中已加以说明。测量泄漏电流所用的设备要比兆欧表复杂，一般用高压整流设备进行测试。由于试验电压高，所以就容易暴露绝缘本身的弱点，用微安表直测泄漏电流，就可以随时进行监视，灵敏度高。并且可以用电压和电流、电流和时间的关系曲线来判断绝缘的缺陷。因此，它属于非破坏性试验。

因为电压是分阶段地加到绝缘物上，所以可以对电压进行控制。当电压增加时，薄弱的绝缘将会出现大的泄漏电流，也就是得到较低的绝缘电阻。

(一) 泄漏电流的特点

测量泄漏电流的原理和测量绝缘电阻的原理，本质上是完全相同的，而且能检出缺陷的性质也大致相同。但由于泄漏电流测量中所用的电源一般均由高压整流设备供给，并用微安表直接读取泄漏电流，因此，它与绝缘电阻测量相比又有自己的以下特点：

(1) 试验电压高，并且可随意调节。测量泄漏电流是对一定电压等级的被试设备施以相应的试验电压，这个试验电压比兆欧表额定电压高得多，所以容易使绝缘本身的弱点暴露出来。

(2) 泄漏电流可由微安表随时监视，灵敏度高，测量重复性也较好。

(3) 根据泄漏电流测量值可以换算出绝缘电阻值，而用兆欧表测出的绝缘电阻值则无

法换算出泄漏电流值。因为要换算首先要知道加到被试设备上的电压是多少，兆欧表虽然在铭牌上刻有规定的电压值，但加到被试设备上的实际电压并非一定是此值，而与试设备绝缘电阻的大小有关。当被试设备的绝缘电阻很低时，作用到被试设备上的电压也非常低，只有当绝缘电阻趋于无穷大时，作用到被试设备上的电压才接近于铭牌值。这是因为被试设备绝缘电阻过低时，兆欧表内阻压降使“线路”端子上的电压显著下降。

(4) 可以用 $i=f(u)$ 或 $i=f(t)$ 的关系曲线并测量吸收比来判断绝缘缺陷。泄漏电流与加压时间的关系曲线如图 1-7 所示。在直流电压作用下，当绝缘受潮或有缺陷时，电流随加压时间下降得比较慢，最终达到的稳态值也较大，即绝缘电阻较小。

(5) 测量原理。当直流电压加于被试设备时，其充电电流（几何电流和吸收电流）随时间的增加而逐渐衰减至零，而泄漏电流保持不变。故微安表在加压一定时间后其指示数值趋于恒定，此时读取的数值则等于或近似等于漏导电流即泄漏电流。

对于良好的绝缘，其漏导电流与外加电压的关系曲线应为一直线。但是实际上的漏导电流与外加电压的关系曲线仅在一定的电压范围内才是近似直线，如图 1-8 中的 OA 段所示。若超过此范围后，离子活动加剧，此时电流的增加要比电压增加快得多，如 AB 段，到 B 点后，如果电压继续增加，则电流将急剧增长，产生更多的损耗，以致绝缘被破坏，发生击穿。

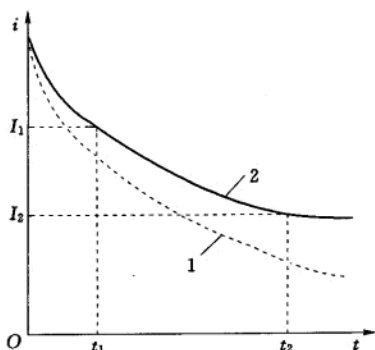


图 1-7 泄漏电流与加压时间的关系曲线

1—良好；2—受潮或有缺陷

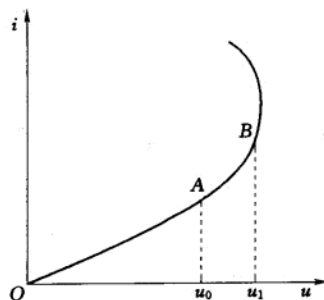


图 1-8 绝缘的伏安特性

在预防性试验中，测量泄漏电流时所加的电压大都在 A 点以下，故对良好的绝缘，其伏安特性 $i=f(u)$ 应近似于直线。当绝缘有缺陷（局部或全部）或有受潮的现象存在时，则漏导电流急剧增长，其伏安特性曲线就不再是直线。因此，可以通过测量泄漏电流来判断绝缘是否有缺陷或是否受潮。

将直流电压加到绝缘上时，其泄漏电流是不衰减的，在加压到一定时间后，微安表的读数就等于泄漏电流值。绝缘良好时，泄漏电流和电压的关系几乎呈一直线，且上升较小；绝缘受潮时，泄漏电流则上升较大；当绝缘有贯通性缺陷时，泄漏电流将猛增，和电压的关系就不是直线了。因此，通过泄漏电流和电压之间变化的关系曲线就可以对绝缘状态进行分析判断。在图 1-9 和图 1-10 中绘出了泄漏电流和电压及时间的关系曲线。