

الباب الأول
الطاقة الكهربائية

ELECTRICAL ENERGY

في نهاية هذا الباب يكون الطالب قادر على:-

- التعرف على الطاقة الكهربائية والعلاقات الرياضية في الكهرباء.
- التعرف على توصيل المقاومات على التوالي والتوازي.
- التعرف على الملفات والمحولات والمكثفات الكهربائية.
- التعرف على نظم توزيع الكهرباء في المزرعة.
- التعرف على اختيار مركز التوزيع واختيار الاسلاك.

الطاقة الكهربائية

Electrical Energy

مقدمة:

مقدمة:

تلعب الطاقة الكهربائية دوراً كبيراً في الإنتاج الزراعي وخصوصاً في الوحدات الثابتة من الآلات والأجهزة بالإضافة إلى تزويد المزرعة مما تحتاجه في الإنارة والتحكم في وحدات الإنتاج الحيواني وغيرها.

- بعض الأساسيات والعلاقات الرياضية في الكهرباء:

من تأثير حركة الالكترونات ينتج تياراً يسرى في عكس اتجاه حركة الالكترونات. والتيار يقاس بمعدل مرور الالكترونات في وحدات الزمن في مقطع عمودي على اتجاه سريان التيار.

$$I = \frac{Q}{T}$$

حيث أن:

I	التيار بالأمبير	(Amperes)
Q	تدفق الالكترونات بالكولمبس	(Coulombs)
T	الزمن بالثانية	

والكولمبس يعادل 6.2×10^{-18} إليكترون حيث أن هذا العدد يمر في الثانية الواحدة يعرف بالأمبير. والأمبير وحدة قياس ترجع إلى العالم الفرنسي أمبير (1775 – 1836) الذي أسس علم ديناميكا الالكترونات.

المقاومة:

تختلف المواد من حيث أنها موصلة أو عازلة والاختلاف بينها أن الالكترونات في المدار الخارجي له مقاومة بسيطة لذا تعتبر مواد موصلة وإذا كانت هذه الالكترونات ذات مقاومة عالية مثل المطاط والزجاج تعتبر مواد عازلة.

القوة الكهربائية:

من التطبيقات المفيدة للتيار هو الاستغلال في الشغل ولذا من المهم أن نعرف كيف يحول التيار إلى شغل.

وهذه القوة الكهربائية أن الجهد (E) تقاس بالفولت وينتج هذا الجهد في حالات كثيرة مثل التأثير الميكانيكي أو المغناطيسي أو الضغطي أو الحرارى أو الإشعاعى أو الكيمائى. أى أن الجهد مقصود به الفرق بين نقطتين بعكس التيار يعنى خاصية السريان. فمثلاً بطارية سيارة 12 فولت أى أن هناك مستويين من الطاقة الكامنة الفرق بينهم هو 12 فولت وهذه الطاقة هى الناتجة من التفاعل الكيماوى لمحاليل البطارية.

القدرة والطاقة الكهربائية:

الجهد الكهربى الذى ينشأ من اختلاف الطاقة الساكنة يحدث شغل. عندما تتحرك كمية معلومة من الاليكترونات من نقطة إلى نقطة أخرى تحت تأثير الفرق فى الطاقة الساكنة (الجهد) يحدث شغل.

إذا حسب هذا الشغل بالنسبة للزمن يعتبر قدرة. لذا يعتبر التيار هو معدل سريان الاليكترونات وتعتبر القدرة حاصل ضرب التيار والجهد.

$$\text{Voltage} \left(\frac{\text{Work}}{\text{Charge}} \right) \times \text{Current} \left(\frac{\text{Charge}}{\text{Time}} \right) = \text{Power} \left(\frac{\text{Work}}{\text{Time}} \right)$$

$$\text{الجهد} \left(\frac{\text{شغل}}{\text{سريان الاليكترونات}} \right) \times \text{التيار} \left(\frac{\text{سريان الاليكترونات}}{\text{الزمن}} \right) = \text{القدرة} \left(\frac{\text{شغل}}{\text{الزمن}} \right)$$

ووحدة القدرة هى الوات:

$$\text{Power (Watts)} = \text{Potential (Volts)} \times \text{Current (amperes)}$$

$$P = E I$$

أما الطاقة الكلية المعطاة فى فترة زمنية معينة تقاس بجهاز كيلووات/ساعة ميتر وهو الموجود عند أغلب المستهلكين لقياس قيمة الاستهلاك من الكهرباء.

$$kWh = \frac{PT}{1000}$$

حيث أن:-

P القدرة بالوات

T الزمن بالساعة

KWh كيلووات ساعة (طاقة)

مثال:

احسب القدرة الناتجة من تيار شدته 10 أمبير استخدم مع فرق جهد 120 فولت؟ ثم احسب الطاقة المطلوبة إذا استخدمت هذه القدرة لمدة 30 دقيقة؟

الحل:

$$\text{Power} = E I$$

$$10 = 1200 \text{ Watt} \times = 120$$

$$\text{Power} = \frac{1200 \times 30}{1000 \times 60} = 0.60 \text{ kWh}$$

المقاومة وقانون أوم :

يرتبط الجهد وشدة التيار من خلال المقاومة ومعنى أن المقاومة عالية أن التيار يقل وهذا ما يظهره قانون أوم :

$$I = \frac{E}{R}$$

حيث ان:

I شدة التيار بالأمبير

E الجهد بالفولت

R المقاومة بالأوم

ويمكن الحصول على بعض العلاقات لحساب القدرة :

$$P = E \cdot I$$

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = E^2/R$$

حيث أن: P القدرة بالوات.

مثال :

مسخن كهربى قدرته 2000 وات عند جهد 220 فولت. احسب :
أ- المقاومة. ب- شدة التيار.

الحل :

$$R = \frac{E^2}{P} = \frac{(220)^2}{2000} = 24.2 \text{ Ohms}$$

$$I = \frac{P}{E} = \frac{2000}{220} = 9.1 \text{ Amp}$$

مقاومة سلك التوصيل تعتمد على نوع مادة السلك والأبعاد الطبيعية لذا
ووجد أن المقاومة تتناسب طردياً مع طول السلك وعكسياً مع مساحة المقطع كما
فى العلاقة التالية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

حيث ان:

R المقاومة

L طول السلك

A مساحة مقطعة

ρ المقاومة النوعية

ويوجد جداول خاصة لمعرفة معامل التوصيل الخاص بكل سلك حسب مواصفاته. كما هو واضح في جداول (1-1 ، 2-1) وذلك للأسلاك النحاس الملمدة والألمونيوم.

وأغلب الأسلاك تزيد مقاومتها عند ارتفاع درجة الحرارة. والعلاقة التي تربط ذلك هي:

$$R_t = R_i (1 + \alpha_i \Delta T)$$

حيث ان:

R_t هي المقاومة المطلوبة عند درجة حرارة

R_i هي المقاومة عند درجة الأساس (20°م)

α_i المعامل الحرارى للمقاومة

ΔT فرق درجة الحرارة عن 20°م

مثال:

ما هي مقاومة موصل عند درجة حرارة 100°م إذا علم أن معامل المقاومة الحرارى 0.004 ومقاومته عند درجة حرارة 20°م هي 50 أوم.

الحل:

$$R_t = 50 [1 + 0.004 (100 - 20)]$$

$$= 66 \text{ Ohms.}$$

جدول (1-1) خواص أسلاك النحاس الملونة

Size B & S ¹ or AWG ²	Diameter		Lb per 1000 ft	Kg per 1000m	Ohms per 1000 ft @ 20 °C	Ohms per 1000 m @20 °C
	mils	cm				
0000	460	1.17	641	954	0.049	0.161
000	410	1.04	508	756	0.0618	0.202
00	365	0.927	403	600	0.0779	0.256
0	325	0.894	320	176	0.0983	0.322
1	289	0.734	253	376	0.121	0.406
2	258	0.655	201	299	0.156	0.513
4	204	0.518	126	188	0.248	0.815
6	162	0.411	79.5	118	0.395	1.30
8	128.5	0.326	50.0	74.4	0.628	2.06
10	101.9	0.259	31.4	46.7	1.000	3.28
12	80.8	0.205	19.8	29.5	1.588	5.21
14	64.1	0.163	12.4	18.4	2.526	8.28
16	50.8	0.129	7.82	11.6	4.02	13.18

¹ B&S – Brown and Sharpe Gauge² AWG – American Wire Gauge

جدول (2-1) خواص أسلاك الألمونيوم

Size B & S ¹ or AWG ²	Diameter		Lb per 1000 ft	Kg per 1000m	Ohms per 1000 ft @ 20 °C	Ohms per 1000 m @20 °C
	mils	cm				
0000	528	1.34	199	296	0.0809	0.265
000	470	1.20	157	234	0.102	0.335
00	418	1.06	125	186	0.129	0.423
0	372	0.945	99.1	147	0.162	0.531
1	332	0.843	78.6	117	0.204	0.669
2	292	0.742	62.3	92.7	0.258	0.816
6	184	0.467	24.2	36.0	0.640	2.10
8	128	0.325	15.2	22.6	1.02	3.35
10	102	0.259	9.56	14.2	1.62	5.31
12	80.8	0.205	6.01	8.94	2.57	8.43

¹ B&S – Brown and Sharpe Gauge² AWG – American Wire Gauge

توصيل المقاومات :

يتم توصيل المقاومات فى الدائرة الكهربائية أما على التوالى أو على التوازى (شكل 1-1) حيث عند التوصيل على التوالى يكون :

1- شدة التيار ثابتة.

$$I_S = I_1 = I_2 = I_3$$

حيث I_S هى شدة التيار المكافئة فى الدائرة.

I_1, I_2 هى شدة التيار فى المقاومات 1 ، 2 ،

2- المقاومة المكافئة تساوى مجموع المقاومات.

$$R_T = R_1 = R_2 = R_3$$

حيث R_T هى المقاومة المكافئة.

R_1, R_2, R_3 هى المقاومة 1 ، 2 ، 3

3- فرق الجهد المكافئ للدائرة يساوى مجموع فروق الجهد للمقاومات المختلفة.

$$E_S = E_1 + E_2 + E_3$$

حيث E_S هو فرق الجهد المكافئ.

