

串联附加电感的电感测量方法

梁志瑞, 牛胜锁

(华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 介绍一种快速测量发电机、变压器等感性绕组电感的方法, 即采用同一化方法并进行动态测量。在测量回路中串联一个附加电感, 同时对被测电感和附加电感进行动态测量, 然后将结果相除, 使得无需求解电流导数值, 消除了由于采用离散采样的数值微分法近似求解电流导数值带来的误差。经计算机仿真, 证明了其准确性。

关键词: 感性绕组; 电感测量; 同一化原理; 附加电感

中图分类号: TM 934.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0094-02

测量变压器、发电机、大型电动机和电抗器等设备的电感值在电力系统电气设备状态检修等实际工作中具有重要的意义。传统方法由于使用测量仪器较多, 操作起来较为不便, 本文应用同一化方法^[1]进行动态测量^[1], 分析和解决了电感测量方法实施中存在的困难。

1 传统的电感测量方法及其存在问题

传统的电感测量接线原理见图 1。

R 和 L 为被测变压器绕组的电阻和电感, 利用电感线圈充电过程中的电压、电流数据测算其电感等参数值, 当开关 S_1 闭合后电路开始充电, 充电过程中 t_1 及 t_2 时刻应分别满足下面两个方程:

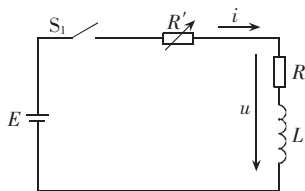


图 1 动态测量接线原理图

Fig.1 The principle circuit of dynamic measurement

$$u(t_1) = Ri(t_1) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_1} \quad (1)$$

$$u(t_2) = Ri(t_2) + L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_2} \quad (2)$$

式中除绕组的电阻 R 和电感 L 外, 其余各参数直接测得或间接求得。联立两式就可求出:

$$L = \frac{u(t_1)i(t_2) - u(t_2)i(t_1)}{i(t_2) \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_1} - i(t_1) \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_2}} \quad (3)$$

式(3)分母中含有电流导数值, 而电流导数值采用离散采样的数值微分法近似求解, 给测量结果带来了较大的误差^[1]。

2 引入电流导数比值的电感测量方法

为了解决用式(3)求解存在的问题, 对测量方法作以下改进, 接线原理图见图 2。

图 2 中 R 和 L 为被测变压器绕组的电阻和电感, E' 和 R' 为测量时外接的可调节大小的电压源和电阻, 作者应用了“同一化”原理^[1], 即通过改变外电源

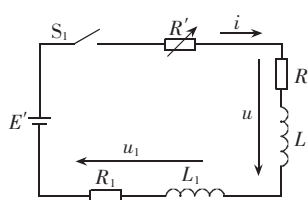


图 2 改进测量方法接线原理图

Fig.2 The principle circuit of improved measurement

电压和外串电阻的阻值, 达到不论试品参数如何, 其充电回路电流曲线完全一样(总回路的时间常数 τ 及稳态电流 I 完全一样)从而提高测量精度。 R_1 和 L_1 为外接附加电感的电阻值和电感值, 其大小为已知。 u_1 为 R_1 和 L_1 上的电压, 它们有如下关系:

$$u_1(t_1) = R_1 i(t_1) + L_1 \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_1} \quad (4)$$

$$L_1 = [u_1(t_1) - R_1 i(t_1)] / \left. \frac{di}{dt} \right|_{t_1} \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可得:

$$\frac{L}{L_1} = \frac{u(t_1)i(t_2) - u(t_2)i(t_1)}{u_1(t_1)i(t_2) - u_1(t_2)i(t_1)} \times \frac{\left. \frac{di}{dt} \right|_{t_1}}{\left. \frac{di}{dt} \right|_{t_2}} = K_1 \quad (6)$$

则

$$L = K_1 L_1 \quad (7)$$

对同一条指数曲线, 当离散采样时间间隔恒定时, 任意两点的数值微分之比值 $((y'|_{t_1})/(y'|_{t_2}))$ 的误差为零^[2], 因此式(7)中导数值虽有误差, 但对 L 的计算结果不引入任何误差, 即式(7)的理论误差为零。

3 无导数因子的电感测量法

3.1 一般情况

接线原理图见图 2。

与式(3)同理, 对 L_1 同样有下式:

$$L_1=\frac{u_1(t_1)i(t_2)-u_1(t_2)i(t_1)}{i(t_2)\frac{di}{dt}\Big|_{t_1}-i(t_1)\frac{di}{dt}\Big|_{t_2}} \tag{8}$$

由式(3)与式(8)之比可得:

$$\frac{L}{L_1}=\frac{u(t_1)i(t_2)-u(t_2)i(t_1)}{u_1(t_1)i(t_2)-u_1(t_2)i(t_1)}=K_2 \tag{9}$$

