Lecture 4

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

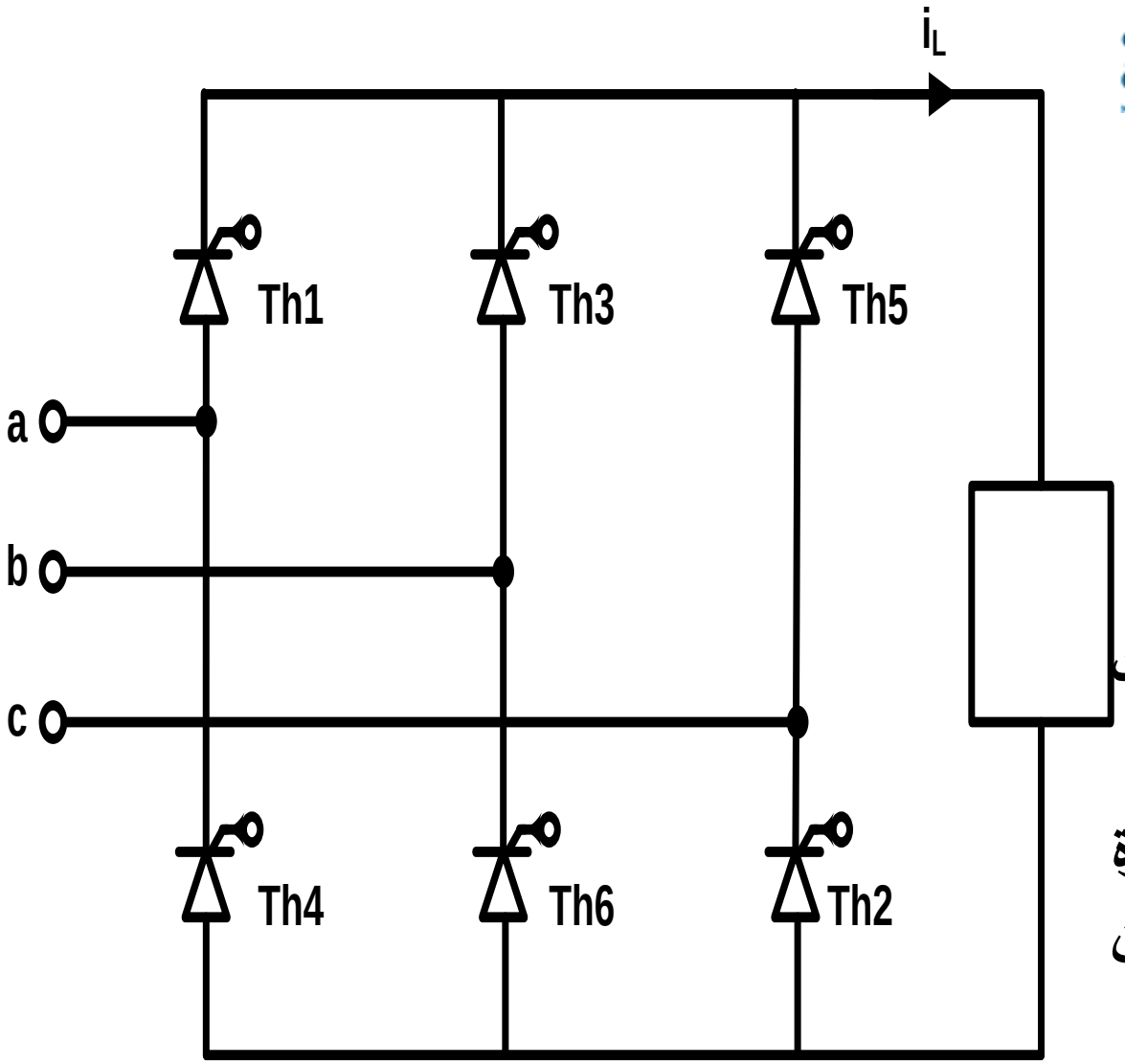
دارات المبدلات الجسرية ثلاثية الأطوار

THREE-PHASE, FULL-WAVE CONTROLLED BRIDGE RECTIFIER CIRCUITS

(RESISTIVE LOAD)

العمل على حمولة أومية ومنبع مثالي

يبين الشكل تمثيل دارة المبدلة الجسريه الثلاثية الأطوار.