E_1, E_2, \dots هو فروق الجهد عند المقاومة 1 ، 2 ،

وعند التوصيل على التوازى يكون :

1- فرق الجهد فى الدائرة ثابت.

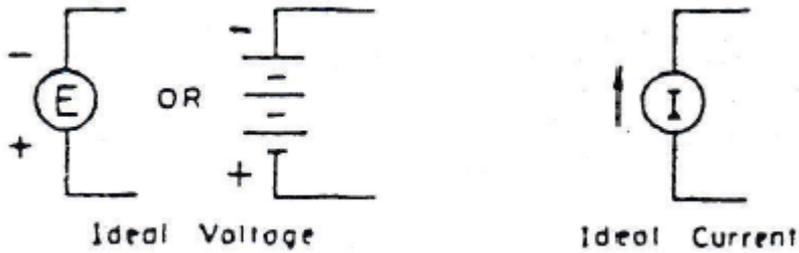
$$E_S = E_1 = E_2 = E_3$$

2- شدة التيار المكافئ تساوى مجموع شدة التيار عند كل مقاومة.

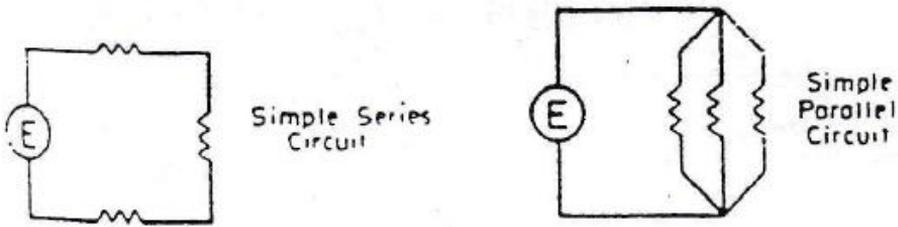
$$I_S = I_1 + I_2 + I_3$$

3- أن المقاومة المكافئة للدائرة تساوى :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



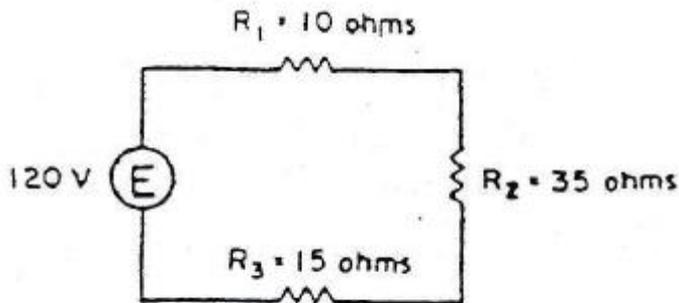
وحدات مصدر التيار الكهربائي



شكل (1-1): توصيل المقاومات على التوالي أو على التوازي

مثال :

احسب شدة التيار وفرق الجهد والمقاومة المكافئة عند توصيل تيار (120 فولت) على مقاومات متصلة على التوالي قيمتها 10 ، 35 ، 15 أوم.



الحل

$$\text{المقاومة المكافئة} = 10 + 35 + 15 = 60 \text{ أوم}$$

$$\text{شدة التيار} = \frac{120}{60} = 2 \text{ أمبير}$$

$$\text{فرق الجهد عند المقاومة } 10 = 10 \times 2 = 20 \text{ فولت}$$

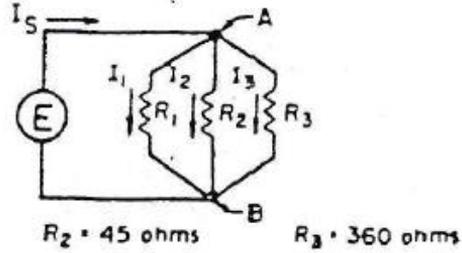
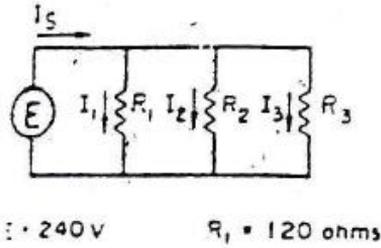
$$\text{فرق الجهد عند المقاومة } 35 = 35 \times 2 = 70 \text{ فولت}$$

$$\text{فرق الجهد عند المقاومة } 15 = 15 \times 2 = 30 \text{ فولت}$$

$$\text{فرق الجهد المكافئ} = 20 + 70 + 30 = 120 \text{ فولت}$$

مثال:

احسب فرق الجهد وشدة التيار والمقاومة المكافئة عند توصيل المقاومات 120 ، 45 ، 360 أوم على التوازي مع مصدر للتيار قيمته 240 فولت.



الحل

$$\frac{1}{360} + \frac{1}{45} + \frac{1}{120} = \frac{1}{\text{المقاومة المكافئة}}$$

$$\therefore \text{المقاومة المكافئة} = 30 \text{ أوم}$$

$$\text{التيار المكافئ} = \frac{240}{30} = 8 \text{ أمبير}$$

$$\text{شدة التيار عند المقاومة } 120 = \frac{240}{120} = 2 \text{ أمبير}$$

$$\text{شدة التيار عند المقاومة } 45 = \frac{240}{45} = 5.33 \text{ أمبير}$$

$$\text{شدة التيار عند المقاومة } 360 = \frac{240}{360} = 0.67 \text{ أمبير}$$

$$\text{شدة التيار المكافئ} = 2 + 5.33 + 0.67 = 8 \text{ أمبير}$$

ويلاحظ أن فرق الجهد ثابت ويساوى 240 فولت.

الملفات الكهربائية :

عند مرور التيار في ملف يتولد مجال مغناطيسي يشتد كلما زادت شدة التيار المار في الملف. ويوجد هذا الملف عند :

1- مفاتيح الغلق والفتح للدوائر المختلفة لتوصيل وفصل نقط التلامس منعاً للصدمات الكهربائية وخصوصاً في الأحمال الكبيرة.

2- في المحولات حيث التيار المتردد يؤثر على ملف رئيسي ويتولد تيار تأثيري في ملف آخر ثانوي.

3- مخدات الماتور لإنتاج مجال مغناطيسي أو تيار تأثيري يسمح لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

بذلك يتضح أهمية الملفات التي تنتج تيارات تأثيرية (Inductors) ولحساب مقاومة هذه الملفات :

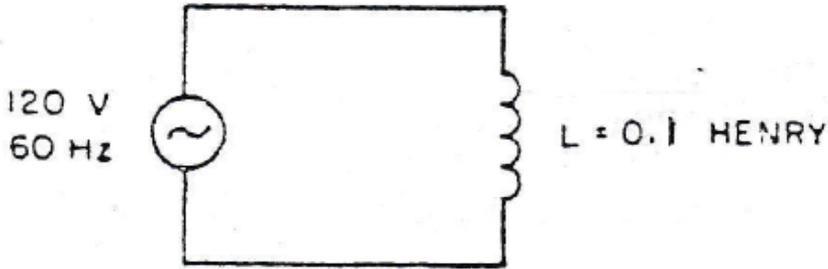
$$X_L = 2 \pi f L \text{ Ohms}$$

$$f = \text{التردد} - \text{بالدبذبة}$$

$$L = \text{التيار التأثيري بالهنري}$$

$$\pi = 3.1416$$

مثال :



إذا كان التيار التآثيرى المتولد فى ملف هو 0.1 هنرى متصل بتيار ذو ذبذبة 60 فاحسب المقاومة المتولدة :

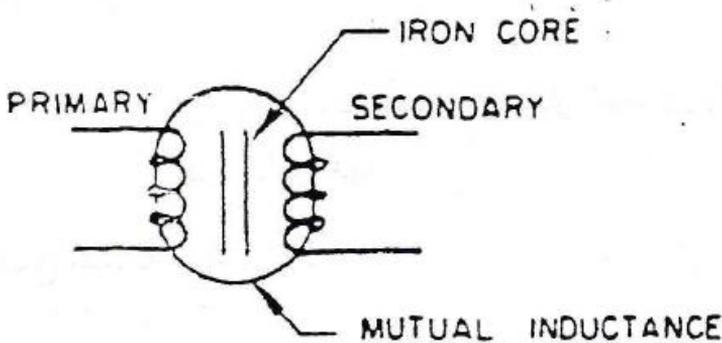
$$X_L = 2 \pi \times 60 \times 0.1 = 37.7 \text{ ohms}$$

فإذا كان فرق الجهد 120 فولت فأوجد قيمة التيار المار :

$$I = \frac{120}{37.7} = \frac{E}{X_L} = 3.18 \text{ Amps.}$$

المحولات : Transformers

تستخدم المحولات فى الغالب لتغير الفولت وتتكون من ملفين احدهما رئيسى أو ابتدائى متصل بالمنبع وآخر ثانوى متصل بالحمل ويوجد قلب حديدى بين الملفين لتحسين التيار التآثيرى الناتج من مرور التيار فى الملف الرئيسى كما فى شكل (2-1).



شكل (2-1): المحول

$$\frac{\text{عدد لفات السلك في الملف الابتدائي}}{\text{عدد لفات السلك في الملف الثانوي}} = \frac{\text{الجهد في الملف الابتدائي}}{\text{الجهد في الملف الثانوي}}$$

مثال:

ما هو فرق الجهد الابتدائي المطلوب في محول إذا كان الجهد منه هو 0 فولت 12 وأن عدد لفات الملف الابتدائي 20 مرة لفات الملف الثانوي.

$$\frac{E_p}{120 \text{ v}} = \frac{20}{1} \quad \therefore E_p = 2400 \text{ v}$$

وإذا كانت عدد لفات الملف الابتدائي والثانوي متساوية تسمى ملفات حماية وتسمى الملفات المعزولة وهي حماية للضغط المفاجئ للتيار الكهربائي ويستخدم مع الأجهزة العالية. (علاقة بين مصدر القدرة والتيار الحمل). وتكون القدرة في الملف الابتدائي مساوية للقدرة في الملف الثانوي.

