

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

3 総合負荷装置を用いた電力と力率の計測

(Measurement of power and power factor by comprehensive load device)

実験日 令和 04 年 06 月 23 日 (木)
令和 04 年 06 月 30 日 (木)

班	学生番号	氏名
1	3309	大山 主朗

共同実験者名

3301 青木 柊人, 3305 市川 潤

3326 塚原 秀翔

提出日			備考	評価
予定日	06/30	07/07		
提出日				

1 目的

本実験では

- 単相交流回路における電圧・電流・電力・力率を測定するための結線方法を学ぶ.
- 単相電力計と力率計の扱い方を習得する.
- 有効電力と力率, 皮相電力と無効電力に関する理解を深める.

ことを目的とする.

2 原理

前諮問を原理として用いた。

2.1 瞬時電力 (in-stantaneous power)[1][2]

インピーダンス Z [Ω] へ印加された時刻 t [s] における交流電圧 $v(t)$ [V] と、 Z に流れる交流電流 $i(t)$ [A] がそれぞれ次式で表されたとする。

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta_V) \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta_I) \quad (2)$$

ここで、 V_m , I_m は最大値、 ω [rad/s] は角周波数、 θ_V [rad] と θ_I [rad] はそれぞれの位相である。この $v(t)$ と $i(t)$ の積を瞬時電力 $p(t)$ と呼び、次式で表される。

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= V_m I_m \sin(\omega t + \theta_V) \sin(\omega t + \theta_I) \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \left(\cos(2\omega t + \theta_I + \theta_V) + \cos(\theta_I - \theta_V) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 有効電力 (effective power)[1][3]

式 (3) は $v(t)$ や $i(t)$ の 2 倍の角速度を持つ周期関数であることが確認できる。そのため、時間的な平均を算出することができ、この値を有効電力 P [W] と呼ぶ。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_m I_m}{2} \left(\cos(2\omega t + \theta_I + \theta_V) + \cos(\theta_I - \theta_V) \right) dt \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \cos(\theta_I - \theta_V) \end{aligned} \quad (4)$$

この上式が得られたとき、交流回路における実効値表現に置き換えると瞬時値電力 p の平均値、すなわち平均電力 (mean power) P [W] は以下のように表せる。

$$P = VI \cos \theta \quad (5)$$

を得ることができる。ここで、 V , I はそれぞれの実効値、 $\theta = \theta_I - \theta_V$ である。式 (9) の右辺は電圧と電流の実効値の積と、 $\cos \theta$ から構成されている。 θ は Z の実部（抵抗）と虚部（リアクタンス）の比によって決定される値であり、

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

であるので、

$$0 \leq \cos \theta \leq 1 \quad (7)$$

の不等式が成立する。

2.3 力率 (power factor)[1]

式 (7) の関係より, $\cos \theta$ と有効電力および皮相電力の間には

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \quad (8)$$

の関係がある. したがって, $\cos \theta$ は皮相電力のどれだけの割合が抵抗で熱となって消費されているのかを表す量で力率と呼ばれる. また, θ を力率角という.

この上式が得られたとき, 交流回路における実効値表現に置き換えると

$$P = VI \cos \theta \quad (9)$$

を得ることができる. ここで, V , I はそれぞれの実効値, $\theta = \theta_I - \theta_V$ である. 式 (9) の右辺は電圧と電流の実効値の積と, $\cos \theta$ から構成されている. θ は \dot{Z} の実部 (抵抗) と虚部 (リアクタンス) の比によって決定される値であり,

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

であるので,

$$0 \leq \cos \theta \leq 1 \quad (11)$$

の不等式が成立する.

以上の関係から, インピーダンス \dot{Z} の端子電圧と流れる電流値の積とは必ずしも等しくなく, 有効に消費される電力の比が $\cos \theta$ に相当することが分かる. この比として見なせる $\cos \theta$ を力率, θ を力率角と呼ぶ.

