

実験レポート
2022 年度
電気電子情報工学実験Ⅱ(a)
電気・電子工学実験Ⅱ

学籍番号 20220057

氏名 池田宗駿

実験番号 6

実験題目 単相変圧器と誘導機の特性測定と低圧配電方式の特徴把握

実験班 A 班

共同実験者 伊藤匠、稲葉悠太、江崎耕平、小川颯太

実験日 7月5日,7月12日

提出締切日 7月28日

提出日 7月28日

チェック欄			点数
合 ・ 否 月 日	合 ・ 否 月 日	合 ・ 否 月 日	

1. 目的

電力システムの重要な構成要素である変圧器の特性とその使用方法を理解するため、単相変圧器の特性を測定し、システム解析のための等価回路を作成する。また、単相変圧器を使用した配電方式である単相 3 線式低圧配電方式の特徴を、バルンサによる電圧不平衡の改善効果を通して理解する。

2. 概要

一般に、発電所・変電所または送電線から伝送される電力は、電送システムの末端にある配電変電所に入り、ここで電圧を下降させたうえで適当な回線数の高圧配電線路により、さらに送り出される。その線路に沿って適当な箇所ごとに配電変圧器を設置し、ここでさらに電圧を下降して低圧配電線路に接続する。一般にこれらの配電線路により需要家に電力を供給するのが配電の役割である。本実験では、配電変圧器の基本的機能を理解するため、その特性試験を行う。

また、配電線路の電圧を需要家の負荷の量が平衡していない場合に、端子電圧を平衡させるためにバルンサの役割についても実験により理解する。

3. 実験方法

(1) 変圧器の特性測定試験

以下に示す、抵抗測定試験、変圧比試験、無負荷試験、短絡試験により、単相変圧器の種々の特性を測定し、パラメータを求める。

さらに、電圧システムの解析に用いられる変圧器の等価回路を作成する。

① 抵抗測定試験

変圧器の 1 次側抵抗 r_1 、二次側抵抗 r_2 を、テスターを用いて測定する。また、その結果について考察する。

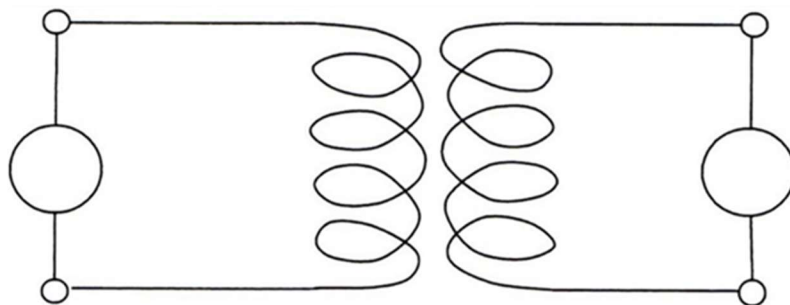


図 1. 実験 1.1 の回路

② 変圧比試験

1 次側に電圧を加え 2 次側の誘起電圧を測定し 1 次-2 次間の変圧比 a を求める。

【方法】

電圧調整器で1次側電圧をゼロから定格電圧（100V）の125%まで変化させ、2次側の電圧を測定する。得られたデータにより1次側電圧 V_1 を横軸とし、2次側電圧 V_2 および変圧比 a を縦軸とするグラフを書き、その結果について考察する。

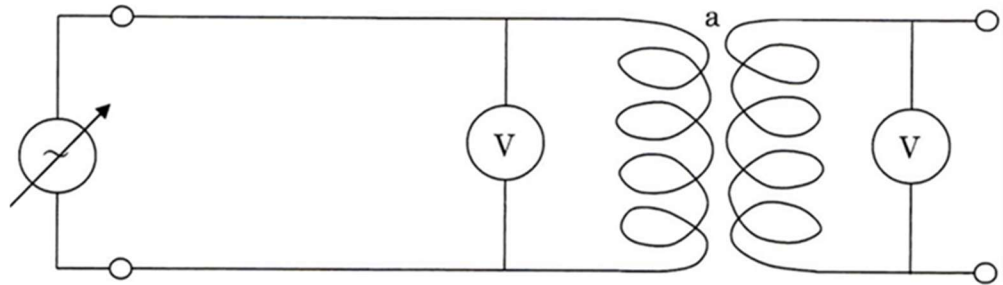


図 2. 実験 1.2 結線図

③ 無負荷試験

変圧器の2大損失の一つである鉄損、励磁電流および飽和度を測定し、鉄損および無負荷力率を計算する。

【方法】

2次側を解放した（何も接続していない）状態で、電圧調整器で1次側電圧 V_{o1} をゼロから定格電圧（100V）の125%まで変化させ、各電圧に対し電流 I_{o1} および入力電圧 W_{o1} を測定する。得られたデータにより1次側電圧 V_{o1} を横軸とする、鉄損 P_i 、励磁電流 I_{o1} 、無負荷力率 $\cos \varphi_o$ を縦軸とするグラフを描く。なお、 α_o は電力計の倍率(0.2)である。

入力（鉄損）	$P_i = \alpha_o W_{o1} [W]$	(1)
--------	-----------------------------	-----

無負荷力率	$\cos \varphi_o = P_i / (V_{o1} I_{o1}) \times 100 [\%]$	(2)
-------	--	-----

励磁アドミタンス	$Y_o = I_{o1} / V_{o1}$	(3)
----------	-------------------------	-----

励磁コンダクタンス	$g_o = P_i / V_{o1}^2$	(4)
-----------	------------------------	-----

励磁サセプタンス	$b_o = \sqrt{Y_o^2 - g_o^2}$	(5)
----------	------------------------------	-----

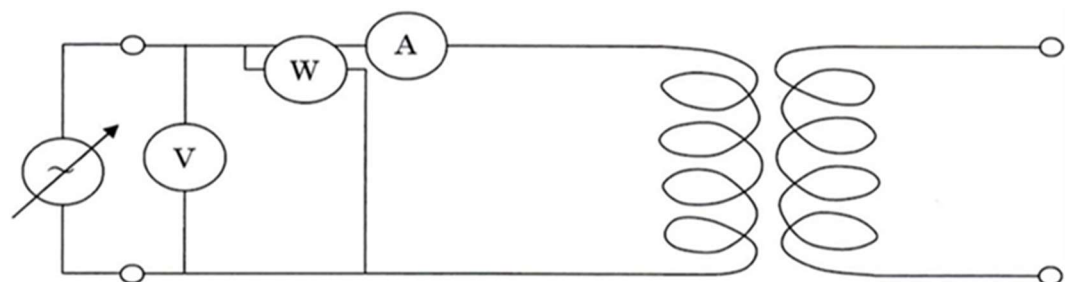


図 3. 実験 1.3 結線図

④ 短絡試験

変圧器の銅損を測定し、合インピーダンス、実効抵抗、実効リアクタンス等を求める。

【方法】

2 次側を短絡した状態で、1 次側に電圧を加え、2 次側を電流計で短絡して電流を測る。この 2 次側の短絡電流 I_{s2} が定格電流(3A の 120%の 3.6A)まで変化するように 1 次側電圧 V_{s1} を調整して、2 次側の短絡電流 I_{s2} に対する 1 次側電流 I_{s1} 、1 次側電圧 V_{s1} 、入力電力 W_{s1} を測定する。得られたデータにより、**2 次短絡電流 I_{s2} を横軸とし、短絡損失（銅損） P_c 、1 次側短絡電流 I_{s1} 、1 次側短絡電圧 V_{s1} を縦軸とするグラフを描き、その結果について考察する。**

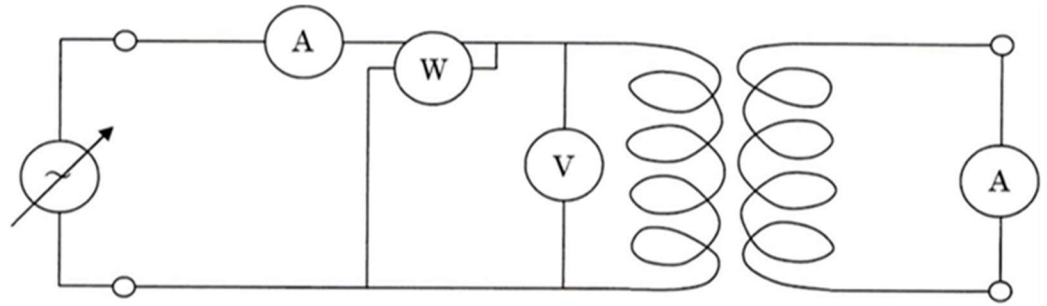


図 4. 実験 1.4 結線図

〈等価回路〉

以上の実験結果を基に、下記の $R_e, Z_e, X_e, g_o, b_o, Y_o$ を求めて、**等価回路**を完成させる。このとき、実験で使用した変圧器の定格値を使用すること。

$$P_c = \alpha_s W_{s1} \quad (\text{電力計読み取り値の換算}) \quad (6)$$

$$Z_e = V_{s1} / I_{s1} [\Omega] \quad (7)$$

$$R_e = r_1 + a^2 r_2 [\Omega] \quad (8)$$

(この実験では r_1, r_2 を取得していないため $R_e = P_c / I_{s1}^2$ として計算する)

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} [\Omega] \quad (9)$$

$$R'_e = R_e \times (234.5 + 75.0) / (234.5 + t) [\Omega] \quad (10)$$

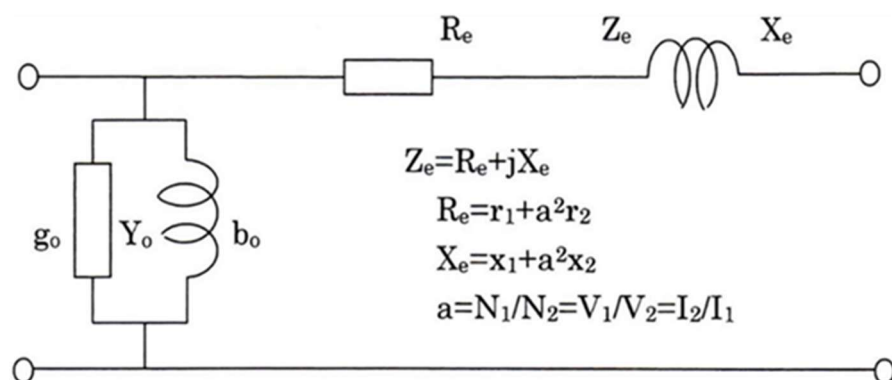


図 5. 変圧器等価回路

〈特性計算〉

実験①～④までの結果を用いて電圧変動率、効率を計算する。

2 次負荷力率 $\cos \varphi = 1$ および $\cos \varphi = 0.8$ に対して、2 次負荷電流に対する q_r 、 q_x を計算し、電圧変動率 $q_{\cos \varphi}$ を求める。次に銅損 P_c と無負荷損（鉄損） P_i から全損失 P_L を算出し、効率 $\eta_{\cos \varphi}$ を計算する。なお、 α_s は電力計の倍率(2.5)である。なお、 P_i は定格時の値、 R_e, X_e は等価回路で求めた一定値を用いること。