القدرة في الملف الابتدائي = القدرة في الملف الثانوي

(فرق الجهد × التيار) = (فرق الجهد × التيار) ملف ثانوي.

مثال:

إذا كان فرق الجهد في الملف الابتدائي 120 فولت والثانوي 24 فولت وكانت قيمة التيار في الملف الثانوي 5 أمبير فوجد قيمة التيار في الملف الابتدائي

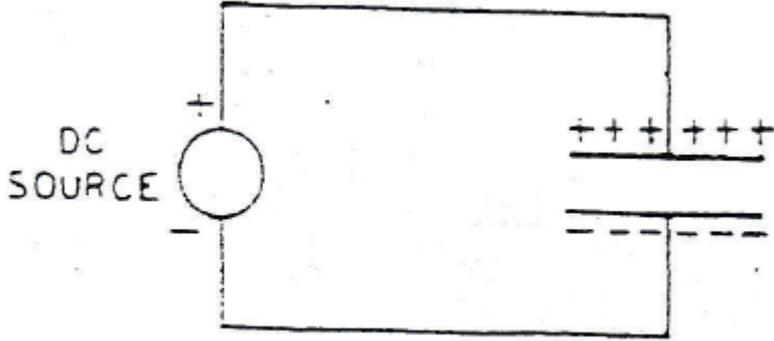
$$120 I_p = 25 \times 5$$

$$I_p = \frac{24 \times 5}{120} = 1 \text{ Amp}$$

المكثفات : Capacitance

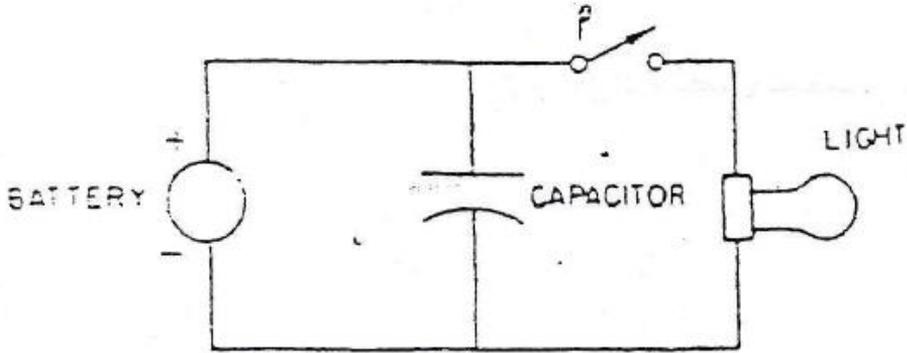
أحد الأجزاء المهمة في الدوائر الكهربائية مثل التحكم والمواتير وأجهزة اللحام ويتكون من سطحين من مواد موصلة للكهرباء منفصلين عن بعض بمسافة بسيطة يكون بها مادة عازلة أو تترك للهواء ومن المواد التي تستخدم كعوازل هو الورق والميكا والزيت شكل (1-3).

وعند توصيل المكثف بجهد كهربى فإنه يشحن الأسطح وعند تمام شحنها
ينعدم مرور التيار فى الدائرة:



شكل (3-1): المكثف

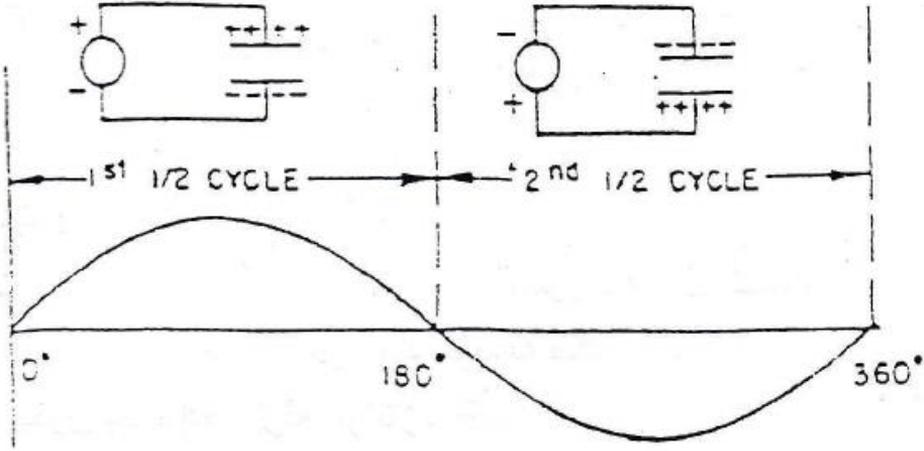
وأبسط مثال للمكثفات هو فلاش التصوير شكل (4-1).



شكل (4-1): فلاش التصوير

عند اتصال النقطة أ يتم تفريغ المكثف مرة واحدة فيعطى وهج شديد لفترة
قصيرة. ثم يعاد شحن المكثف مرة أخرى وهكذا..

وعند توصيل المكثف بتيار متردد حيث يتم شحن وجهى المكثف وتفريغه
كل منتصف دورة شكل (5-1).



شكل (5-1): توصيل المكثف بتيار متردد

وسعة المكثف تقاس بالفاراد farad وهي وحدة كبيرة جدا ، لذلك تستخدم الميكروفاراد $10^{-6} \text{ farad} = 1 \mu\text{f}$

ويمكن حساب المقاومة في المكثفات من العلاقة :

$$X_c = \frac{10^6}{2\pi f c} \text{ Ohms}$$

حيث أن:

$f =$ التردد بالذبذبة.

$c =$ سعة المكثف بالميكروفاردا

مثال:

احسب المقاومة لمكثف سعته 13 ميكروفاراد متصل بمصدر كهربى تردده 60 ذبذبة .

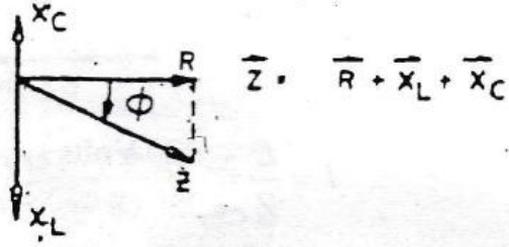
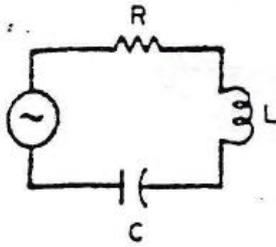
$$\begin{aligned} X_c &= \frac{10^6}{2\pi f c} \\ &= \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 60 \times 13} = 204 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

دائرة مركبة من مقاومة وملف ومكثف (RIC)

(Capacitance, inductance, Resistance)

الصورة العامة لقانون أوم تطبيق:

فرق الجهد = التيار × مجموع المقاومة



المقاومة المكافئة (Z)

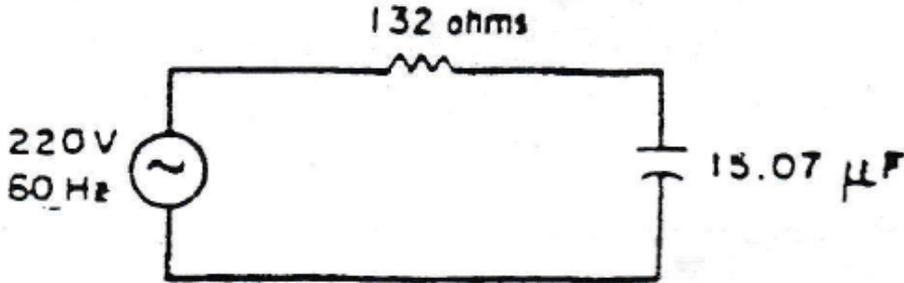
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} \text{ Ohms}$$

وبالمثل فرق الجهد:

$$E_T = \sqrt{E_R^2 + (E_C - E_L)^2} \text{ Volts}$$

مثال:

دائرة بها مقاومة ومكثف: (RC circuit)



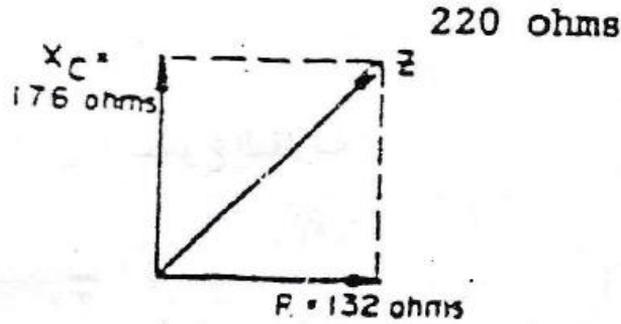
احسب قيمة التيار المار ومعامل القدرة والقدرة الحقيقية والظاهرية.