2.4 無効電力 (reactive power)[1]

コンデンサあるいはコンデンサに蓄えられている電力は式 (12) で与えられ, この値 Q を無効電力という. 単位は var (ヴァール) である. var は volt, ampere, reactive power の頭文字をとったもので, 人名ではないため, v は大文字にしない.

上記のことは, 式 (3) において, インピーダンスがリアクタンス成分のみ ($\dot{Z} = jX$) の場合について考えた場合と同値である. この時, 電圧と電流の位相差 $\theta_I - \theta_V$ は $\pm\pi/2$ となり, 括弧内の第二項の値は 0 となる. 従って, 瞬時電力 $p(t)$ の振る舞いは平均値が 0 の正弦波 (あるいは余弦波) になることが分かる. これは, 電源から負荷へ, 負荷から電源へ電力供給が交互に行われていることを示し, 電力として消費されず仕事をしない.

$$Q = VI \sin \theta \quad (12)$$

2.5 皮相電力 (apparent power)[1]

電圧の実効値と電流の実効値の積 VI は, インピーダンス \dot{Z} が純抵抗 (リアクタンス $X = 0$) の場合にのみ有効電力と等しくなり, それ以外の場合では $VI > P$ となる. この, 見かけ上の電力を皮相電力 S とよび, 単位には VA (ボルトアンペア) を用いる. また, 皮相電力と有効電力, 無効電力には次の関係が成り立つ.

$$\begin{aligned} S &= VI \\ &= \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \quad (13)$$

2.6 式 (4.7) の途中式

$$\begin{aligned}
 p &= ei = \sqrt{2}|Z|I \sin(\omega t + \angle Z) \cdot \sqrt{2}I \sin \omega t \\
 \text{ここで } \sin \alpha \sin \beta &= -\frac{1}{2} (\cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)) \text{ より} \\
 &= 2|Z|I^2 \cdot \left(-\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \angle Z) + \frac{1}{2} \cos \angle Z \right) \\
 &= -|Z|I^2 \cos(2\omega t + \angle Z) + |Z|I^2 \cos \angle Z
 \end{aligned}$$

2.7 式 (4.8) の途中式

$$\begin{aligned}
 p_a &= 2RI^2 \sin^2 \omega t \\
 \text{ここで } \cos \angle Z &= \frac{R}{|Z|} \text{ より} \\
 &= 2|Z|I^2 \cos \angle Z \sin^2 \omega t \\
 \text{また } \sin^2 \alpha &= \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha) \text{ より} \\
 &= |Z|I^2 \cos \angle Z (1 - \cos 2\omega t)
 \end{aligned}$$

2.8 式 (4.12) の途中式

$$\begin{aligned}
 p_r &= ei \\
 &= (\sqrt{2}XI \cos \omega t) \cdot (\sqrt{2}I \sin \omega t) \\
 &= 2XI^2 \cos \omega t \sin \omega t \\
 \text{ここで } \sin \angle Z &= \frac{X}{|Z|} \text{ より} \\
 &= 2|Z|I^2 \sin \angle Z \cos \omega t \sin \omega t \\
 \text{また, } \sin \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} (\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)) \text{ より} \\
 &= 2|Z|I^2 \sin \angle Z \cdot \left(\frac{1}{2} \sin 2\omega t + \sin 0 \right) \\
 &= |Z|I^2 \sin \angle Z \sin 2\omega t
 \end{aligned}$$

2.9 式 (4.15) の途中式

$$\begin{aligned}
 e &= \sqrt{2}|Z|I \sin(\omega t + \angle Z) \\
 |E| &= |I||Z|, E \neq 0, I \neq 0 \text{ より} \\
 &= \sqrt{2}E \sin(\omega t + \angle Z)
 \end{aligned}$$