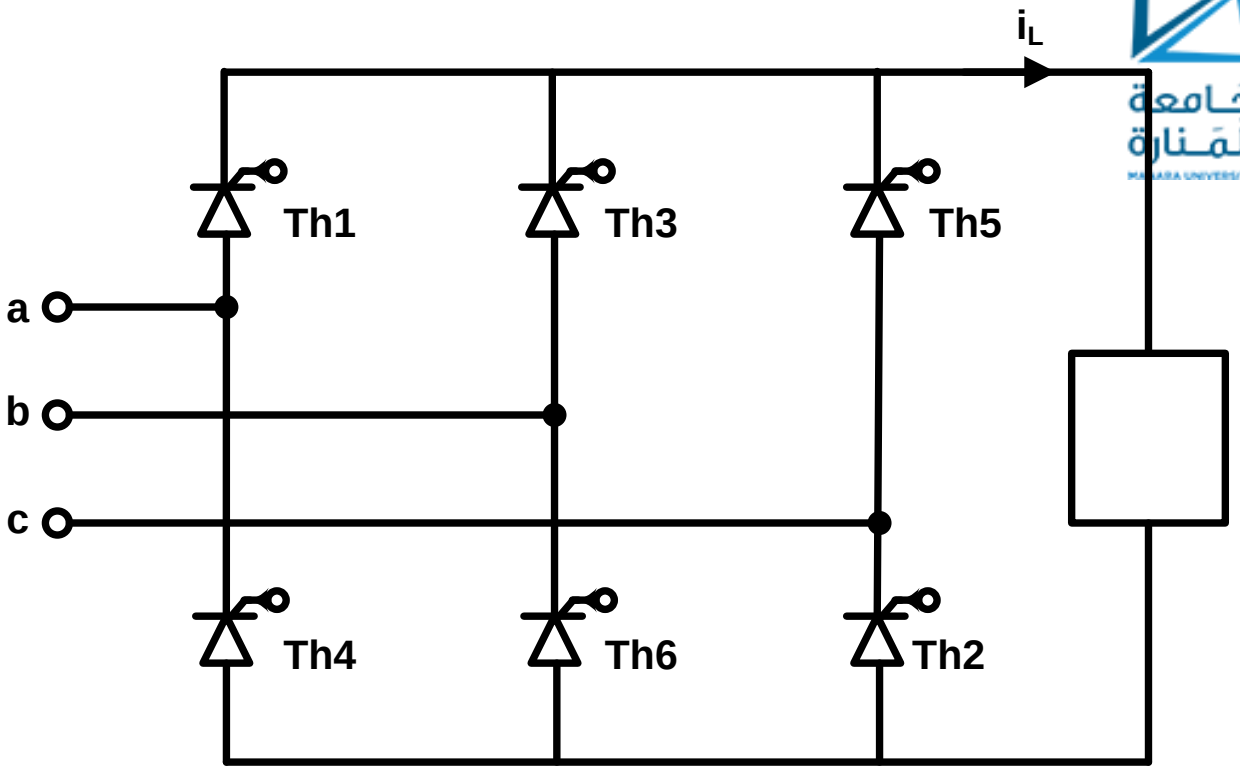


يـتم تشـغيل المبدلـة بحيـث تكـون نبضـات الـتحكم للثايرسـتورات $(Th1; Th3; Th5)$ التـي تشكل المجموعة المهبطية متقدمة عـن نبضـات الـتحكم للثايرسـتورات $(Th4; Th6; Th2)$ التـي تشكل المجموعة المصعدية بزمن $\left(\frac{T}{2}\right)$ أو بزاوية (180^0).

سـنقوم لاحقـا بتحليـل عمـل المبدلـة الجسـريه عنـد الفرضـيات التالية:

١ـ جميـع العناصـر(المفـاتيح) الإلكترونيـة المسـتخدمة فـي دارة المبدلة ذات خصائص واحدة ومن نوع واحد (ثايرستورات من نوع SCR) وذات ممانعة مهملة.

٢ـ دارة المبدلة مغذاة من منبع جهد ثلاثي متزن:



جهود الاطوار

$$e_{aN} = E_m \sin(\omega t)$$
$$e_{bN} = E_m \sin(\omega t - 120^0)$$
$$e_{cN} = E_m \sin(\omega t - 240^0)$$

