

变压器铁心剩磁估量

邢运民¹, 罗建², 周建平³, 熊再豹², 蔡明²

(1. 西华大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610039; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044; 3. 成都电业局, 四川省 成都市 610021)

Estimation of Remanence in Transformer Core

XING Yunmin¹, LUO Jian², ZHOU Jianping³, XIONG Zaibao², CAI Ming²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan Province, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 3. Chengdu Electric Power Company, Chengdu 610021, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The key to realize synchronous closing control is to pre-estimate the value of remanence in transformer core effectively after the switching-off of transformer. For this purpose, a method to estimate the remanence in transformer core is proposed. Based on the values of voltages and currents measured at the primary side of transformer after the no-load closing and the phase angle at closing moment, the moment when transformer core saturated is searched, then the remanence in transformer core can be estimated after the transformer is switched off. Using physical model in laboratory, several hundreds of experiments of no-load closing of transformer were performed, and according to the values of voltages and currents of saturated transformer core as well as the phase angle at the moment of no-load closing the remanence in transformer core is estimated. Based on the results of the remanence estimation, the relation between remanence in transformer core and different phase angles of voltage at the switching-off moment and that between remanence in transformer core and the peak currents under different phase angle of voltage at the switching-off moment are obtained.

KEY WORDS: transformer; no-load closing; remanence

摘要: 实现同步关合技术的关键是有效预估变压器分闸后铁心中的剩磁, 提出了一种变压器铁心剩磁估量方法, 依据变压器空载合闸后在变压器一次侧检测到的电压电流数据和空载合闸角, 寻找变压器的铁心饱和时刻, 估量变压器分闸后铁心中的剩磁。通过实验室物理模型就变压器空载合闸进行了数百次实验, 依据变压器铁心饱和后的电压电流数据和空载合闸角对变压器铁心剩磁给予了估量。基于变压器铁心剩磁估量的结果, 获取了变压器分闸角与变压器铁心剩磁的关系特性。

关键词: 变压器; 空载合闸; 剩磁

0 引言

电力变压器空载合闸时, 会因铁心的饱和出现

励磁涌流^[1], 其励磁涌流可为变压器额定电流的若干倍。随着电力变压器容量的增加, 空载合闸励磁涌流将变得更大, 空载合闸励磁涌流对系统运行、设备安全和保护动作都会产生一定的影响, 甚至会产生严重的后果。

目前, 已有多种技术方法用于抑制变压器的空载合闸励磁涌流, 如: 在变压器的低压侧加装电容器、内插电阻和同步关合技术等方法。除了同步关合技术方法以外, 其他方法都增加了设备投资费用和操作的复杂性^[2-3]。同步关合技术的核心是根据分闸后铁心中的剩磁确定合闸时刻。只要合闸时刻, 能避免变压器铁心磁通的饱和, 就可以有效地抑制变压器的空载合闸励磁涌流。

预估变压器分闸后铁心中的剩磁是实现同步关合技术的关键。文献[4-7]提到了多种关于剩磁或磁场的经典计算模型或方法, 包括 Preisach 模型、Product 模型、Stoner-Wohlfarth 模型。但是以上模型计算方法都涉及部分不可直接测量的参数, 故在变压器铁心剩磁的具体预估中实用性不大。

为了使变压器铁心剩磁的预估达到工程实用性, 可以将变压器铁心剩磁与变压器分闸时刻的电流幅值和相角关联起来, 只要获取到变压器分闸时刻的电流幅值和相角与变压器铁心剩磁的关系特性, 则依据变压器分闸时刻的电流幅值和相角就能预估变压器的铁心剩磁。要获取此关系特性, 可就变压器进行空投试验, 或依据变压器的空载合闸运行, 记录不同的分闸时刻电流幅值和相角, 测量不同分闸时刻电流幅值和相角下的变压器铁心剩磁。随着记录和测量数据的丰富和完善, 变压器分闸时

刻的电流幅值和相角与变压器铁心剩磁的关系特性将更加易于获取。

变压器分闸后铁心中的剩磁通常可由专有仪器(如磁通计 WB-1)进行测量,但因测量的复杂性,很难在变压器运行现场测量。但实际工程中,在了解变压器空载合闸角的前提下,利用变压器空载合闸后在变压器一次侧检测到的电压电流数据,寻找变压器的铁心饱和时刻,就可以估量变压器分闸后铁心中的剩磁。