3 方法

3.1 使用器具

今回の実験で使用した器具を表 1 に示す。

表 1: 使用器具

装置名	製造会社	型番	定格	製造番号
電力計	YOKOGAWA	B-5038.H1.2/2	レンジ：120-240V, 5-25A	632
低力率用電力計	YOKOGAWA	B-3041	レンジ：120-240V, 1-5A	04823M
交流用電圧計	YOKOGAWA	B-3039.44.9/10	レンジ：0.1-300V	70-1
交流用電流計	YOKOGAWA	B-2044.45.1/7	レンジ：1-5A	OG 0575
力率計	YOKOGAWA	B-2054.49.1/1	120V	L94-004318
スライダック	東芝	B-5091.H1.2/3	0-130V	625
総合負荷装置	山菱電機株式会社	UL-100-30	100V, 30A	L94-004164

3.2 実験手順

a) 電力計による RL 負荷の電力測定

(1) 図 1 のように回路を構築する。¹

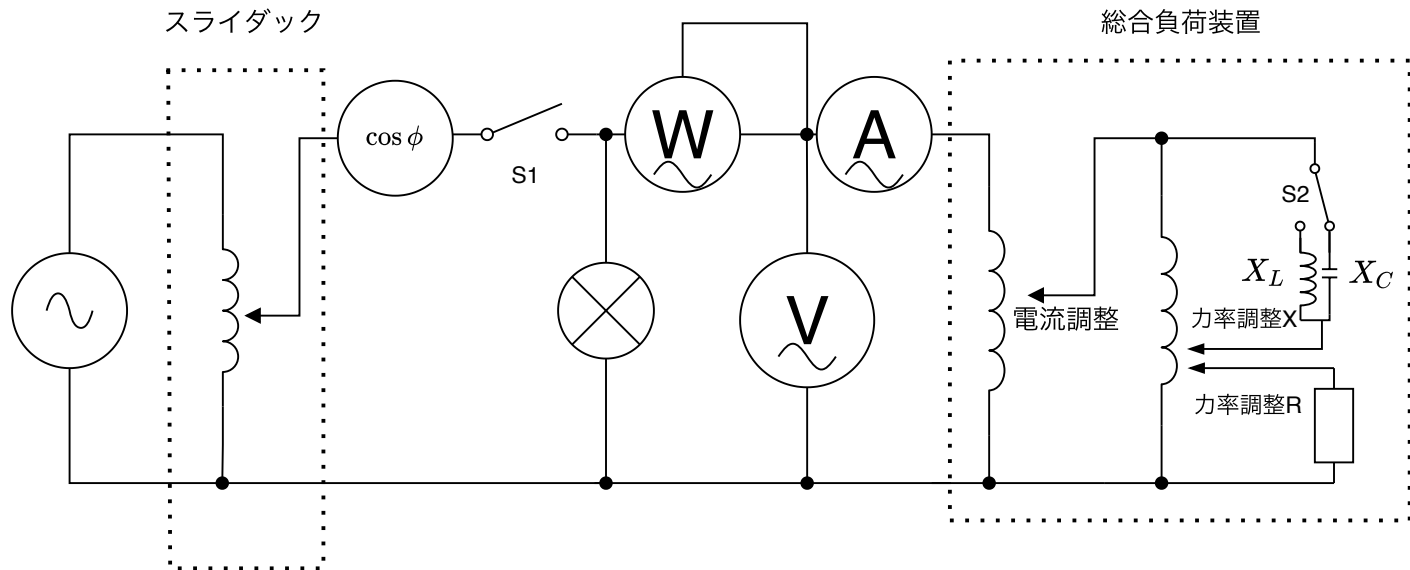


図 1: 測定回路

(2) スイッチ S1 を開き、負荷の電流調節つまみを DEC 方向いっぱいに戻した。²

(3) スイッチ S2 を X_L 側にし、リアクタンスとして L を選択。

(4) 力率を 1 に設定（負荷を $R = 1.0$, $X = 1.0$ に設定）

¹電源線ははずして作業を行う

²DEC:decrease の略で減らすの意。この処理は負荷に電流を加えないための初期設定

- (5) S1 を閉じ、商用電源の電圧 (スライダック部) が 100 V になるように調整し、総合負荷装置の電源ランプの点灯を確認した。
- (6) 電流計の読みが 1 A (± 0.1 A) となるように SL1 で電流を調整し、電力、力率、電圧、電流を計測し、表を作成。
- この際、計算力率は式 (14)、皮相電力は式 (15) で求めた。