الحل

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi f C} = \frac{10^6}{2 \times 3.14 \times 60 \times 15.07} = 176 \text{ Ohms}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = 220 \text{ Ohms}$$

$$\cos \phi = \frac{132 \text{ Ohms}}{220 \text{ Ohms}} = 0.6 = \text{Power Factor}$$



$$I = \frac{E}{Z} = \frac{220 \text{ Volts}}{220 \text{ Ohms}} = 1 \text{ Amp}$$

True power = $EI \cos \Phi$ القدرة الحقيقية

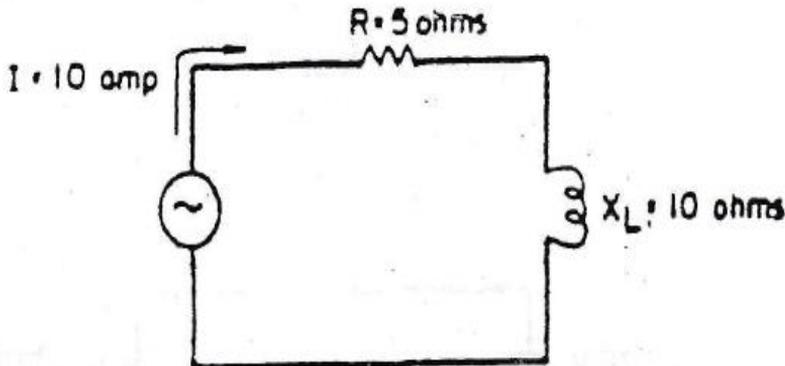
$$= 220 \times 1 \times 0.6 = 132 \text{ W}$$

Apparent power = EI القدرة الظاهرية

$$= 220 \times 1 = 220 \text{ W}$$

مثال:

دائرة مقاومة وملف (RL)

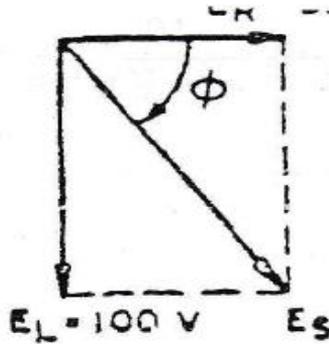


احسب مقدار الانخفاض في الجهد في كل جزء ومقدار جهد المصدر ومعامل القدرة والمقاومة المكافئة.

$$E_R = IR = 10 \text{ amp} \times 5 = 50 \text{ V}$$

$$E_L = IX_L = 10 \times 10 = 100 \text{ V}$$

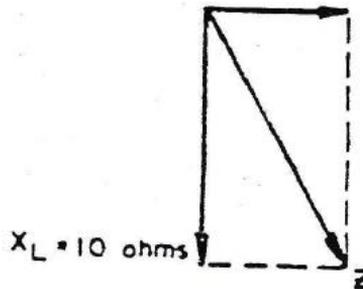
∴ جهد المصدر:



$$E_s = \sqrt{E_R^2 + E_L^2} = \sqrt{(50)^2 + (100)^2} = 112 \text{ V}$$

$$\text{Power Factor} = \cos \phi = \frac{50}{112} = 0.446$$

ولتحديد المقاومة المكافئة:



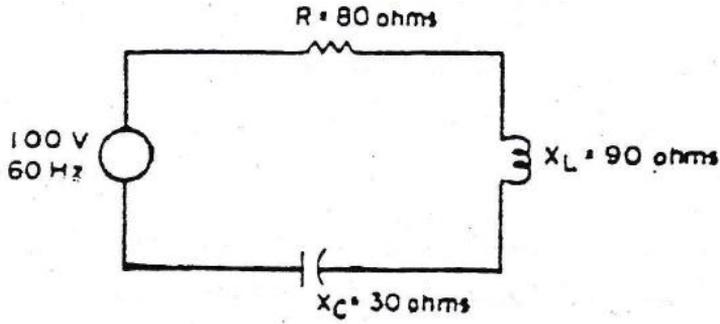
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{25 + 100} = 11.2 \text{ Ohms}$$

ويمكن تحديد قيمة جهد المصدر من :

$$E_{\text{source}} = I Z = 10 \times 11.2 = 112 \text{ V}$$

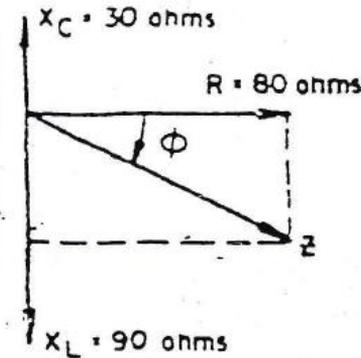
مثال:

دائرة بها مقاومة وملف ومكثف (RLC circuit)



المطلوب إيجاد المقاومة المكافئة ومعامل القدرة.

الحل



$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

$$= \sqrt{(80)^2 + (30 - 90)^2} = 100 \text{ Ohms}$$

$$\text{Power Factor} = \cos \phi = \frac{80}{100} = 0.8$$

ولحساب التيار المار

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{100}{100} = 1 \text{ Amp}$$

$$\text{True power} = EI \cos \Phi$$

القدرة الحقيقية

$$= 100 \times 1 \times 0.8 = 80 \text{ Watt}$$

$$\text{Apparent power} = EI$$

القدرة الظاهرية

$$= 100 \times 1 = 100 \text{ Watt}$$

التيار المستمر والمتردد

التيار الكهربائي يمكن تقسيمه إلى نوعين رئيسيين من ناحية صور التيار:

أ- تيار ثابت (DC): وهو يعرف بالتيار الثابت مع الزمن ولا يتغير وله اتجاه واحد وأحسن أمثلة له البطارية وخلايا الشمس والمولدات الكهربائية.

ب- تيار متغير (AC): وهو الذى يتغير فى اتجاهين حيث أن الإليكترون يتحرك فى اتجاه ثم يغير اتجاه وفى الغالب يتبع المنحنى الجيبى. شكل (1-)

(6)

$$E = E_m \cdot \sin \theta$$

حيث أن : θ = زاوية المحددة بين الجهد عند أى لحظة وأقصى جهد.

$$E = \text{الجهد عند أى لحظة.}$$

$$E_m = \text{أقصى جهد.}$$

ويلاحظ أن الجهد يعتمد على الزاوية حيث يصل إلى أقصى قيمة عند 90° ثم يقل إلى الصفر عند 180° ويصل إلى أقصى قيمة سالبة عند 270° ثم يصل مرة أخرى إلى الصفر عند 360° وبذلك اكتملت دورة واحدة يعيدها باستمرار.

والتردد هو عدد الدورات التى تتم فى الثانية الواحدة وتقاس بالذبذبة (HZ) والذبذبة هى زمن دورة واحدة بالثانية.

ويعتبر ارتفاع الموجة احد محددات الموجة ويوجد طرق مختلفة لقياسها إحداهما قياس أقصى ارتفاع وأقل انخفاض للموجة من الناحية الموجبة والسالبة وتسمى هذه الطريقة: النقطة العظمى للموجة (Peak current or Peak Voltage).

وهناك طريقة أخرى وهى حساب قيمة جذر مربع المتوسط (Root R M S mean Square) وهو يعادل القيمة العظمى مقسومة على جذر.

$$E_{RMS} = \frac{E_{peak}}{\sqrt{2}}, \quad I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}$$

حساب القدرة في التيار المتردد:

عندما يتحمل جهد كهربى حملاً معيناً وينشأ منحى التيار فإذا كان منحى الجهد ومنحى التيار منطبقين ومتماثلين (in-Phase) أى أن قيم النهاية العظمى والصغرى لهم تحدث فى نفس الوقت فيمكن استنتاج القدرة الحقيقية وتكون موجبة من حاصل ضرب التيار والجهد. شكل (7-1).

$$\text{True Power} = I_{\text{RMS}} \cdot E_{\text{RMS}}$$

وعندما تكون هناك فرق بين منحى الجهد ومنحى التيار أى اختلاف الزاوية بينهم (Φ) ينتج بجانب القدرة الحقيقية قدرة أخرى مرتدة وغير مستفاد منها (Reactive Power) كما يظهر من شكل (8-1) وبالتالي فى هذه الحالة الأخيرة تكون قيمة القدرة الحقيقية.

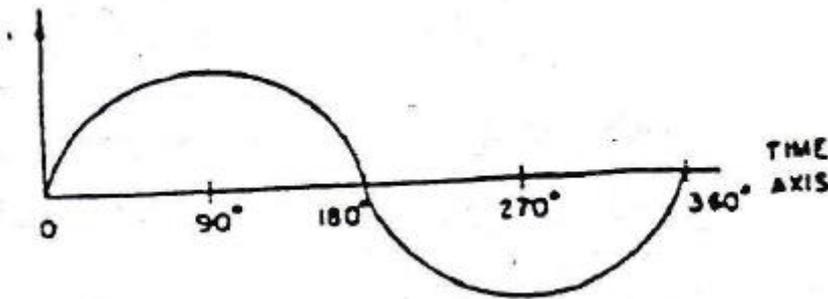
$$\text{Real . Power} = I_{\text{RMS}} \cdot E_{\text{RMS}} \cdot \text{Cos } \Phi$$

حيث أن Φ = الزاوية بين التيار والجهد (Phase – shift angle) وعندما تكون هذه الزاوية صفر تكون القدرة مساوية للأولى.

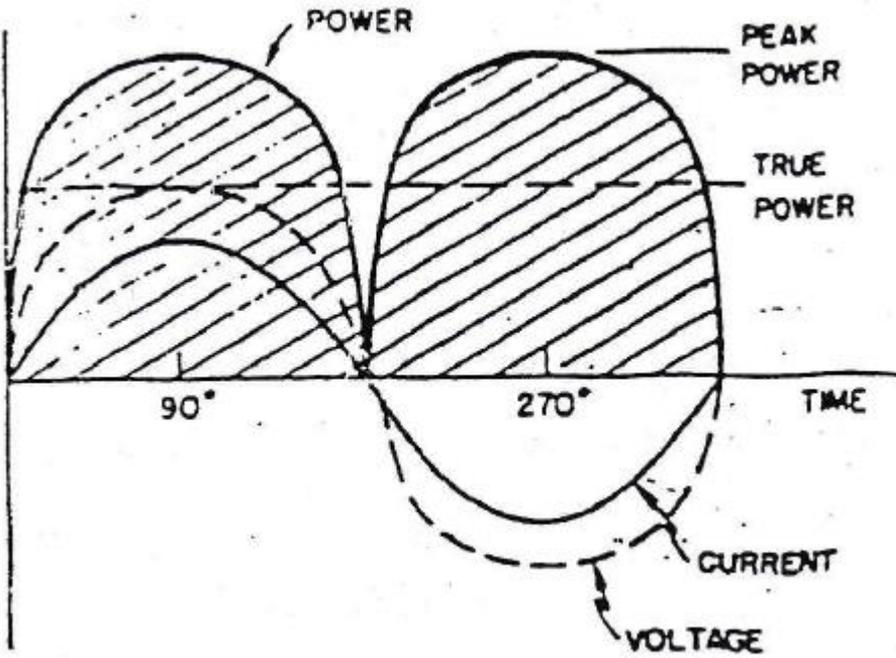
$$P = E_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}}$$

ويسمى المعامل $\text{Cos } \Phi$ بمعامل القدرة.