1 变压器空载合闸的暂态过程

以单相变压器为例来分析变压器空载合闸的暂态过程。变压器一次侧的输入电压为

$$u = U_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中: U_m 为电压幅值最大值; ω 为电源的角频率; α 为电压合闸角。

在变压器空载合闸时刻

$$U_m \cos(\omega t + \alpha) = L(di)/(dt) + Ri \quad (2)$$

式中: R 为一次侧回路的电阻; L 为一次侧回路的电感,在忽略一次侧绕组的漏感情况下, L 近似为变压器的励磁电感; i 为励磁电流。

考虑到变压器空载合闸时刻的变压器励磁电流为零,由式(2)可求得励磁电流为

$$i = U_m \sin(\omega t + \alpha - \phi) / Z - U_m \sin(\alpha - \phi) e^{-t/\tau} / Z \quad (3)$$

式中: $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $\phi = \arctan(\omega L/R)$; 时间常数 $\tau = L/R$ 。

在变压器铁心饱和前,可得励磁磁通为

$$\phi_1 = Li = \frac{LU_m \sin(\omega t + \alpha - \phi)}{Z} - \frac{LU_m \sin(\alpha - \phi)}{Z} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

若铁心内存在剩磁,其变压器磁通量为

$$\phi_T = \frac{LU_m \sin(\omega t + \alpha - \phi)}{Z} - \frac{LU_m \sin(\alpha - \phi)}{Z} e^{-t/\tau} + \phi_r(t) \quad (5)$$

式中 $\phi_r(t)$ 为铁心剩磁在合闸后瞬时值。参照文献[8],剩磁 $\phi_r(t)$ 可表示为

$$\phi_r(t) = \phi_{r0} e^{-t/\tau} \quad (6)$$

式中 ϕ_{r0} 为变压器铁心剩磁初值。

由于变压器暂态磁通分量和铁心剩磁的作用,在多种合闸情况下变压器铁心内的总磁通会偏向时间轴一侧,即一侧的变压器磁通会增加很大。当变压器磁通增加到使变压器铁心饱和时,变压器将出现励磁涌流。

2 变压器铁心剩磁的估计

2.1 剩磁初值估计

在变压器铁心出现饱和的时刻,变压器磁通可

称为变压器饱和磁通,并可表示为

$$\phi_s = \frac{LU_m \sin(\omega t_s + \alpha - \phi)}{Z} - \frac{LU_m \sin(\alpha - \phi)}{Z} e^{-t_s/\tau} + \phi_{r0} e^{-t_s/\tau} \quad (7)$$

对于一个铁心材料和结构确定的变压器,当铁心未饱和时,可将 R 和 L 认为常数;当铁心出现饱和时,可将饱和磁通 ϕ_s 近似认作为一个定值。在变压器的 R 和 L 、饱和磁通 ϕ_s 、变压器空载合闸角 α 、铁心饱和时刻 t_s 都已确定的基础上,依据式(7)变压器铁心的剩磁初值可估计为

$$\phi_{r0} = [\phi_s - \phi_m \sin(\omega t_s + \alpha - \phi)] e^{t_s/\tau} + \phi_m \sin(\alpha - \phi) \quad (8)$$

式中 $\phi_m = LU_m/2$ 为稳态磁通幅值。

电压幅值 U_m 可由一次侧电压计算获得;空载合闸角 α 可在变压器空载合闸时控制确定或通过检测空载合闸时的电压获得。

2.2 R 和 L 的确定

变压器一次侧回路的电阻和电感参数可在出厂前测试给出。若出厂时未给出一次侧回路的电阻和电感参数,文献[9]给出了一种利用变压器空载合闸后的一次侧电压电流数据计算一次侧回路电阻和电感参数的方法。