【方法】

二次負荷力率 $\cos \varphi = m$ を $m = 1$ および 0.8 ($\sin \varphi = n$ 、 $n = 0.0$ および 0.6) と仮定し、2 次負荷電流 I_2 を 0 から定格電流まで仮定して、2 次端子電圧 V_2 、電圧変動率 $q_{\cos \varphi}$ 、効率 $\eta_{\cos \varphi}$ を求める。なお、 V_1 は定格 1 次電圧(100V)である。

$$q_r = I_2 R_e / a V_1 \times 100 = \% \text{抵抗電圧降下} \quad (11)$$

$$q_x = I_2 X_e / (a V_1) \times 100 = \% \text{リアクタンス電圧降下} \quad (12)$$

$$q_{\cos \varphi} = \text{電圧変動率} = q_r m + q_x n \quad (13)$$

$$V_2 = \text{2 次負荷端子電圧} = V_1 (1 - q_{\cos \varphi} / 100) / a [\text{V}] \quad (14)$$

$$W_2 = \text{二次出力} = V_2 I_2 \cos \varphi [\text{W}] \quad (15)$$

$$P_c = \text{銅損} = I_2^2 a^2 R_e' [\text{W}] \quad (16)$$

$$P_L = \text{全損失} = P_c + P_i [\text{W}]$$

$$\eta_{\cos \varphi} = W_2 / (W_2 + P_L) \times 100 [\%]$$

求めたデータより 2 次負荷電流 I_2 を横軸として、力率 1 ($\cos \varphi = 1$) と遅れ力率 ($\cos \varphi = 0.8$) に対する 2 次端子電圧 V_2 、電圧変動率 $q_{\cos \varphi}$ 、効率 $\eta_{\cos \varphi}$ を縦軸とするグラフを描き、その結果について考察する（特に、効率が最大となる条件と理由）。

(2) 誘導電動機(モータ)の特性測定実験

以下に示す、無負荷試験、拘束試験、抵抗測定により、誘導電動機の種々特性を測定し、等価回路のパラメータを求める。

① 誘導電動機の起動

通常、停止状態のモータに定格電圧を加えると、大きな起動電流が流れる。これは、二次側を短絡した変圧器の一次側に、高い電圧を加えるのと同じである。大きな起動電流はモータの巻き線を急激に加熱し、大きな機械的衝撃を与えるだけでなく、力率が悪いために著しく電源電圧を降下させ、同じ電源に接続されているほかの負荷に悪影響を及ぼす。そのため、大型の巻線形誘導電動機では、二次回路に抵抗を調整して起動電流を減少させるなどの起動方法がとられる。

最も広く利用されているかご形電動機では、この方法を採用できないので、起動電流を減少させるためには低い印加電圧において起動し、加速後、定格電圧に切り替える。5kW 程度以下の小容量かご形電動機では、電源に与える影響が少ないので、定格電圧を直接印加して起動する。

② 無負荷試験

モータの特性を求めるためには、巻線抵抗測定、無負荷試験および拘束試験が必要である。無負荷試験から、励磁アドミタンスが求められる。

モータが無負荷で運転しているとき、一次側に流れる電流（無負荷電流）は、

a) 電動機内に回転磁界を作るために必要な磁化電流

b) 鉄損および摩擦損を供給する有効電流

の二つの合成電流である。

無負荷試験は変圧器の無負荷の場合に相当するが、誘導電動機には空隙があるために磁化電流が大きく、また、摩擦損があるために有効電流も多く流れ、変圧器に比較して無負荷電流は大きい。

【方法】

a) 誘導電動機の銘板をノートに写し取り、各計器のレンジ、抵抗器の容量を適切に選択した後、図のように結線する。電力計は低力率計のものを使用する。

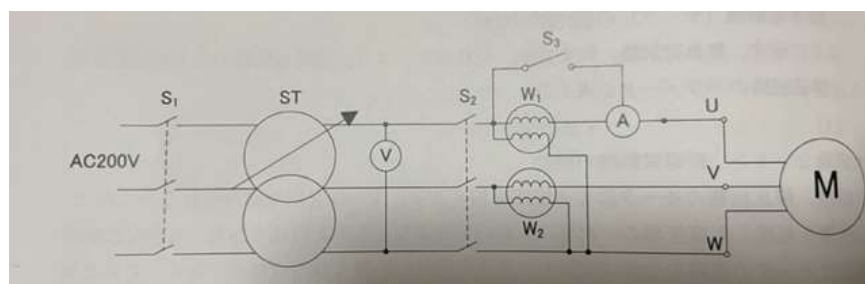


図 6. 誘導電動機(モータ)の特性試験結線図

- b) 摺動変圧器 ST のハンドルが 0 の位置にあり、電圧計の指示が 0 であることを確認し、スイッチ S_2 を閉じる。ST のハンドルを回して、徐々に電圧を上げ、誘導電動機が起動したら電圧 V_0 、電流 I_0 、 P_0 、および回転数 N を測定する。
- c) 端子電圧 V_1 を定格電圧から、ほぼ同期速度を保つ最低値まで変化させ、 V_1, I_0, P_0 および N 後を測定し、下図のようにグラフを描く。この曲線を $V_1 = 0$ まで外挿して、機械損 P_m を求める。 $P_0 - P_m$ は鉄損と一次巻線の銅損の和となる。

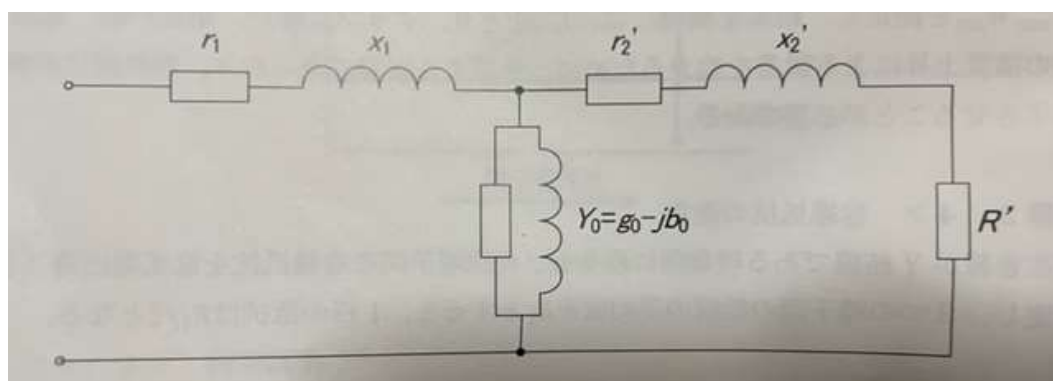


図 7. 鉄損と機械損の分離

③ 拘束試験

拘束試験では、回転子が回転しないように拘束し、一時端子に低電圧を加えて、一時電流がほぼ定格になった場合の電圧、電流および電力を求める。これは変圧器の短絡試験と同じで、図 9 の等価回路で負荷抵抗を短絡した状態に相当する。この試験から、一次および二次の実効抵抗の和およびリアクタンスの和が求められる。

電圧、電流、電力の測定値を V_{sm}, I_{sm}, W_{sm} とすると、定格電圧 V を印加した場合の短絡電流 I_s 、電力 W_s 、および力率 $\cos \phi$ は次式から求められる。

$$I_s = I_{sm} \frac{V}{V_{sm}} \quad W_s = W_{sm} \left(\frac{V}{V_{sm}} \right)^2 \quad \cos \phi = \frac{W_{sm}}{\sqrt{3} V_{sm} I_{sm}}$$

この試験時の入力電圧、すなわち、電力損失には、回転子が拘束されているので機械損はない。また、電圧が低く、磁束が少ないために鉄損も極めて少ないので、一次および二次の銅損の和と見なすことができる。したがって、一相あたりの抵抗 $r_1 + r_2'$ (r_2' は一次側から見た二次抵抗) は次式から求められる。

$$r_1 + r_2' = \frac{W_s}{3I_s^2} \quad (19)$$

【方法】

- a) 結線は図 6 と同じ。無負荷試験の時と同様に、低力率電力計を使用する。
- b) 回転子を回らないように拘束し、ST のハンドルが 0 の位置にあり、電圧計

の指示が 0 であることを確認し、スイッチ S_2 を閉じる。ST のハンドルを回して、徐々に電圧を上げ、一次電流がほぼ定格値となったときの電圧、電流、電力の値 V_{sm}, I_{sm}, W_{sm} を測定する。

- c) 電流を定格の約 120% から 50% 程度まで変化させ、電圧、電流、電力の値 V_{sm}, I_{sm}, W_{sm} を測定し、結果を横軸に電流 I_{sm} をとり、グラフに描く。測定の際、電機子巻線の温度上昇による誤差を抑えるために、手際よく計器を読み取り、短時間に試験を終了させることが必要である。

⑤ 巻線抵抗の測定

一次巻線が Y 結線であるときを例にとると、一次端子間の巻線抵抗を直流電圧降下法で測定し、3 つの端子間の抵抗の平均値を R_1 とすると、1 相の抵抗は $R_1/2$ となる。

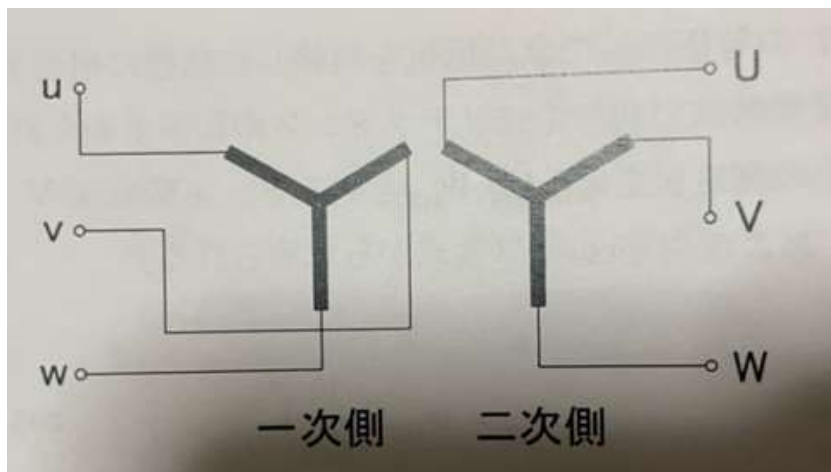


図 8. 三相誘導電動機の Y-Y 結線

<等価回路>

誘導電動機は様々な点で変圧器に似ているため、変圧器の特性計算に等価回路を使用したように、誘導電動機にも等価回路を利用できる。変圧器との唯一の相違点は、変圧器の出力は電力であるが、誘導電動機は機械的動力であることにある。つまり、機械的動力に等価な電力消費 $I_1'^2 R'$ ($I_1'^2$ は一次換算の二次電流) を生じる抵抗 R' が負荷として接続された変圧器と等価である。この等価抵抗は誘導電動機のモータのすべり s に関係し、次式で表される。

$$R' = \frac{(1-s)}{s} r_2' \quad (20)$$

ただし r_2' は一次換算二次実効抵抗である。

誘導電動機が停止、すなわち $s=1$ のときは $R' = 0$ となり、機械的出力は 0 であり、電力消費は二次銅損だけとなる。

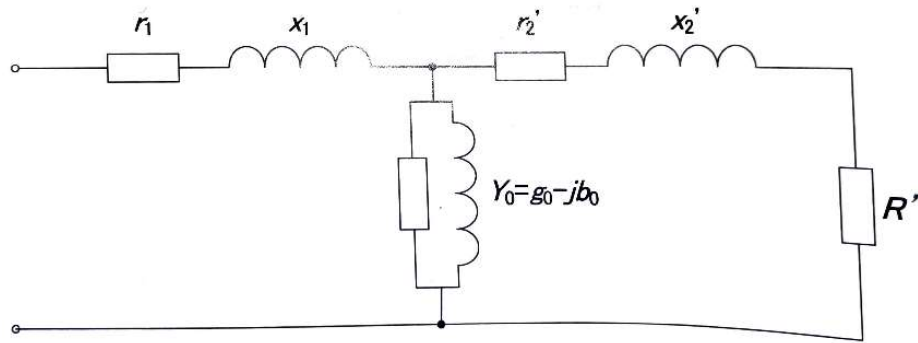


図 9. 誘導電動機の等価回路

等価回路の各パラメータは以下のように求められる。

- a) 巻線抵抗の測定値を、基準温度に換算した値を用いる。測定温度を $t[^\circ\text{C}]$ とすると、基準温度 $T[^\circ\text{C}]$ に換算した一相あたりの一次抵抗は次式となる。