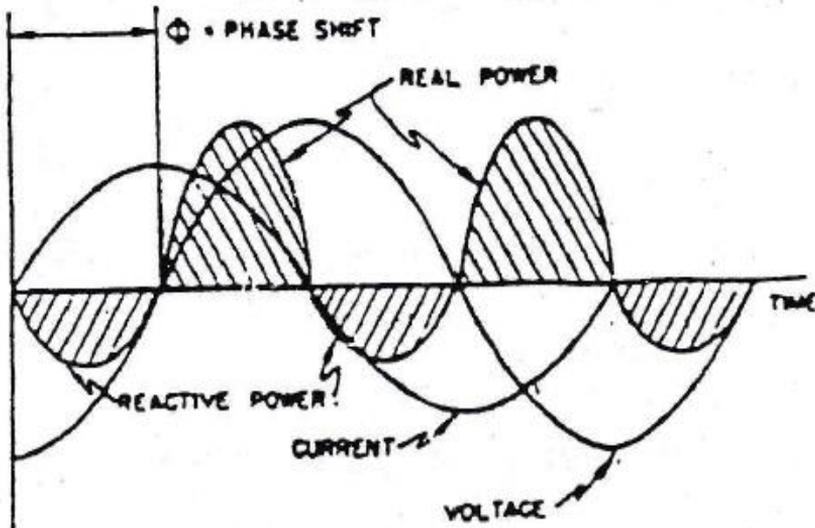
$$\text{Power Factor} = \cos \phi = \frac{\text{True Power}}{\text{Apparent Power}} = \frac{\text{Watts}}{\text{Volts} \times \text{Amperes}}$$



شكل (6-1): شكل موجة التيار المتردد



شكل (7-1): منحنى القدرة للتيار المتردد المتمائل



شكل (8-1) منحنى القدرة للتيار المتردد غير المتمائل

مثال:

احسب القدرة الحقيقية من تيار متردد جهده 220 فولت وشدته 10 أمبير والزاوية بين الجهد والتيار 20°م.

الحل:

$$\begin{aligned} \text{Ture Power} &= E I \text{ Cos } \Phi \\ &= 220 \times 10 \times \cos 20^\circ \\ &= 2067.3 \text{ Watt} \end{aligned}$$

مثال:

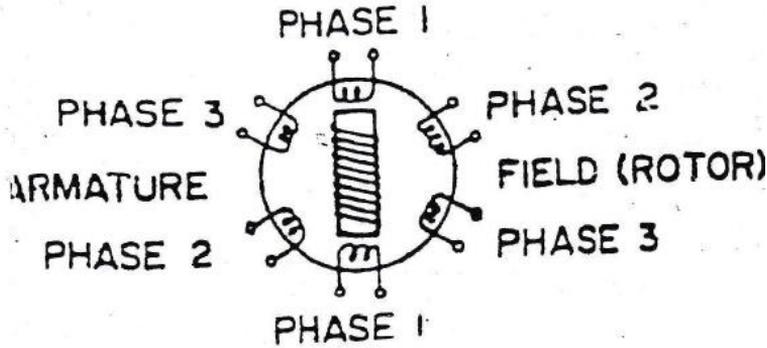
احسب معامل القدرة والزاوية بين التيار والجهد عندما تكون القدرة الحقيقية 3840 وات والنتيجة من شدة تيار 20 أمبير وفرق جهد 240 فولت.

الحل:

$$\begin{aligned} \text{Power Factor} = \cos \phi &= \frac{3840}{240 \times 20} = 0.8 \\ \phi &= \text{arc cos}(0.8) = 36.87^\circ \end{aligned}$$

التيار الثلاثي الأوجه: Three phases current

يمكن الحصول على التيار الثلاثي الأوجه من توصيل ثلاثة ملفات بطريقة معينة بحيث أن تكون الزاوية بين كل ملفين 120°م شكل (9-1).

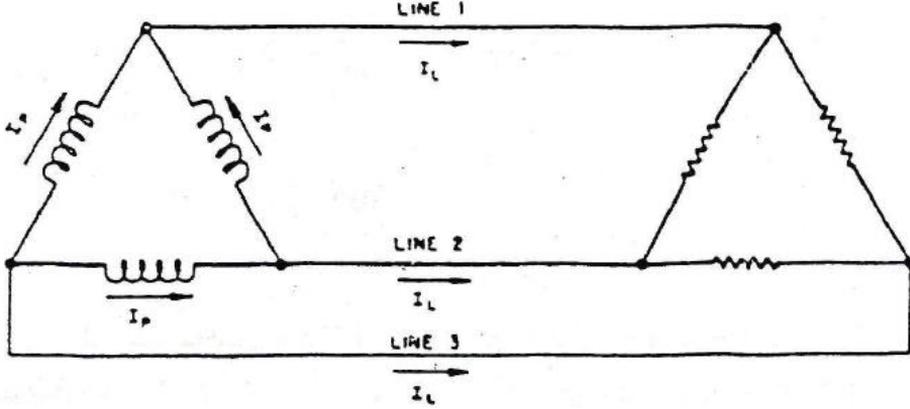


شكل (9-1): التيار ثلاثي الأوجه

ويوجد طريقتين لتوصيل الثلاثة ملفات لإنتاج التيار الثلاثي الأوجه:

الطريقة الأولى : طريقة دلتا أو مثلث.

ويتم توصيل نهاية كل ملف مع نهاية الملفين الآخرين وعند توصيل 3 نقط من الملفات مع ثلاثة نقط من الأحمال كما في شكل (10-1):



شكل (10-1): تيار ثلاثي الأوجه بطريقة دلتا

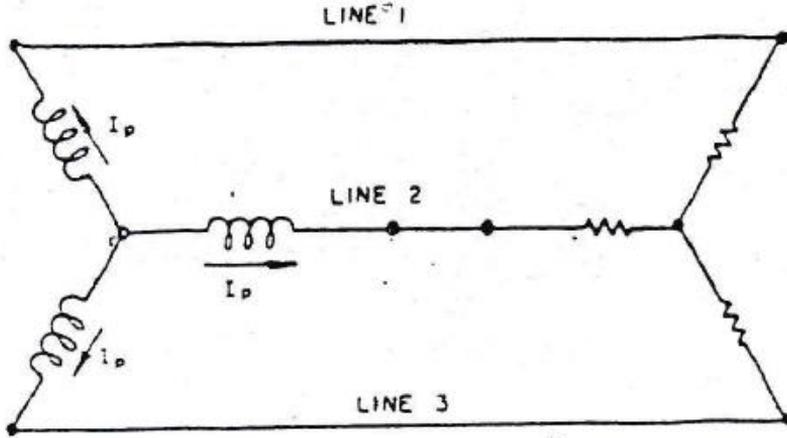
ويسمى الجهد المتولد في الملفات بجهد الوجه والجهد بين المولد والحمل يسمى جهد الخط ويكون في هذه الطريقة متساوي لجهد الوجه.

أما شدة التيار في الخط فيساوي 1.73 مرة شدة التيار المتولد في الملف والمسمى بتيار الوجه.

أي أن في هذه الطريقة تزداد شدة التيار بنسبة 73% أما فرق الجهد فهو ثابت.

الطريقة الثانية: طريقة الواي أو توصيلة مركزية.

وفيها يتم توصيل احد أطراف الثلاثة ملفات بنقطة واحدة مركزية ويتصل كل الطرف الأخر لكل ملف مع أطراف الأحمال كما هو واضح في شكل (11-1):

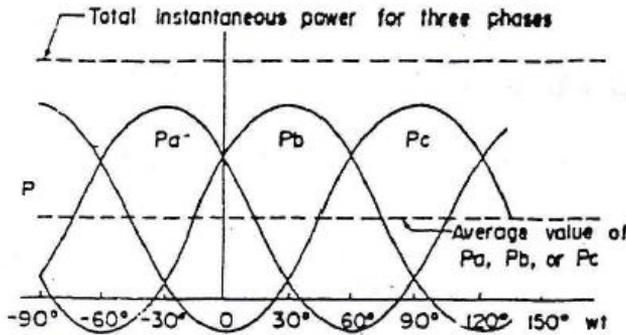


شكل (11-1): تيار ثلاثي الاوجه بطريقة واى

وفى هذه الطريقة يكون التيار ثابت أما فرق الجهد فيزداد فى الخط عن فرق الجهد المتولد فى الوجه بنسبة 73% حيث فرق الجهد فى الخط يساوى 1.73 مرة فرق الجهد فى الوجه ويستخدم هذه الطريقة عندما يراد زيادة فرق الجهد.

فائدة استخدام توصيلة الثلاثة أوجه:

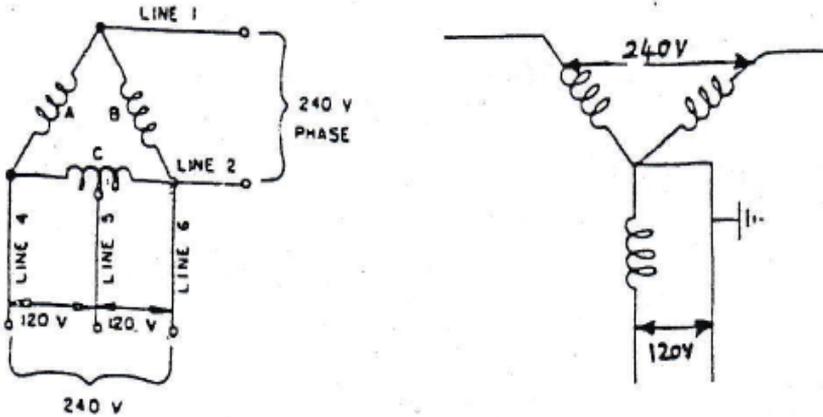
عندما يراد زيادة فرق الجهد أو شدة التيار وحسب نوع التوصيلة وبالتالي تزداد الطاقة المنقولة بنسبة 73% مع العلم أن التيار الثلاثة أوجه يحتاج 3 أسلاك أو أحادى الوجه فيحتاج فقط إلى سلكين أى أن الأسلاك زادت بنسبة 50% فى الطول وتبعها زيادة فى الطاقة مقدارها 73%. وهذا يساعد على تقليل التكاليف وزيادة الطاقة المنقولة بالإضافة إلى أن التيار الثلاثة أوجه ثابت كما يظهر فى شكل (12-1):



شكل (12-1): زيادة الطاقة المنقولة باستخدام توصيلة ثلاثية الاوجه

كيفية الحصول على فرق جهد 240/120 من تيار ثلاثى الأوجه:

يمكن الحصول على تيار كهربائى بجهد 120 فولت أو بجهد 240 فولت من توصيلة المثلث أو الوأى كما يظهر فى شكل (13-1):



شكل (13-1): كيفية الحصول على فرق جهد 240/120 من تيار ثلاثى الأوجه

التيار الثلاثة أوجه فى الخدمات المزرعية:

فى بعض الأحمال الكبيرة مثل الماتورات تحتاج دائماً إلى تيار ثلاثى الأوجه وحيث أنه فى بعض الأحيان يتعذر توصيل تيار بهذه الصفات إلى كل المزرعة لذا يستلزم وجود محول لتغيير التيار الأحادى إلى تيار ثلاثى الأوجه ويحتاج إلى التيار الأحادى فى الإنارة وتشغيل بعض الأجهزة ذات الأحمال الصغيرة.

