

测定有效电感的一种新方法

李中年, 高永雄, 刘合波

(武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070)

A New Method for Determining the Effective Inductance

LI Zhong-nian, GAO Yong-xiong, LIU He-bo

(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The earth's magnetic field and surroundings have an obvious effect on the electromagnetism device, which give rise to considerable time varying inductance. The traditional method of measuring the effective inductance, however, is difficult and loaded down with trivial details. Based on the theory of twinkling process of inductance circuit and online measure technology of modern micro-electronics, this paper studied and developed a new method for determining the effective inductance of time varying inductance in magnetic field. Not only is this method much more simple than traditional method, but it is practicable. Related formulas are derived for evaluating the effective inductance.

KEY WORDS: time varying inductance; effective inductance; quasi direct current; saturation

摘要: 地球磁场和周围环境磁场对电力变压器这类电磁器件的电感影响很大, 从而导致处在这种磁场中的电磁器件电感的时变性很大, 然而, 历来测算这种时变电感的有效电感相当困难和烦琐。针对这一问题, 依据电感电路瞬态过程理论, 并利用现代微电子技术在线检测设施, 提出一种测算这种磁场中电磁器件时变电感有效电感的新方法, 此方法实施简便, 切实可行。运用此方法进行现场测算的结果相当准确。还导出了测算这种有效电感的系列相关公式, 不仅对测算这种有效电感快捷简便, 而且对设计和研制工作在这种环境中的电力变压器这类电磁器件很有理论价值和实际意义。

关键词: 时变电感; 有效电感; 准直流; 饱和

0 引言

电感器在周期性交变电流激励下, 每个周期中有一部分时期进入饱和状态(称之为分时饱和)^[1-3], 则电感器对所在电路将交替轮换呈现两个电感量 L_1 和 L_2 , 这种情形在实际工程中经常可见, 诸如饱和式磁力仪的工作状态, 电源变压器受地磁感应电

流作用的情形等等。工作在这种情况下的电感器件, 其电感量是时变的, 分析测定这种时变电感的有效电感, 在理论研究和实际应用中均具有重要意义。用传统方法(如二次谐波测试法)^[1,4-5]测算这种有效电感十分烦琐。针对着这一问题, 本文研究出了一种新方法, 用来测算这种时变电感的有效电感, 不仅简便, 而且实用。

1 模式

考察图1所示的时不变电阻 R 和时变电感 L 在电压源 u 激励下的这一电路。其中 u 是由一周期性交流分量(后面简称交流分量)和一准直流分量组成。

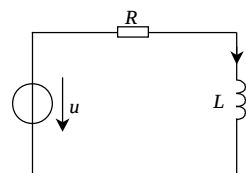


图1 具有时变电感 L 的电路

Fig. 1 A circuit consist of time varying inductance L

由电流 i 的路径可得

$$u = Ri + \frac{d(Li)}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

此式按电流变量可写成下列形式:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - Ri - i \frac{dL}{dt}}{L} \quad (2)$$

上式涉及到所论及的时变电感, 此电感在每个交变周期反复变化。对电流 i 中的准直流分量呈现的电感效应, 可通过定义电流 i 的均变量 Di/Dt 求得:

$$\frac{Di}{Dt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{di}{dt} dt \quad (3)$$

将式(2)带入式(3)可得

$$\frac{Di}{Dt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u - Ri - i \frac{dL}{dt}}{L} dt \quad (4)$$

将式(4)中的 u 和 i 分别展开为交流分量 u_{ac} 和 i_{ac} 以及准直流分量 u_{dc} 和 i_{dc} , 于是可得

$$\begin{aligned} \frac{Di}{Dt} = & \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_{dc} - Ri_{dc} - i_{dc} \frac{dL}{dt}}{L} dt + \\ & \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_{ac} - Ri_{ac} - i_{ac} \frac{dL}{dt}}{L} dt \end{aligned} \quad (5)$$

由于 i 的交流分量等于 i 的变化率(见式(2)), 所以由式(5)可得

$$\frac{Di}{Dt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_{dc} - Ri_{dc} - i_{dc} \frac{dL}{dt}}{L} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{di_{ac}}{dt} dt \quad (6)$$

积分 T 的区间可选交流分量的一个周期, 因此交流分量项的积分结果(即式(6)中右边的第 2 项积分结果)等于零; 而准直流分量可视为常量, 能移到积分号外边, 于是从式(6)可得

$$\frac{Di}{Dt} = (u_{dc} - Ri_{dc}) \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{L} dt - i_{dc} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{L} dL \quad (7)$$