$$r_1 = \frac{R_1}{2} \frac{234.5 + T}{234.5 + t} \quad (21)$$

- b) 無負荷試験の測定値より、一相あたりの電圧を V_0 (線間電圧の $1/\sqrt{3}$)、電流を I_0 、電力を P_0 (測定値の $1/3$) とすれば、

$$\text{励磁アドミタンス} \quad Y_0 = I_0/V_0 \quad (22)$$

$$\text{励磁コンダクタンス} \quad g_0 = (P_0 - P_m)/V_0^2 \quad (23)$$

$$\text{励磁サセプタンス} \quad b_0 = \sqrt{Y_0^2 - g_0^2} \quad (24)$$

P_m は図 7 より求める。

- c) 拘束試験の測定値より、一相あたりの電圧を V_s 、電流を I_{sm} 、電力を P_s (測定値 W_s の $1/3$ をとる) とすれば

$$\text{一次および二次換算抵抗} \quad r_1 + r_2' = P_s/I_s^2 \quad (25)$$

$$\text{一次および二次換算リアクタンス} \quad x_1 + x_2' = \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - \left(\frac{P_s}{I_s^2}\right)^2} \quad (26)$$

- d) 式(25)は交流実効抵抗を与えるが、式(21)で求めた直流抵抗 r_1 を差し引くと r_2' を求めることができる。 $x_1 + x_2'$ は分離することは困難であるが、必要な場合には近似的に一次と二次に等分する。

(3) 配電方式の特徴

単相変圧器を使用した配電方式である単相 3 線式低圧配電方式の特徴を、バランスによる電圧不平衡の改善効果を通して理解する。

【方法】

一次側の電圧 V_{a0} を 100V になるように調節しながら、

- バランサの有無 (S_3 の開/閉)
- 中性線の有無 (S_2 の開/閉)

の計 4 通りの回路に対し、負荷 L_{a1}, L_{b1}, L_{a2} は最大数 10 に固定し、 L_{b2} を 10~5 と変化させて、そのときの電圧、

電流($V_{a0}, V_{b0}, V_{a1}, V_{b1}, V_{a2}, V_{b2}, I_{a1}, I_{n1}, I_{b1}, I_{a2}, I_{n2}, I_{b2}$)を測定する。

測定結果を表にまとめ、負荷比 $(L_{b1} + L_{b2}) / (L_{a1} + L_{a2})$ と各電圧、電流($V_{a0}, V_{b0}, V_{a1}, V_{b1}, V_{a2}, V_{b2}, I_{a1}, I_{n1}, I_{b1}, I_{a2}, I_{n2}, I_{b2}$)の関係をグラフに表す。また、その結果について考察する（特に、中性線の有無、バランスの効果）。

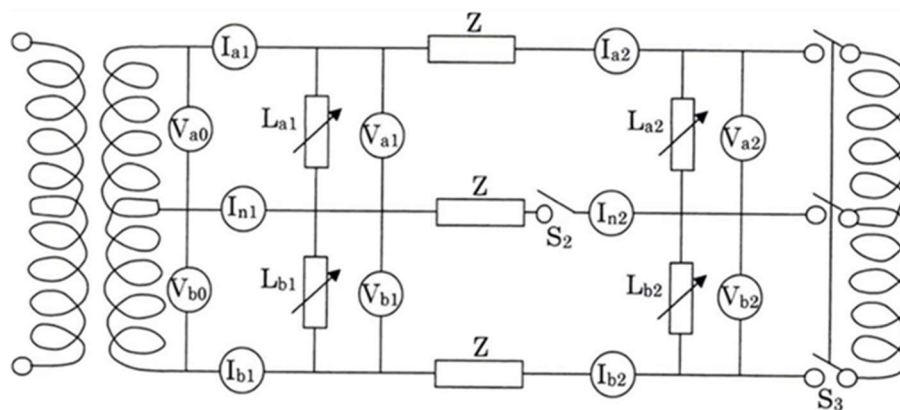


図 10. 単相三線式低圧配電方式の回路

以下は、変圧器、誘導電動機、配電方式の 3 つの実験に分けて報告すること。

4. 実験器具

実験で使用した変圧器の規格を以下に示す。

変圧器容量 $P = 300[\text{VA}]$

変圧比 $a = 1$

1 次側電圧 $V_1 = 100[\text{V}]$

2 次側電圧 $V_2 = 100[\text{V}]$

2 次側電流 $I_2 = 3[\text{A}]$

5. 実験結果

(1) 実験 1 の結果を以下に示す。

① 実験 1.1 の測定結果は以下の表である。

表 2. 実験 1.1 の測定結果

1 次側	1.5Ω
2 次側	2.8Ω
リード線	0.1Ω

リード線の抵抗値は 0.1Ω であるから補正值はそれぞれの測定した抵抗値から 0.1Ω 引いたものである。2 次側の巻線抵抗の抵抗値が、1 次側に比べ、1.92 倍

大きい。導線の抵抗値は $R=\rho l/S$ で求められることから1次側の巻線の方が導線が1.92倍太いことが考えられる。

② 実験 1.2 の結果を以下に示す。

表 3. 実験 1.2 の測定結果

一次側電圧 (V)	2次側電圧 (V)	変圧比
0.0	0.0	0
10.0	10.0	1
20.0	20.0	1
30.0	29.8	1.006711
40.0	39.8	1.005025
50.0	49.6	1.008065
60.0	60.0	1
70.0	69.8	1.002865
80.0	79.8	1.002506
90.0	90.0	1
100.0	99.6	1.004016
110.0	109.5	1.004566
120.0	119.4	1.005025
125.0	124.6	1.00321

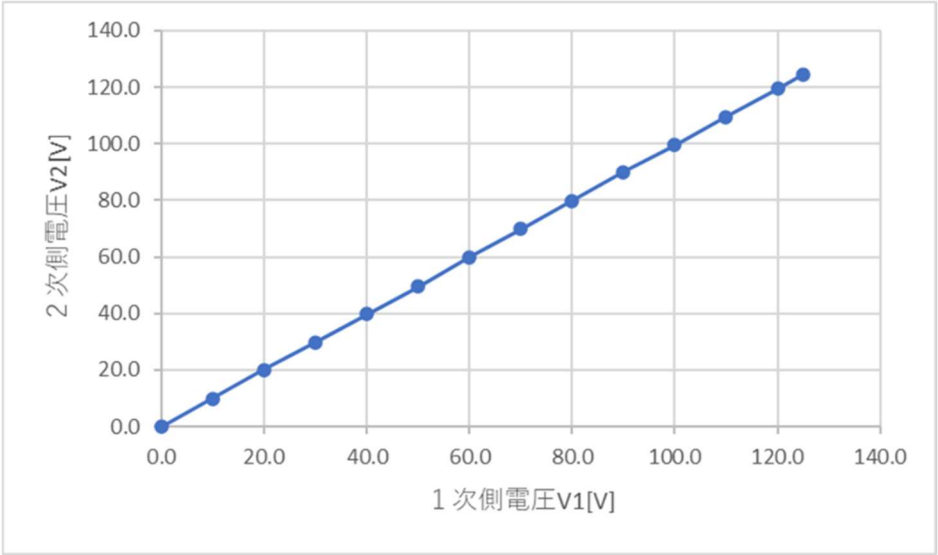


図 11. $V_1 - V_2$ のグラフ

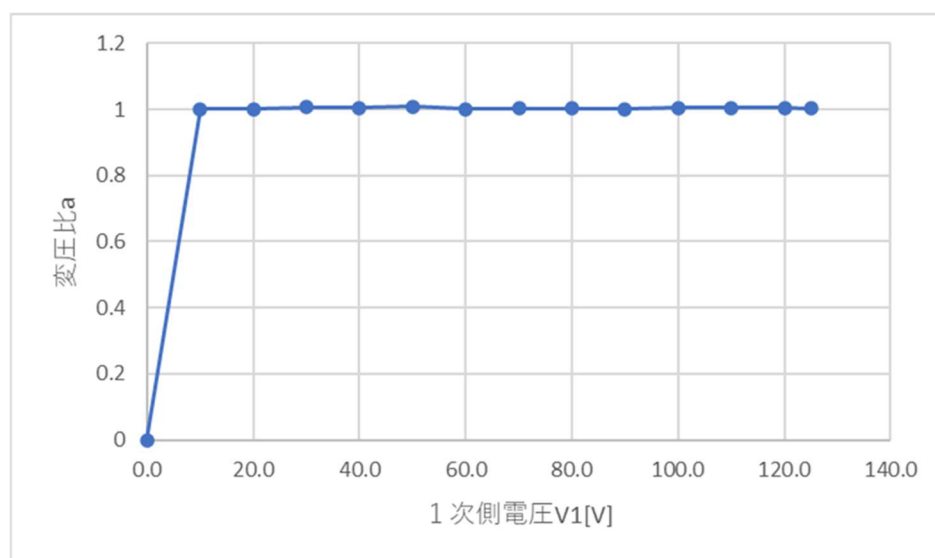


図 12. $V_1 - a$ のグラフ

測定値には測定誤差が存在し、今回 2 次側電圧を測定するのに使用した実験器具の誤差範囲は 0.5% であるから測定結果から 1 次側電圧と 2 次側電圧は常に同じ値であることがわかる。よってそれぞれは比例しており変圧比 a は常に 1 であることがわかる。

- ③ 実験 1.3 の測定結果を以下に示す。

表 4. 実験 1.3 の測定結果

1次側電圧[V]	鉄損	励磁電流[mA]	無負荷力率
0	0.00	0.0	0.00
10	0.04	15.0	26.67
20	0.20	22.5	44.44
30	0.40	32.0	41.67
40	0.70	40.0	43.75
50	1.02	46.2	44.16
60	1.44	53.0	45.28
70	2.00	60.2	47.46
80	2.56	66.8	47.90
90	3.18	76.0	46.49
100	3.90	86.2	45.24
110	4.70	100.2	42.64
120	5.60	124.0	37.63
125	6.20	146.0	33.97