وفى الرسومات التوضيحية التالية بعض الرسومات التى تتيح الحصول على تيار ثلاثى الأوجه من ثلاثة أسلاك أو أربعة ومحول لتغيير نوع الطور (الوجه) شكل (14-1) الى (19-1).

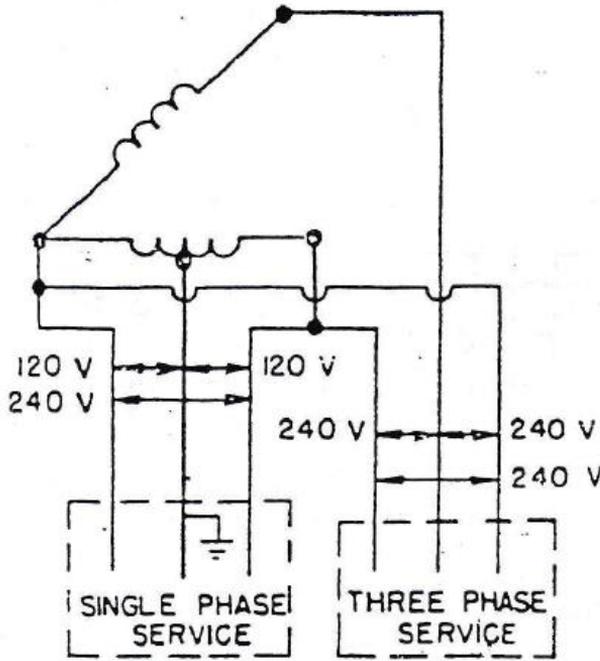
ويلزم استخدام محول الأطوار فى الحالات الآتية:

(1) عندما يكون هناك احتياج لتيار ثلاثى الأوجه وتكاليف انشاء هذا الخط من المنبع إلى المزرعة مكلف.

(2) عندما يكون ثمن كيلو وات ساعة للتيار ثلاثى الأوجه أعلا من الأحادى لذا يستحسن استقبله أحادى وتحويله إلى ثلاثى الأوجه.

(3) عندما يكون متواجد ماتور كبير ويحتاج إلى جهد عالى أى تيار أقل لأن أحادى الوجه التيار به عالى وبالتالي ينخفض الجهد فيؤثر على الفروع الأخرى عند تشغيل الماتور وبالتالي يؤثر على الخدمة فى نقط أخرى أو يؤثر على بعض الأجهزة.

(4) عندما يكون سعر الماتور الثلاثى الأوجه والمحول أقل من سعر الأحادى الوجه.

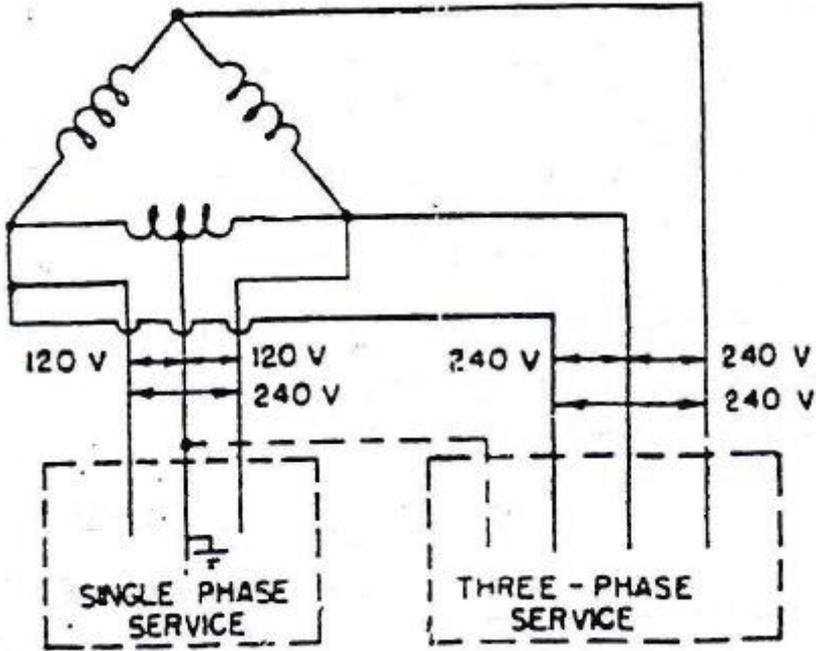


شكل (14-1): 240/120 فولت - أربعة أسلاك - ثلاثة أوجه

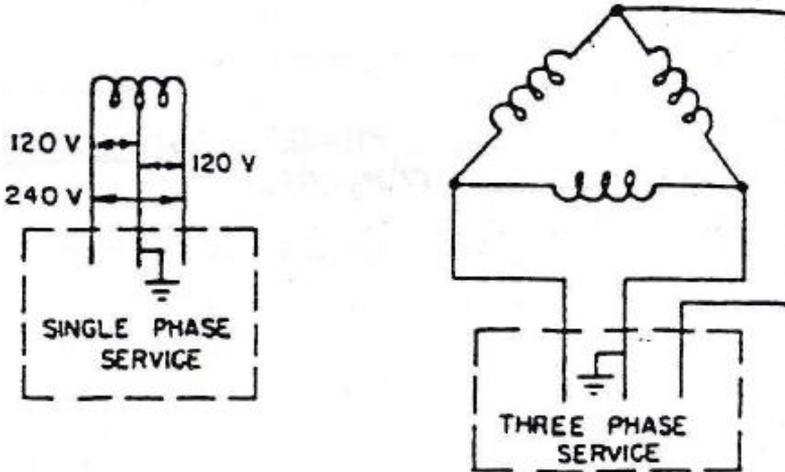
فى نظام دلتا مفتوحة (2 ملف)



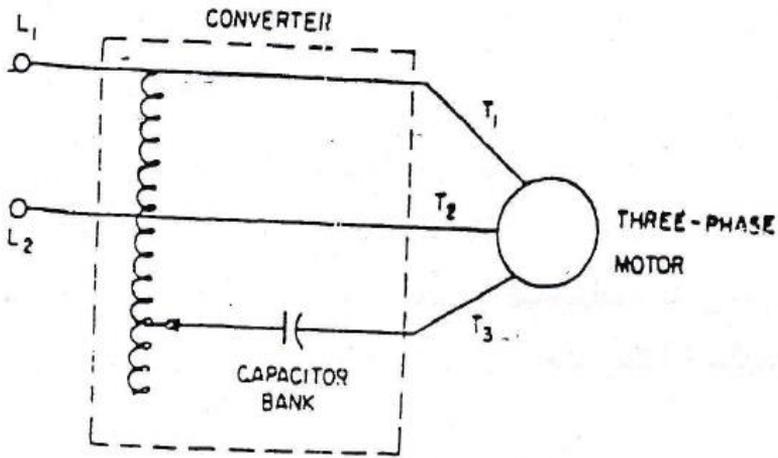
شكل (15-1) كيفية الحصول على تيار ثلاثى الأوجه (محول لتغيير عدد الأوجه)



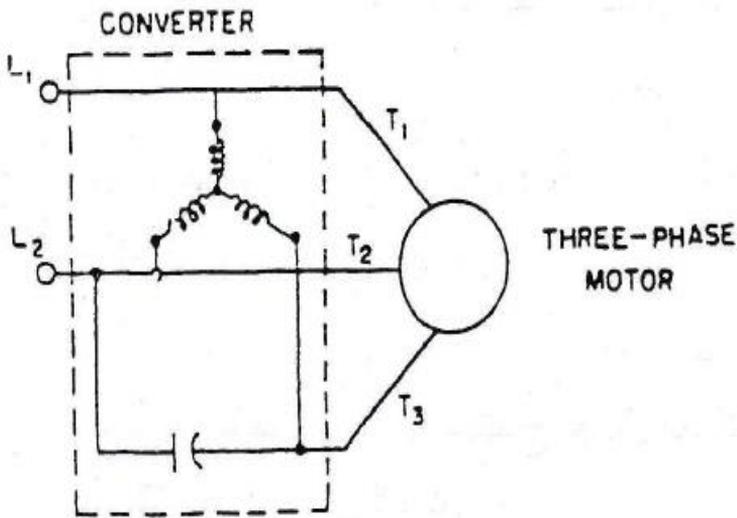
شكل (16-1): 240/120 فولت - أربعة أسلاك - ثلاثة أوجه
 فى نظام دلتا مفتوحة (3 ملف)



شكل (17-1): 240/120 فولت - أحادى الوجه وأخر
 دلتا ثلاثية الأوجه (4 ملف)



شكل (18-1): تيار ثلاثي الأوجه من ثلاث أسلاك



شكل (19-1): تيار ثلاثي الأوجه من ثلاث أسلاك

تخطيط لنظم التوزيع الكهربى فى المزرعة:

بعد دراسة الأساسيات السابقة للكهرباء وخواصها لزم الأمر إلى دراسة التطبيقات لهذه الطاقة فى المزرعة لتحقيق رفع كفاءة الاستخدام وتحقيق فائض لأى احتياجات أخرى فى المستقبل.

