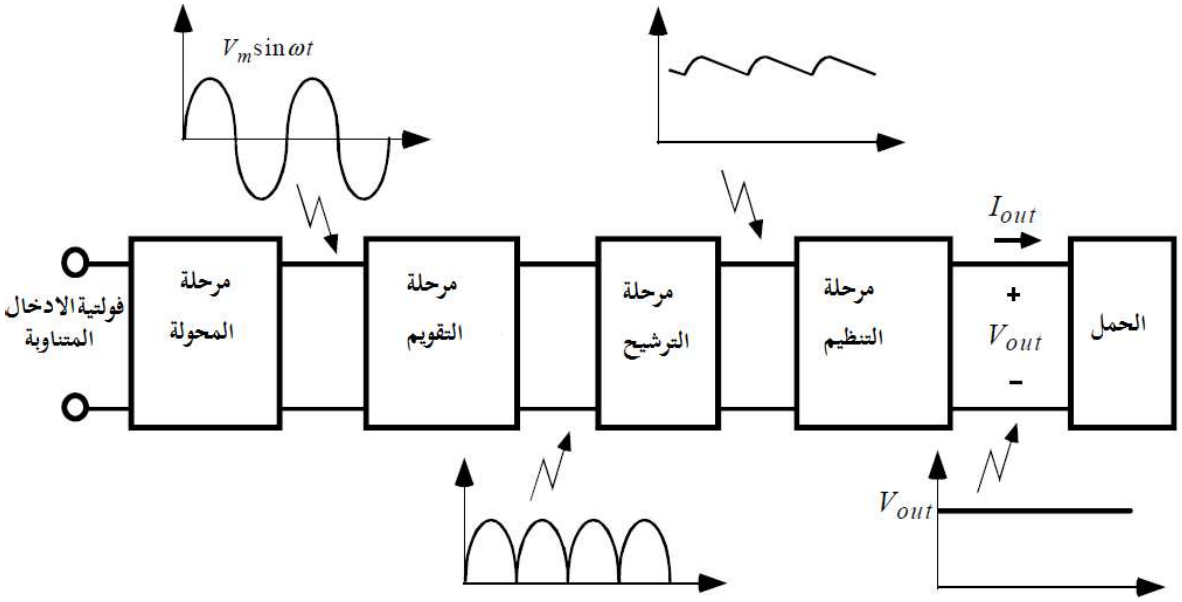
١.٣ التقويم الموجي

ان معظم الأجهزة الإلكترونية (مثل التلفاز، الحاسوب، مشغل الأقراص المدمجة، الهواتف النقالة، مصابيح الإنارة الاقتصادية، وغيرها) تكون بحاجة إلى فولتية مستمرة للقيام بعملها، وحيث ان الشبكة الوطنية تجهز الدور بفولتية متناوبة (قيمتها الفعالة في العراق $V_{rms}=220V$ وترددها $f=50Hz$، بينما في أمريكا $V_{rms}=120V, f=60Hz$, اما في اوربا فهي $V_{rms}=240V, f=60Hz$) ، لذلك فلتشغيل تلك الأجهزة لا بد من تحويل الفولتية المتناوبة إلى فولتية مستمرة، ويسمى الجهاز الذي يقوم بهذه العملية بمجهز القدرة المستمر (DC Power Supply).

الشكل (٣-١) يمثل صورة لمجهز القدرة المستمر، وهو شائع الاستعمال في المختبرات وخصوصا في مختبر الإلكترون وكذلك في مختبر الكهرباء، ويتغذى الجهاز من كهرباء الشبكة الوطنية والتي تكون عبارة عن فولتية متناوبة (متغيرة الشدة والاتجاه) قيمتها الفعالة (220V) وترددها (50Hz)، اما طرفي الإخراج للجهاز فتوفر فولتية مستمرة (ثابتة الشدة والاتجاه) يمكن التحكم في قيمتها.