参照文献[9]提出的方法,将空载合闸后的一次侧电压电流视为幅值和相位随时间变化的正弦瞬变信号,并表示为

$$\begin{cases} u(t) = a_u(t) \cos(\omega t) + b_u(t) \sin(\omega t) \\ i(t) = a_i(t) \cos(\omega t) + b_i(t) \sin(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(2),为

$$\begin{cases} L(da_i)/(dt) + \omega Lb_i(t) + Ra_i(t) = a_u(t) \\ L(db_i)/(dt) - \omega La_i(t) + Rb_i(t) = b_u(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $a_u(t)$ 、 $b_u(t)$ 、 $a_i(t)$ 和 $b_i(t)$ 为正弦瞬变信号表达式的时变系数,文献[10]给出了这种信号系数详细介绍和正弦逼近求取方法。由此,依据式(11)就可在线实时计算一次侧回路的电阻和电感参数。

2.3 铁心饱和时刻的确定

当变压器铁心未饱和时,变压器的励磁电感可考虑为常数,即变压器一次侧回路的电感 L 为常数;当变压器铁心出现饱和后,变压器的励磁电感是励磁电流的函数,随励磁电流的增大而减小。依据文献[9]给出的方法,利用变压器空载合闸后的一次侧电压电流数据在线实时计算一次侧回路的电感 L ,只要电感 L 出现明显的减少,则此时此刻就是变压器铁心饱和时刻。

2.4 饱和磁通的估计

对于一个铁心材料和结构确定的变压器,铁心

的饱和磁通可认为是一个定值，其饱和磁通值可由制造方给出。若制造方未给出饱和磁通值，可采用如下方法对变压器饱和磁通进行估计。

就一个剩磁几乎为零的变压器进行空载合闸，若变压器铁心出现饱和，将铁心饱和时刻 t_s 、 R 和 L 、空载合闸角 α 及电压幅值 U_m 代入式(6)，可求出该变压器铁心的饱和磁通为

$$\phi_s = \frac{LU_m \sin(\omega t_s + \alpha - \phi)}{Z} - \frac{LU_m \sin(\alpha - \phi)}{Z} e^{-t_s/\tau} \quad (11)$$

3 铁心剩磁估计的动模实验

3.1 剩磁的计算

实验变压器为一台单相 DMB-15 型模拟变压器。铭牌参数为：额定容量 15 kVA，高压侧最高电压 1040 V，低压侧额定电压 380 V，空载电流为 1.5%，绕组匝数 386 匝，空载损耗为 1.2%，短路阻抗 10%~18%，负载损耗为 0.45%。

合闸时电流波形的 1 个实验录波如图 1 所示。

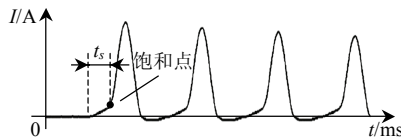


图 1 合闸时电流波形

Fig. 1 The switching current waveform

根据文献[11]，变压器绕组电阻为

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2}$$

式中： R_T 为变压器高低压绕组的总电阻，此电阻大于一次绕组电阻值 R ； P_k 为变压器的负载损耗，kW。

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} = \frac{0.45 \times 15 \times 380^2}{1000 \times 15^2} = 4.33 \Omega$$

由于电流有效值小，故合闸时变压器一次绕组电阻的分压作用可以忽略，并结合本变压器的结构特点，可取一次绕组电阻值 $R \approx 1.3 \Omega$ 。

通过文献[9]给出方法，得到铁心磁路饱和和前绕组的电感 $L = 1.130845 \text{ H}$ ；铁心磁路饱和时间 $t_s = 0.00554 \text{ s}$ 。

由于该实验用变压器的铁心是由 0.28~0.35 mm 冷轧取向电工硅钢片制成的。其铁心饱和磁通按中间值进行计算^[2]

$$\phi_s \approx 1.14 \phi_m$$

所以有

$$\phi_s \approx 1.14 \times 1.1994 = 1.3673 \text{ Wb}$$

代入以上已知参数，计算得本次合闸前铁心内的剩磁 $\phi_{r0} \approx -0.4456 \text{ Wb}$ 。

3.2 剩磁-分闸角模型

表 1 列出了 60 组铁心磁路达到饱和的实验波形数据，经过分析计算后得出在不同分闸角时的铁心剩磁。本次动模实验总共录制了上百组波形数据。实验中有少部分数据对应的铁心磁路没有饱和，本文提出的剩磁估算方法可知，根据这部分数据不能计算合闸前铁心的初始剩磁。