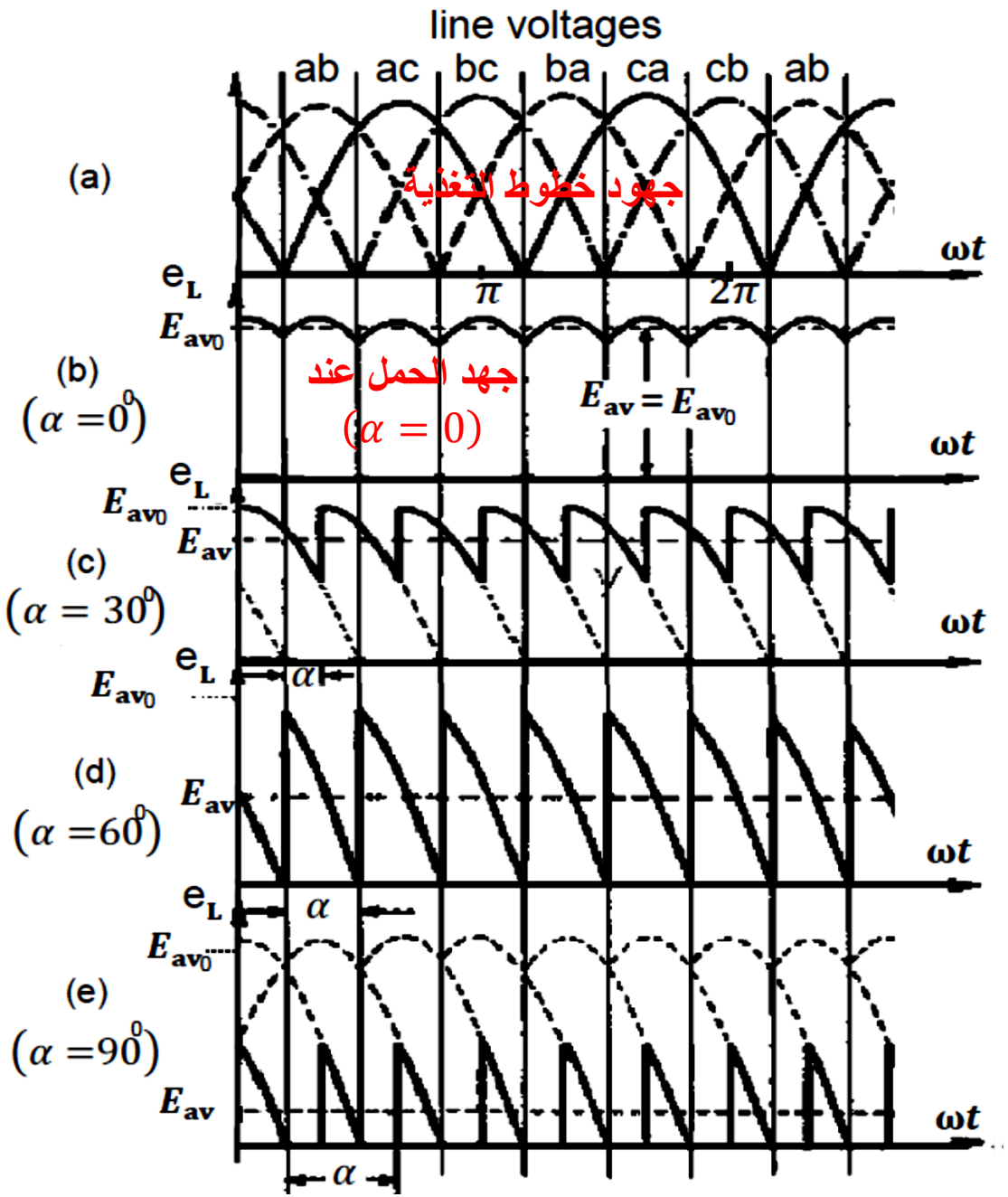
جهود الخطوط

$$e_{ab} = e_{aN} - e_{bN} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t + 30^0)$$
$$e_{bc} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - 90^0)$$
$$e_{ca} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - 120^0)$$

- يتم تشكيل نبضات التحكم على بوابات الثايرستورات حسب تسلسل أرقامها وبفرق صفحة بين كل ثايرستورين متتاليين تعادل 60^0.
- يتشكل جهد الخرج للجسر من ست حالات تشغيل مختلفة خلال الدور الواحد بتوصيل أحد ثايرستورات طور المجموعة المهبطية مع أحد ثايرستورات المجموعة المصعدية للأطوار الأخرى.
- يعادل المجال الزمني لكل حالة من الحالات الستة زمناً قدره $\left(\frac{T}{6}\right)$، والذي يوافق زاوية $\left(\frac{\pi}{3}\text{rad}; 60^0\right)$.

١. العمل على حمولة أومية ومنبع مثالي :

(RESISTIVE LOAD AND IDEALSUPPLY)



يتشكل جهد الخرج للجسر من ست حالات تشغيل مختلفة خلال الدور الواحد بتوصيل أحد ثايرستورات طور المجموعة المهبطية مع أحد ثايرستورات المجموعة المصعدية للأطوار الأخرى. يعادل المجال الزمني لكل حالة من الحالات الستة زمناً قدره $\left(\frac{T}{3}\right)$، والذي يوافق زاوية $\left(\frac{2\pi}{3}\text{rad}; 120^0\right)$.

يتحدد تيار شبكة التغذية من أربع حالات تشغيل مختلفة.

يبين الشكل (7.3) الحالات الأربعة المشكلة لتيار شبكة التغذية (i_a).

