

变压器三相励磁涌流的特征分析

清 华 大 学 肖 逸 王 维 俭
水电部西北勘测设计院 李 宁 君

众所周知,变压器励磁涌流的特征直接影响变压器差动保护的设计、研制和运行。以往,继电保护工作者对励磁涌流的分析,常常局限于个别的特定条件,所得结论不一定能包括全部实际可能出现的情况。本文对三相变压器空载合闸的各种可能严重条件,利用数字机,分析励磁涌流的特征,并由此探讨了变压器差动保护的闭锁判据。

(一) 励磁涌流分析中的简化条件和原始数据

为了继电保护的需要,励磁涌流分析中采用了以下简化条件:

1. 电源内阻抗为零,即变压器空载合闸到无穷大电源。
2. 作为分析的第一步近似,忽略合闸回路的所有电阻(二次负荷电阻除外)。
3. 忽略变压器的漏抗压降。
4. 假设磁密小于饱和磁密 B_s 时,励磁电流为零;当 $B \geq B_s$ 时, $B \sim H$ 曲线以一近似直线代替,即变压器铁芯磁化特性仍为线性,但导磁系数为一小值常数(磁化特性分段线性化。)
5. 考虑到变压器差动继电器接受的是励磁涌流两相之差,所以所有三相励磁涌流的特征分析均指两相差流而言。

作为励磁涌流分析的变压器原始数据是:

1. 变压器实用分接头的额定电压(峰值) V_{rn} 和空载合闸时电源电压(峰值) V_m 有 $V_s = V_m / V_{rn} = 1.1$ 。
2. 变压器饱和磁密 B_s 和额定工作磁密(峰值) B_m 有 $B_s / B_m = 1.15$ 。
3. 合闸初相角为 $\alpha_s = 0, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \dots, \pm 120^\circ$;
 $\alpha_r = \alpha_s - 120^\circ, \alpha_c = \alpha_s + 120^\circ$ 。
4. 变压器铁芯剩磁 B_r 取为 $B_{r1} / B_m = 0.5, 0.6, 0.7, (0.9)$;
 $B_{r2} / B_m = 0, -0.1, -0.2, \dots, -0.7, (-0.9)$;
 $B_{r3} / B_m = 0, -0.1, -0.2, \dots, -0.7, (-0.9)$ 。

根据上述各种不同的合闸初相角和铁芯剩磁,组成了1700多种涌流分析的原始条件。

(二) 变压器铁芯最大剩磁的可能值

铁芯剩磁大小,直接关系到变压器励磁涌流的特征。目前在讨论变压器励磁涌流问题时,有争议的原始数据就是剩磁,为此有必要对变压器铁芯剩磁的大小问题进行讨论。

铁磁物质是一种多晶体,磁晶具有各向异性的性质。当铁磁体被磁化到饱和状态时,磁畴的磁矩集中到磁场方向;当磁化场减到零时,由于各向异性的作用,磁矩将转到离磁化场最近的易磁化方向,这就产生了剩磁。

静态磁场(直流励磁)中的剩磁 B_{r0} 和交变磁场(交流励磁)中的剩磁 $B_{r\omega}$ 不同, $B_{r0} < B_{r\omega}$,这是因为在交变磁场中除有磁滞损耗外,还存在涡流损耗和其它损耗。就变压器从系统断开而言,由于磁后效的作用和涡流的阻尼效应,磁密将由 B_m 首先降到 B' , $B' > B_{r0}$,然后再逐渐到达平衡状态,此时有剩磁 B_{r0} (先不讨论切断过程中的低频振荡)。

近代变压器铁芯均采用冷轧晶粒定向的硅钢片材料,这种材料的直流剩磁 B_{r0} (当工作磁密 $B_m = 17000$ 高斯)举例如下表1。

表 1

钢 号	M 4 T28	Z 10	UNISIL 46	M-4
公 司	TERNI (意)	NIPPONS, CO (日)	WALEY (英)	ARMCO (美)
$B_r = B_m$	0.90	0.875	0.836	0.90
δ (厚度) (mm)	0.28	0.35	0.33	0.28
B_s/B_m	1.17	1.16	1.16	1.16