$$\cos \theta' = \frac{P_a}{VI} \quad (14)$$

$$P = VI \quad (15)$$

- (7) 電流を 2 A から 5 A まで 1 A 刻みで同様の計測を実施。
- (8) 力率を以下のように設定し、上記の計測を繰り返した。

- 力率 0.8 ($R = 0.8, \quad X = 0.8$)
- 力率 0.6 ($R = 0.6, \quad X = 0.6$)
- 力率 0.4 ($R = 0.4, \quad X = 0.4$)
- 力率 0.2 ($R = 0.2, \quad X = 0.2$)

b) 電力計による RC 負荷の電力測定

- (1) a を参考にし、a3 の部分でリアクタンスとして C を選択した。(スイッチ S2 を X_C 側に設定)

c) 低力率用電力計による電力計測

- (1) 図 1 において、電力計を低力率用のものに変更。
- (2) 力率 0.2 ($R = 0.2, \quad X = 0.2$) に設定し a と同様の計測を行った。

4 結果

計測データの力率における負の値は進み位相を示している。

- 負荷を X_L にした場合における各力率での計測データを表 2 から表 6 に示す。
- 負荷を X_C にした場合における各力率での計測データを表 7 から表 11 に示す。
- 負荷を X_L し、低力率計で計測したデータを表 12 に示す。
- 負荷を X_C し、低力率計で計測したデータを表 13 に示す。

電流の増加とともに電力、皮相電力の増加および電圧の減少が見られる。また、計測力率 $\cos \theta$ が計算力率 $\cos \theta'$ より大きい場合が多い。

表 2: X_L , 設定力率 = 1.0 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 1.0					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	102.5	103.1	1.01	0.992	0.984	104.1
2	205.0	102.2	2.01	0.995	0.998	205.4
3	301.0	101.9	2.98	0.996	0.991	303.7
4	407.5	101.0	4.00	0.997	1.009	404.0
5	497.5	100.8	5.00	0.998	0.987	504.0

表 3: X_L , 設定力率 = 0.8 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.8					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	59.0	104.3	1.00	0.830	0.566	104.3
2	160.0	104.0	1.95	0.817	0.789	202.8
3	242.5	102.9	3.01	0.800	0.783	309.7
4	322.5	102.3	4.04	0.798	0.780	413.3
5	395.0	101.9	5.01	0.798	0.774	510.5

表 4: X_L , 設定力率 = 0.6 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.6					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	69.0	104.1	1.01	0.701	0.656	105.1
2	131.0	103.9	2.03	0.650	0.621	210.9
3	154.0	103.0	2.99	0.640	0.500	308.0
4	252.5	102.9	3.99	0.638	0.615	410.6
5	305.0	102.1	4.98	0.625	0.600	508.5

表 5: X_L , 設定力率 = 0.4 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.4					
	電力計 $Pa[W]$	電圧計 $V[V]$	電流計 $I[A]$	力率 $\cos \theta$		皮相電力 $P_0[VA]$
				測定値	計算値	
1	55.0	104.7	1.00	0.570	0.525	104.7
2	97.5	104.0	2.04	0.500	0.460	212.2
3	136.0	103.8	3.00	0.478	0.437	311.4
4	179.0	103.1	4.01	0.470	0.433	413.4
5	217.0	103.0	5.01	0.460	0.421	516.0

表 6: X_L , 設定力率 = 0.2 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.2					
	電力計 $Pa[W]$	電圧計 $V[V]$	電流計 $I[A]$	力率 $\cos \theta$		皮相電力 $P_0[VA]$
				測定値	計算値	
1	37.5	104.9	0.99	0.460	0.361	103.9
2	62.5	104.2	2.03	0.365	0.295	211.5
3	82.5	104.1	2.99	0.316	0.265	311.3
4	106.0	103.9	4.02	0.300	0.254	417.7
5	125.0	104.0	5.01	0.290	0.240	521.0