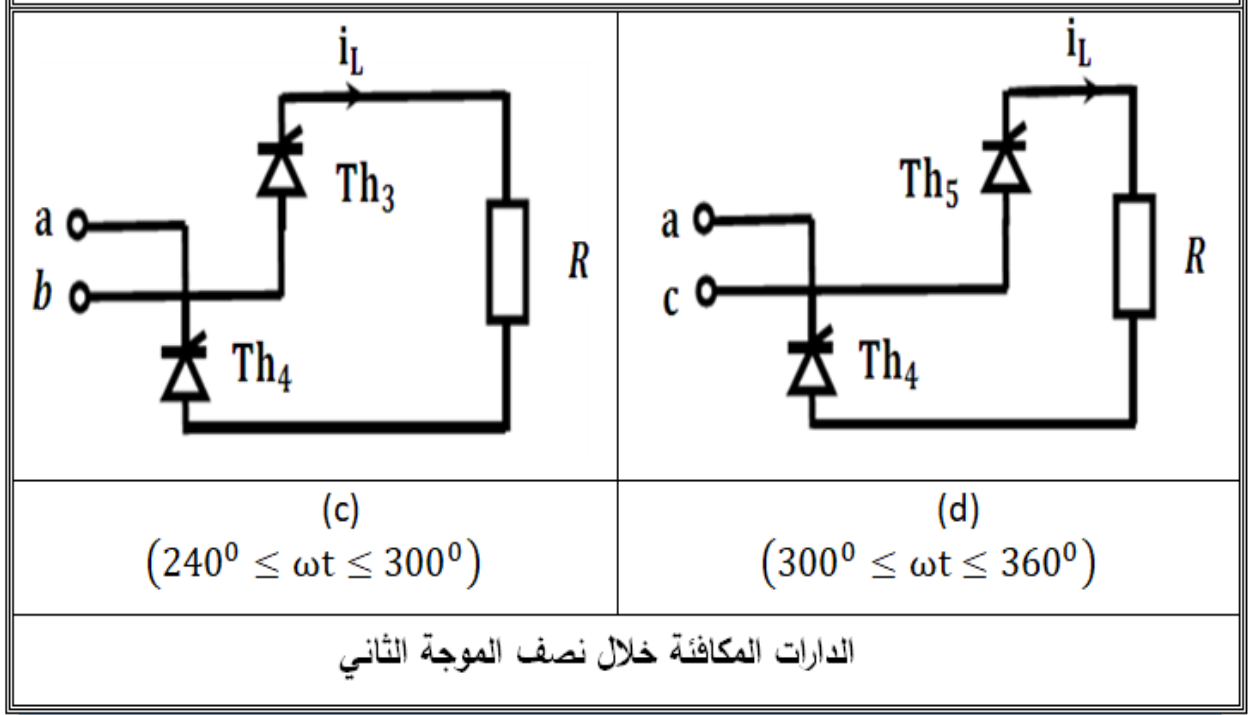
يتشكل تيار شبكة التغذية من الحالات التي يكون فيها أحد (i_a) الثايرستوران في حالة توصيل حيث تتشكل نصف الموجة $(\text{Th1}, \text{Th4})$ الموجبة لإشارة هذا التيار من حالات توصيل الثايرستور (Th1)، بينما تتشكل نصف الموجة السالبة لإشارة هذا التيار من حالات توصيل الثايرستور (Th4).

- يتحدد تيار شبكة التغذية من أربع حالات تشغيل مختلفة.
- يبين الشكل الحالات الأربعة المشكلة لتيار شبكة التغذية (i_a).
- يتشكل تيار التغذية i_a من الحالات التي يكون فيها أحد الثايرستوران Th4 , Th1 بحالة توصيل.
- حيث تتشكل نصف الموجة الموجبة لإشارة هذا التيار من حالات توصيل الثايرستور Th1 .
- بينما تتشكل نصف الموجة السالبة لإشارة هذا التيار من حالات توصيل الثايرستور(Th4).

يختلف نظام عمل المبدلة الجسريه على حمولة أومية حسب زاوية التأخير (α):