فلابد من دراسة لمختلف الاحتياجات من الكهرباء وإدخال آلات وأجهزة جديدة ذات كفاءة أعلى واستهلاك أقل من الكهرباء وكذلك لابد من دراسة خطوط التوزيع وتصميمها بما يحقق هذا الفائض ولإجراء نظام سليم لابد أن يتوفر فيه صفة الأمان وان يمكنه أن يتحمل الأحمال المحتاج إليها فعلاً وبكفاءة عالية وقابل لأى زيادة طارئة.

و عملية توزيع الأسلاك يوجد قواعد لتصميمها حيث يوجد مدخل خدمة كهربى رئيسى ومدخل لمبنى الخدمة ليعطوا أعلى كفاءة ولتلبية الاحتياجات من القدرة والنظام لابد أن يحتوى على فروع كافية ومخارج ذات أحجام مختلفة وتكون موزعة حسب الاحتياجات الفعلية للكهرباء فى وحدات المزرعة.

وعند حساب التكاليف تنقسم إلى تكاليف ابتدائية وتكاليف تشغيل وتكاليف الطاقة المفقودة لتشغيل النظام. وعند تقليل التكاليف الابتدائية فقط قد تؤثر على كفاءة التشغيل وبالتالي تزيد التكاليف الكلية ولكن يمكن تقليل تكاليف الطاقة المفقودة عن طريق تقليل المقومات.

ويهمنا أن ندرس نظم التوزيع الكهربائى فى المزرعة وكذلك طرق اختبار أحجام الموزعات ذات الوجه الواحد وكذلك نظم ذات الأوجه الثلاثة.

وأولى خطوات تصميم النظم ذات الوجه الواحد هو حساب الاحتياج الفعلى من الأحمال لكل مبنى أو منطقة خدمة وباستنتاج أحمال المبانى وموقعها وحجمها يمكن تحديد مركز التوزيع الرئيسى للنظام.

ويمكن حساب أحجام ونوع الموصلات المحتاج إليها التيار الكهربى من مركز التوزيع الرئيسى إلى كل مبنى أو منطقة خدمة وكذلك دراسة الاحتياجات من الأسلاك فى كل مبنى.

حساب الاحتياجات الفعلية من الأحمال فى المباني الزراعية:

أولى خطوات التصميم هو حساب الأحمال المحتاج إليها فى كل مبنى أو منطقة خدمة عندما تكون هذه الأحمال خارج المبنى. ومن الصعب تحديد أحجام ثابتة لكل نوع من المباني لاختلاف هذه المباني حسب أغراضها لذا يلزم دراسة كل مبنى على حدة ويتم حساب جميع الأحمال داخل المبنى لحساب إجمالى الأحمال وهل سيتم تشغيل كل الأحمال فى وقت وذلك لحساب أقصى احتياج من الأحمال ويمكن تقسيمها إلى:

1- **أحمال كبيرة:** وهى التى يستلزم تشغيلها على حمل كامل أو التى تحتاج إلى 2500 وات أو $\frac{1}{2}$ حصان ولا بد من حساب التيار اللازم وخصوصاً فى الأجهزة التى تشغيل على حمل كامل فلا بد من ضرب الاحتياج الخاص بها فى 125% لتغطية تيار البدء فى التشغيل.

2- **أحمال صغيرة:** وهى التى فى حدود 1.5 أمبير على 115 فولت ويدخل فمنا الأجهزة الصغيرة.

3- **أحمال الإضاءة:** وهى التى تحتاج إلى 1.5 أمبير عند 115 فولت ويمكن التحكم فى تقليلها أو زيادتها حسب نوع الإنتاج (دواجن).

ولتكتملة هذه الحسابات يلزم حساب شدة التيار الكلى لكل الأحمال منسوباً إلى فولت 240 حيث يمكن تحويل الأحمال من 120 إلى 240 بقسمة شدة التيار عند 120 على 2 لاستنتاج شدته عند 240 فولت. ويوجد طريقة لحساب قيمة الأحمال.

الاحتياج هو مجموع الثلاثة الأقسام الآتية:

(1) 100 % من الاحتياج لأكبر واحد من :

أ - الحمل عند عدم التشغيل الكلى فى وقت واحد .

ب- 125 % من احتياج أكبر ماتور كهربى.

ج- لا تكون أقل من 60 أمبير.

(2) 50% من الاحتياج لـ 60 أمبير التالية من الأحمال الأخرى.

(3) 25% من الباقي.

ولتوضيح هذه الطريقة يتم حل المثال السابق:

مثال:

احسب الحمل المحتاج إليه في إسطبل ماشية: الحمل الكلى 185 أمبير وأعلى ماتور 3 حصان (240 فولت وجه واحد) والحمل الكلى عند عدم التشغيل الكلى في وقت واحد هو 65 أمبير- من جداول خاصة (جدول 1-3) يمكن استنتاج أن الماتور يحتاج إلى 17 أمبير.

الحل:

الاحتياج → نسبة من المجموع

أ- حمل تشغيل في وقت واحد 65 أمبير
ب- 17 أمبير $\times 125\% = 21.25$
ج- 60 أمبير

65 أمبير → 100% من الأكبر

30 أمبير → 50%

15 أمبير → 25% من باقى الأحمال (185-125).

110 أمبير

أى أن مجموع الأحمال المحتاج إليها 110 أمبير عند 240 فولت.

جدول (3-1) مقدار التيار للمواتير أحادية وثلاثية الأوجه عند الحمل الكامل.

Table FULL LOAD CURRENTS FOR SINGLE PHASE MOTORS

HP	Single Phase AC Motors	
	115V	230 V
1/6	4.4 amp	2.2 amp
1/4	5.8	2.9
1/3	7.2	3.6
1/2	9.8	4.9
3/4	13.8	6.9
1	16	8
1 1/2	20	10
2	24	12
3	34	17
5	56	28
7 1/2	30	10
10	100	50

Source: Anon. (1977)

Note: The voltages are rated motor voltages. The currents listed shall be permitted for system voltage ranges of 110 to 120 and 220 to 240.

Table FULL LOAD CURRENT FOR THREE PHASE MOTORS

HP	Three-Phase AC Motors induction		
	Type squirrel –Cage and Wound Rotor		
	115 V	230 V	
1/2	4 amp	2 amp	1 amp
3/4	5.6	2.8	1.4
1	7.2	3.6	1.8
1 1/2	10.4	5.2	2.6
2	13.6	6.8	3.4
3		9.6	4.5
5		15.2	7.6
7 1/2		22	11
10		28	14
15		42	21
20		54	27
25		68	34

Source: Anon. 1(1977).

مثال:

احسب الأحمال الكهربائية اللازمة لوحدة حليب إذا كان بيان هذه الأحمال

كالتالى

أمبير عند 240 فولت

40	9600 وات عند 240 فولت	- سخان ماء
70	70 أمبير عند 240 فولت	* فرن كهربائى
22	22 أمبير عند 240 فولت	- جهاز تكييف
14.6	3500 وات عند 120 فولت	* ثلاجة
8	1 حصان عند 120 فولت	- مضخة اللبن
18.10	2.5 حصان عند 240 فولت	* تبريد تنك كبير اللبن
20	20 أمبير عند 240 فولت	½ أحمال إضاءة

وبفرض أن الأحمال التى يمكن أن تعمل فى وقت واحد هى التى عليها

علامة * مع إضافة ½ أحمال الإضاءة.

الحل:

نجد أن مجموع الأحمال التى تعمل فى وقت واحد و ½ أحمال الإضاءة هى

112.7 أمبير

الاحتياج نسبة من المجموع

أ- 112.7 حمل تشغيل فى وقت واحد			
ب- 18.1 أقصى حمل للماتور	100% من الأكبر	→	112.7
ج- 60 أمبير			
60 أمبير من الأحمال التالية	50%	→	30
172.7 = (60 + 112.7) من الأحمال الباقية	25%	→	5
20 أمبير = 172.7 - 192.7		-----	
			147.7

لذا يصمم الاحتياج على 150 أمبير على 240 فولت (يختار دائماً رقم صحيح من (30 - 60 - 100 - 150 - 200 - 300 وهكذا).

اختيار مركز التوزيع:

في أغلب التوزيعات المألوفة بأن يكون مركز التوزيع في المركز ويكون بجانب مركز التوزيعات أجهزة القياس المختلفة وخطوط التغذية تمتد من هذا المركز إلى كل مبنى أو منطقة خدمة ويزود مركز التوزيع بعدة قواطع أو مفاتيح ولمركز التوزيع عدة مميزات.

- 1- الأمان حيث أن القطع في احد المباني لا يؤثر على بقية النظام.
- 2- القدرة على التوسع حيث عندما يتغير حجم التيار في مبنى معين أو يراد إضافة مبنى جديد يؤثر على بقية النظام.
- 3- تقليل حجم الاستهلاك حيث يمكن تحديد أقصى استهلاك في وقت واحد حيث يمكن التحكم في النظام كله.
- 4- الإقلال من طول الأسلاك وبالتالي تقليل المقاومة والتكاليف.
- 5- يسهل عملية القياس بوضعها بجوار مركز التوزيع بدلاً من وضعها في كل مبنى.

ويعتبر أنسب موضع لمركز التوزيع هي النقطة التي تعطى أقل تكاليف في الأسلاك وتعتبر هي مركز الحمل. ومركز الحمل هو تخطيطاً مركز كل الأحمال. ولإيجاده لابد من رسم تخطيطي بسيط للمزرعة ولابد من تحديد مدخل التيار في كل مبنى وكذلك تحديد الاحتياج الفعلي في كل مبنى.