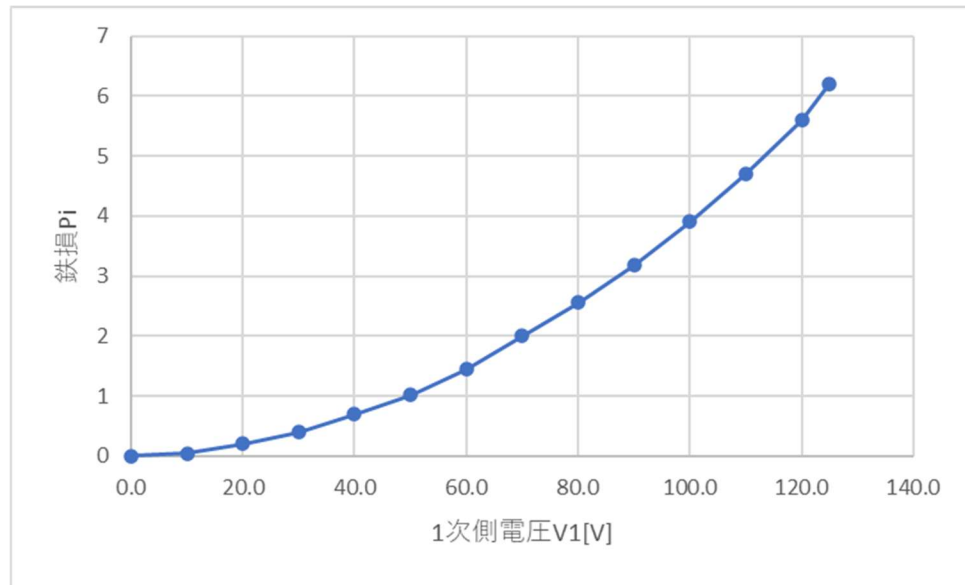


図 13. V_{01} - P_i のグラフ

鉄損 P_i は(1)式で表すことができ、 $W_{01} = V_{01}^2/R$ であるから、 $P_i = \alpha_o V_{01}^2/R$ と表すことができるため上のようなグラフになったと考えられる。

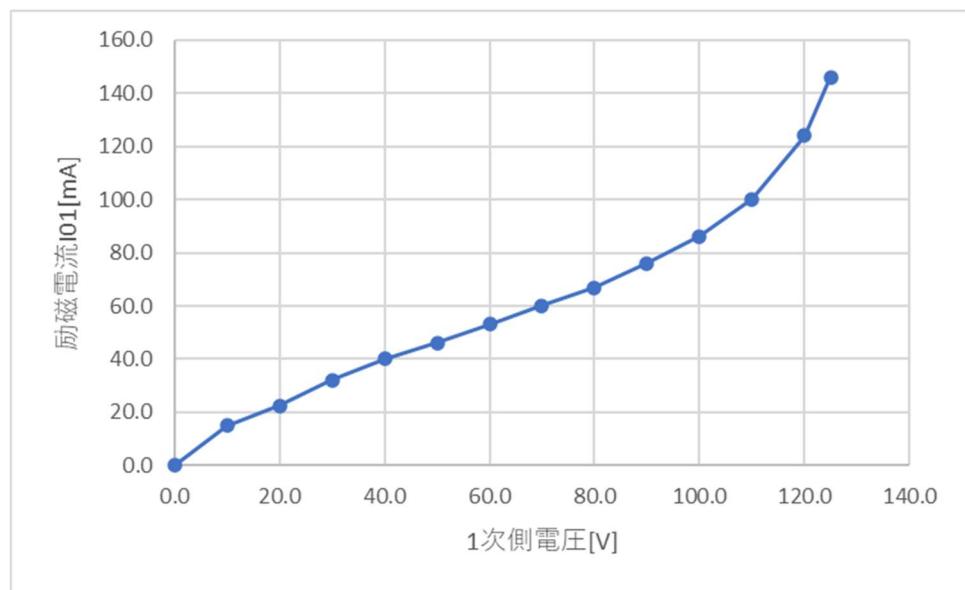


図 14. $V_{01} - I_{01}$ のグラフ

励磁電流 I_{01} は 1 次側電圧 V_{01} が 100V 付近に達するまではほぼ比例しているが 100V を超えたあたりから急に電流が増え比例関係が崩れた。これは変圧器に使われている磁性材料の特性によって磁気飽和が起きたためだと考えられる。

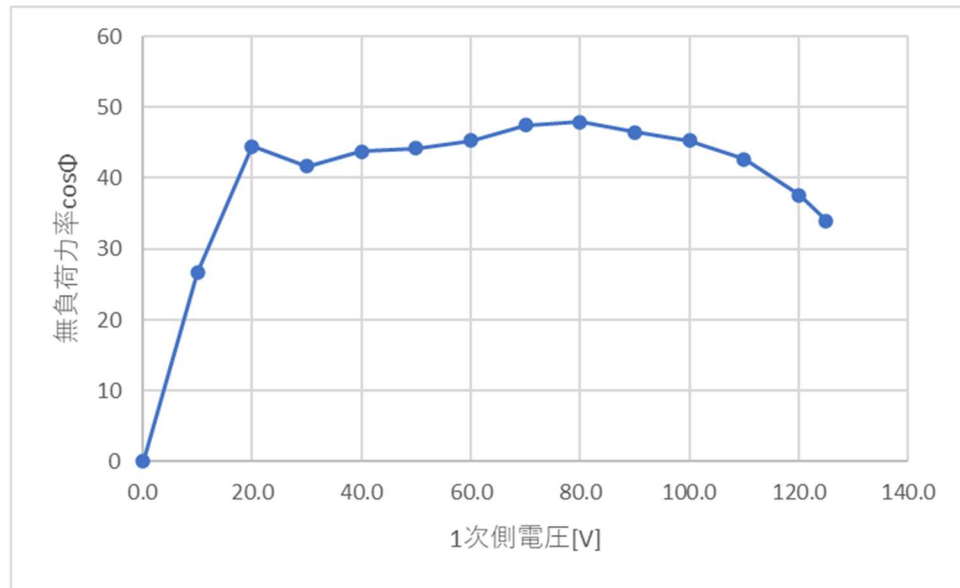


図 15. $V_{01} - \cos\phi$ のグラフ

無負荷力率は(2)式より求めることができる。図より 1 次側電圧が 100V を超えたあたりから無負荷力率が小さくなっていることが読み取れる。これは、磁気飽和によって電流が多く流れているのが原因だと考える。磁気飽和が起きるまでは 1 次側電圧と励磁電流はほぼ比例の関係なので無負荷力率は一定であると考えられる。

⑥ 実験 1.4 の結果を以下に示す。

表 5. 実験 1.4 の測定結果

二次側電流(A)	銅損(W)	一次側電流(A)	一次側電圧(V)
3.60	56.0	3.52	15.8
3.30	48.5	3.29	14.8
3.00	40	3.00	13.5
2.70	33.0	2.68	12.2
2.40	26.2	2.40	10.9
2.10	20.0	2.09	9.5
1.80	14.9	1.78	8.1
1.50	10.1	1.49	6.80
1.20	7.0	1.20	5.40
0.90	4.0	0.89	4.0
0.60	1.90	0.58	2.70

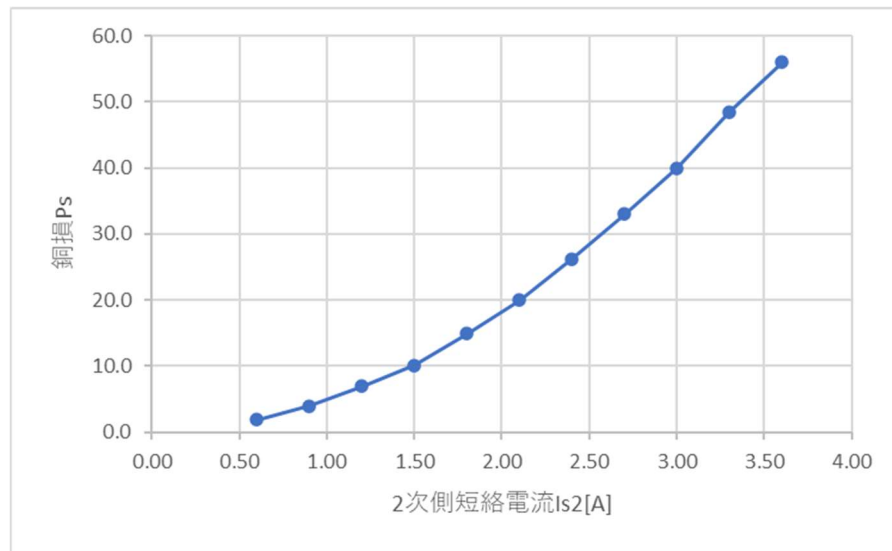


図 16. $I_{s2} - P_c$ のグラフ

銅損 P_s は(6)式で表すことができ、 $W_{s1} = RI_{s1}^2$ であるから、 $P_s = \alpha_s RI_{s1}^2$ と表すことができるため上のような二次関数的なグラフになったと考えられる。

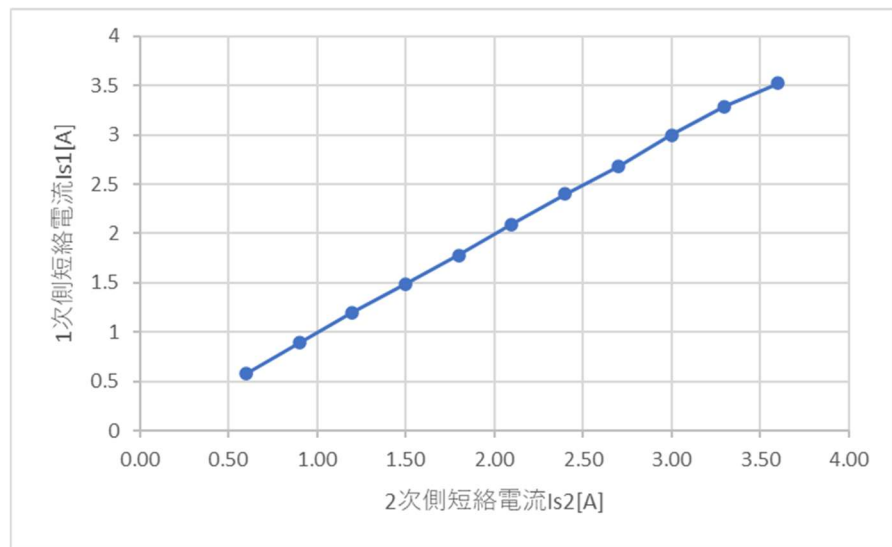


図 17. $I_{s2} - I_{s1}$ のグラフ

グラフより 1 次側、2 次側電流には比例関係があることが読み取れる。

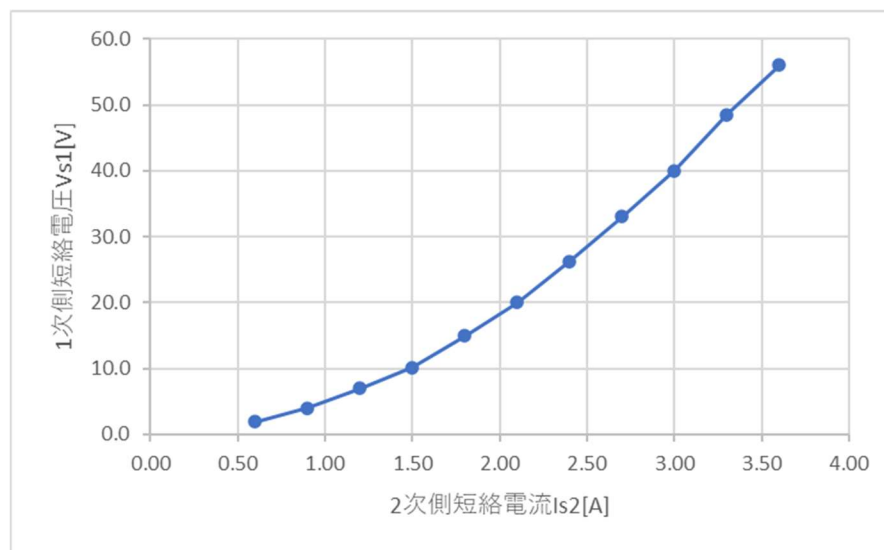


図 18. $I_{s2} - V_{s1}$ のグラフ

グラフより 1 次側電圧、2 次側電流には比例関係があることが読み取れる。
 これらは実験 1.2 のより求めた変圧比より明らかである。

(2) 実験 2 の結果を以下に示す。

① 実験 2.1 の結果を以下に示す。

表 6. 誘導電動機起動時の測定値

電圧 $V1$ [V]	電流 $I0$ [A]	W1	W2	無負荷入力 $P0$	N(rpm)
35.0	1.41	51	15	66	1652.8

② 実験 2.2 の結果を以下に示す。

誘導電動機の銘板は以下である。

測定結果を以下に示す。

表 7. 実験 2.2 の測定結果

電圧 $V1$ [V]	電流 $I0$ [A]	W1 [W]	W2 [W]	回転数 N(rpm)	無負荷入力 $P0$
200.0	2.68	330	-180.0	1793.5	332.68
180.0	2.45	275	-135.0	1790.8	277.45
160.0	2.15	222	-100.0	1788.4	224.15
140.0	1.89	175	-59.0	1788.1	176.89
120.0	1.62	142	-35.0	1783.4	143.62
100.0	1.40	110	-15.0	1776.9	111.40
80.0	1.21	89	0.0	1767.2	90.21
60.0	1.15	69	10.0	1743.4	70.15
40.0	1.35	59	20.0	1685.1	60.35