必须指出:上述数据仅指硅钢片材料所具有的特性,作为由这种材料构成的变压器铁芯,不能直接应用此数据,因为:

1. 由硅钢片冲剪成型时会出现内应力,使 B_r 减小。退火能有助于消除内应力,但在退火过程中又不可避免渗入碳、氧等杂质,也使 B_r 减小。

2. 同样的材料,由于铁芯设计和工艺不同,其剩磁将不同。迭装后的铁芯,在其搭接处将有小气隙,工艺的优劣决定了气隙的大小,这将严重影响 B_r 的数值,也直接关系到空载电流 i_{xx} 和空载损耗的大小; i_{xx} 小, B_r 大。以苏联的几台变压器为例,实测数据为表2。

表 2

型 号	АОДПТГ133000 400/220	АОДПТГ133000 400/220	АОДПТГ115000 500/110
$(B_r/B_m)_{max}$	0.36	0.07	0.04
i_{xx} %	0.43	2.50	5.33
空耗 %	0.10	0.22	0.51

注意到我国大型变压器的空载电流和空载损耗一般低于苏联的, 例如表 3 所示。

表 3

型 号	SSP—360000/220	SSP L ₁ -240000/110	OSFPSZ-100000/220
i_{xx}	0.242	0.30	0.15
空耗 %	0.043	0.063	0.0865

日本一台500千伏三单相自耦变压器组, 其空载电流实测值为0.26。

可以推论, 我国变压器铁芯剩磁将高于苏联提出的上述数据。

3. 由于变压器电感器和分布电容的储能, 当变压器突然从系统断开后, 励磁电流将呈逐渐衰减的低频振荡现象, 这将降低剩磁数值。苏联提出了330~750KV变压器的剩磁实测数据, 据此认为冷轧硅钢片铁芯 B_r 取为 $0.36B_m$ 。对于这一数据的采用应注意两点: (1)如上所述, 我国变压器的 i_{xx} 普遍低于苏联的。(2)系统中大量的220千伏及以下的变压器, 不一定存在切断后发生低频振荡的条件。因此对于我国(包括不是从苏联引进的国外产品)变压器铁芯剩磁的取值不应完全受0.36的约束。

综上所述, $B_r = 0.9B_m$ 应是硅钢片材料特性, 不应作为变压器铁芯的数据。考虑到我国变压器的实际性能、照顾到大量的中、高压变压器, 剩磁的数值宜在0.5~0.7的范围内取值, 而且为了变压器差动保护不在励磁涌流冲击下误动作, 差动继电器的设计、制造部门应取用可能的较高值(例如美国G. E公司取用 $0.70 \sim 0.73B_m$), 这样的继电器在运行中将有较大的可靠性。

(三) 变压器励磁涌流计算结果和特征分析

具有典型意义的部分计算结果见表4。表中 θ_0^0 为间断角, I_p 为涌流峰值, $I_0/I_1, \dots, I_5/I_1$ 分别为涌流的直流分量和各次谐波分量。

表 4 $V_m = 1.1$ $B_s = 1.15B_m$ 励磁涌流的特征分析典型数据

组别	相别	B_r/B_m	α°	θ_0^0	I_1^*	I_p/I_1	I_0/I_1	I_2/I_1	I_3/I_1	I_4/I_1	I_5/I_1
1	A	0.7	30	125.6	0.783	1.860	0.745	0.187	0.094	0.009	0.027
	B	-0.1	-90	105.4	0.783	1.860	0.737	0.194	0.094	0.014	0.027
	C	-0.7	-210	65.6	1.351	1.957	-0.859	0.111	0.000	0.006	0.023
2	A	0.7	30	125.9	0.796	1.831	0.749	0.173	0.115	0.021	0.035
	B	-0.2	-90	92.5	0.796	1.831	0.711	0.207	0.115	0.030	0.035
	C	-0.7	-210	65.9	1.351	1.957	-0.859	0.111	0.000	0.006	0.023
3	A	0.7	30	125.9	0.780	1.867	0.744	0.191	0.088	0.010	0.023
	B	0	-90	125.9	0.780	1.867	0.744	0.191	0.088	0.010	0.023
	C	-0.7	-210	65.9	1.352	1.957	-0.859	0.111	0.000	0.006	0.023