表 7: X_C , 設定力率 = 1.0 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 1.0					
	電力計 $Pa[W]$	電圧計 $V[V]$	電流計 $I[A]$	力率 $\cos \theta$		皮相電力 $P_0[VA]$
				測定値	計算値	
1	112.5	107.0	1.02	0.992	1.031	109.1
2	214.0	106.1	2.01	0.996	1.003	213.3
3	319.0	105.7	3.01	0.997	1.003	318.2
4	427.5	105.0	4.02	0.997	1.013	422.1
5	521.0	103.9	5.02	0.998	0.999	521.6

表 8: X_C , 設定力率 = 0.8 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.8					
	電力計 $Pa[W]$	電圧計 $V[V]$	電流計 $I[A]$	力率 $\cos \theta$		皮相電力 $P_0[VA]$
				測定値	計算値	
1	97.5	107.7	1.00	-0.901	0.905	107.7
2	186.0	106.9	2.03	-0.842	0.857	217.0
3	265.0	106.1	2.97	-0.830	0.841	315.1
4	350.0	105.5	3.95	-0.822	0.840	416.7
5	432.0	105.0	4.90	-0.820	0.840	515.5

表 9: X_C , 設定力率 = 0.6 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.6					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	84.5	107.9	1.00	-0.790	0.783	107.9
2	157.5	107.2	2.04	-0.700	0.720	218.7
3	221.0	106.1	2.98	-0.676	0.699	316.2
4	290.0	106.0	3.99	-0.660	0.686	422.9
5	355.0	105.8	5.02	-0.650	0.668	531.1

表 10: X_C , 設定力率 = 0.4 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.4					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	69.0	107.9	1.01	-0.640	0.633	109.0
2	116.0	107.5	2.02	-0.520	0.534	217.2
3	161.0	107.0	2.99	-0.480	0.503	319.9
4	211.0	106.9	3.98	-0.466	0.496	425.5
5	305.0	106.2	5.03	-0.458	0.571	534.2

表 11: X_C , 設定力率 = 0.2 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.2					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	45.0	108.1	0.99	-0.480	0.420	107.0
2	70.0	107.9	2.01	-0.320	0.323	216.9
3	94.0	107.8	3.00	-0.280	0.291	323.4
4	120.0	107.7	4.08	-0.260	0.273	439.4
5	144.0	107.1	5.00	-0.240	0.269	535.5

表 12: 低力率計を用いた X_L , 設定力率 = 0.2 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.2					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 Pa [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	39.0	106.8	1.00	0.462	0.365	106.8
2	63.8	106.8	2.00	0.360	0.299	213.6
3	84.0	106.5	3.05	0.308	0.259	324.8
4	106.0	106.1	3.98	0.300	0.251	422.3

表 13: 低力率計を用いた X_C , 設定力率 = 0.2 の場合の実験結果

電流計 の指示 [A]	設定力率 = 0.2					皮相電力 P_0 [VA]
	電力計 P_a [W]	電圧計 V [V]	電流計 I [A]	力率 $\cos \theta$		
				測定値	計算値	
1	46.5	106.9	1.00	-0.484	0.435	106.9
2	71.5	106.3	2.01	-0.340	0.335	213.7
3	95.8	106.0	2.99	-0.300	0.302	316.9
4	119.5	105.9	4.01	-0.280	0.281	424.7

5 考察

1.) 各設定に対して、横軸が電流、縦軸が電力のグラフ (一つにまとめる) を描け。

図 2 に X_L での電流-電力特性を、図 3 に X_C での電流-電力特性を示す。どちらの場合においても、力率が 1.0 に近づくほど全体的に多くの電力が得られていることがわかる。また、力率による電力への影響は電流が大きい場合であるほど大きくなっている。