对式(7)中右边的第 2 项积分得: $\ln L(T) - \ln L(0)$, 显然为零, 因为 L 随着交流分量的周期 T 周期性变化, 而又选择 T 为积分区间。因此, 电流 i 的准直流分量变化率表达式可由式(7)简写成

$$\frac{Di}{Dt} = (u_{dc} - Ri_{dc}) \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{L} dt \quad (8)$$

显然, 式(8)中只含有 L 的变量, 对时变电感而言, 这就是电流 i 的交流分量和准直流分量综合激励的效应。

处在磁场中进入分时饱和状态的电感器, 其电感呈现时变特性, 当激励源为周期性交变信号时, 电感器对所在电路呈现 2 个交替转换的电感量 L_1 和 L_2 , 它们之间交替转换的感应分量, 其积分正好是积分区间 T 之外的求和, 可用时间比率计算

$$\int_0^T \frac{1}{L} dt = \left(\frac{K}{L_1} + \frac{1-K}{L_2} \right) T \quad (9)$$

式中 K 是关于具有 L_1 电感量的时间比率。

于是, 电流 i 的均变量 Di/Dt 可由式(8)改写为

$$Di/Dt = u_{dc} - Ri_{dc} / L_{ef} \quad (10)$$

式中 L_{ef} 即为“有效电感”, 显然它被定义为

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{K}{L_1} + \frac{1-K}{L_2} \quad (11)$$

为了更直观地描述准直流分量的电路行为, 可将式(10)写成

$$u_{dc} = Ri_{dc} + L_{ef} \frac{Di}{Dt} \quad (12)$$

此式同一阶感性电路的伏安关系式完全一样。在式(12)的推导中, 认为电感器被交流分量和准直流分量共同激励呈现分时饱和^[4,6-7]。当准直流分量被近似视作常量, 则交流分量被视作电感器进、出饱和两情形的控制信号^[8-10]。事实上式(10)和式(11)与电感器激励源中的交流分量无关。

2 范例

若不考虑图 1 所示电路中 t_0 时刻的准直流电压, 图 2 中电感器具有 L_1 值是从时间 $t=t_0$ 到 $t=t_1$; 具有 L_2 值是从时间 $t=t_1$ 到 $t=t_2$; 而电流在 $t_0 \sim t_1$ 和 $t_1 \sim t_2$ 这 2 个期间都发生衰减, 如图 2 所示。

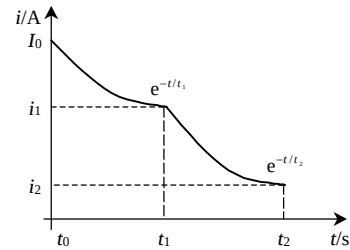


图 2 电感器中电流 i 的变化

Fig. 2 The variety of current i in inductance

在 $t=t_1$ 时刻, 电感器中的电流 i 为 i_1 , 即

$$i_1 = I_0 \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{t_1}\right) \quad (13)$$

其中 $t_1 = L_1/R$ 。

同理, 在 $t=t_2$ 时刻, 电流 i 为 i_2 , 即

$$i_2 = i_1 \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_2}\right) \quad (14)$$

其中 $t_2 = L_2/R$ 。

将式(13)代入式(14)可得

$$\begin{aligned} i_2 = & I_0 \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{t_1}\right) \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_2}\right) = \\ & I_0 \exp\left\{-\left(\frac{t_1 - t_0}{t_1} + \frac{t_2 - t_1}{t_2}\right)\right\} \end{aligned} \quad (15)$$

可见, 电感器的电感量每一次变化都将会引起一相应指数项附加到式(15)的末端, 即有

$$\begin{aligned} i_n = & I_0 \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{t_1}\right) \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{t_2}\right) \cdots \exp\left(-\frac{t_{n-1} - t_{n-2}}{t_{n-1}}\right) \cdot \\ & \exp\left(-\frac{t_n - t_{n-1}}{t_n}\right) = I_0 \exp\left\{-\left[\frac{(t_1 - t_0) + \cdots + (t_{n-1} - t_{n-2})}{t_1} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(t_2 - t_1) + \cdots + (t_n - t_{n-1})}{t_2}\right]\right\} = I_0 \exp\left\{-t\left(\frac{K}{t_1} + \frac{1-K}{t_2}\right)\right\} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $t=(t_n-t_0)$ 为每一次变化经过的时间; K 和 $(K-1)$ 分别为电感器具有 L_1 值和 L_2 值各经过时间的比率^[11-13]。