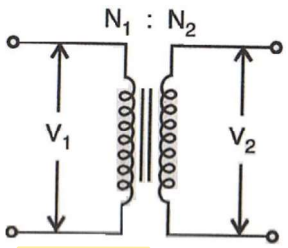
شكل (٣-١) مجهز القدرة المستمر

ان مجهز القدرة المستمر يتكون من عدة مراحل، كما موضح بالمخطط (٣-١) كما نلاحظ من المخطط ان مجهز القدرة المستمر يتكون من أربعة مراحل تبدأ بالمحولة ومن ثم المقوم والمرشح وأخيرا دائرة المنظم، وسنورد الآن بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بالمحولة الكهربائية، اما الأجزاء الثلاثة المتبقية فسيفرد لكل منها فقرة خاصة بها.



شكل (٣-٢) مخطط لمراحل مجهز القدرة المستمر

الشكل (٣-٣) يمثل رمز المحولة وتمثل N_1 عدد لفات الملف الابتدائي، بينما تمثل N_2 عدد لفات الملف الابتدائي، والعلاقة التي تربط بين القيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الابتدائي V_1 والقيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الثانوي V_2 هي:



شكل (٣-٣) رمز المحولة

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \qquad (3-1)$$

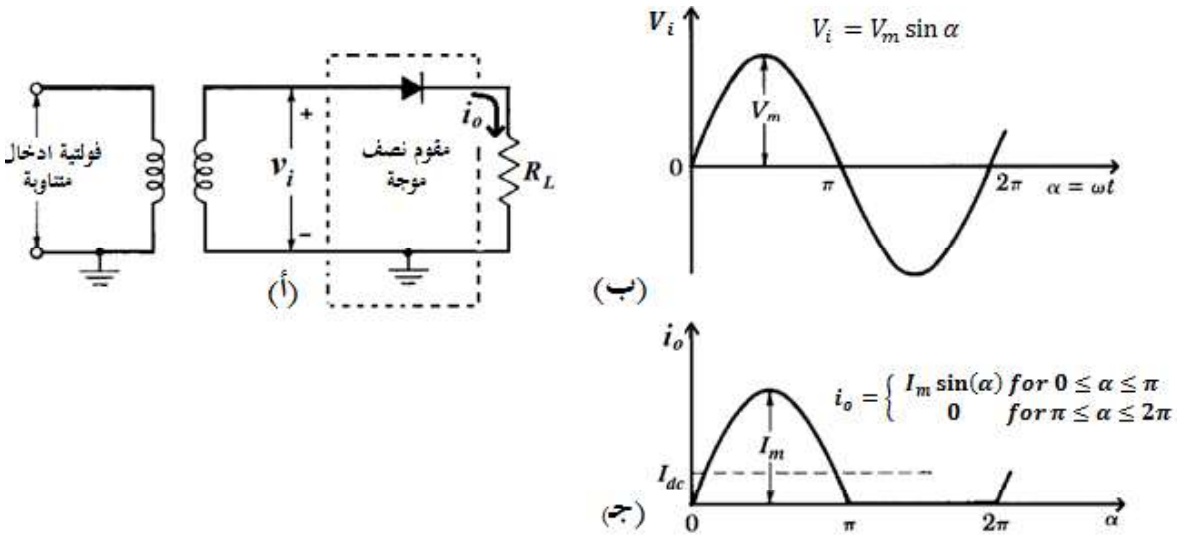
ان استعمال المحولة في دائرة مجهز القدرة هو لسببين هما:

١. لخفض (أو رفع) الفولتية لقيمة مناسبة لعمل بقية أجزاء المجهز ووفقاً للفولتية المستمرة المطلوبة.
٢. لعزل الدائرة عن خط القدرة (الشبكة الوطنية) مما يقلل من احتمال الإصابة بالصدمة الكهربائية.

تعرف دوائر التقويم الموجي بانها دوائر تقوم على تحويل الفولتية المتناوبة (متغيرة الشدة والاتجاه) إلى فولتية مستمرة نبضية (متغيرة الشدة وثابته الاتجاه). يكون للثنائي البلوري دور أساسي في دوائر التقويم الموجي وذلك لامتلاكه الخاصية بكونه يُبدي مقاومة قليلة لسريان التيار في اتجاه معين (عندما ينحاز أماميا) ولا يسمح لسريان التيار بالاتجاه المعاكس (عندما ينحاز عكسياً)، وبعبارة أخرى انه يسمح بمرور التيار باتجاه واحد. بشكل عام هناك نوعان من دوائر التقويم الموجي وهي مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة.