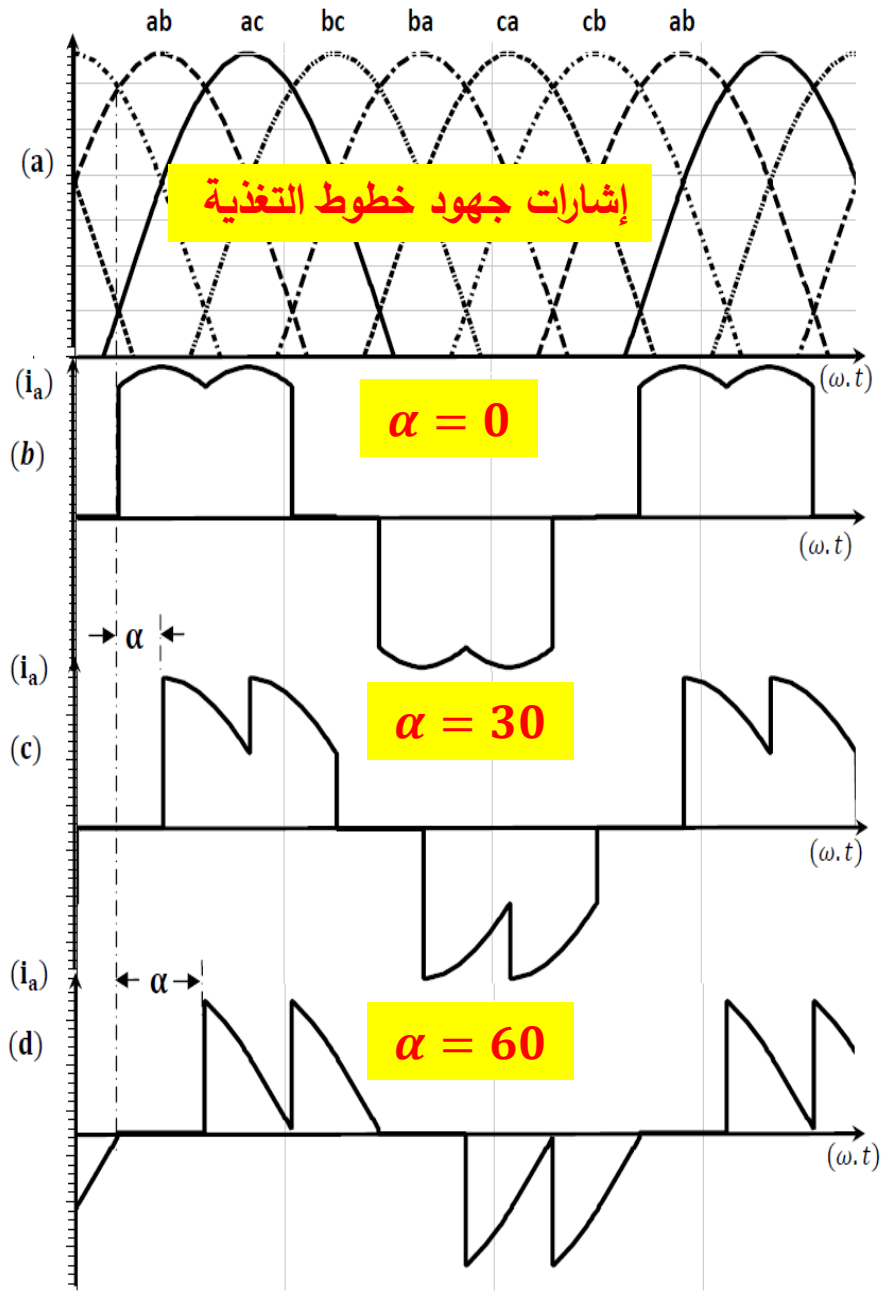
- نظام العمل بتيارات حمولة مستمرة $\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{3}\right)$.
- نظام العمل بتيارات حمولة متقطعة $\left(\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{2\pi}{3}\right)$.

الدارات المكافئة لحالات عمل الجسر على حمولة أومية بزاوية تأخير $\alpha = 30^0$



الشكل	المجال	ثايرستورات التوصيل	الجهد اللحظي للحمل
(a)	$(60^0 \le \omega t \le 120^0)$	$(Th_1, Th_6 \text{ on})$	(e_{ab})
(b)	$(120^0 \le \omega t \le 180^0)$	$(Th_1, Th_2 \text{ on})$	(e_{ac})
(c)	$(240^0 \le \omega t \le 300^0)$	$(Th_3, Th_4 \text{ on})$	(e_{ba})
(d)	$(300^0 \le \omega t \le 360^0)$	$(Th_5, Th_4 \text{ on})$	(e_{ca})

إشارات جهود الحمل وتيار التغذية i_a عند العمل على حمولة أومية بزوايا تأخير مختلفة $(\alpha = 0; 30; 60)$



إشارات تيار التغذية

محددات طرف الحمل (Load-Side Quantities):

يتم تحديد كميات طرف الحمل حسب نظام العمل:

نظام العمل بتيارات حمولة مستمرة $\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{3}\right)$:

- إشارة جهد الخرج

$$e_L(\omega t) = \sqrt{3}\, E_m . \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج

$$E_{av} = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{\pi}{2}} \sqrt{3} E_m . \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m cos\alpha$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{av} = \frac{E_{av}}{R} = \frac{E_{av0}}{R} cos\ \alpha$$

نظام العمل بتيارات حمولة متقطعة $\left(\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{2\pi}{3}\right)$.

- **القيمة اللحظية لإشارة جهد الخرج**

$$e_L(\omega t) = \sqrt{3}\, E_m . \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\pi/6}^{5\pi/6}$$

- **القيمة المتوسطة لإشارة جهد الخرج**

$$E_{av} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m [1 + cos(\alpha + \pi/3)]$$

☜ نلاحظ أن القيمة المتوسطة للنظام المتقطع تكون مساوية للصفر عند العمل على زاوية تأخير $(\alpha = 120^0)$.