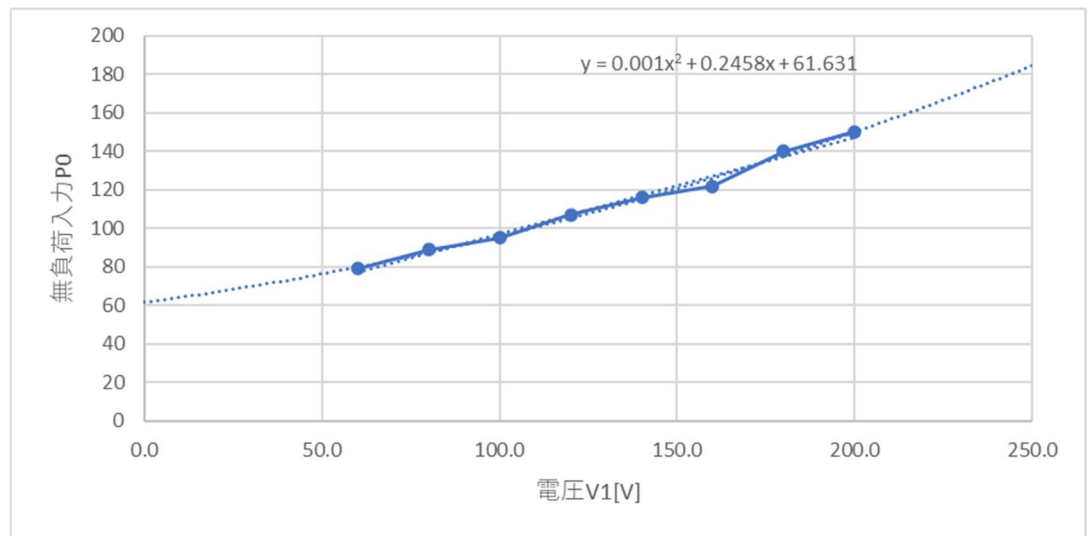


図 19. 鉄損、機械損の分離

上のグラフは回転数が近い値をとる点(80~200V)だけ限定しグラフを作成した。このグラフの近似曲線を求め、切片が 61.6W だと分かった。これが機械損 P_m だと考えられる。

③ 実験 2.3 の結果を以下に示す。

実験 2.3 の測定結果は以下に示す。

表 8. 実験 2.3 の測定結果

電圧Vsm[V]	電流ism[A]	Wsm[W]
26.7	4.99	115.0
26.3	4.78	106.0
25.2	4.60	100.0
24.0	4.40	89.0
22.9	4.18	81.0
22.0	4.01	75.0
20.7	3.79	69.0
18.5	3.60	58.0
17.7	3.42	50.0
17.3	3.22	49.0
16.0	3.00	40.0

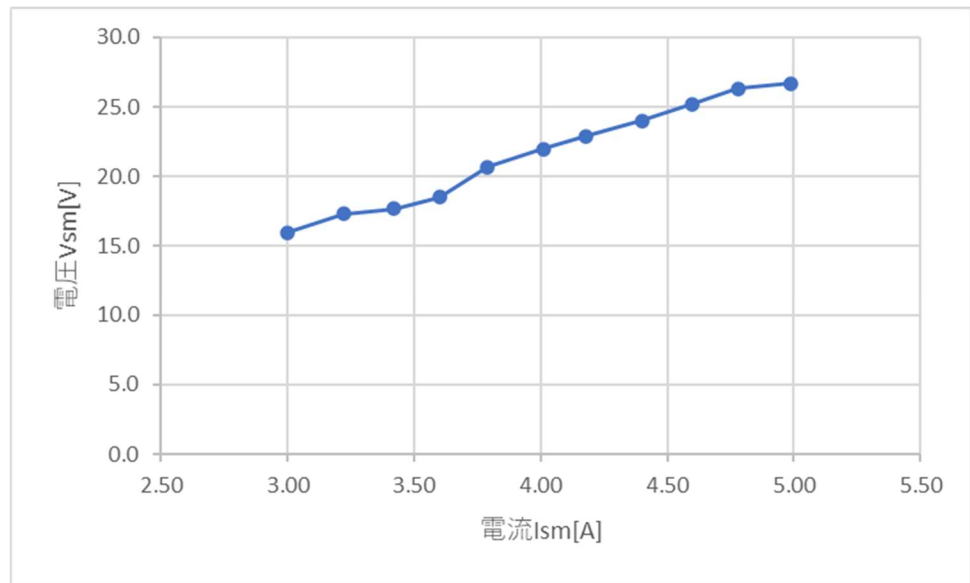


図 20. $I_{sm} - V_{sm}$ のグラフ

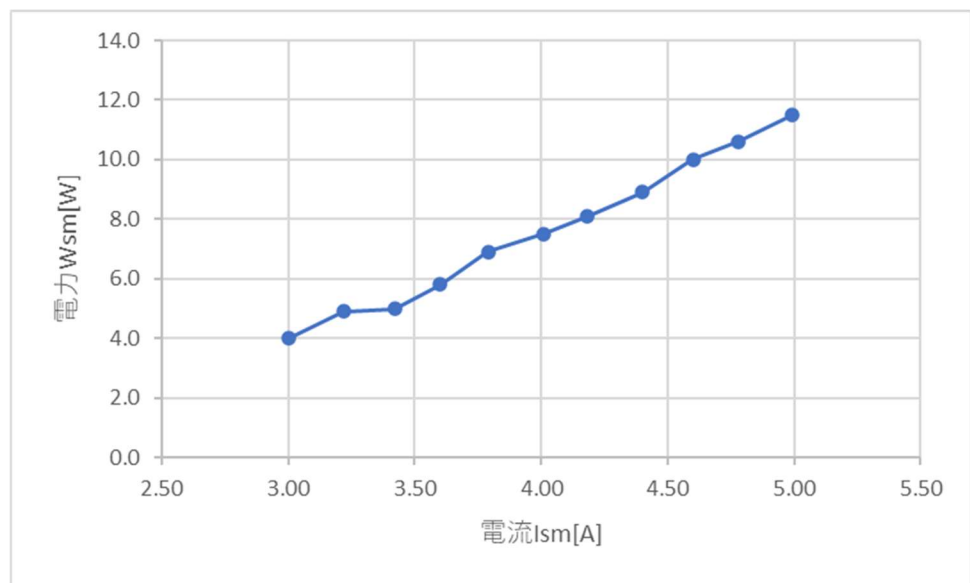


図 21. $I_{sm} - W_{sm}$ のグラフ

図 20, 21 のグラフを見ると、電流の値が 3.5A 付近まではほとんど比例関係であることがわかるが 3.5A 以下になると傾きに誤差が生じている。これは電気子巻線が温度上昇を起こしたことによって発生した測定誤差だと考えられる。

- ④ 実験 2.4 の結果を以下に示す。

表 9. 実験 2.4 の測定結果

U-V間抵抗[Ω]	U-W間抵抗[Ω]	V-W間抵抗[Ω]	R1[Ω]	一相当たりの抵抗[Ω]
1.5	1.6	1.5	1.53	0.767

各端子間での抵抗値を求め、その平均値 R_1 を 2 で割り一相あたりの抵抗値が $0.767[\Omega]$ であるとわかった。

(3) 実験 3 の結果を以下に示す。

実験結果を以下の表にしめす。

表 10. 実験 3 測定結果(バランサ×中性線×)

バランサ×中性線×	Va0	Vb0	Va1	Vb1	Va2	Vb2	Ia1	In1	Ib1	Ia2	In2	Ib2
0.75	100	101	99.2	99.4	32	115.8	9.01	0	9.2	4.95	0	4.89
0.8	100	101	99	99	38.2	99	9.4	0	9.4	5.45	0	5.39
0.85	100	101.1	99	99	43.5	84.9	9.62	0	9.7	5.6	0	5.75
0.9	100	101.2	99	99.1	48	72.8	9.81	0	9.9	6.2	0	6.08
0.95	100	100.9	98.5	99	51.5	62.9	10	0	10.02	6.38	0	6.3
1	100	101.1	99	99.5	54	54.5	10.05	0	10.18	6.55	0	6.5

表 11. 実験 3 測定結果(バランサ○中性線×)

バランサ○中性線×	Va0	Vb0	Va1	Vb1	Va2	Vb2	Ia1	In1	Ib1	Ia2	In2	Ib2
0.75	100	101	99	99.5	66.2	67	9.45	0	9.5	5.52	0	5.49
0.8	100	101	99	99	63.8	64	9.6	0	9.62	5.6	0	5.72
0.85	100	101	99	99	61	61.2	9.75	0	9.8	6	0	5.91
0.9	100	101	99.4	99.5	59	59	9.9	0	9.95	6.2	0	6.14
0.95	100	101	99	99.2	56.2	56.2	10	0	10	6.4	0	6.32
1	100	100.9	99	99.5	54	54	10.1	0	10.16	6.56	0	6.5

表 12. 実験 3 測定結果(バランサ×中性線○)

バランサ×中性線○	Va0	Vb0	Va1	Vb1	Va2	Vb2	Ia1	In1	Ib1	Ia2	In2	Ib2
0.75	100	101.2	99	99.5	40.5	99	9.21	1.87	8.8	5.6	1.925	4.5
0.8	100	101.2	99	99.5	44	88.1	9.5	1.4	9.22	5.85	1.45	5.05
0.85	100	101	99	99	47	78	9.7	0.98	9.59	6.08	1.02	5.52
0.9	100	100.12	99	99.5	50	69.2	9.9	0.6	9.85	6.3	0.68	5.94
0.95	100	101.2	99	99.2	52.5	61.2	10	0.1	10.01	6.42	0.2	6.22
1	100	101	99	99.1	54	54.2	10.1	0	10.11	6.55	0	6.48

表 13. 実験 3 測定結果(バランサ○中性線○)