剩磁与分闸电压相角之间的关系曲线见图 2。

表 1 不同分闸角时的铁心剩磁估量值

Tab. 1 Valuated values of core remanence with different opening angle

序号	分闸参数/(°)		计算剩磁/Wb	序号	分闸参数/(°)		计算剩磁/Wb
	电压相角	电流相角			电压相角	电流相角	
1	20.2	5.1	0.4393	31	169.6	154.5	-0.4642
2	21.4	6.3	0.4406	32	172.0	156.9	-0.4620
3	27.1	12.0	0.4453	33	193.5	178.4	-0.4435
4	31.5	16.4	0.4511	34	197.1	182.0	-0.4437
5	35.9	20.8	0.4567	35	199.8	184.7	-0.4449
6	37.6	22.5	0.4593	36	202.9	187.8	-0.4461
7	40.4	25.3	0.4624	37	207.3	192.2	-0.4432
8	42.3	27.2	0.4641	38	210.3	195.2	-0.4415
9	48.8	33.7	0.4640	39	216.4	201.3	-0.4386
10	55.5	40.4	0.4487	40	222.2	207.1	-0.4334
11	58.7	43.6	0.4431	41	227.5	212.4	-0.4302
12	65.6	50.5	0.4282	42	233.6	218.5	-0.4262
13	72.2	57.1	0.4205	43	240.6	225.5	-0.4213
14	76.2	61.1	0.4102	44	247.3	232.2	-0.4172
15	78.7	63.6	0.4069	45	253.7	238.6	-0.4128
16	82.3	67.2	0.4003	46	259.8	244.7	-0.4083
17	84.4	69.3	0.3911	47	265.5	250.4	-0.4021
18	98.5	83.4	0.3804	48	278.7	263.6	-0.3827
19	101.7	86.6	0.3776	49	283.4	268.3	-0.3766
20	107.8	92.7	0.3762	50	290.1	275.0	-0.3153
21	111.3	96.2	0.3122	51	296.0	280.9	-0.0836
22	116.8	101.7	0.0795	52	300.6	285.5	0.1386
23	122.2	107.1	-0.2467	53	305.2	290.1	0.3265
24	126.9	111.8	-0.3937	54	310.0	294.9	0.4001
25	131.0	115.9	-0.4013	55	316.9	301.8	0.4148
26	137.4	122.3	-0.4167	56	321.3	306.2	0.4266
27	142.6	127.5	-0.4280	57	324.5	309.4	0.4353
28	153.7	138.6	-0.4456	58	335.8	320.7	0.4468
29	160.3	145.2	-0.4582	59	342.0	326.9	0.4591
30	166.6	151.5	-0.4663	60	348.9	333.8	0.4643

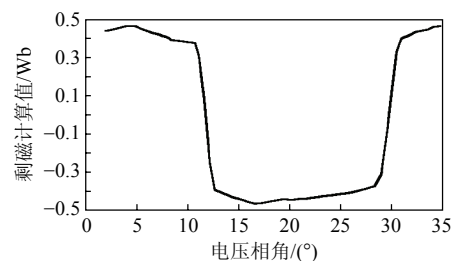


图 2 剩磁与分闸电压相角的关系

Fig. 2 The relationship between the remanence and the voltage opening phase

3.3 分闸前电流幅值对剩磁的影响

根据文献[12]可知，在同一分闸角时若电流大小不同、断电瞬间变压器铁心所在的磁滞回线不

同, 同一分闸角断电时铁心内的剩磁是不一样的。实验时还分别对 5 个电流峰值下的多次实验录波, 并选择分闸电压相角为 40° 、 70° 和 150° 附近的波形数据进行分析, 得到分闸点对应的铁心剩磁, 计算结果见表 2。电流幅值与铁心剩磁的关系见图 3。

表 2 不同电流幅值下的剩磁估量值
Tab. 2 Valuated values of core remanence with different current amplitude

电流幅值/A	剩磁估量值/Wb		
	电压相角 40°	电压相角 70°	电压相角 150°
1.36	0.4240	0.4005	-0.4109
2.32	0.4620	0.4231	-0.4400
3.08	0.4706	0.4313	-0.4483
3.87	0.4788	0.4393	-0.4562
4.53	0.4837	0.4435	-0.4616