则

$$L=K_2L_1 \tag{10}$$

3.2 外电源电压恒定(“同一化”后为定值)

接线原理见图 2,列写整个回路在两个时刻的状态方程,类似于式(1)~(3),易得:

$$L+L_1=\frac{E'i(t_2)-E'i(t_1)}{i(t_2)\frac{di}{dt}\Big|_{t_1}-i(t_1)\frac{di}{dt}\Big|_{t_2}} \tag{11}$$

由式(3)(11)可得:

$$\frac{L}{L+L_1}=\frac{u(t_1)i(t_2)-u(t_2)i(t_1)}{E'[i(t_2)-i(t_1)]}=K_3 \tag{12}$$

则

$$L=K_3L_1/(1-K_3) \tag{13}$$

这样在知道了 E' 后就可以不测 u_{10} 。

3.3 第一测量点为零时刻

将测量回路闭合瞬间设为计时起点 $t=0$,若第一采样点为 $t_1=0$,由于是电感回路,则:

$$i(t_1)=i(0)=0$$

此时, $K_2=u(t_1)/u_1(t_1)$, $K_3=u(t_1)/E'$, 故得:

$$L=[u(t_1)/u_1(t_1)]L_1 \tag{14}$$

或

$$L=\{u(t_1)/[E'-u(t_1)]\}L_1 \tag{15}$$

总之,上面 3 种情况都不用测量电流导数值,不但减少了测量数据,更重要的是大大降低了计算误差,提高了测量结果的准确性。

4 计算机仿真测试

为了校核上面所述的变压器电感动态测量法的快速准确性及对各种变压器的通用性,作者针对各电压等级较典型的变压器参数(见表 1),用上述各种方法,即用式(3)(7)(10)(13)求解,分别对应 L_1,L_2,L_3,L_4 ,在计算机上进行了仿真测试。

表 1 被测变压器数据

Tab.1 The parameters of transformer tested

序号	型号	U_N/kV	U/kV	R/Ω	L/H
1	SJL-560/10	10/0.4	10.0	2.742 00	9.47
2	SJL-2000/35	35/10.5	35.0	7.350 00	162.47
3	SJL ₄ -4000/110	110/11	110.0	1.543 00	137.56
4	SSPL ₄ -150000/220	242/13.8	242.0	2.320 00	310.67
5	250 MV·A/500 kV	550/220/15.7	15.7	0.002 88	3.75

注: U_N 为额定电压; U 为被测试侧电压; R,L 分别为变压器电阻和电感。

- 仿真测试有如下具体步骤。
- a. 按接线原理图接线并求 E' 及 R' 的同一化值^[2]。
- b. 按 a 求得的 E' 及 R' 值将之调整好,合上电源开关 S_1 ,对每种方法分别采样,按式(3)(7)(10)(13)计算电感值。

等时间间隔对电流和电压采样,对于电流导数值由下式得出:

$$\Delta i_{m+1}=(i_{m+1}-i_m)/\Delta t \tag{16}$$

式中 m 为采样序号; i_m 为采样点的电流值; Δt 为两采样点之间的时间间隔。

对每一试品用每种方法测 4 个电感值。被试变压器的数据及利用本法的仿真测试结果分别见表 1 及表 2。

表 2 仿真测试结果

Tab.2 The simulative results

序号	L_1/H	$\varepsilon_1/\%$	L_2/H	$\varepsilon_2/\%$	L_3/H	$\varepsilon_3/\%$	L_4/H	$\varepsilon_4/\%$
1	4.359 67	-53.963	9.470 00	-1.875 77×10 ⁻¹⁴	9.470 00	0	9.470 00	3.563 96×10 ⁻¹³
	4.201 86	-55.629	9.469 99	1.538 13×10 ⁻¹²	9.469 99	-1.875 77×10 ⁻¹³	9.470 00	4.445 58×10 ⁻¹²
	4.198 65	-55.663	9.469 99	-4.333 03×10 ⁻¹²	9.470 00	8.440 97×10 ⁻¹³	9.470 00	5.518 52×10 ⁻¹³
	4.198 58	-55.664	9.469 99	-2.501 99×10 ⁻⁹	9.469 99	-6.587 71×10 ⁻¹¹	9.469 99	-2.085 80×10 ⁻⁸
2	57.753 71	-64.452	162.470 00	-1.224 54×10 ⁻¹³	162.470 00	0	162.470 00	1.889 29×10 ⁻¹²
	29.010 13	-82.144	162.469 99	-3.323 76×10 ⁻¹³	162.470 00	3.498 70×10 ⁻¹⁴	162.470 00	1.889 29×10 ⁻¹²
	21.333 06	-86.869	162.469 99	-6.647 53×10 ⁻¹³	162.470 00	3.498 70×10 ⁻¹⁴	162.470 00	7.434 74×10 ⁻¹²
	17.906 63	-88.978	162.469 99	-1.189 55×10 ⁻¹²	162.470 00	-1.749 35×10 ⁻¹⁴	162.469 99	-7.364 76×10 ⁻¹²
3	48.605 10	-64.666	137.560 00	8.264 52×10 ⁻¹⁴	137.560 00	2.066 13×10 ⁻¹⁴	137.560 00	1.198 35×10 ⁻¹²
	24.060 60	-82.509	137.560 00	-2.685 97×10 ⁻¹³	137.560 00	-2.066 13×10 ⁻¹⁴	137.559 99	-1.157 03×10 ⁻¹²
	17.473 79	-87.297	137.560 00	1.508 27×10 ⁻¹²	137.560 00	-2.066 13×10 ⁻¹⁴	137.560 00	1.198 35×10 ⁻¹⁴
	14.508 85	-89.452	137.559 99	-5.371 94×10 ⁻¹³	137.560 00	0	137.560 00	7.479 39×10 ⁻¹⁴
4	107.975 47	-65.244	310.670 00	-9.148 52×10 ⁻¹⁴	310.670 00	-1.829 70×10 ⁻¹⁴	310.670 00	1.061 22×10 ⁻¹⁴
	51.339 54	-83.474	310.669 99	-3.110 49×10 ⁻¹³	310.670 00	1.829 70×10 ⁻¹⁴	310.669 99	-2.433 50×10 ⁻¹²
	35.989 77	-88.415	310.670 00	1.591 84×10 ⁻¹²	310.670 00	3.659 40×10 ⁻¹²	310.670 00	8.050 69×10 ⁻¹²
	28.951 36	-90.680	310.669 99	-2.561 58×10 ⁻¹²	310.670 00	-1.829 70×10 ⁻¹⁴	310.670 00	1.154 54×10 ⁻¹²
5	1.606 46	-57.161	3.750 00	0	3.750 00	0	3.750 00	1.065 81×10 ⁻¹²
	1.588 03	-57.652	3.749 99	-4.879 06×10 ⁻¹²	3.750 00	-4.736 95×10 ⁻¹²	3.749 99	-4.610 23×10 ⁻¹¹
	1.587 92	-57.655	3.750 00	1.302 66×10 ⁻¹¹	3.750 00	1.768 06×10 ⁻¹¹	3.749 99	3.749 99×10 ⁻⁹
	1.587 92	-57.655	3.750 00	2.301 87×10 ⁻⁹	3.749 99	-1.407 72×10 ⁻⁹	3.750 00	7.731 693×10 ⁻⁹

注: $L_1,L_2,L_3,L_4;\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3,\varepsilon_4$ 分别为测试出的电感及其相对误差。

5 结论

- a. 动态测量方法及“同一化”原理为实现感性绕组电感量的快速、准确测量奠定了基础。
- b. 附加电感的引入简化了测量和计算,是找到一种简单、快速而又准确测量感性绕组电感量的关键。
- c. 本文方法可用于测量发电机、变压器、电抗器等电力设备在受到短路故障电流冲击后的变形量,是电气设备故障诊断的一种有效方法。

参考文献:

[1] 梁志瑞,盛四清,赵书强,等. 基于同一化方法的绕组直流电阻测量方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):42-44.
LIANG Zhi-rui,SHENG Si-qing,ZHAO Shu-qiang,*et al.* A new method for measuring direct current resistances of inductive coils [J]. **Automation of Electric Power Sys-**

tems,2001,25(10):42-44.
[2] 梁志瑞,米增强,张建成. 大电感类电器设备参数动态测量的研究[J]. 电工技术杂志,1998,(5):41-43.
LIANG Zhi-rui,MI Zeng-qiang,ZHANG Jian-cheng. Dynamic measurement research for the parameters of electrical equipment with large inductance [J]. **Electrotechnical Journal**,1998,(5):41-43.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

梁志瑞(1959-),男,河北磁县人,教授,中国电机工程学会城市供电专委会委员,从事电力系统自动化、电气设备参数测量技术及故障分析的教學与研究工作;
牛胜锁(1980-),男,河北高邑人,硕士研究生,研究方向为电力系统设备参数的自动测量(E-mail:nss8@sina.com.cn)。

Inductance measuring using series additional inductance

LIANG Zhi-rui,NIU Sheng-suo

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: An approach to fast inductance measuring for generator and transformer is presented, in which the identification principle and dynamic measuring are adopted. A series additional inductance is introduced in the measurement circuit,which is dynamicly measured together with the transformer inductance. The ratio of two measurement results makes solution of current derivative value needless.Thus the error of current derivative value induced by numerical differentiation method with discrete sampling data is eliminated. The simulation on computer verifies its veracity.
Key words: inductive coils; inductance measuring; identification principle; additional inductance