バランサ○中性線○	Va0	Vb0	Va1	Vb1	Va2	Vb2	Ia1	In1	Ib1	Ia2	In2	Ib2
0.75	100	101.2	99	99.2	66	66.5	9.41	0	9.5	5.55	0	5.48
0.8	100	101	99	99.1	63.5	64	9.6	0	9.61	5.78	0	5.7
0.85	100	101	99	99.1	60.7	61.2	9.78	0	9.8	6	0	5.91
0.9	100	101	99	99	58.5	58.8	9.9	0	9.9	6.2	0	6.12
0.95	100	101	99	99	56	56	10	0	10	6.38	0	6.3
1	100	101	99	99	54	53.7	10.1	0	10.18	6.58	0	6.48

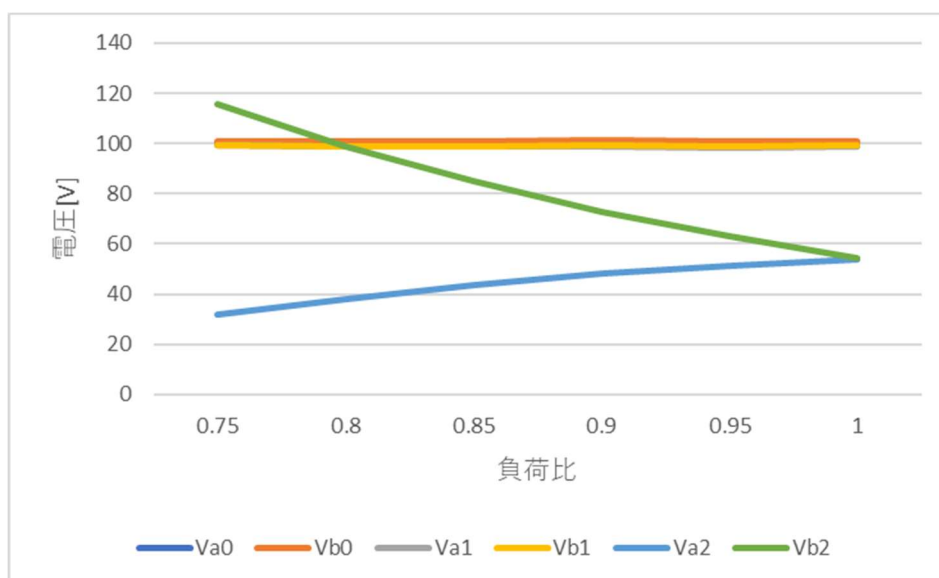


図 22. バランス×中性線×の時の負荷比および電圧

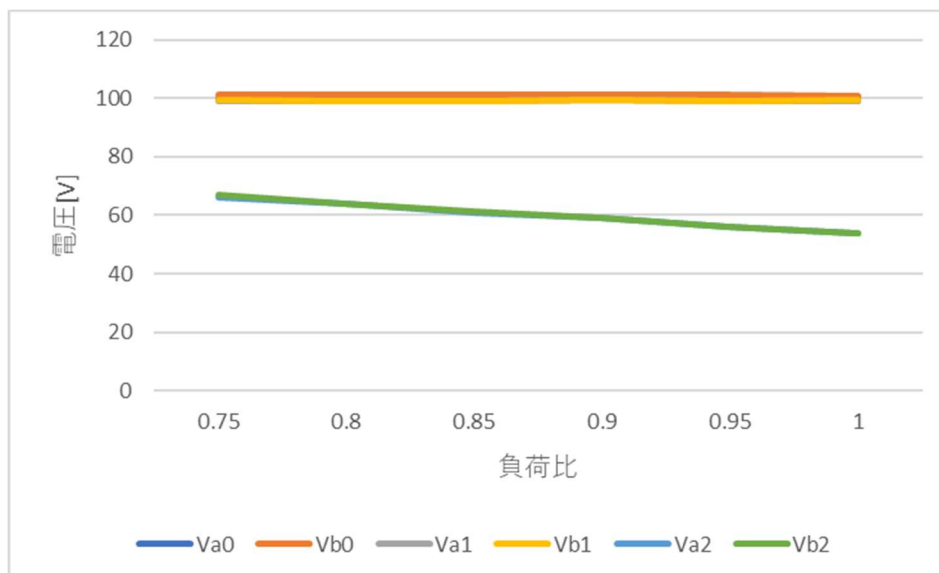


図 23. バランス○中性線×の時の負荷比および電圧

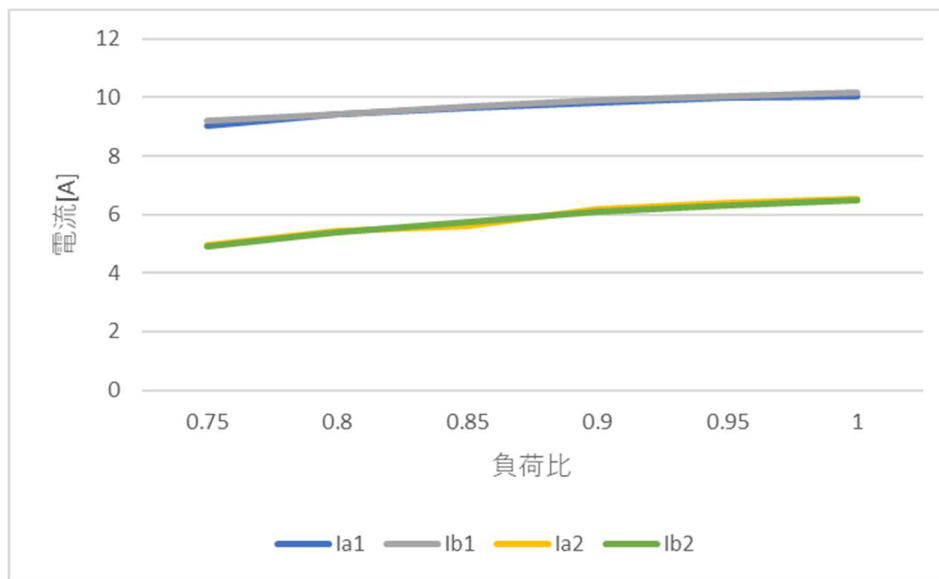


図 24. バランサ×中性線×の時の負荷比および電流

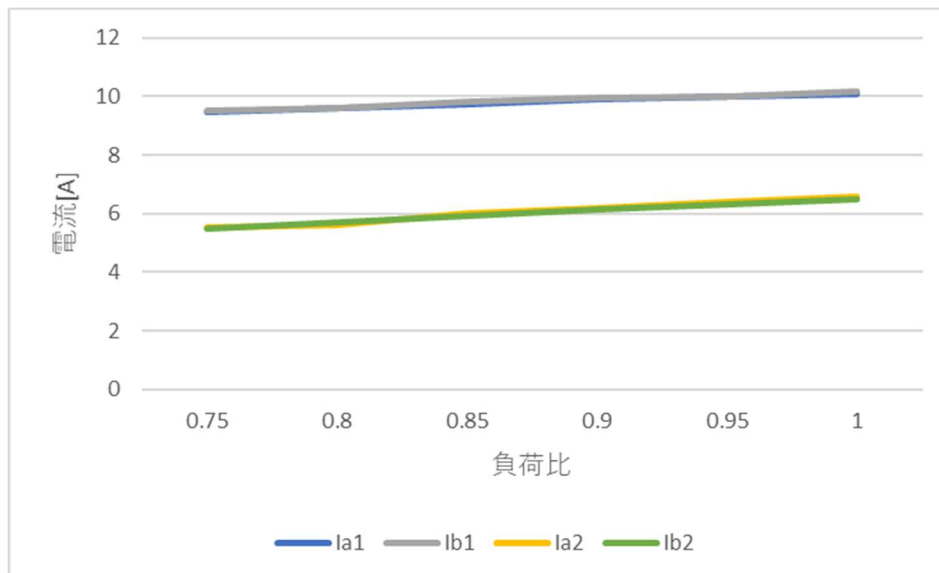


図 25. バランサ○中性線×の時の負荷比および電流

以上の図 22、23 を比較すると、バランサがない時、負荷比が小さくなるほど（回路の下側の $Lb1 + Lb2$ のほうが $La1 + La2$ に比べて抵抗が小さくなるほど） $Va2$ と $Vb2$ の間に電圧差ができるのに対し、バランサがある場合 $Va2$ と $Vb2$ の間に均等に電圧がかかることが分かる。これはバランサがあることで線路での電圧降下が大きくなり、

負荷にかかる電圧が変化し、 $Lb2$ と $La2$ にかかる電圧が均等になるからである。

続いて図 24、25 を比較するとバランサがないとき、あるときで電流の変化はほとんどないことが分かった。これよりバランサが回路の各電圧差を一定に保つために起用するものであると考える。

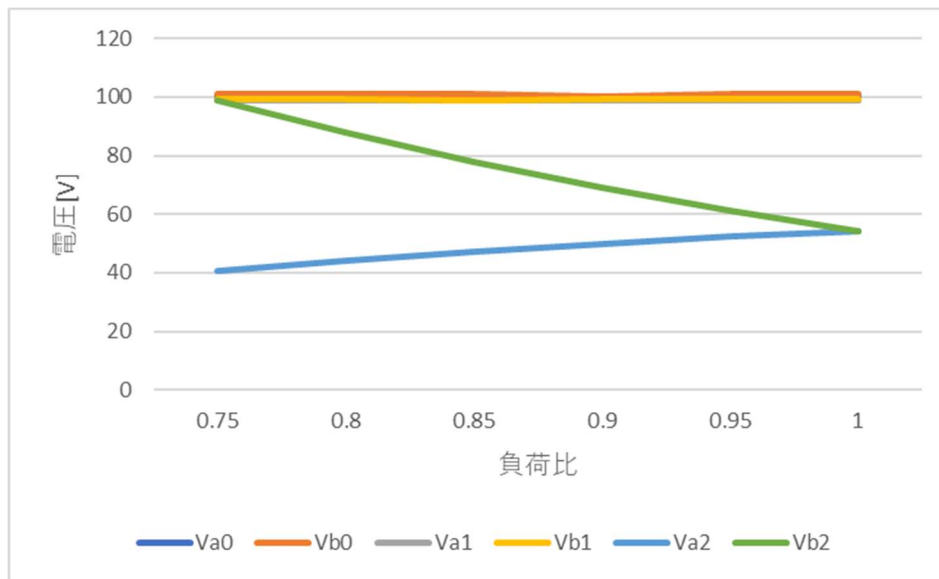


図 26. バランサ×中性線○の時の負荷比および電圧

図 22、26 を比較すると中性線がないときは負荷比が下がっていくことによる $Vb2$ の上昇が、あるときに比べより急になっていることが分かった。これは中性線があることで電圧が分配される経路が増え $Lb1 + Lb2$ と $La1 + La2$ の差による電圧の変化を受けにくくなったからだと考えられる。