١.١.٣ مقوم نصف الموجة (Half-Wave Rectifier):

الشكل (٣-٤) يوضح مقوم نصف موجة وشكل الموجة الداخلة للمقوم والخارجة منه.



شكل (٣-٤) دائرة مقوم نصف الموجة

خلال النصف الأول من فولتية الإدخال للمقوم يكون الثنائي منحاز أماميا ويسمح الثنائي بمرور التيار من خلاله، وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائي بنظر الاعتبار وتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد نحصل على:

$$v_i - i_o r_B - i_o R_L = 0$$

$$i_o = \frac{v_i}{R_f + R_L}, \quad But \quad v_i = V_m \sin(\alpha) \ \ for \quad 0 \le \alpha \le \pi$$

$$i_o = \left(\frac{V_m}{R_f + R_L}\right)\sin(\alpha) \qquad for \quad 0 \le \alpha \le \pi$$

$$i_o = I_m \sin(\alpha) \quad , \quad I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L} \quad , \quad v_o = i_o R_L \qquad (3-2)$$

حيث v_i تمثل القيمة الآنية لفولتية الإدخال، i_o تمثل القيمة الآنية لتيار الإخراج، V_m اقصى قيمة يمكن ان تصل اليها فولتية الإدخال، I_m اقصى قيمة يمكن ان تصل اليها تيار الإخراج، R_L مقاومة الحمل، R_f مقاومة الثنائي في حالة الانحياز الأمامي، v_o فولتية الإخراج (فرق الجهد على طرفي مقاومة الحمل). وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز للوصلة فان قيمة ذروة الإخراج تصبح بالصورة:

$$I_m = \frac{V_m - V_B}{R_f + R_L} \qquad (3-3)$$

خلال النصف السالب من فولتية الإدخال يكون الثنائي محازاً عكسياً ولا يسمح بمرور التيار وعندها يكون:

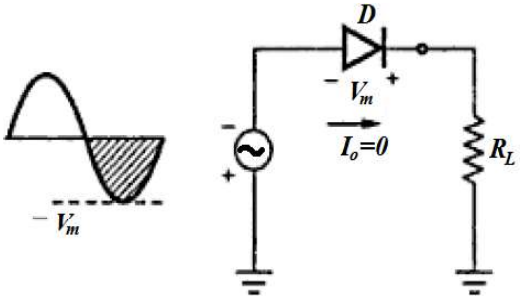
$$i_o = v_o = o \qquad \text{for} \qquad \pi \le \alpha \le 2\pi$$

نلاحظ من الشكل الخاص بمقوم نصف الموجة ان زمن الإخراج هو نفسه زمن الإدخال أي ان:

$$T_o = T_i \quad so, \quad f_o = f_i$$

أي انه في حالة مقوم نصف الموجة فان تردد الإخراج هو نفسه تردد الإدخال.

في حالة الانحياز العكسي يجب ان لا تتجاوز الفولتية العكسية المسلطة على طرفي الثنائي فولتية الانهيار التهدمي الخاصة به، وتسمى اعظم قيمة للفولتية العكسية التي يجب ان يتحملها الثنائي بفولتية الذروة العكسية (PIV) (Peak Inverse Voltage).



الشكل المجاور يوضح ان اعظم فولتية الذروة العكسية في حالة مقوم نصف الموجة هي:

$$PIV = V_m$$

من الأمور المهمة في أي مقوم هو مقدار المركبة المستمرة (معدل القيمة المستمرة) التي تخرج من المقوم و يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_o \, d\alpha \quad , i_o = \begin{cases} I_m \sin(\alpha) & for\ 0 \le \alpha \le \pi \\ 0 & for\ \pi \le \alpha \le 2\pi \end{cases}$$

وبالتعويض عن قيمة التيار نجد:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}[\int_0^{\pi} I_m \sin(\alpha)\, d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} (0)\, d\alpha] = \frac{I_m}{2\pi}[-\cos(\alpha)]_0^{\pi} = \frac{I_m}{2\pi}[-(-1-1)]$$