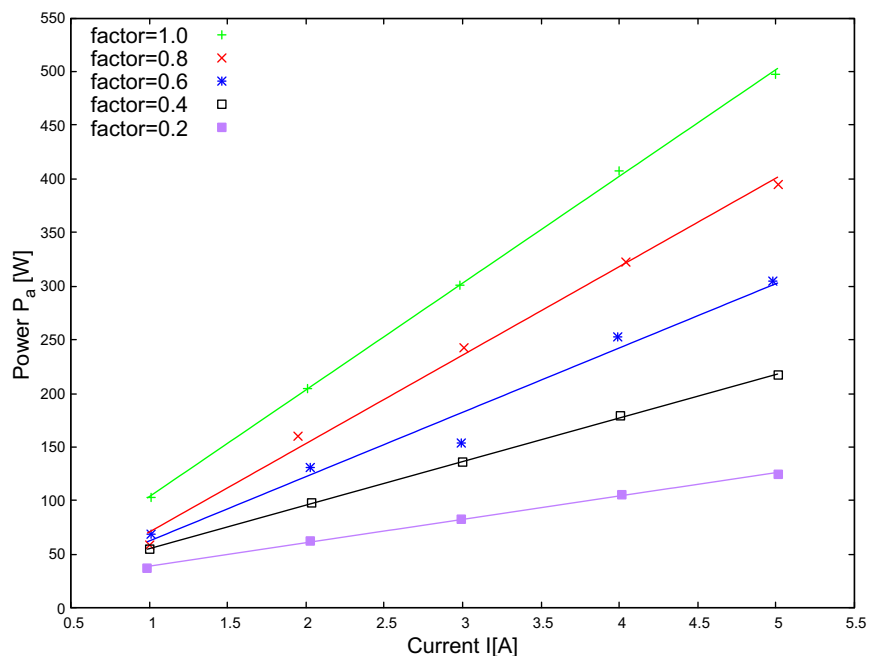


図 2: X_L の電流-電力特性

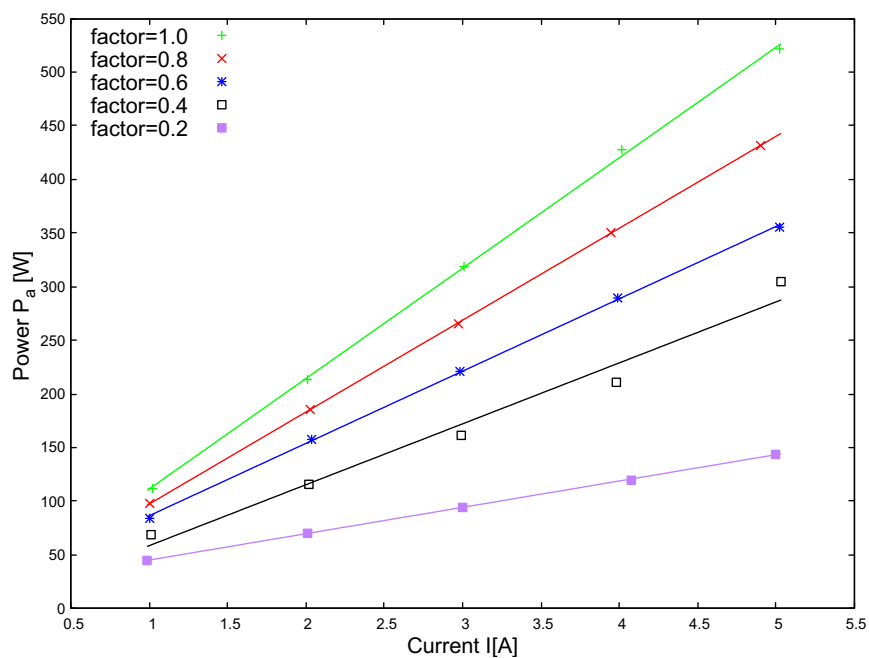


図 3: X_C の電流-電力特性

2.) 各電流計の指示に対して，横軸が力率，縦軸が電力のグラフ（一つにまとめる）を描け．

図 4，図 5 それぞれ近似直線と共に力率-電力特性を示す．

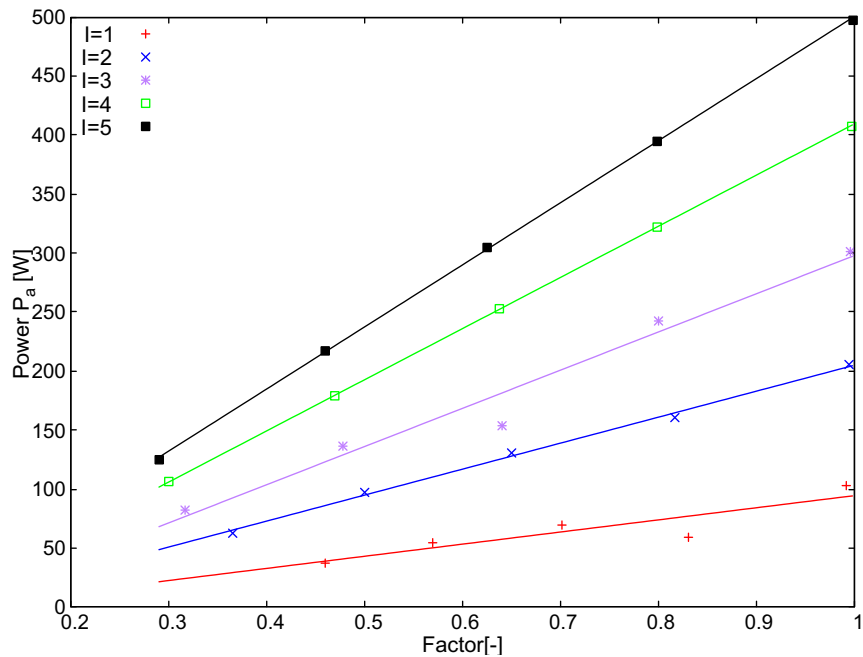


図 4: X_L の力率-電力特性

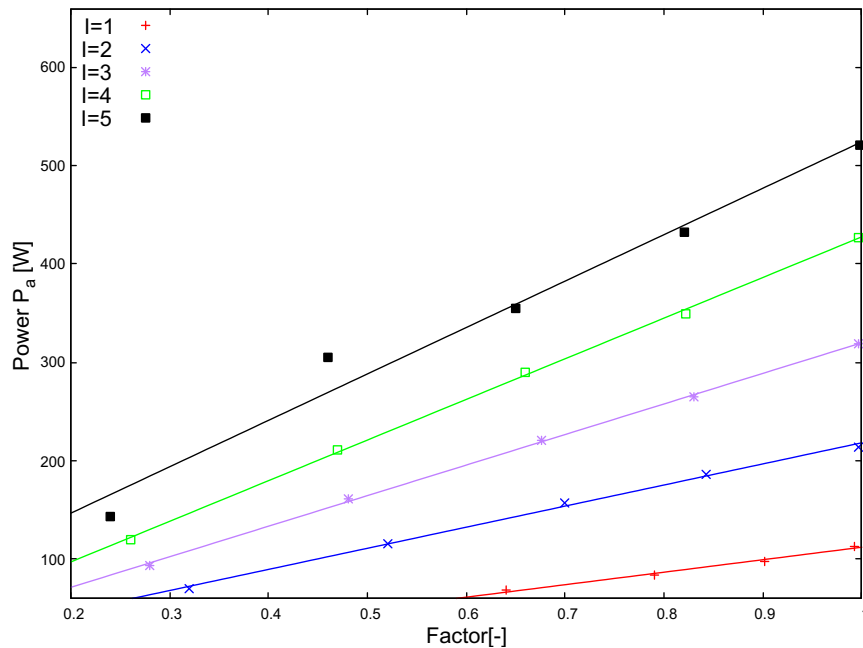


図 5: X_C の力率-電力特性

3.) 電力と電圧，電流，力率の関係を述べよ．

電力と電圧，電流は式 (15) より比例関係にある．また，電力と力率も式 (9) より比例関係にある．

4.) 普通電力計による測定結果と低力率用電力計による測定結果について比較検討せよ．

2 種類の計測器の精度を式 (16) に示すように，相対誤差を利用した．また，その表を表 14，表 15 に

示す。リアクタンスの種類によらず、低力率用電圧計を用いると精度向上が確認できた。

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \left| \frac{\text{推定値} - \text{測定値}}{\text{推定値}} \right| \times 100 \\ &= \left| \frac{\cos \theta \text{測定値} - \cos \theta \text{計算値}}{\cos \theta \text{測定値}} \right| \times 100 [-] \end{aligned} \quad (16)$$