续表 4

组别	相别	B_r/B_m	α°	θ°	I_1^*	I_P/I_1	I_0/I_1	I_2/I_1	I_3/I_1	I_4/I_1	I_5/I_1
4	A	0.7	0	78.6	1.231	1.961	0.842	0.148	0.038	0.046	0.010
	B	-0.7	-120	49.6	0.966	1.129	0.000	0.376	0.000	0.071	0.020
	C	-0.7	120	78.6	1.231	1.961	-0.842	0.148	0.038	0.046	0.010
5	A	0.7	30	117.0	0.929	1.916	0.777	0.168	0.145	0.008	0.022
	B	-0.7	-90	57.0	0.929	1.568	0.474	0.290	0.145	0.008	0.022
	C	-0.7	-210	65.6	1.352	1.957	-0.859	0.111	0.000	0.006	0.023
6	A	0.6	0	111.5	0.971	1.924	0.790	0.162	0.135	0.019	0.022
	B	-0.2	-120	120.5	0.474	1.342	0.000	0.627	0.000	0.026	0.089
	C	-0.2	120	111.5	0.971	1.924	-0.790	0.162	0.135	0.019	0.022
7	A	0.6	30	128.6	0.843	1.896	0.750	0.186	0.156	0.022	0.025
	B	-0.6	-90	68.6	0.843	1.620	0.491	0.316	0.156	0.014	0.025
	C	-0.6	-210	77.1	1.260	1.956	-0.830	0.136	0.000	0.005	0.033
8	A	0.6	0	90.0	1.140	1.958	0.813	0.164	0.061	0.045	0.012
	B	-0.6	-120	60.0	0.866	1.155	0.000	0.425	0.000	0.035	0.000
	C	-0.6	120	90.0	1.140	1.958	-0.813	0.164	0.061	0.045	0.012
9	A	0.6	0	111.5	0.971	1.925	0.790	0.162	0.135	0.019	0.022
	B	-0.2	-120	91.7	0.573	1.428	0.131	0.565	0.045	0.064	0.067
	C	-0.4	120	100.7	1.051	1.950	-0.801	0.170	0.101	0.039	0.017
10	A	0.6	30	137.1	0.728	1.877	0.719	0.235	0.086	0.009	0.033
	B	0.0	-90	137.1	0.728	1.877	0.719	0.235	0.086	0.009	0.033
	C	-0.6	-210	77.1	1.260	1.955	-0.830	0.136	0.000	0.005	0.033
11	A	0.5	0	110.7	0.961	1.945	0.774	0.184	0.122	0.022	0.024
	B	-0.3	-120	91.6	0.569	1.278	0.000	0.575	0.000	0.064	0.075
	C	-0.3	120	110.7	0.961	1.945	-0.774	0.184	0.122	0.022	0.024
12	A	0.5	0	128.9	0.851	1.874	0.756	0.172	0.158	0.023	0.023
	B	0	-120	125.5	0.297	1.537	0.000	0.732	0.000	0.115	0.050
	C	0	120	128.9	0.851	1.874	-0.756	0.172	0.158	0.023	0.023
13	A	0.5	30	148.1	0.706	1.805	0.709	0.238	0.133	0.060	0.049
	B	-0.3	-90	110.4	0.536	1.871	0.535	0.456	0.079	0.070	0.028
	C	-0.2	-210	103.9	1.021	1.969	-0.772	0.197	0.050	0.036	0.024