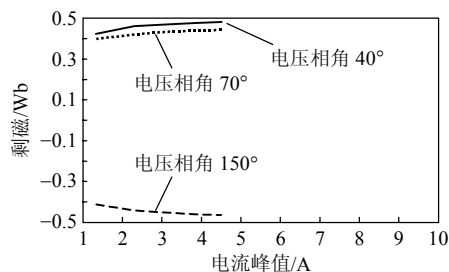


图 3 电流峰值与铁心剩磁关系

Fig. 3 The relationship between the remanence and the current amplitude

可见, 在同样的分闸角时, 若变压器切除电力系统前绕组电流越大, 铁心内的剩磁越大。

3.4 关于三相变压器剩磁估量的讨论

虽然三相变压器有多种形式的铁心结构, 但本文提出的剩磁估量方法可用于三相变压器中的每相剩磁估量。由于三相变压器分闸前的三相电压(或三相电流)之间的相角确定(互差 120°), 可依据三相变压器中每相的剩磁估量和分闸前的三相电压(或三相电流)相角, 获得三相变压器分闸角与铁心剩磁的关系。

4 结论

本文提出了一种变压器铁心剩磁估计的方法。依据变压器空载合闸后在变压器原边检测到的电压电流数据和空载合闸角, 寻找变压器的铁心饱和时刻, 该方法可以估计变压器分闸后铁心中的剩磁。

通过实验室物理模型, 就变压器空载合闸进行了大量的实验, 对变压器铁心剩磁给予了估计。基于变压器铁心剩磁估计的结果, 获取了变压器分闸角与变压器铁心剩磁的关系特性。实验数据说明了本方法的合理性, 获取的变压器分闸角与变压器铁心剩磁的关系特性可以为制定合闸策略提

供参考依据。

参考文献

- [1] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 电力出版社, 1989: 144-166.
- [2] 陈艳, 陈小川, 高仕斌. 几种削减变压器励磁涌流的方法[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 282-285.
Chen Yan, Chen Xiaochuan, Gao Shibin. Transformer inrush current reduction in several ways[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 282-285(in Chinese).
- [3] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.
Hao Zhiguo, Zhang Baohui, Chu Yunlong, et al. Transformer no-load closing inrush current suppression technology research[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84(in Chinese).
- [4] 王巨丰, 何振东, 李明武, 等. 利用分相断策略消除电力变压器的励磁涌流[J]. 广西电力, 2005, 30(5): 43-45.
Wang Jufeng, He Zhendong, Li Mingwu, et al. Related to the use of sub-cut strategy for the elimination of the power transformer inrush current[J]. Guangxi Electric Power, 2005, 30(5): 43-45(in Chinese).
- [5] Atherton D L, Schonbachler M. Measurements of reversible magnetization component[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1988, 24(1): 616-620.
- [6] 李明武, 梁冠安. 变压器有载合闸过程中故障分闸后铁心剩磁分析[J]. 高压电器, 2003, 39(5): 26-28.
Li Mingwu, Liang Guan'an. Transformer has set the course of fault reclosing after sub-gate analysis of core remanence[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(5): 26-28(in Chinese).
- [7] 赵国生. 磁滞数学模型及考虑磁滞时磁场数值计算[M]. 河南: 黄河水利出版社, 2004: 34-51.
- [8] 李树棠. 变压器基础知识[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1980: 31-42.
- [9] Li Guang, Qian Qingquan, Luo Jian, et al. Discrimination of inrush current based on dynamic magnetizing inductance solved by sinusoid approximation of instantaneous signal[C]//2006 International Conference on Power System Technology. Chongqing, China: CEPRI, 2006: 201-203.
- [10] 罗建. 基于神经网络模型的母线保护研究和实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [11] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 60-73.
- [12] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
Ding Fuhua, Zou Jiyan, Fang Chun'en, et al. Investigations on switching idle power transformer with phising vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 89-93(in Chinese).



邢运民

收稿日期: 2010-04-10。

作者简介:

邢运民(1954), 男, 学士, 副教授, 主要从事电力系统设备与控制的教学和科研, E-mail: xym_123456789@163.com;

罗建(1960), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护;

周建平(1978), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;

熊再豹(1979), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制;

蔡明(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 张磊)