ويرسم هذا الرسم التخطيطي على محورين X, Y حيث يحدد البعد الأفقي والبعد الراسي لكل مبنى أو منطقة خدمة عن مركز المحورين ونتيجة حاصل ضرب الأبعاد الأفقية والرأسية في قيمة الحمل اللازم والمحدد للاحتياج في كل مبنى يمكن إيجاد بعد التوزيعات بقسمة مجموع نتائج حاصل الضرب على مجموع الأحمال.

$$Y_{LoadCenter} = \frac{\sum(L_i Y_i)}{\sum L_i} = \frac{\text{sum of each load} \times \text{its Y - distance}}{\text{sum of the loads}}$$

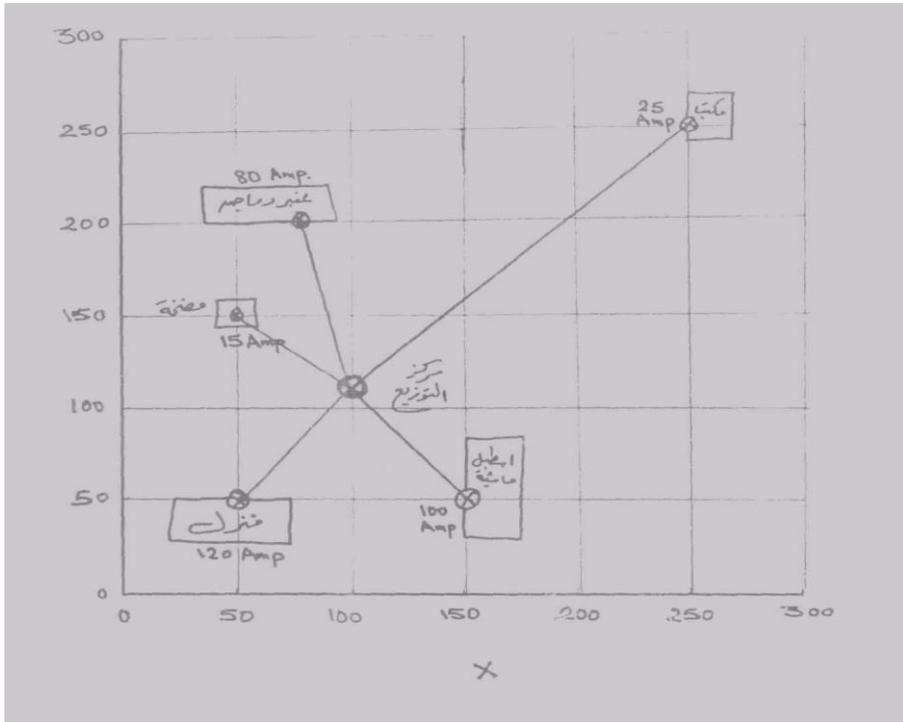
$$X_{LoadCenter} = \frac{\sum(L_i X_i)}{\sum L_i} = \frac{\text{sum of each load} \times \text{its X - distance}}{\text{sum of the loads}}$$

Where L_i = demand load at a building
 X_i , Y_i = The coordinates of the building
 Σ = implies summation each building on the farmstead

مثال:

عين مركز التوزيع لمزرعة تحتوى الوحدات الزراعية الآتية وأمام كل وحدة أقصى حمل يحتاج إليه فى وقت واحد.

المسافة الرأسية	المسافة الأفقية	الحمل	المبنى
200	75	80	عنبر دواجن
250	250	25	مكتب
150	50	15	مضخة
50	150	100	إسطبل ماشية
50	50	120	منزل



YL	المسافة الرأسية Y	XL	المسافة الأفقية X	الحمل L	المبنى
16000	200	6000	75	80	عتبر دواجن
6250	250	6250	250	25	مكتب
2250	150	750	50	15	مضخة
5000	50	15000	150	100	إسطنبول ماشين
6000	50	6000	50	120	منزل
35500		34000		340	المجموع

$$X = \frac{34000}{340} = 100$$

$$Y = \frac{35500}{340} = 104.4$$

حساب حجم الأحمال لمركز الخدمة الرئيسي:

عند استخدام مركز للتوزيعات لابد من حساب حجم أقصى استهلاك فى وقت واحد لكل المباني وذلك عن طريق مجموع النسب الآتية:

نسبة الحمل

100%

المسكن

الأحمال الأخرى

100%

اكبر حمل

75%

ثانى أكبر حمل

65%

ثالث أكبر حمل

50%

مجموع الأحمال الباقية

مثال:

احسب أقصى حمل لمركز الخدمة الرئيسى للمثال السابق.

الحل:

$$\text{المنزل} = 120 \text{ أمبير} \times 100\% = 120 \text{ أمبير}$$

$$\text{اكبر حمل (إسطبل ماشية)} = 100 \times 100\% = 100 \text{ أمبير}$$

$$\text{ثانى اكبر حمل (عنبر دواجن)} = 80 \times 75\% = 60 \text{ أمبير}$$

$$\text{ثالث اكبر حمل (مكتب)} = 25 \times 65\% = 16.25 \text{ أمبير}$$

$$\text{مجموع الباقى} = 15 \times 50\% = 7.5 \text{ أمبير}$$

303.75

المجموع

أى أن أقصى احتياج لمركز الخدمة الرئيسى 350 أمبير.

اختيار أسلاك التوصيلات:

يوجد ثلاثة عوامل رئيسية لاختيار أسلاك الموصل:

1- تحديد حجم السلك على أساس العزل المطلوب لتوفير الأمان لنقل التيار.

2- تحديد نوع السلك والعزل حسب الاحتياجات والظروف المحيطة.

3- تحديد حجم السلك المطلوب لتحمل فرق الجهد بين طرفيه.

بالنسبة للعاملين الأول والثاني يوجد جداول خاصة حيث يتم اختيار الأسلاك المناسبة من حيث نوع مادة التوصيل وقطره ونوع العزل وقد يكون السلك معزولاً أو غير معزول أى يترك فى الهواء وفى الحالة الأخيرة تكون سعته التيارية اكبر من الأول المعزول أما الموصل المعزول فيمكن استخدامه مدفوناً تحت الأرض.

أما العامل الثالث الخاص بتحمل فرق الجهد فيتحكم فيها عن طريق المقاومة. حيث أن مقاومة السلك دالة لمساحة مقطعة وطول السلك أى انه كلما زاد طول السلك كلما زادت مقاومته بعكس المقطع كلما زاد المقطع تقل مقاومته. وتحسب قيمة الفقد فى القدرة P_{LOSS} عن طريق التيار وفرق الجهد.

$$P_{LOSS} = I \cdot \Delta E$$

Where P_{LOSS} = Line loss in watts

I = Current in amp.

ΔE = Voltage drop in conductors in Volts

وهذه القدرة المفقودة تظهر بأن الموصل ترتفع درجة حرارته لذا يستلزم استخدام الموصل السليم لتلافى هذا الفقد ويحدد هذا الفقد بحوالى 2% - 5% فى الموصلات حسب حجمها ونوعها.

ولحساب المقاومة المسموح بها يستخدم قانون أوم:

$$R_A = \frac{E_D}{I}$$

Where R_A = max. Allowable resistance in ohms

E_D = Voltage drop in volts allowable

$$= (\% \text{ voltage drop}) \times E_{source}$$

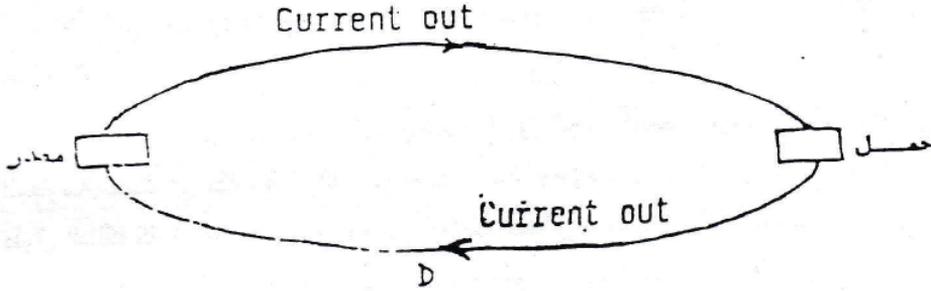
مثال:

احسب المقاومة المسموح بها في موصل تيار شدته 48 أمبير عند 240 فولت إذا كانت نسبة الفقد في الفولت 2%.

الحل:

$$R_A = \frac{0.02 \times 240}{48}$$

المقاومة الكلية للموصل كما سبق على طول الموصل ومساحة مقطعة والطول الكلى للموصل الحامل للتيار يساوى ضعف المسافة بين مصدر التيار ومكان الحمل حتى تكتمل الدائرة.



ولإيجاد المقاومة لوحدة الطول يستخدم القانون التالي:

$$P = \frac{R_A}{2D}$$

حيث أن:

P = المقاومة لوحدة الطول (أوم/م)

D = المسافة بين المصدر والحمل.

R_A = المقاومة المسموح بها.

وفى الغالب هذه المقاومة لوحدة الطول تنسب في جداول إلى الطول 1000 قدم أو 100 متر.

$$R_{100} = \frac{R_A}{2D} \times 1000$$

مثال:

إذا كانت المسافة بين المصدر والحمل 80 متر في المثال السابق احسب حجم سلك النحاس المفروض استخدامه.

$$R_{100} = \frac{0.10 \times 1000}{2 \times 80} = 0.625 \frac{Ohms}{1000m}$$

من جدول (1-1) نجد أن السلك رقم (2) مقاومته 0.513 بطول 1000

متراً

∴ فهو المناسب.

مثال:

احسب حجم سلك الالمونيوم اللازم لحفظ الفقد في فرق الجهد 3% لتيار شدته 90 أمبير/ 240 فولت وأن المسافة بين الحمل والمصدر 220 قدم.

الحل:

$$R_A = \frac{0.03 \times 243}{90} = 0.08 Ohms$$

$$R_{100} = \frac{0.08 \times 1000}{2 \times 220} = 0.1818 \frac{Ohms}{1000ft}$$

من الجدول رقم (2) نجد أن السلك رقم صفر (0) مقاومته 0.162 عند

1000 قدم ولحساب الفقد في فرق الجهد:

$$R = \frac{0.162}{1000} \times 440 = 0.07128 Ohms$$

$$E_{Drop} = I \cdot R = 90 \times 0.07128 = 6.408 Volt$$

$$\% Drop = \frac{6.408}{240} \times 100 \% = 2.67\%.$$

