减少大容量变压器绕组直流电阻测量时间的研究

刘大源
（大唐南京发电厂 江苏 南京 210046）

摘要：大型变压器的直流电阻测量是一项比较消耗时间的试验项目。快速测量出绕组的直流电阻，对提高电气试验工作效率具有非常重要的意义。本文通过对测试仪器、测试接线及方法的论证，分析减小测量直流电阻测试时间应采用的接线方法，最后对 220kV 大容量的油浸式变压器进行直流电阻测量试验，对比了不同方法下的测试时间。

关键词：变压器；直流电阻；测量；时间

0 引言

广泛用于电力生产的大容量油浸式变压器多采用三相双绕组 Y/△接线。大容量油浸式变压器的绕组直流电阻测量是必做的试验项目之一。通过测量绕组直流电阻，可以检查绕组接头焊接不良、匝间绝缘不良、分接头移位、绕组引出线折断等异常情况，快速测量出变压器的直流电阻，提高试验人员的工作效率，及时诊断变压器的实际状况。

1 变压器绕组直流电阻测量原理

变压器绕组近似为大电感元件，可以等效为直流电阻 R 和绕组电感 L。令某一时刻流过绕组的电压为 u、电流为 i，则有：

$$u = iR + \frac{di}{dt}L \tag{1}$$

$$i = \frac{u}{R}\left(1 - e^{-\frac{\tau}{t}}\right) \tag{2}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{3}$$

式中：t —时间；

τ —时间常数。

当绕组储能完成后，通过计算可以得到直流电阻值 R。一般情况下，在测量时间为 5τ ～ 6τ 时，直流电阻测试值趋近稳定值。在实际情况中，直流电阻测试值是处于波动状态并逐渐达到最终的稳定值的。选择专用于大型变压器的直流电阻测试仪，可提高测量的准确性、快速性和可靠性。而电路达到稳定时间的长短取决于时间常数 τ 值的大小。为了进一步缩短直流电阻的测量时间，应使 τ 值减小。

2 大型变压器直流电阻测量方法

2.1 变压器 Y 侧直流电阻的测量

图 1 所示为测量变压器 Y 侧绕组直流电阻原理图。变压器的△侧三相绕组为闭合回路。当 Y 侧绕组进行直流电阻测量时，变压器铁芯内部逐渐产生稳定的磁场。△侧三相绕组均有感应电流产生，感应电流会产生反相磁场，能起到一定的消磁作用。