式(16)可用有效时间常数 t_{ef} 改写成

$$i = I_0 \exp\left(-\frac{t}{t_{ef}}\right) \quad (17)$$

$$1/t_{ef} = K/t_1 + (1-K)/t_2 \quad (18)$$

显而易见, 有效时间常数 t_{ef} 同有效电感 L_{ef} 的关系为

$$t_{ef} = L_{ef} / R \quad (19)$$

把 t_{ef} , t_1 , t_2 这 3 者的表达式代入式(18)并除以 R 便得有效电感的表达式

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{K}{L_1} + \frac{1-K}{L_2} \quad (20)$$

此式同前面定义有效电感 L_{ef} 的式(11)完全一样。所以利用式(11)和式(19)便可计算 t_{ef} 和 L_{ef} ^[14-16]。

3 实验

分别对 200, 400, 800kVA 电力变压器按照旧方法(即传统方法)经烦琐的实验实测, 从测试数据整理出的有效电感均与用式(11)新方法测算的 L_{ef} 结果基本相符。该新方法的具体测试设施如下:

(1) 实验环境。均在 25℃ 工频不同负载下测试这三种电力变压器的一次绕组相关参数。

(2) 测试方法。将马克斯威尔电感测量电桥同有效电感在线(动态)测试匹配装置组合起来进行实测^[17-19]。其测试电路示意图如图 3 所示。

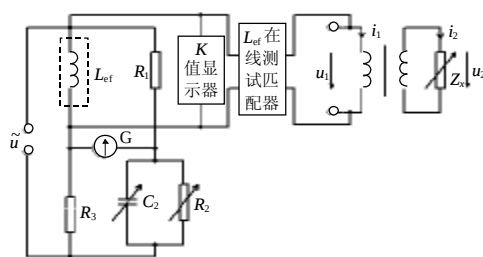


图3 有效电感 L_{ef} 测试电路示意图

Fig.3 The sketch map of circuit for testing effective inductance L_{ef}

测量时调节 C_2 和 R_2 使电桥平衡, 于是被测线圈的有效电感

$$L_{ef} = R_1 \times R_3 \times C_2$$

上述 3 个变压器在多种工作状态下其一次绕组有效电感 L_{ef} 用新、旧方法进行实测的结果如表 1 所示。

通过对新、旧方法的实测结果对比^[20], 不难看出

表 1 3 个变压器各带不同负载时的 L_{ef} 实测值

Tab. 1 Measured results of L_{ef} of three transformers under different loads

额定负载数/%	方法	型号		
		S9-200	S9-400	S9-800
20	旧方法	24.5	27.8	29.7
	新方法	23.6	26.7	28.6
50	旧方法	46.4	48.9	52.3
	新方法	45.3	48.0	51.1
80	旧方法	76.3	79.5	83.4
	新方法	75.1	78.6	82.5
100	旧方法	92.8	107.9	119.8
	新方法	91.7	106.7	118.6
110	旧方法	88.7	103.6	113.8
	新方法	87.9	102.6	112.7
115	旧方法	85.1	99.5	108.6
	新方法	84.2	98.7	107.7
120	旧方法	78.9	93.6	102.3
	新方法	77.8	92.5	101.5

出本文提出的这种新方法用来测算时变电感的有效电感是便利可行的。

4 结论

本文依据电感电路瞬态过程理论, 并利用现代微电子技术在线检测设施, 研究并提供了磁场时变电感的有效电感 L_{ef} 的一种新的测算方法和系列相关算式, 其中关于 L_{ef} 的算式: $1/L_{ef}=K/L_1+(1-K)/L_2$ 具有实用性。式中的 L_1 和 L_2 是时变电感交替变化的 2 电感量; K 和 $(K-1)$ 分别为电感器呈现电感量 L_1 和 L_2 的时间比率, 十分类似于 2 去耦并联的等效电感, 只是还要考虑时间比率 K 。该方法比传统的方法优化便捷。