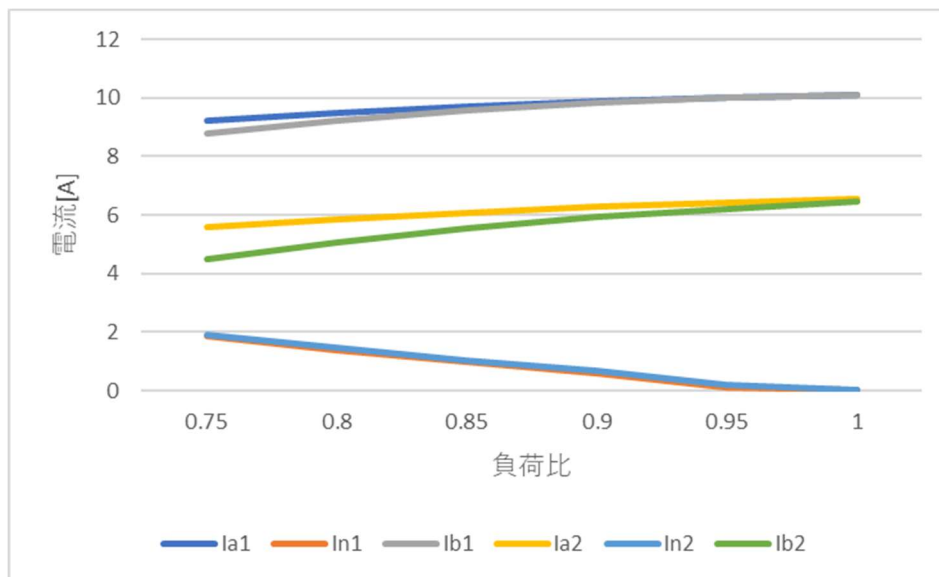


図 27. バランサ×中性線○の時の負荷比および電流

図 24、27 を見比べると中性線があることにより、負荷比が小さくなるほど各電流の値が近づいていくことが分かる。これは $Lb1 + Lb2$ と $La1 + La2$ の差が大きくなれば大きくなるほどその間にある抵抗 Z が無視できなくなることで中性線の $In1$ や $In2$ に電流が流れていくからだと考えた。

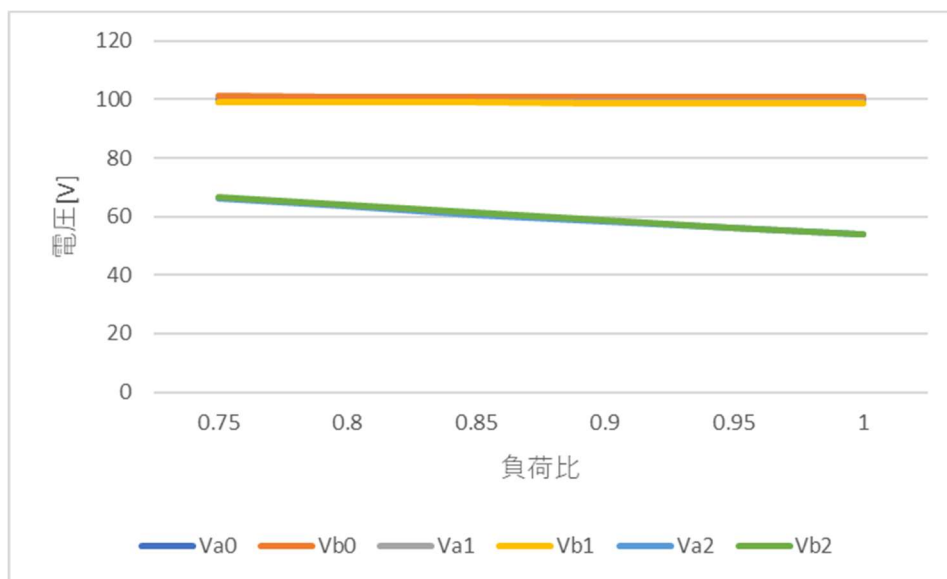


図 28. バランサ○中性線○の時の負荷比および電圧

図 22, 28 を比較すると、バランサと中性線があるとき、ないときと比べ $Va2$ と $Vb2$ の電圧差がない事がわかる。これは前述のバランサがあることで線路での電圧降下が大きくなり、負荷にかかる電圧が変化、その後に $Lb2$ と $La2$ にかかる電圧が均等になるからである。

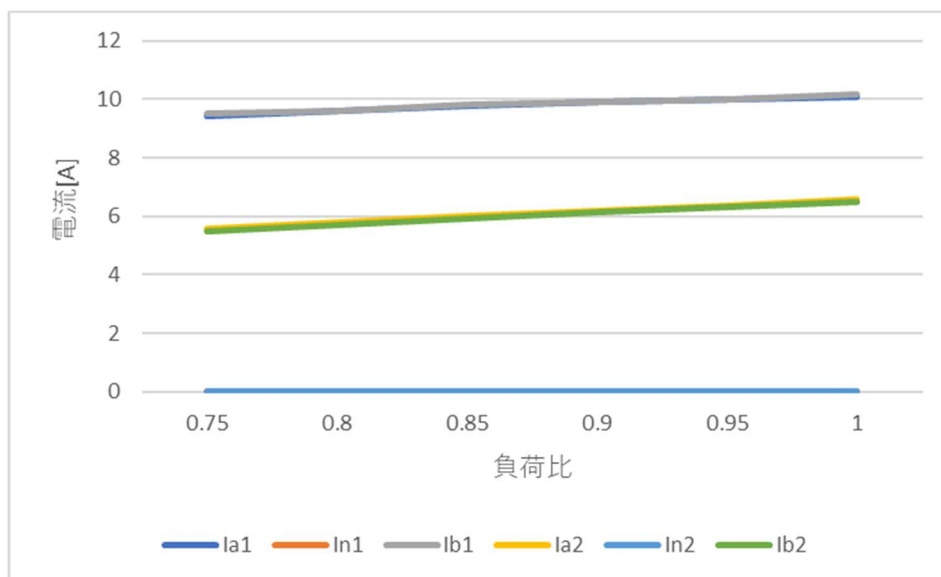


図 29. バランサ○中性線○の時の負荷比および電流

図 24, 29 を比較すると、バランサと中性線があるとき、ないときと比べ負荷比の減少による各電流の降下がゆるやかであり、これはバランサにより負荷にかかる電圧差が小さくなるため電圧の変動や電力の損失が低減したからだと考えられる。

[検討課題]

1. グラフをすべて完成させ、各実験について考察を加えよ。
前述の通り。

2. 式(1)~(26)の値をすべて求めた上で、変圧器、誘導電動機の等価回路を完成させよ。

実験 1.4 の等価回路を作成する。ここで数値は表 5 の 2 次側電流が 3.0A のときの結果を使用する。これにより求めた数値は

$$P_c = \alpha_s W_{s1} = 100$$

$$Z_e = V_{s1} / I_{s1} = 4.5[\Omega]$$

$$R_e = r_1 + a^2 r_2 = 4.4[\Omega]$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = 0.70[\Omega]$$

ここで表 4 の測定値が一次側の電圧が定格値 100V のときのものを使用し(3)(4)(5)式を求める。

$$Y_o = I_{o1} / W_{o1} = 8.62 \times 10^{-4}$$

$$g_o = P_i / V_{o1}^2 = 3.90 \times 10^{-4}$$

$$b_o = \sqrt{Y_o^2 - g_o^2} = 7.69 \times 10^{-4}$$

続いて特性計算を行う。

表 14. 力率 1(m=1,n=0)のときの各値

二次側電流(A)	Re[Ω]	Ze[Ω]	Xe[Ω]	qr	qx	qcosφ	V2	W2	Pc	全損失	効率
3.60	4.4	4.5	0.70	15.8	2.52	15.84	84.2	303.0	56.0	59.9	83.5
3.30	4.4	4.5	0.70	14.5	2.31	14.52	85.5	282.1	48.5	52.4	84.3
3.00	4.4	4.5	0.70	13.2	2.1	13.2	86.8	260.4	40.0	43.9	85.6
2.70	4.4	4.5	0.70	11.9	1.89	11.88	88.1	237.9	33.0	36.9	86.6
2.40	4.4	4.5	0.70	10.6	1.68	10.56	89.4	214.7	26.2	30.1	87.7
2.10	4.4	4.5	0.70	9.2	1.47	9.24	90.8	190.6	20.0	23.9	88.9
1.80	4.4	4.5	0.70	7.9	1.26	7.92	92.1	165.7	14.9	18.8	89.8
1.50	4.4	4.5	0.70	6.6	1.05	6.6	93.4	140.1	10.1	14.0	90.9
1.20	4.4	4.5	0.70	5.3	0.84	5.28	94.7	113.7	7.0	10.9	91.2
0.90	4.4	4.5	0.70	4.0	0.63	3.96	96.0	86.4	4.0	7.9	91.6
0.60	4.4	4.5	0.70	2.6	0.42	2.64	97.4	58.4	1.9	5.8	91.0

表 15. 力率 0.8(m=0.8,n=0.6)のときの各値

二次側電流(A)	Re[Ω]	Ze[Ω]	Xe[Ω]	qr	qx	qcosφ	V2	W2	Pc	全損失	効率
3.60	4.4	4.5	0.70	15.8	2.52	14.184	85.8	247.2	56.0	59.9	80.5
3.30	4.4	4.5	0.70	14.5	2.31	13.002	87.0	229.7	48.5	52.4	81.4
3.00	4.4	4.5	0.70	13.2	2.1	11.82	88.2	211.6	40.0	43.9	82.8
2.70	4.4	4.5	0.70	11.9	1.89	10.638	89.4	193.0	33.0	36.9	84.0
2.40	4.4	4.5	0.70	10.6	1.68	9.456	90.5	173.8	26.2	30.1	85.2
2.10	4.4	4.5	0.70	9.2	1.47	8.274	91.7	154.1	20.0	23.9	86.6
1.80	4.4	4.5	0.70	7.9	1.26	7.092	92.9	133.8	14.9	18.8	87.7
1.50	4.4	4.5	0.70	6.6	1.05	5.91	94.1	112.9	10.1	14.0	89.0
1.20	4.4	4.5	0.70	5.3	0.84	4.728	95.3	91.5	7.0	10.9	89.4
0.90	4.4	4.5	0.70	4.0	0.63	3.546	96.5	69.4	4.0	7.9	89.8
0.60	4.4	4.5	0.70	2.6	0.42	2.364	97.6	46.9	1.9	5.8	89.0