令三相绕组阻抗相等，则 Y 侧直流电阻和电感分别为：

$$R_1 = R_A \qquad L_1 = L_A + M_n \tag{4}$$

式中，M_n 为互感量，由△侧绕组消磁作用产生。绕组耦合作用越强，互感量越高。在△侧绕组出线开路时，△侧电感为：

$$L_2 = L_a + L_b + L_c = 3L_a \tag{5}$$

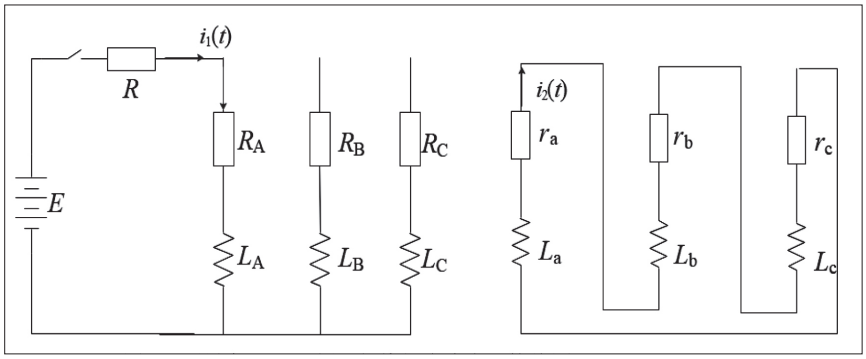

图 1 测量变压器 Y 侧一相绕组直流电阻接线图

在绕组间完全耦合没有漏磁通的情况下，互感量 M_1 及时间常数 τ_1 为：

$$M_1=\sqrt{L_A\cdot 3L_a}=\sqrt{3L_AL_a} \tag{6}$$

$$\tau_1=\frac{L_1}{R_1}=\frac{L_A+\sqrt{3L_AL_a}}{R_A} \tag{7}$$

当△侧绕组三相短路时，测量 Y 侧一相绕组直流电阻接线如图 2 所示。

令绕组三相阻抗相等，则△侧电感为：

$$L_2=L_a \tag{8}$$

绕组完全耦合没有漏磁通的情况下，互感量 M_2 及时间常数 τ_2 为：

$$M_2=\sqrt{L_AL_a} \tag{9}$$

$$\tau_2=\frac{L_A+\sqrt{L_AL_a}}{R_A} \tag{10}$$

当采用 Y 侧绕组两相接线时，测量 Y 侧一相绕组进行直流电阻接线如图 3 所示。令绕组三相阻抗相等，则 Y 侧直流电阻、电感及△侧电感分别为：

$$R_1=R_A+R_B=2R_A \tag{11}$$

$$L_1=L_A+L_B+M_3=2L_A+M_3 \tag{12}$$

$$L_2=3L_a \tag{13}$$

绕组完全耦合没有漏磁通的情况下，互感量 M_3 时间常数 τ_3 为：

$$M_3=\sqrt{2L_A\cdot 3L_a}=\sqrt{6L_AL_a} \tag{14}$$

$$\tau_3=\frac{2L_A+\sqrt{6L_AL_a}}{2R_A}=\frac{L_A+\sqrt{\frac{3}{2}L_AL_a}}{R_A} \tag{15}$$