☜ كما نلاحظ أن إشارة جهد الخرج للنظامين تكرر نفسها ست مرات خلال الدور الواحد.

☜ تحوي إشارة جهد الخرج على المركبة المستمرة والمركبة التأرجحية ذات التردد $(6.f)$.

- **القيمة الفعالة لإشارة تيار الحمل**

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} {i_L}^2 (\omega t) d\omega t}$$

- **علاقات القيم الفعالة لإشارة تيار الحمل في النظامين:**

$$I_L \Big| 0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\, cos2\alpha}{\pi}}$$

$$I_L \Big| \frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{4\pi - 6\alpha + 3sin\left(2\alpha - \frac{\pi}{3}\right)}{\pi}}$$

المحدد	العمل على حمولة أومية	
القيمة اللحظية لجهد الحمل $e_L(\omega t)$	مستمر	$u_{ab}\Big\vert_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2}$
	متقطع	$u_{ab}\Big\vert_{\alpha+\pi/6}^{5\pi/6}$
القيمة المتوسطة لجهد الحمل (E_{av})	مستمر	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi}E_m cos\alpha = E_{av0}\ cos\ \alpha$
	متقطع	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi}E_m[1+cos(\alpha+\pi/3)]$
القيمة الفعالة لتيار الحمل (I_L)	مستمر	$0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}$ $\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{2\pi+3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{\pi}}$
	متقطع	$\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3}$ $\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{4\pi-6\alpha+3sin\left(2\alpha-\frac{\pi}{3}\right)}{\pi}}$
استطاعة الحمل (P_L)	مستمر	$\frac{3E_m^{\,2}}{4\pi R}(2\pi+3\sqrt{3}\,cos2\alpha)$
	متقطع	$\frac{3E_m^{\,2}}{4\pi R}\left[4\pi-6\alpha-3\,sin\left(2\alpha-\frac{\pi}{3}\right)\right]$

- **الاستطاعة المصروفة في الحمل لكلا النظامين:**

حمولة مستمرة

$$P_L\Big|_{0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}} = \frac{3E_m^{\,2}}{4\pi R}\left(2\pi+3\sqrt{3}\,cos2\alpha\right)$$

حمولة متقطعة

$$P_L\Big|_{\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3}} = \frac{3E_m^{\,2}}{4\pi R}\left[4\pi-6\alpha-3\,sin\left(2\alpha-\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

يبين الجدول ملخص لعلاقات محددات طرف الحمل للمبدلة الجسريه عند عملها على حمولة أومية في النظامين المستمر والمتقطع:

محددات طرف التغذية(Supply-Side Quantities):

- نظام العمل بتيارات حمولة مستمرة$\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{3}\right)$:

بناء على إشارات تيار المنبع (i_a) لعمل المبدلة في نظام تيارات حمولة مستمرة، تكتب القيمة اللحظية لإشارة تيار المنبع (i_a) بالمعادلة التالية:

$$i_a(\omega t) = \frac{\sqrt{3}E_m}{R}.\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{\pi}{2}} + \frac{\sqrt{3}E_m}{R}.\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\frac{\pi}{2},....}^{\alpha+\frac{5\pi}{6},....}$$

- تتحدد القيمة الفعالة لتيار المنبع بالنظام المستمر بالعلاقة :

$$I_a\Big|0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}E_m}{\sqrt{2}R}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{\pi}}$$

- نظام العمل بتيارات حمولة متقطعة$\left(\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3}\right)$.

القيمة اللحظية لإشارة تيار المنبع :

$$i_a(\omega t) = \frac{\sqrt{3}E_m}{R}.\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} + \frac{\sqrt{3}E_m}{R}.\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)\Big|_{\alpha+\frac{\pi}{2}}^{\alpha+\frac{7\pi}{6}}$$

- تتحدد القيمة الفعالة لتيار المنبع بالعلاقة التالية:

$$I_a\Big|\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3} = \frac{E_m}{\sqrt{2}R}\sqrt{\frac{4\pi - 6\alpha - 3\,sin\left(2\alpha - \frac{\pi}{3}\right)}{\pi}}$$

$$I_a = I_L\sqrt{\frac{2}{3}}$$

- يمكن التعبير عن القيمة الفعالة لتيار الطور للمنبع بدلالة القيمة الفعالة لتيار الحمل في كلا النظامين بالعلاقة التالية:

عامل الاستطاعة (Operating Power Factor):

$$PF = \frac{P_a}{3.E_a.I_a}$$

- يمثل عامل الاستطاعة نسبة الاستطاعة المصروفة بالحمل إلى الاستطاعة المقدمة من المنبع:
- عامل استطاعة الجسر لنظامي التيار المستمر والمتقطع