表 14: 電力計による相対誤差の差異 (X_L)

電流 [A]	電力計での相対誤差 [-]	低力率用電力計での相対誤差 [-]
1	21.50125	20.95919
2	19.04878	17.03079
3	16.12260	16.03871
4	15.40533	16.32684
平均値	18.01949	17.58888

表 15: 電力計による相対誤差の差異 (X_C)

電流 [A]	電力計での相対誤差 [-]	低力率用電力計での相対誤差 [-]
1	12.39873	10.12687
2	0.86269	1.57673
3	3.80776	0.75514
4	5.03451	0.50081
平均値	5.52592	3.23988

5.) グループで議論した考察を述べよ。

6.) この実験について独自の考察も加えよ [4].

近年では、単純にリアクタンスの値を調節して力率調整を行うだけでなく、制御方法を工夫することもある。ここではその一例である、無効電力補償制御について述べる。この制御方法は PWM パターンの位相制御を行うフィードバックを付加したものなどがある [5].

RWM(Pulse Width Modulation) とは、半導体を使った電力を制御する制御方法の 1 つ。オンとオフの繰り返しスイッチングを行い、出力される電力を制御する。一定電圧の入力から、パルス列のオンとオフの一定周期を作り、オンの時間幅を変化させる電力制御方法である。そのため、早い周期でスイッチングを行うことで、オンのパルス幅に比例した任意の電圧が得られる。これは半導体がオンとオフ状態が最も損失が少ない(中間状態は損失が多い)ことを利用した電力制御方法。PWM は、優れた制御性と、高効率が特徴で、インバータ回路(直流電流を交流電流に変換する回路)で広く回路で広く使われている技術である。ブラシ付き DC モータの回転制御にも使われている。インバータ回路にて、RWM 制御のオンの時間幅(デューティ)を周期的に変化させることにより、モータ駆動に最適な正弦波の交流電圧を作ることできる。

また無効電力を減少させるだけでなく、静止型無効電力補償装置(SVC)と呼ばれるシステム偶発事象(ネットワーク短絡、ラインおよび発電機の断線など)に応じて動的かつ高速な応答無効電圧を提供する装置もある。これにより、線間電圧を迅速かつ確実に制御できる [6].

7.) 報告書の提出前切までに理解できなかった疑問点を挙げよ。

特にない。

6 結論

本実験を通して

- 単相交流回路における電力・電流・電圧・力率の測定方法
- 単相電力計及び力率計の使用方法
- 電力に関する諸知識

を習得することができた。

参考文献

- [1] 俊. 岩崎 and 電子情報通信学会, 電磁気計測 (電子情報通信レクチャーシリーズ). コロナ社, 2002, p. 78. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797667922816>.
- [2] 栄. 堀田, 電気基礎, 新訂版. 実教出版, 2017, p. 280. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271973066112>.
- [3] 栄. 堀田, 電気基礎, 新訂版. 実教出版, 2017, p. 281. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271973066112>.
- [4] 東芝デバイス&ストレージ株式会社, Pwm とは, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/knowledge/e-learning/brushless-motor/chapter3/what-pwm.html>.
- [5] 川. 心平, 柴. 洋次郎, and 根. 保彦, “Pwm 電流形コンバータを用いた系統無効電力補償制御,” 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, vol. 2021, pp. 195–195, 2021. DOI: 10.11527/jceek.2021.0_195.
- [6] H. Energy, 静止型無効電力補償装置 (svc), Jul. 2022. [Online]. Available: <https://www.hitachienergy.com/jp/ja/offering/product-and-system/facts/static-var-compensation-svc>.