续表 4

组别	相别	B_r/B_m	α°	θ°	I_1^*	I_p/I_1	I_0/I_1	I_2/I_1	I_3/I_1	I_4/I_1	I_5/I_1
14	A	0.5	30	140.2	0.757	1.870	0.724	0.217	0.156	0.052	0.031
	B	-0.5	-90	80.2	0.757	1.684	0.512	0.347	0.156	0.030	0.031
	C	-0.5	-210	88.1	1.165	1.958	-0.803	0.162	0.000	0.018	0.037
15	A	0.5	0	101.1	1.047	1.958	0.787	0.182	0.081	0.038	0.018
	B	-0.5	-120	70.4	0.766	1.187	0.000	0.474	0.000	0.090	0.025
	C	-0.5	120	101.1	1.047	1.958	-0.787	0.182	0.081	0.038	0.018
16	A	0.7	0	108.4	0.982	1.902	0.810	0.137	0.137	0.022	0.018
	B	-0.1	-120	86.9	0.640	1.563	0.303	0.493	0.107	0.062	0.029
	C	-0.6	120	84.2	1.185	1.960	-0.835	0.155	0.056	0.050	0.002
17	A	0.9	0	53.6	1.403	1.980	0.905	0.121	0.010	0.028	0.015
	B	-0.9	-120	28.4	1.163	1.090	0.000	0.281	0.000	0.031	0.037
	C	-0.9	120	53.6	1.403	1.980	-0.905	0.121	0.010	0.028	0.015
18	A	0.9	30	93.5	1.102	1.946	0.831	0.157	0.096	0.046	0.023
	B	-0.9	-90	33.5	1.100	1.490	0.448	0.235	0.097	0.025	0.023
	C	-0.9	-210	40.7	1.523	1.976	0.925	0.061	0.002	0.021	0.006
19	A	0.9	30	100.7	0.877	1.869	0.804	0.110	0.070	0.032	0.004
	B	0	-90	100.7	0.880	1.863	0.799	0.108	0.07	0.034	0.008
	C	-0.9	-210	40.7	1.523	1.976	0.925	0.061	0.002	0.021	0.006

*注 1: 基波电流幅值 I_1 之基值为 $\sqrt{2} V_e V_m / \omega L$, 式中 V_e 为额定电压, L 为变压器饱和后的 $B \sim H$ 近似直线的电感值。

根据励磁涌流的计算结果, 分析其特征如下:

(1) 三相涌流峰值 I_p

这里所说的三相涌流实际上是指三个两相涌流之差值, 即三相差动继电器所接受的电流。

由图 1 和表 4 可知: 涌流峰值的最大值出现在 $\alpha_A = \pm 30^\circ$ (不是单相变压器涌流最大值出现条件 $\alpha = 0^\circ$)。当 $B_{r,a} > 0$, $B_{r,b} \leq 0$, $B_{r,c} \leq 0$ 时, 将有:

若 $|B_{r,b}| > |B_{r,c}|$, 则 $\alpha_A = -30^\circ$ 出现 a 相涌流峰值最大;

若 $|B_{r,c}| > |B_{r,b}|$, 则 $\alpha_A = 30^\circ$ 出现 c 相涌流峰值最大。

(2) 三相涌流的间断角 θ 和直流分量 I_0

表 4 中第 4、6、8、11、12、15、17 组数据的共同特征是一相涌流的直流分量为零, 即该相涌流对称于时间轴 (另两相的直流分量大小相等, 方向相反)。产生这种对称性涌流的条件是:

$$\cos \alpha_i + \frac{B_{rj} - B_{sj}}{V_* B_m} = \cos \alpha_j + \frac{B_{rj} - B_{sj}}{V_* B_m}$$

式中 $i, j \in (a, b, c)$ 但 $i \neq j$ 。

例如 $B_{rb} = B_{rc}$, 且 $\cos \alpha_b = \cos \alpha_c$ 。

如果存在下述条件, 则将有最小间断角 $\theta_{j \cdot \min}$ 出现: $B_{rb} = B_{rc} = -B_{ra}$, 且 $\alpha_a = 0$, (相应必有 $\alpha_b = -120^\circ$, $\alpha_c = 120^\circ$, 即 $\cos \alpha_b = \cos \alpha_c$), 如表 4 中第 4、8、15、17 组数据便是, 其值为:

$ B_r = 0.7 B_m$	$0.6 B_m$	$0.5 B_m$	$0.9 B_m$
$\theta_{j \cdot \min} = 49.6^\circ$	60.0°	70.4°	28.4°
$\theta_{j \cdot a, c} = 78.6^\circ$	90.0°	101.1°	53.6°

