

1 目的

変圧器の鉄心の履歴現象を調べる。無負荷試験と磁気ヒステリシス特性試験からそれぞれ損失を求める。2通りの方法で計算したこの同じ物理量を比較検討する。

2 無負荷試験

2.1 原理

2.1.1 変圧器のアドミタンス

$$Y_0 = g_0 - jb_0 \quad (1)$$

ここで等価回路のアドミタンス Y_0 を考えると、

$$Y_0 = 1/R - j1/\omega L \quad (2)$$

したがって、 $g_0 = 1/R$ 、また $b_0 = 1/\omega L$ である。

変圧器で消費される電力を P 、変圧器にかかる電圧の実効値を V 、流れる電流の実効値を I とすると、

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{V^2}{R} \cos\theta \\ &= \frac{V^2}{R} \\ P_L &= \frac{V^2}{j\omega L} \cos\theta \\ &= 0 \\ P &= P_R + P_L \\ &= \frac{V^2}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 θ は R, L の各インピーダンスが虚数空間上で実数軸とのなす角とする。

したがって、

$$\begin{aligned} g_0 &= 1/R \\ &= P/V^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_0 &= \sqrt{Y_0^2 - g_0^2} \\ &= \frac{1}{V} \sqrt{I^2 - \frac{P^2}{V^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

力率も考えてみると、

$$\text{力率 } P \cos \theta = P \frac{P}{V^2} \frac{V}{I} = \frac{P^2}{VI} \quad (6)$$

で与えられる。

ここでの θ は R,L の等価回路におけるアドミタンスが虚数空間上で実数軸となす角である。

2.1.2 変圧器に流れる電流

変圧器の等価回路から計算する電流は、その等価回路に流れる電流 i_0 を考えればよい。R,L が前項と同様、並列に接続されるため、電流 i_0 の内、R 成分に流れる電流を i_R 、L 成分に流れる電流を i_L とおくと、 $i_0 = i_R + i_L$ となることがわかる (キルヒホッフの電流則)。また電源の電圧は、 $v = \sqrt{2}V \sin \omega t$ 、電圧 v と電流 i_0 の位相差を θ とすると、

$$i_R = v/R = \sqrt{2} \frac{V}{R} \sin \omega t \quad (7)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v dt = -\sqrt{2} \frac{V}{\omega L} \cos \omega t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} i_0 &= i_R + i_L \\ &= \sqrt{2}V \frac{1}{\omega RL} (\omega L \sin \omega t - R \cos \omega t) \\ \cos \theta &= \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \\ \sin \theta &= \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{より、} \\ &= \frac{\sqrt{2}V}{\omega RL} \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \sin(\omega t - \theta) \\ &= \sqrt{2}V \sqrt{g_0^2 + b_0^2} \sin(\omega t - \theta) \\ &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

2.2 結果と考察

無負荷試験のデータを表 1 に、それらをまとめた各 2 物理量の特性グラフを図 1,2,3,4 に示す。

また電流波形を図 5 に、電圧の積分波形を図 6 に、そして起磁力 $F = Ni_0$ と $\phi = \frac{1}{N} \int v dt$ の関係を図 7 に示した。

表 1 無負荷試験のデータ

電圧 [V] _{rms}	電流 [A] _{rms}	電力 [W]	電力 (読値)	go[S]	bo[S]	go[mS]	bo[mS]
50	0.100	3.708	18.0	0.0014832	0.001342	1.483	1.342
55	0.110	4.326	21.0	0.0014301	0.001398	1.430	1.398
60	0.125	5.150	25.0	0.0014306	0.001515	1.431	1.515
65	0.135	5.871	28.5	0.0013896	0.001544	1.390	1.544
70	0.155	6.695	32.5	0.0013663	0.001742	1.366	1.742
75	0.180	7.725	37.5	0.0013733	0.001968	1.373	1.968
80	0.215	8.755	42.5	0.0013680	0.002313	1.368	2.313
85	0.251	9.991	48.5	0.0013828	0.002609	1.383	2.609
90	0.295	11.124	54.0	0.0013733	0.002976	1.373	2.976
95	0.350	12.566	61.0	0.0013924	0.003411	1.392	3.411
100	0.420	14.008	68.0	0.0014008	0.003960	1.401	3.960

3 磁気ヒステリシス

3.1 原理

3.1.1 損失 W と有効電力 P の関係

起磁力対磁束曲線で囲まれた面積 (損失 W) と電力計で測定される値 (有効電力) の関係を考える。

まず、電力計で計測される平均有効電力の値は

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 v dt \quad (10)$$

起磁力対磁束曲線で囲まれた面積 (損失) は

$$W = \oint F d\phi \quad (11)$$

で表される。

したがってここから P, W の関係を考えると、

$$\begin{aligned} W &= N i_1 d\phi \\ &= N \int i_1 \frac{1}{N} v dt \\ &= T \cdot P \end{aligned} \quad (12)$$