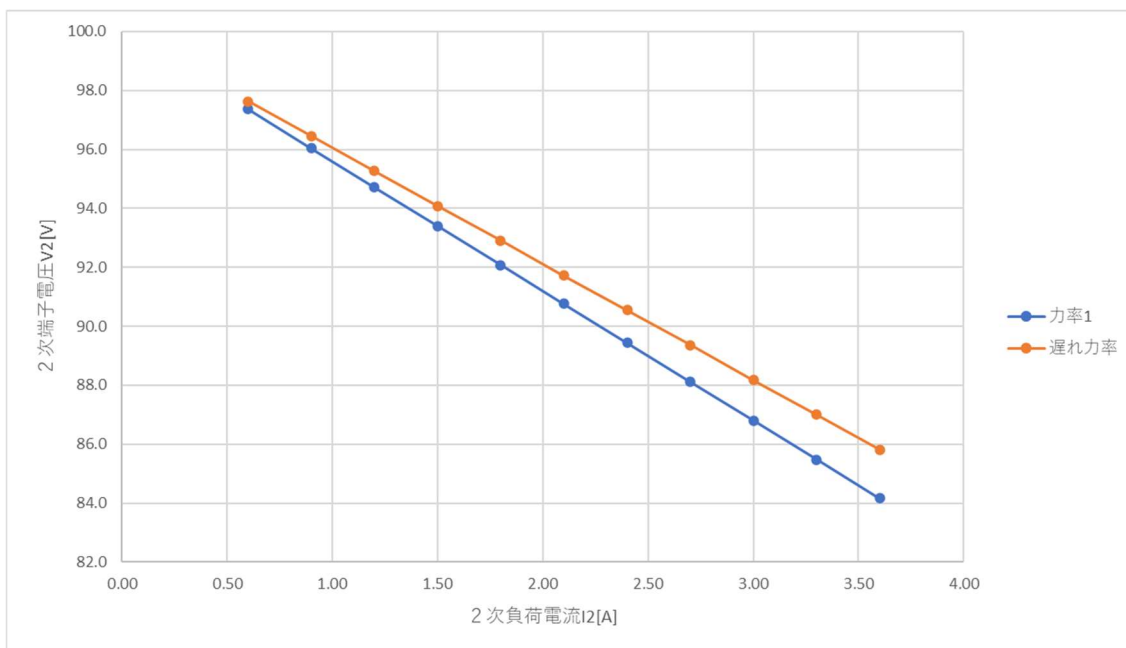


図 30. 2次負荷電流 I_2 -2次端子電圧 V_2 の関係

図を見て分かる通り遅れ力率の方が全体的に V_2 が大きい。これは位相差によるリアクタンスの影響で電圧が大きくなるからだと考えた。

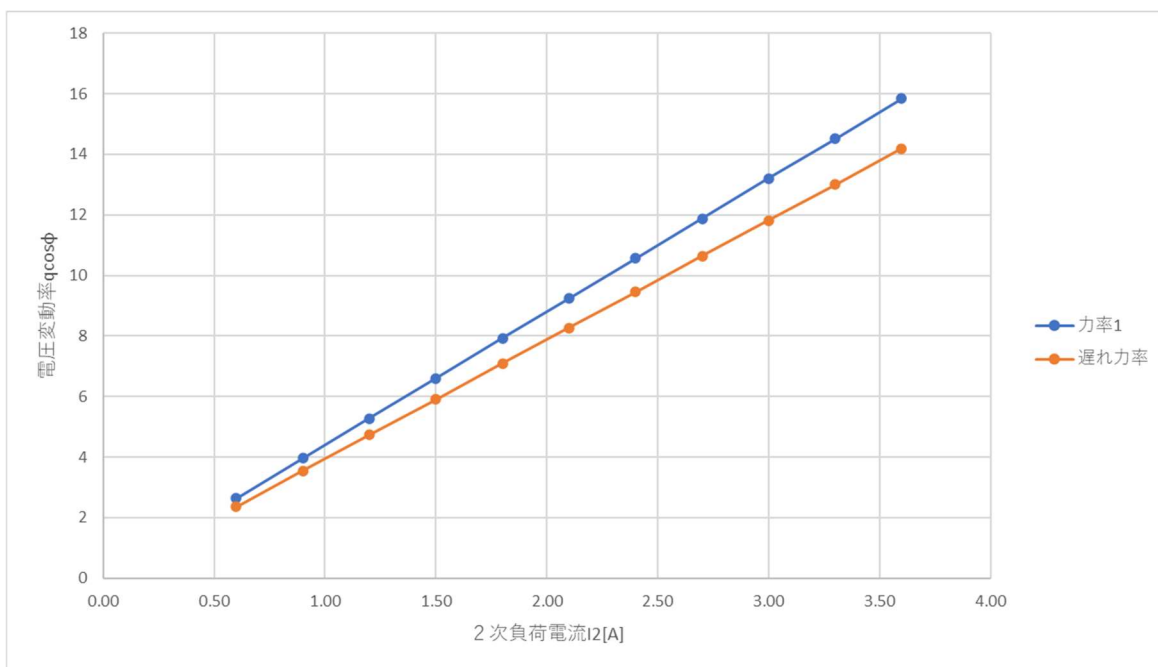


図 31. 2次負荷電流 I_2 -電圧変動率 $q_{\cos\phi}$ の関係

図を見て分かる通り力率1の方が全体的に $q_{\cos\phi}$ の値が大きい。

これは $q_{\cos\phi}$ が $q_r m + q_x n$ で表されることから力率1、遅れ力率のそれぞれの場合で $q_r, 0.8q_r + 0.6q_x$ と表され、表14、15から分かるように q_r, q_x の変化率は、 q_r の方が大きいいため、 q_r の要素を多く含む力率1の方が $q_{\cos\phi}$ の値が大きくなるからである。

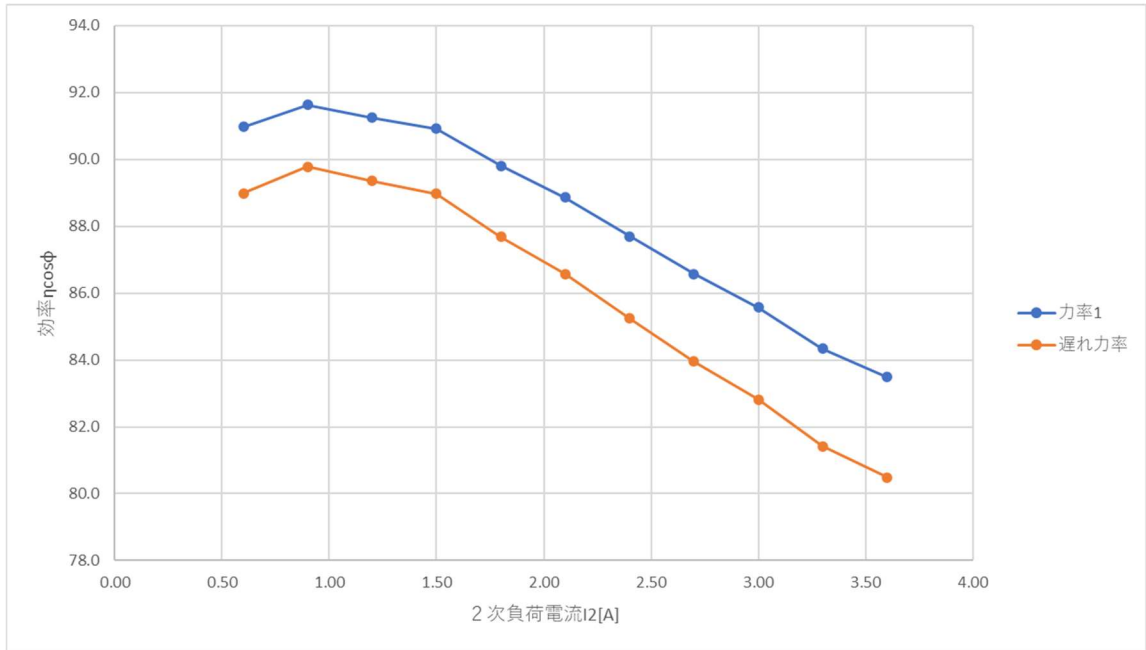


図 32. 2次負荷電流 I_2 -効率 $\eta_{\cos\varphi}$ の関係

図を見て分かるとおり力率1の方が全体的に $\eta_{\cos\varphi}$ の値が大きい。これは遅れ力率の場合は位相差による無効電力が発生し、効率が下がるためである。

続いて効率が最大となる条件を考える。効率 $\eta_{\cos\varphi}$ は $W_2/(W_2 + P_L) \times 100$ で表すことができ式変形すると

$$\eta_{\cos} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi + R_e I_{s1}^2 + P_i}$$

ここで変圧比 $a=1$ であるから $I_2 \cong I_{s1}$ となり

$$\eta_{\cos\varphi} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi + R_e I_2^2 + P_i}$$

ここで $\eta_{\cos\varphi}$ を偏微分すると

$$\frac{\partial \eta_{\cos\varphi}}{\partial I_2} = \frac{V_2 \cos \varphi (P_i - R_e I_2^2)}{(V_2 I_2 \cos \varphi + R_e I_2^2 + P_i)^2}$$

$$\frac{\partial \eta_{\cos\varphi}}{\partial V_2} = \frac{P_i + R_e I_2^2}{(V_2 I_2 \cos \varphi + R_e I_2^2 + P_i)^2}$$

となる。ここで $P_i + R_e I_2^2 > 0$ であるから $P_i - R_e I_2^2 = 0$ となるととき極となり最大値をとる。

ここで $P_c = R_e I_2^2$ であるから、 $\eta_{\cos\varphi}$ が最大となるのは $P_c = P_i$ となるとときである。

続いて図9の等価回路を作成する。測定温度 $t=25^\circ\text{C}$ とし、 $T=75$ とすると

$$r_1 = \frac{R_1}{2} \frac{234.5+T}{234.5+t} = 0.914$$

$$Y_0 = I_0/V_0 = 0.0234$$

$$g_0 = (P_0 - P_m)/V_0^2 = 0.00832$$

$$b_0 = \sqrt{Y_0^2 - g_0^2} = 0.022$$

$$r_1 + r'_2 = P_s / I_s^2 = 1.54$$

$$x_1 + x'_2 = \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - \left(\frac{P_s}{I_s^2}\right)^2} = 2.68$$

よって $r'_2 = 1.54 - 0.914 = 0.626$ となり、

$$R' = \frac{(1-s)}{s} r'_2 = \frac{(1-s)}{s} \times 0.626$$

電力システムは、現在、交流送電方式を用いている。なぜ直流送電方式ではなく交流送電方式が主流なのか、交流送電方式と直流送電方式の特徴をそれぞれ述べた上で、理由について検討せよ。

交流送電方式の特徴として三つの単相交流を組み合わせた三相交流が使用され変圧器などの専用機器で電圧を変換して電圧の変換に必要な変圧器と力率調整装置や電線路・制御装置で構成されており、電力システムに起用する利点として初期投資が安い、いざというときの遮断が簡単で事故になりにくく、変圧器を使用するため、簡単に電圧の変換ができるなどのメリットがある。しかしデメリットとして絶縁の強化が必要不可欠で、電力損失・電圧降下、長距離の送電の場合初期投資が高くなる、交流ループによって潮流調整が難しいなどが挙げられる。逆に直流送電方式の特徴として、実効値の同じ交流電圧よりも最大電圧が小さいため、絶縁が簡単に出来る、表皮効果（銅線に電流を流したとき周波数の上昇により、線の表面にしか流れない現象）がない、リアクタンスの影響がない、静電容量の影響がないなどの利点がある。しかしデメリットとして電流の遮断が難しい、交直変換の設備が必要であるという点が挙げられる。このように交流送電方式と直流送電方式にはそれぞれメリットとデメリットが存在するが現在の電力システムは交流送電方式が起用されている。これは送電する際、送電損失が電流の2乗に比例することから、より高電圧で送電し、できる限り損失を減らす必要があることから変圧し電圧量を増加させることができる交流送電方式が起用されるのである。また交流は変圧器で簡単に電圧を調整できることや現代社会で様々な機器に使用されている誘導電動機が利用できるといった利点もあり、直流でも変圧はできるがそのたびに交流に変換し、変圧器を通して変圧後、再び直流に戻さなくてははいけなくてはならず、損失を発生させるポイントが交流よりも多くなってしまうため交流送電方式が多く起用されると考えられる。

[実験報告の方法]

1. 実験の目的・実験内容・実験結果・考察・検討課題をまとめたパワーポイントを作成し、実験終了約1週間後に発表会を行う。

2. 実験の目的・実験内容・実験結果・考察・検討課題をまとめ、発表用に作成したパワーポイントの印刷資料を付けて、実験報告書を完成させ、発表後1週間以内に提出する。
3. 締め切り厳守のこと。

[注意点]

1. 有効数字に気をつけること（加算減算と乗算除算の違い、グラフで0と書くか0.0と書くか、多すぎる桁数）。
2. パワーポイントやグラフで、文字が小さくなり過ぎないようにすること。
3. グラフで線を引くときは、直線で結ぶこと（エクセルのスプラインを使わない）。