参考文献

- [1] Bolduc L. Geomagnetically induced currents in power systems [C]. Presented at the CIGRE Colloquium, Graz, Austria, 1991: 17-21.
- [2] 林湘宁, 刘沛, 刘世明. 变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 6-11.
Lin Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming. Ultrasaturation state during transformer switch-in with load and its influence to transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 6-11(in Chinese).
- [3] 张雪松, 何奔腾. 变压器励磁涌流的相移比较鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 43-47.
Zhang Xuesong, He Benteng. A new method to identify inrush current by phasor comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 43-47(in Chinese).
- [4] Gao Z C, Russel R D. Fluxgate sensor theory: stability study[J]. IEEE Trans. Geosci Remote Sensing, 1987, GE-25(6): 124-129.
- [5] 李中年, 许智榜, 方欢. 关于电场解的因果关系[J]. 电波科学学报, 2005, 20(2): 252-255.

- Li Zhongnian, Xu Zhibang, Fang Huan. Causality of electric field solution in attenuation medium[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(2): 252-255(in Chinese).
- [6] 张瑛, 张小青. 考虑铁磁元件励磁特性的电网暂态计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 20(3): 235-239.
- Zhang Ying, Zhang Xiaoqing. Calculation of transients in power system containing ferromagnetic elements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 20(3): 235-239(in Chinese).
- [7] Li Zhongnian. Study on the N^2C^2 problem[C]. Proc. of IEEE ICIPS'97, Beijing, China, 1997, 10: 258-261.
- [8] Bi Changqing, Li Zhongnian. Study on the MIF computerisation mode[C]. Proc. of ICCEA'94, Beijing, China, 1994, 10: 159-162.
- [9] Qin Juanying, Li Zhongnian. Study on the causality for the GEFS [C]. Proc. of ICRS'95, Beijing, China, 1995: 205-208.
- [10] 万凯, 刘会金, 陈允平. 考虑铁磁特性的有载调压变压器无微态切换过程的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 172-174.
- Wan Kai, Liu Huijin, Chen Yunping. Research on the no transience process of the tap change in the load-ratio voltage transformer considering the ferromagnetic characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 172-174(in Chinese).
- [11] 王国利, 郑毅, 郝艳捧, 等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.
- Wang Guoli, Zheng Yi, Hao Yanpeng, et al. Study on the ultra-high-frequency sensors for PD detection in power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160(in Chinese).
- [12] 王泽忠, 王炳革. 三维开域涡流场 A-V 位有限元与边界元耦合分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 1-4.
- Wang Zezhong, Wang Bingge. FE-BE coupling method of 3-D open boundary eddy current fields in potential A-V[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 1-4(in Chinese).
- [13] Li Zhongnian. A new method for the model processing of the ULS[C]. Proc. of ICSP'96, 3RD, Beijing, China, 1996, 10: 108-111.
- [14] 李琳, 崔翔, 苑津莎, 等. 双标量磁位的表面阻抗法[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 87-91
- Li Lin, Cui Xiang, Yuan Jinsha, et al. A surface impedance method using two scalar magnetic potentials[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 87-91(in Chinese).
- [15] Onuki T, Wakao S, Shimazaki M. 3D eddy current analysis by the hybrid FE-BE method using magnetic field intensity H[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2259-2261.
- [16] Onuki T, Wakao S, Yoshizawa T. Eddy current computations in moving conductors by the hybrid FE-BE method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 1436-1439.
- [17] 李剑, 孙才新, 杜林, 等. 局部放电灰度图象分维数的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 123-127.
- Li Jiang, Sun Caixin, Du Lin, et al. Study on fractal dimension of gray intensity image[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 123-127(in Chinese).
- [18] 李中年. 电脑控制的测试与设备[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1990.
- [19] Li Zhongnian. Research on the N^2C^2 temperature control system of the electroplating liquid[C]. Proc. of IEEE ICEMI'2005, Beijing, China, 2005, 8: 46-49.
- [20] 姜磊, 朱德恒, 李福祺, 等. 基于人工神经网络的变压器绝缘模型放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 21-24.
- Jiang Lei, Zhu Deheng, Li Fuqi, et al. ANN based discharge pattern recognition of insulation models of electrical transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 21-24(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-16。

作者简介:

李中年(1949—), 男, 教授, 主要研究方向为电气工程及其智能化, znli49@yahoo.com.cn;

高永雄(1973—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能测控理论及应用;

刘合波(1980—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制与光电电子技术。

(编辑 车德竞)