对比三种测量方法，采用△侧绕组三相出线短路接线法，时间常数 τ_2 最小，理论上测试时间相对较短。

2.2 变压器△侧直流电阻的测量

图 4 所示为测量变压器△侧一相绕组直流电阻的接线图。

若绕组三相阻抗相等，则△侧直流电阻和电感分别为：

$$R_2=\frac{(r_b+r_c)\cdot r_a}{r_a+r_b+r_c}=\frac{2}{3}r_a \tag{16}$$

$$L_2=\frac{(L_b+L_c)\cdot L_a}{L_a+L_b+L_c}+M_4=\frac{2}{3}L_a+M_4 \tag{17}$$

当 Y 侧绕组开路时，三相绕组无法构成回路，不具备实现消磁作用的能力，互感量 M_4 为 0。绕组完全耦合没有漏磁通的情况下，时间常数 τ_4 为：

$$\tau_4=\frac{L_2}{R_2}=\frac{L_a}{r_a} \tag{18}$$

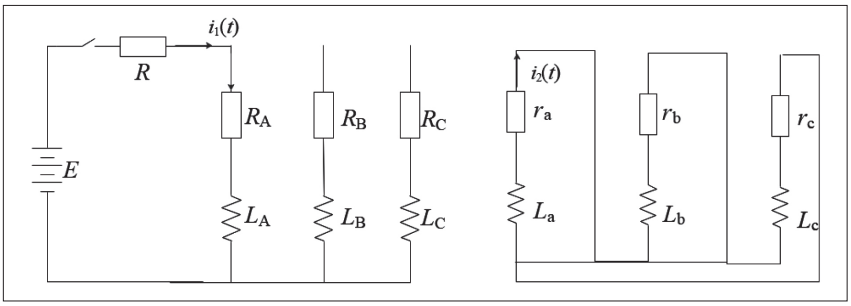

图 2 △侧绕组三相短路

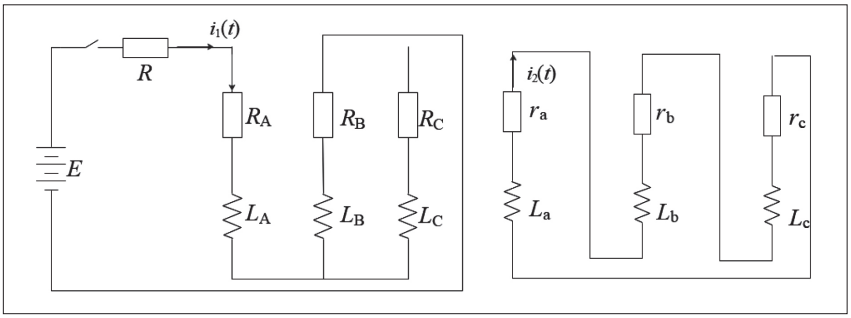

图 3 Y 侧绕组两相充电

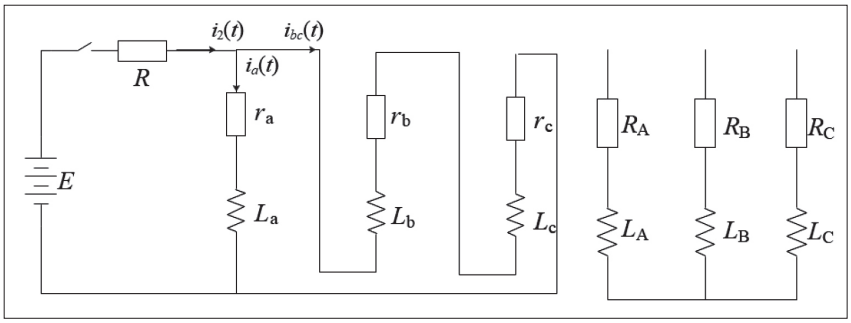

图 4 测量变压器△侧绕组直流电阻接线图

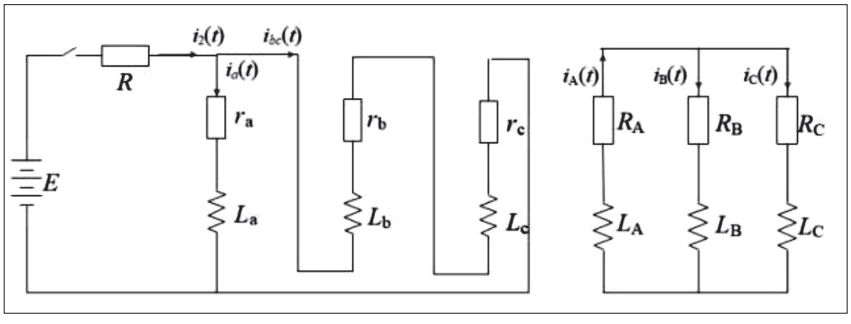

图 5 Y 侧绕组三相短路接线图

如图 5 所示为 Y 侧绕组三相短路时，△侧绕组直流电阻测量接线图。

若绕组三相阻抗相等，则 Y 侧电感为：

$$L_1 = \frac{(L_B + L_C)\cdot L_A}{L_A + L_B + L_C} = \frac{2}{3}L_A \tag{19}$$

在组间完全耦合没有漏磁通的情况下，每一相的互感量相等，则互感量 M_5 和时间常数 τ_5 为：

$$M_5 = \sqrt{\frac{2}{3}L_A \cdot \frac{2}{3}L_a} = \frac{2}{3}\sqrt{L_A L_a} \tag{20}$$

$$\tau_5 = \frac{\frac{2}{3}L_a + M_5}{\frac{2}{3}r_a} = \frac{L_a + \sqrt{L_A L_a}}{r_a} \tag{21}$$

助磁法是通过铁芯磁路，使变压器绕组相互充磁的方法，多用于测量高低压绕组采用不同接线组别的变压器。如图 6 所示为在采用助磁法测量 R_a 接线图。通过将 Y 侧 B、C 两相并联后再与 A 串联，再串联入△侧绕组测量回路。此时△侧绕组与 Y 侧绕组三相电流方向相同，互感量与 Y 侧三相短路时相同。若绕组三相阻抗相等，在组间完全耦合没有漏磁通的情况下，△侧绕组的电感应为：

$$L_2 = \frac{2}{3}L_a - M_5 \tag{22}$$

时间常数 τ_6 为：

$$\tau_6 = \frac{\frac{2}{3}L_a - M_5}{\frac{2}{3}r_a} = \frac{L_a + \sqrt{L_A L_a}}{r_a} \tag{23}$$