بالنظام المستمر

$$PF\Big|_{0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}} = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{4\pi}}$$

بالنظام المتقطع

$$PF\Big|_{\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3}} = \sqrt{\frac{4\pi - 6\alpha - 3Sin(2\alpha - \pi/3)}{4\pi}}$$

بتعويض $(\alpha = 0^0)$

$$PF\Big|_{\alpha = 0} = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{4\pi}} = 0.956$$

المحدد	العمل على حمولة أومية		حمل بمحارضة عالية
القيمة اللحظية لجهد الحمل $e_L(\omega t)$	مستمر	$u_{ab}\Big\vert_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+\pi/2}$	$u_{ab}\Big\vert_{\alpha+\pi/6}^{5\pi/6}$
	متقطع	$u_{ab}\Big\vert_{\alpha+\pi/6}^{5\pi/6}$	
القيمة المتوسطة لجهد الحمل (E_{av})	مستمر	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi}E_m cos\alpha = E_{av0}\ cos\ \alpha$	$E_{av0}\ cos\ \alpha$
	متقطع	$\frac{3\sqrt{3}}{\pi}E_m[1+cos(\alpha+\pi/3)]$	
القيمة الفعالة لتيار الحمل (I_L)	مستمر	$0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}$ $\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{2\pi+3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{\pi}}$	$\frac{E_{av0}\ cos\ \alpha}{R}$
	متقطع	$\frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{2\pi}{3}$ $\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{4\pi-6\alpha+3sin\left(2\alpha-\frac{\pi}{3}\right)}{\pi}}$	
استطاعة الحمل (P_L)	مستمر	$\frac{3E_m^{\ 2}}{4\pi R}\left(2\pi+3\sqrt{3}\,cos2\alpha\right)$	$\frac{(E_{av0}\ cos\ \alpha)^2}{R}$
	متقطع	$\frac{3E_m^{\ 2}}{4\pi R}\left[4\pi-6\alpha-3\ sin\left(2\alpha-\frac{\pi}{3}\right)\right]$	

يبين الجدول ملخص لعلاقات محددات طرف الحمل للمبدلة الجسريه عند عملها على حمولة أومية في النظامين المستمر والمتقطع وعلى حمولة تحريضية:

ملخص المحددات الكاملة لعامل الاستطاعة لحالات العمل بنظام التيارات المستمرة والمتقطعة الاومية والتحريضية.

جامعة المنارة

Resistive Load

	Mode I ($0 \le \alpha \le 60°$)	Mode II ($0 \le \alpha \le 120°$)	Highly inductive load
Fourier coefficients of supply current a_1	$-\frac{3\sqrt{3}E_m}{2\pi R}\sin 2\alpha$	$-\frac{3E_m}{2\pi R}[1+\cos(2\alpha-60°)]$	$-\frac{9}{\pi^2}\frac{E_m}{R}\sin 2\alpha$
b_1	$\frac{E_m}{2\pi R}(2\pi+3\sqrt{3}\cos 2\alpha)$	$\frac{E_m}{2\pi R}[4\pi-6\alpha-3\sin(2\alpha-60°)]$	$\frac{9}{\pi^2}\frac{E_m}{R}(1+\cos 2\alpha)$
Fundamental rms supply current I_1		$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{a_1^2+b_1^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{a_1^2+b_1^2}$
RMS current I	$\frac{E_m}{\sqrt{2R}}\sqrt{\frac{2\pi+3\sqrt{3}\cos 2\alpha}{\pi}}$	$\frac{E_m}{\sqrt{2R}}\sqrt{\frac{4\pi-6\alpha-3\sin(2\alpha-60°)}{\pi}}$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{E_m}{R}\cos\alpha$
Current displacement factor ($\cos\psi_1$)	$\frac{2\pi+3\sqrt{3}\cos 2\alpha}{\sqrt{27+4\pi^2+12\sqrt{3}\pi\cos 2\alpha}}$	$\frac{4\pi-6\alpha-3\sin(2\alpha-60°)}{\sqrt{9[1+\cos(2\alpha-60°)]^2+[4\pi-6\alpha-3\sin(2\alpha-60°)]^2}}$	$\cos\alpha$
Current distortion factor (I_1/I)	$\frac{27+4\pi^2+12\sqrt{3}\pi\cos 2\alpha}{4\pi(2\pi+3\sqrt{3}\cos 2\alpha)}$	$-\frac{3\sqrt{3}E_m}{2\pi R}\sin 2\alpha$	$\frac{3}{\pi}$
Power factor	$\sqrt{\frac{2\pi+3\sqrt{3}\cos 2\alpha}{4\pi}}$	$\sqrt{\frac{4\pi-6\alpha-3\sin(2\alpha-60°)}{4\pi}}$	$\frac{3}{\pi}\cos\alpha$

تطبيق:

مبدلة جسرية تغذى من شبكة ثلاثية الأطوار مثالية $(415\ V; 50Hz)$ لتغذي حمل أومي $(R = 100\Omega)$. والمطلوب تحديد القيمة المتوسطة لجهد الحمل والاستطاعة المصروفة بالدارة عند العمل على زوايا تأخير $(\alpha = 45^0; 90^0)$.