(3) 三相涌流的二次谐波 I_2

1. 表 4 第 1、3、19 组数据可知, 三相涌流的 I_2/I_1 均可能小于 20%。

2. 当 $|B_r| = 0.9 B_m$ 时, 三相涌流的 I_2/I_1 将均小于 15%。

3. 当 $|B_r| = 0.7 B_m$ 时, $(I_2/I_1)_{\min} = 11.1\%$, 但另外两相中至少有一相大于 15%。

4. 当 $|B_r| = 0.6 B_m$ 时, $(I_2/I_1)_{\min} = 13.6\%$ 但另外两相中至少有一相大于 20%。

5. 当 $|B_r| = 0.5 B_m$ 时, 三相涌流的 I_2/I_1 , 约大于 15%。

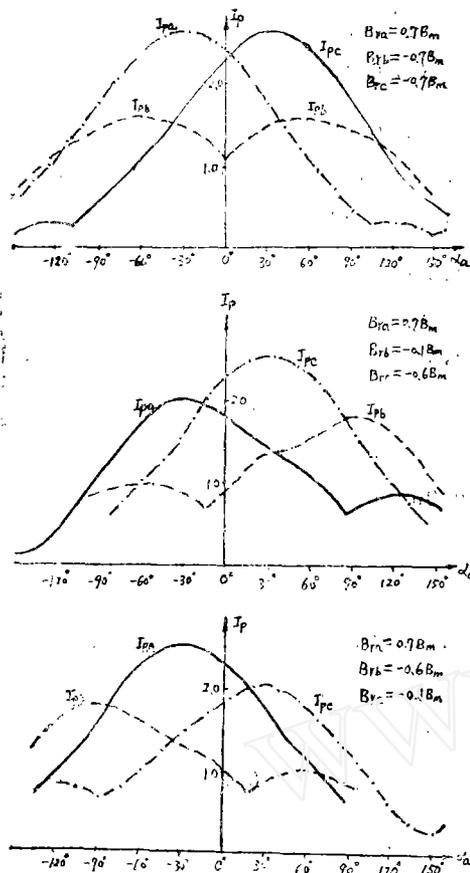


图 1 合闸初相角 α_a 与涌流峰值 I_p 的关系 I_2/I_1 , 约大于 15%。

(四) 三相涌流经 CT 转变后的特征分析

这里的分析增加了下列假设条件:

1. 不计 CT 的漏感抗。
2. 不计 CT 的激磁损耗, 激磁支路以纯感 L_m 代表。
3. CT 二次以纯阻负荷 R_2 表示。

4. 不计CT铁芯剩磁的影响。

为了便于对比三相涌流经CT传变后的特征变化，我们计算了表4中第1、2、3、5几种情况，计算结果见表5。

表5 $V_* = 1.1$ $B_s = 1.15B_m$ 经CT传变后的励磁涌流特征分析

组别	T_2 (秒)	相别	B_r/B_m	α°	I'_1	I'_2/I'_1	I'_0/I'_1	I'_2/I'_1	I'_3/I'_1	I'_4/I'_1	I'_5/I'_1
1	0.004	A	0.7	30	0.613	1.181	0.000	0.222	0.116	0.011	0.034
		B	-0.1	-90	0.613	1.178	0.000	0.231	0.116	0.018	0.034
		C	-0.7	-210	1.058	1.096	0.000	0.131	0.000	0.007	0.030
2	0.008	A	0.7	30	0.725	1.126	0.000	0.202	0.093	0.010	0.025
		B	0	-90	0.725	1.126	0.000	0.202	0.093	0.010	0.025
		C	-0.7	-210	1.256	1.097	0.000	0.117	0.000	0.006	0.025
3	0.004	A	0.7	30	0.611	1.183	0.000	0.227	0.108	0.012	0.030
		B	0	-90	0.611	1.183	0.000	0.227	0.108	0.012	0.030
		C	-0.7	-210	1.058	1.096	0.000	0.131	0.000	0.007	0.030
5	0.55	A	0.7	30	0.929	1.141	0.000	0.168	0.145	0.008	0.022
		B	-0.7	-90	0.929	1.105	0.000	0.290	0.145	0.008	0.022
		C	-0.7	-210	1.352	1.098	0.000	0.111	0.000	0.006	0.023
5	0.008	A	0.7	30	0.863	1.222	0.000	0.177	0.154	0.009	0.024
		B	-0.7	-90	0.863	1.174	0.000	0.360	0.154	0.009	0.024
		C	-0.7	-210	1.256	1.097	0.000	0.117	0.000	0.006	0.025
5	0.004	A	0.7	30	0.727	1.286	0.000	0.199	0.179	0.010	0.028
		B	-0.7	-90	0.727	1.300	0.000	0.344	0.179	0.010	0.028
		C	-0.7	-210	1.058	1.096	0.000	0.131	0.000	0.007	0.030