对比三种测量方法，采用 Y 侧绕组助磁法接线，时间常数最小，理论上测试时间相对较短。

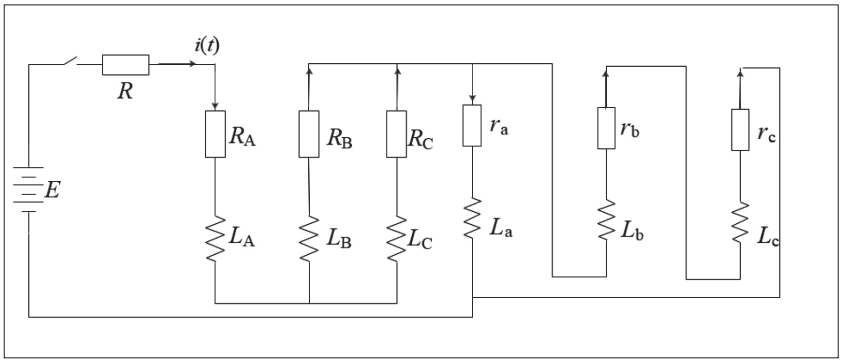

图 6 助磁法接线图

3 试验验证

取型号铭牌如表 1 所示的大容量变压器，进行同一相绕组的直流电阻测试。

该变压器高压绕组为 Y 接法，记录直流电阻数值和测量时间，数据如表 2 所示。

该变压器低压绕组为△接法，记录直流电阻数值和测量时间，数据如表 3 所示。

根据表 2 和表 3 的数据可知，随着测试电流档位的增大，测试时间逐渐缩短。在进行 Y 绕组直流电阻测量时，△绕组出线短路有利于减少测量时间。在进行△绕组直流电阻测量时，Y 绕组助磁法有利于减少测量时间。前期理论分析与试验结果一致，理论分析结果可行。

4 结语

为了减少大容量三相双绕组 Y/△接线变压器直流电阻测量时间：测量 Y 绕组直流电阻时，应采用△绕组出线短路的方法；测量△绕组直流电阻时，应采用 Y 绕组助磁的方法。通过对 220kV 大容量油浸式变压器绕组直流电阻的测试，试验结果与理论分析计算结果一致。采

表 1 变压器铭牌

型号	SFP-780000/220	额定容量	780000kVA
电压组合	（242±2×2.5%）/20kV	额定电流	1815.5/22516.7A
联接组别	YNd11	生产日期	2009.11

表 2 Y 绕组直流电阻测量数据

电流档位	5A 档		10A 档		20A 档	
测试项目	测量值 / Ω	时间 /s	测量值 / Ω	时间 /s	测量值 / Ω	时间 /s
低压侧开路高压侧接一相	0.04605	220	0.04604	192	0.04603	135
低压侧短路高压侧接一相	0.04606	167	0.04605	145	0.04604	71
低压侧开路高压侧接两相	0.09212	206	0.09210	179	0.09212	104

表 3 △绕组直流电阻测量数据

电流档位	5A 档		10A 档		20A 档	
测试项目	测量值 / Ω	时间 /s	测量值 / Ω	时间 /s	测量值 / Ω	时间 /s
高压侧开路	0.0007127	2226	0.0007124	1858	0.0007124	1650
高压侧短路	0.0007125	2450	0.0007125	2160	0.0007123	1894
高压侧助磁	0.0007126	1805	0.0007124	1450	0.0007123	1235

用这两种方法可明显减少测量时间，提高工作效率。

参考文献：

[1] 曲晓峰，李贻凯．大型变压器低压绕组直流电阻测试时间过长问题的研究 [J]．电气技术，2015(11)：12-15.

[2] 李维波，毛承雄，陆继明，等．电力设备直流电阻测量用恒流源研究 [J]．电力自动化设备，2003，23(5)：63-66.

[3] 李珂．快速测量变压器绕组直流电阻实例探讨 [J]．水电与新能源，2011(6)：1-3.

作者简介：刘大源（1989.01-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：高压试验。

征 稿 启 事

《中国机械》(Machine China) 杂志，1982 年创刊于北京，由中国工业经济联合会主管，中国工业报社主办，是经国家新闻出版总署批准登记的机械工业类学术期刊（旬刊），系万方数据全文收录期刊。国内统一刊号：CN11-5417/TH；国际标准刊号：ISSN 1003-0085； 邮发代号：28-165。

《中国机械》杂志定位于成为机械工业领域产学研用协同创新平台，顺应大机械学科发展趋势，主要刊发机械工程领域及其交叉学科具有创新性的应用研究，进而推动机械工程技术进步的优秀科研成果，兼顾基础研究领域对科技创新有前瞻性和重大影响的基础理论研究，引领机械工程学科发展。杂志主要服务机械工业主管部门、行业组织、科研院所、制造企业，以及各相关企事业单位等，以管理者、中高层技术人员、经理人为主。