الحل:

تتحدد القيمة المتوسطة لجهد الحمل لنظام التيار المستمر من العلاقة التالية:

$$E_{av} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m cos\alpha = E_{av0}\ cos\ \alpha \qquad ; E_m = 415\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

عند العمل على زاوية تأخير $(\alpha = 45^0)$:

تكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل

$$E_{av0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} 415\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 396\ V$$

كما تتحدد الاستطاعة المصروفة لنظام التيار المستمر بالعلاقة التالية:

$$P_L = \frac{3{E_m}^2}{4\pi R}\left(2\pi + 3\sqrt{3}\ cos2\alpha\right) = \frac{3}{4\pi}\ \ \frac{415^2}{100}.\frac{2}{3}.2\pi = 1722\ W$$

عند العمل على زاوية تأخير $(\alpha = 90^0)$ تكافئ العمل بنظام تيار متقطع:

تتحدد القيمة المتوسطة لجهد الحمل:

$$E_{av} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \left[1 + cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} 415 \sqrt{\frac{2}{3}} \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right] = 75.1\ V$$

كما تتحدد الاستطاعة المصروفة:

$$P_L = \frac{3{E_m}^2}{4\pi R} \left[4\pi - 6\alpha - 3\ \sin\left(2\alpha - \frac{\pi}{3}\right)\right] =$$

$$= \frac{3}{4\pi} \frac{415^2}{100} \frac{2}{3} \left[4\pi - 3\pi - 3\ \frac{\sqrt{3}}{2}\right] P_L = \frac{415^2}{200\pi} [\pi - 2.589] = 149\ W$$

تطبيق:

أوجد عامل التموج لتيار حمل مبدلة جسرية تغذى من شبكة ثلاثية الأطوار مثالية لتغذي حمل أومي بزاوية تأخير $(\alpha = 70^0)$ وقارن النتيجة مع حالة العمل على زاوية $(\alpha = 0^0)$.

الحل: تتحدد نسبة القيمة الفعالة إلى القيمة المتوسطة لتيار الحمل حسب نظام عمل المبدلة الجسريه بالعلاقات التالية:

- **لنظام التيار المستمر:**

$$\frac{I_L}{I_{av}} = \frac{\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{\pi}}}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi R}E_m cos\alpha} = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\,cos2\alpha}{\pi.cos^2\alpha}}$$

- **لنظام التيار المتقطع $60 \le \alpha \le 120$:**

$$\frac{I_L}{I_{av}} = \frac{\frac{\sqrt{3}E_m}{2R}\sqrt{\frac{4\pi - 6\alpha + 3sin\left(2\alpha - \frac{\pi}{3}\right)}{\pi}}}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi R}E_m[1 + cos(\alpha + \pi/3)]} = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{4\pi - 6\alpha + 3sin\left(2\alpha - \frac{\pi}{3}\right)}{\pi[1 + cos(\alpha + \pi/3)]^2}}$$

بتعويض $(\alpha = 60)$ في المعادلة السابقة نجد:

$$\frac{I_L}{I_{av}} = 1.134 \quad ; \quad RF = \sqrt{\left(\frac{I_L}{I_{av}}\right)^2 - 1} = 0.535$$

بينما يتحدد عامل التموج (ripple factor) عند$(\alpha = 0)$ وفق النسبة:

$$\frac{I_L}{I_{av}} = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{\pi}} = \frac{\pi}{6}1.9115 = 1.001$$

لاحظ ان عامل التموج $ripple\ factor$

ينخفض مع انخفاض زاوية التاخير α

تطبيق:

أوجد عامل الاستطاعة لمبدلة جسرية تغذى من شبكة ثلاثية الأطوار مثالية لتغذي حمل أومي $(R = 100\Omega)$ بزاويا $\alpha = 45^0; 90^0$.

الحل: نحدد عامل استطاعة المبدلة عند $(\alpha = 45^0; 90^0)$ باستخدام العلاقات التالية:

✓ عند $(\alpha = 45^0)$ نظام التيار المستمر:

$$PF = \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}\,cos90^0}{4\pi}} = \sqrt{0.5} = 0.707$$

✓ عند $(\alpha = 90^0)$ نظام التيار المتقطع:

$$PF = \sqrt{\frac{4\pi - 3\pi - 3Sin(2\pi/3)}{4\pi}} = \sqrt{\frac{\pi - 3\sqrt{3}/2}{4\pi}} = 0.21$$

لاحظ ان عامل الاستطاعة

يزداد مع انخفاض زاوية التاخير α