注: $T_2 = L \mu / R_2$ 二次回路时间常数

三相涌流经CT传变后，其特征有如下变化：

1. 当CT未饱和时（表5中第5组 $T_2 = 0.55''$ ），各次谐波被线性地传到二次侧（对比表4中第5组）。由于CT仅以 $L\mu$ 和 R_2 表示，因此涌流的直流分量 I_0 均不传到二次侧，使 $I'_0 = 0$ （实际当然不是这样），而且使 I'_2/I'_1 比 I_2/I_1 要小。

2. 当CT饱和时（ $T_2 = 0.004'' \sim 0.008''$ 均属此情况），基波电流 I'_1 普遍小于 I_1 ，这是因为CT饱和后励磁电抗 $\omega L\mu$ 急剧减小造成的。CT越饱和， T_2 越小， I'_1 越小，相应的二次谐波分量比例 I'_2/I'_1 却随CT饱和而有所提高，CT越饱和， I'_2/I'_1 提高越多。

（五）变压器差动保护闭锁判据

根据以上变压器三相励磁涌流特征的分析, 变压器差动保护的理論闭锁判据可以是以下几种方式:

1. 当最大剩磁为 $0.5 \sim 0.7 B_m$ 时, 差动继电器应在任一相间断角大于 65° 时闭锁, 即闭锁条件为

$$\theta_{\gamma_a} \cup \theta_{\gamma_b} \cup \theta_{\gamma_c} > 65^\circ$$

在实现此判据时, 继电器电路设计应修正间断角因CT饱和所引起的畸变。

2. 当最大剩磁为 $0.7 B_m$ 时, 闭锁判据可取

$$\frac{I_{2a}}{I_{1a}} \cup \frac{I_{2b}}{I_{1b}} \cup \frac{I_{2c}}{I_{1c}} > 15\%$$

3. 当最大剩磁为 $0.5 \sim 0.6 B_m$ 时, 闭锁判据可取

$$\frac{I_{2a}}{I_{1a}} \cup \frac{I_{2b}}{I_{1b}} \cup \frac{I_{2c}}{I_{1c}} > 20\%$$

4. 当最大剩磁不超过 $0.5 B_m$ 时, 闭锁判据也可取“与门”条件

$$\frac{I_{2a}}{I_{1a}} \cap \frac{I_{2b}}{I_{1b}} \cap \frac{I_{2c}}{I_{1c}} > 15\%$$

根据对保护装置灵敏性、可靠性的要求和实现装置的繁简, 确定上述判据之一。

主要参考文献

- [1] 《铁磁学》 北京大学物理系编 科学出版社 1976
- [2] 《各国电工钢手册》 李荣 刘兴民编译 机械出版社 1975
- [3] 《大型机组继电保护理论基础》 王维俭 侯炳蕴编著
水电出版社 1982
- [4] “现代变压器的励磁涌流及过励磁电流对差动保护的影响” 王祖先
《继电器》 1981 . 3
- [5] “Об Остаточной Индукции В Трансформаторах
330~750kV”
М. Х. ЗИХЕРМАН.....
《Электричество》 1972 . 5
- [6] “A Dissertation on Power Transformer Excitation and Inrush Characteristics”
J. Berdy.....
《The 3rd Annual Western Protective Relay Conference》 1976