◆ 栏目设置 ◆

本刊特稿：发表有较高价值的应用研究论文，理论上有深度或前瞻性的研究论文，以及技术创新、政策解读和市场调研等方面的热点焦点综述文章。
机械制造与智能化：发表机械制造技术、工艺、智能及自动化等科技论文。
工业设计：发表机械设计、产品设计、造型设计、环境设计、建筑设计、传播设计和设计管理等科技论文。
工业互联网：工业系统与高级计算、分析、感应技术以及互联网连接融合、软件和大数据分析，数字设计等科技论文。
先进材料技术：发表高性能结构材料、功能材料、关键原材料与先进制造业结合相关科技论文。
先进动力与能源技术：先进及新型动力系统相关技术研究论文。
现代交通技术：立足综合交通运输技术，主要刊发道路工程机械、桥隧工程机械、交通工程机械、港航工程机械、轨道交通装备等领域的科研文章。
可持续环境工程：发表环保机械、环保工程相关科技论文。
机械工业：发表农业机械、工程机械、内燃机、仪器仪表、石油化学通用机械、机床工具、汽车、重型矿山机械、文化办公设备、电工电器、食品包装机械、其他民用机械，以及增材制造等行业领域的科技应用论文。
市场与管理：发表机械工业相关的市场分析、管理提升等学术论文。
质量与标准：发表机械工业相关企事业单位的质量管理、体系建设及相关产品标准、故障诊断等科技论文。
安全与生产：发表机械设备制造、施工及使用过程中安全与生产等科技论文。
职业教育：发表机械行业相关院校职业教育、学生就业、创业等相关文章。
首台套：发布首台套重大工业技术装备有关技术突破、功能创新、用户反馈等相关文章。

◆ 征稿要求 ◆

1、**本着尊重原创、严禁抄袭的原则。**
2、**文章格式采用 GB7713-87，科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式。**
3、**稿件的结构组成，按次序排列为：题名、作者署名、作者工作单位名称、第一作者工作单位所在省、市及邮编；摘要、关键词；引言、正文、结语；基金项目（可选）、参考文献（必选）及作者简介（可选）。**
（1）题名：符合学术期刊论文标题要求，简单明了概括文章主题，一般不超过 15 个字。
（2）作者署名及工作单位：所有文章须 2 版起发，2 版论文的作者数量不应超过 3 位；4 位作者的论文起发版面数为 3 版；5 位作者的论文起发版面数为 4 版，依此类推。多位作者分属不同工作单位的，须明确标记。
（3）摘要：摘要应具有独立性和自含性，即不阅读论文的全文，就能获得必要的信息。摘要一般应说明研究工作的目的、实验方法、结果和结论等，重点是结果和结论。以 200 ~ 300 字为宜，用第三人称写，尽量不重复题名中已有信息。不出现插图、表格、公式及参考文献序号等。
（4）关键词：每篇论文选取 3 ~ 6 个单词或术语作为关键词。
（5）正文：撰写论文时，不同级别标题可采用阿拉伯数字 1，1.1,1.2,1.3.....2，2.1,2.2,2.3..... 标示。结语部分不能重复正文内容，如果层次分明，可以编号 (1)、(2) 等分条来撰写。
（6）参考文献：参考文献须按照 GB-T7714 - 2005 标准编写。所引用的文献及对应的刊物需具有较高的学术质量。作者一律姓前名后（外文作者名应缩写），多位作者间用“，”间隔。凡参考过本刊论文的，请切记标注在参考文献中。
（7）作者简介：须按照统一格式编写：姓名（出生年 . 月 -），性别，民族，籍贯，最高学历，职称，研究方向：具体专业（不超过 10 个字为宜）。
注：
1、作者所投论文是否满足要求，以《中国机械》编辑部审核意见为准，编辑部拥有稿件的惟一最终审核权。
2、文章一旦被录用，除特殊原因不允许无故撤稿。同时，不允许再行增减作者或变更原作者顺序，否则一律视为作者主动撤稿，该稿将不再录用。
3、作者在收到稿件录用通知后，如主动撤稿并易名再投，一经发现，将被纳入本刊敏感作者名单，相关稿件均不再录用。
4、对于未通过本刊初审，二次投稿依然不能通过审核的稿件，一律做退稿处理，不再录用。
5、针对每一篇论文，编辑部将免费赠送一本发表该论文的期刊，如需更多请联系编辑部预定。

◆ 权利和责任约定 ◆

1. 作者在投稿时视同同意向《中国机械》编辑部授予论文著作权专有许可使用和独家代理授权书，包括授权以电子出版物形式出版发布。
2. 编辑部收到稿件后，将按照工作流程对稿件进行处理。
3. 稿件需经本刊编辑和审稿专家审核，一经录用则依照编辑部出版流程依序刊登出版。如果作者想撤稿或改投其他刊物，需向本刊提出申请，已定稿、进入了出版流程的稿件，作者需承担相应的责任和费用。
4. 本刊只接收作者原创、未公开发表过的论文，对存在抄袭剽窃、一稿多投等学术不端现象的论文，编辑部将严肃处理。