となる。

3.1.2 磁束 ϕ の関係式

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \\ &= \sqrt{\frac{\omega^2 R^2 C^2 + 1}{\omega^2 C^2}} \\ &= \frac{1}{C} \sqrt{(RC)^2 + \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2} \\ &\cong R \end{aligned} \tag{13}$$

ただし、 $CR \gg T = 1/f$ により近似している。

したがって、

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{N_2} \int R i_2 dt \\ \int i_2 dt &= c e_2 \text{より、} \\ \phi &= \frac{RC}{N_2} e_2 \end{aligned} \tag{14}$$

となる。

3.2 結果と考察

各電圧ごとの鉄心の磁気特性を表 2,3,4 に示す。また $\phi - F$ グラフを図 8($V=100V$), 図 9($V=80V$), 図 10($V=60V$) に示す。

4 参考文献

表 2 100V の時の鉄心の磁気特性

時間 [ms]	e1 [mV]	i1[A]	F[A]	e2 [mV]	[wb]
0.00	-146.00	-0.87	-119.77	-182.50	-3.318E-03
0.50	-132.00	-0.79	-108.29	-181.20	-3.294E-03
1.00	-103.30	-0.62	-84.74	-175.70	-3.194E-03
1.50	-70.50	-0.42	-57.84	-166.40	-3.025E-03
2.00	-42.30	-0.25	-34.70	-154.20	-2.803E-03
2.50	-16.40	-0.10	-13.45	-137.30	-2.496E-03
3.00	0.25	0.00	0.21	-115.50	-2.100E-03
3.50	12.50	0.07	10.25	-92.50	-1.682E-03
4.00	17.10	0.10	14.03	-69.30	-1.260E-03
4.50	19.70	0.12	16.16	-41.90	-7.617E-04
5.00	22.10	0.13	18.13	-13.80	-2.509E-04
5.50	24.90	0.15	20.43	14.40	2.618E-04
6.00	28.20	0.17	23.13	42.60	7.744E-04
6.50	32.70	0.20	26.83	71.50	1.300E-03
7.00	38.40	0.23	31.50	96.40	1.752E-03
7.50	47.40	0.28	38.89	118.60	2.156E-03
8.00	64.20	0.38	52.67	138.40	2.516E-03
8.50	88.60	0.53	72.68	155.80	2.832E-03
9.00	114.50	0.69	93.93	168.70	3.067E-03
9.50	134.50	0.81	110.34	177.70	3.230E-03
10.00	142.50	0.85	116.90	181.20	3.294E-03
10.50	133.50	0.80	109.52	179.40	3.261E-03
11.00	100.30	0.60	82.28	174.20	3.167E-03
11.50	70.30	0.42	57.67	164.50	2.990E-03
12.00	38.60	0.23	31.67	151.40	2.752E-03
12.50	12.40	0.07	10.17	135.30	2.460E-03
13.00	-3.70	-0.02	-3.04	117.30	2.132E-03
13.50	-13.30	-0.08	-10.91	94.60	1.720E-03
14.00	-17.90	-0.11	-14.68	69.10	1.256E-03
14.50	-20.60	-0.12	-16.90	42.10	7.653E-04
15.00	-23.00	-0.14	-18.87	15.50	2.818E-04
15.50	-25.70	-0.15	-21.08	-13.30	-2.418E-04
16.00	-29.10	-0.17	-23.87	-42.30	-7.689E-04
16.50	-33.60	-0.20	-27.56	-70.40	-1.280E-03
17.00	-39.10	-0.23	-32.08	-96.20	-1.749E-03
17.50	-48.60	-0.29	-39.87	-118.50	-2.154E-03
18.00	-64.80	-0.39	-53.16	-137.70	-2.503E-03
18.50	-87.20	-0.52	-71.54	-154.20	-2.803E-03
19.00	-113.50	-0.68	-93.11	-167.70	-3.049E-03

表 3 80V の時の鉄心の磁気特性

時間 [ms]	e1 [mV]	i1[A]	F[A]	e2 [mV]	[wb]
0.00	-66.80	-0.40	-54.80	-143.60	-2.610E-03
0.50	-60.50	-0.36	-49.63	-143.30	-2.605E-03
1.00	-45.50	-0.27	-37.33	-139.60	-2.538E-03
1.50	-29.70	-0.18	-24.36	-132.60	-2.410E-03
2.00	-13.20	-0.08	-10.83	-122.70	-2.230E-03
2.50	-1.20	-0.01	-0.98	-109.20	-1.985E-03
3.00	7.60	0.05	6.23	-92.60	-1.683E-03
3.50	12.70	0.08	10.42	-74.90	-1.362E-03
4.00	15.80	0.09	12.96	-55.40	-1.007E-03
4.50	17.70	0.11	14.52	-33.70	-6.126E-04
5.00	19.50	0.12	16.00	-11.30	-2.054E-04
5.50	21.40	0.13	17.56	11.30	2.054E-04
6.00	23.60	0.14	19.36	34.10	6.199E-04
6.50	26.20	0.16	21.49	56.60	1.029E-03
7.00	28.90	0.17	23.71	77.00	1.400E-03
7.50	32.60	0.20	26.74	95.30	1.732E-03
8.00	38.00	0.23	31.17	110.90	2.016E-03
8.50	46.10	0.28	37.82	124.50	2.263E-03
9.00	55.60	0.33	45.61	135.70	2.467E-03
9.50	63.20	0.38	51.85	142.50	2.590E-03
10.00	65.60	0.39	53.82	145.40	2.643E-03
10.50	60.30	0.36	49.47	144.30	2.623E-03
11.00	45.30	0.27	37.16	141.00	2.563E-03
11.50	29.20	0.17	23.95	134.00	2.436E-03
12.00	12.40	0.07	10.17	123.10	2.238E-03
12.50	0.40	0.00	0.33	109.50	1.991E-03
13.00	-8.20	-0.05	-6.73	93.20	1.694E-03
13.50	-13.50	-0.08	-11.07	74.20	1.349E-03
14.00	-16.50	-0.10	-13.54	55.10	1.002E-03
14.50	-18.40	-0.11	-15.09	34.20	6.217E-04
15.00	-20.20	-0.12	-16.57	12.30	2.236E-04
15.50	-22.10	-0.13	-18.13	-10.10	-1.836E-04
16.00	-24.20	-0.14	-19.85	-33.30	-6.053E-04
16.50	-26.70	-0.16	-21.90	-56.60	-1.029E-03
17.00	-29.50	-0.18	-24.20	-77.30	-1.405E-03
17.50	-33.00	-0.20	-27.07	-95.40	-1.734E-03
18.00	-38.30	-0.23	-31.42	-112.10	-2.038E-03
18.50	-45.30	-0.27	-37.16	-124.50	-2.263E-03
19.00	-55.10	-0.33	-45.20	-135.80	-2.469E-03

表 4 60V の時の鉄心の磁気特性

時間 [ms]	e1 [mV]	i1[A]	F[A]	e2 [mV]	[wb]
0.0	-30.4	-0.18	-24.94	-109.4	-1.99E-03
0.5	-26.6	-0.16	-21.82	-109.0	-1.98E-03
1.0	-21.0	-0.13	-17.23	-105.7	-1.92E-03
1.5	-12.8	-0.08	-10.50	-100.4	-1.83E-03
2.0	-3.7	-0.02	-3.04	-89.7	-1.63E-03
2.5	1.8	0.01	1.48	-82.4	-1.50E-03
3.0	7.4	0.04	6.07	-69.5	-1.26E-03
3.5	11.0	0.07	9.02	-53.8	-9.78E-04
4.0	13.4	0.08	10.99	-42.3	-7.69E-04
4.5	15.0	0.09	12.31	-25.5	-4.64E-04
5.0	16.3	0.10	13.37	-9.2	-1.67E-04
5.5	17.7	0.11	14.52	7.5	1.36E-04
6.0	19.0	0.11	15.59	24.6	4.47E-04
6.5	20.4	0.12	16.74	42.1	7.65E-04
7.0	21.5	0.13	17.64	56.8	1.03E-03
7.5	23.1	0.14	18.95	70.7	1.29E-03
8.0	25.0	0.15	20.51	82.9	1.51E-03
8.5	26.8	0.16	21.99	92.8	1.69E-03
9.0	28.8	0.17	23.63	100.4	1.83E-03
9.5	29.8	0.18	24.45	105.5	1.92E-03
10.0	29.6	0.18	24.28	108.5	1.97E-03
10.5	26.6	0.16	21.82	108.1	1.97E-03
11.0	20.0	0.12	16.41	104.7	1.90E-03
11.5	11.5	0.07	9.43	98.6	1.79E-03
12.0	3.7	0.02	3.04	91.2	1.66E-03
12.5	-3.0	-0.02	-2.46	80.7	1.47E-03
13.0	-8.1	-0.05	-6.64	68.8	1.25E-03
13.5	-11.7	-0.07	-9.60	55.3	1.01E-03
14.0	-14.1	-0.08	-11.57	40.3	7.33E-04
14.5	-15.8	-0.09	-12.96	24.8	4.51E-04
15.0	-17.1	-0.10	-14.03	7.6	1.38E-04
15.5	-18.4	-0.11	-15.09	-9.3	-1.69E-04
16.0	-19.7	-0.12	-16.16	-26.4	-4.80E-04
16.5	-21.1	-0.13	-17.31	-43.8	-7.96E-04
17.0	-22.3	-0.13	-18.29	-58.6	-1.07E-03
17.5	-23.7	-0.14	-19.44	-72.0	-1.31E-03
18.0	-25.4	-0.15	-20.84	-83.4	-1.52E-03
18.5	-27.5	-0.16	-22.56	-93.2	-1.69E-03
19.0	-29.3	-0.18	-24.04	-100.3	-1.82E-03