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} \qquad (3-4)$$

وبنفس الطريقة يكون :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \qquad (3-5)$$

اما القيمة الفعالة للفولتية الخارجة من مقوم نصف الموجة فتعطى بالعلاقة:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}(i_o)^2 d\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}[I_m \sin(\alpha)]^2 d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi}[0]^2 d\alpha}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi}\int_0^{\pi}\sin^2(\alpha) d\alpha}$$

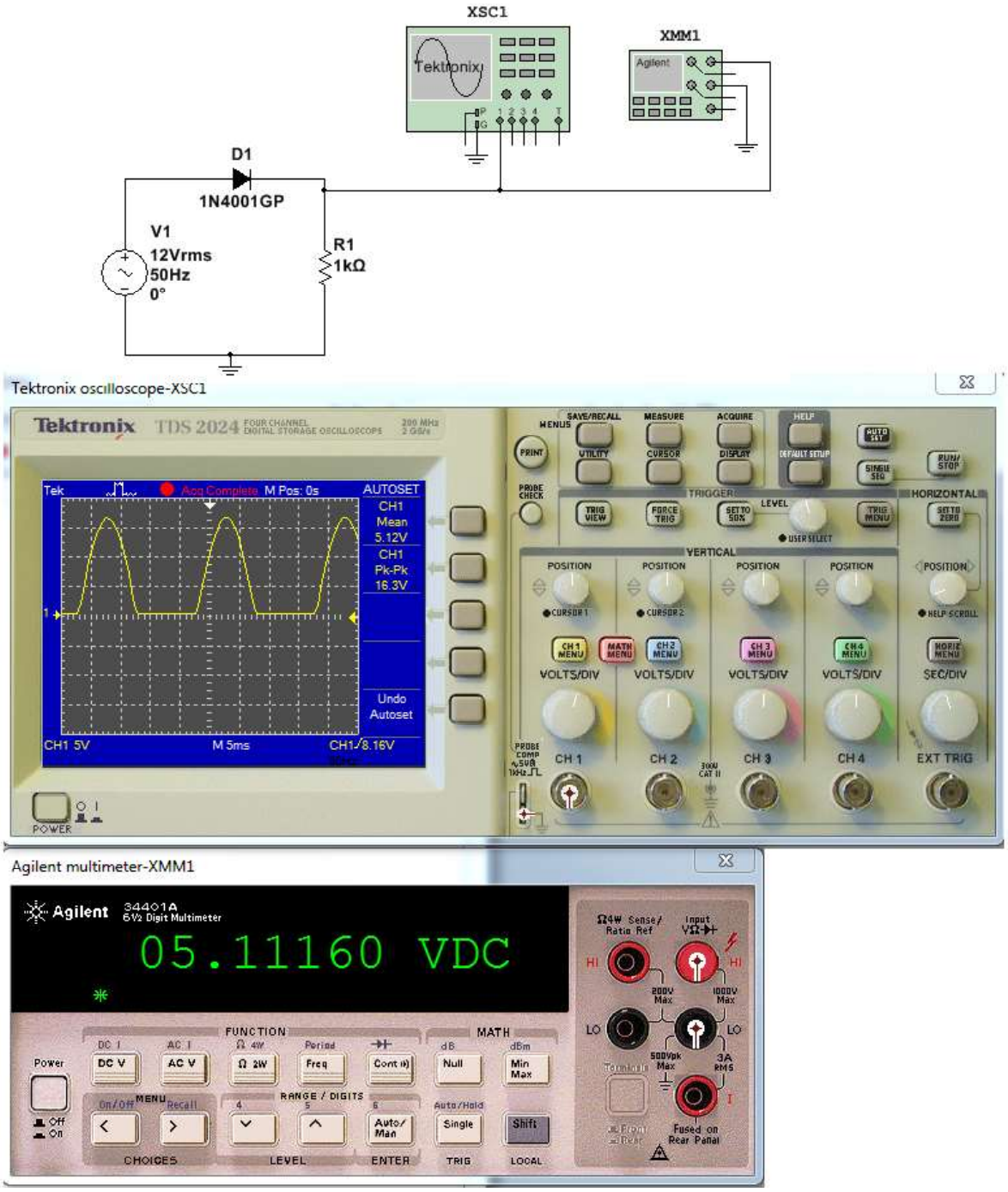
بالاستفادة من المتطابقة المثلثية $\sin^2\alpha = \frac{1}{2}(1-\cos 2\alpha)$ وحل التكامل نحصل على:

$$I_{rms} = I_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{1}{2}(1-\cos 2\alpha)d\alpha} = I_m\sqrt{\frac{1}{4\pi}[\int_0^{\pi} d\alpha - \int_0^{\pi}\cos 2\alpha d\alpha]}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} \qquad (3-6)$$

مثال (٣-١):

الشكل (٣-٥) يمثل تجربة محاكات حاسوبية لتجربة مقوم نصف موجة تم بنائها باستعمال برنامج المحاكات (Multisim-14) ، حيث تم استعمال ثنائي الاستعمالات العامة (1N4001GP) وتم استعمال برنامج Multisim لرسم شكل الإشارة الخارجة عبر مقاومة الحمل باستعمال محاكات لجهاز الاوسليسكوب (Tektronix) الذي يوفره البرنامج، كما تم استعمال برنامج المحاكات لقياس الفولتية المستمرة الخارجة على طرفي الحمل بطريقة مباشرة باستعمال محاكات لجهاز الملتميتر الرقمي(Agilent multimeter-XMM1). باستعمال العلاقات النظرية أوجد قيمة ذروة فولتية الإخراج والقيمة المستمرة في فولتية الإخراج باستعمال التقريب المثالي ومن ثم التقريب الثاني وقارن بين نتائجك ونتائج برنامج المحاكات.



شكل (٣–٥) تجربة مقوم نصف الموجة باستعمال برنامج المحاكات Multisiom–14

الحل: نجد أولاً ذروة فولتية الإدخال، من رسمة الدائرة نلاحظ ان فولتية الإدخال متناوبة وقيمتها الفعالة $(12V_{rms})$، ومنها يمكننا ايجاد ذروة فولتية الادخال باستعمال العلاقة:

$$V_m = V_{rms}\sqrt{2}$$

$$V_m = 12 \times \sqrt{2} = 16.97V$$

أولا: باستعمال التقريب الأول (الثنائي المثالي)

في حالة التقريب المثالي تكون ذروة فولتية الإخراج على الحمل تساوي ذروة فولتية الإدخال لمقوم نصف الموجة $(V_p = V_m)$ ، أي ان ذروة فولتية الإخراج هي $(V_p = 16.97V)$.

اما قيمة المركبة المستمرة لفولتية الإخراج فتكون:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{16.97}{\pi} = 5.4V$$

بالمقارنة بين القيمتين المحسوبيتين والقيمة المسجلة على أجهزة المحاكات نلاحظ ان الاوسليسكوب يسجل ذروة فولتية اخراج مقدارها (16.3V) بينما يسجل جهاز الملتي ميتر فولتية اخراج مستمرة مقدارها (5.11V) ان الاختلاف في النتيجتين عائد إلى ان الثنائي المستعمل في تجربة المحاكات هو ثنائي عملي وله جهد حاجز ومقاومة داخلية.

ثانياً: باستعمال التقريب الثاني

في حالة التقريب الثاني يتم الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للثنائي، وتكون ذروة فولتية الإخراج معطاة بالعلاقة:

$$V_p = V_m - V_B$$

وحيث ان الثنائي (1N4001GP) هو من ثنائيات السليكون، لذا يكون قيمة حاجز الجهد لها $(V_B = 0.7V)$. وبالتعويض في علاقة جهد الذروة نجد:

$$V_p = 16.97 - 0.7 = 16.27V$$

اما قيمة المركبة المستمرة في فولتية الإخراج باعتماد التقريب الثاني فتعطى بالعلاقة:

$$V_{dc} = \frac{V_P}{\pi}$$

$$V_{dc} = \frac{16.27}{\pi} = 5.18V$$

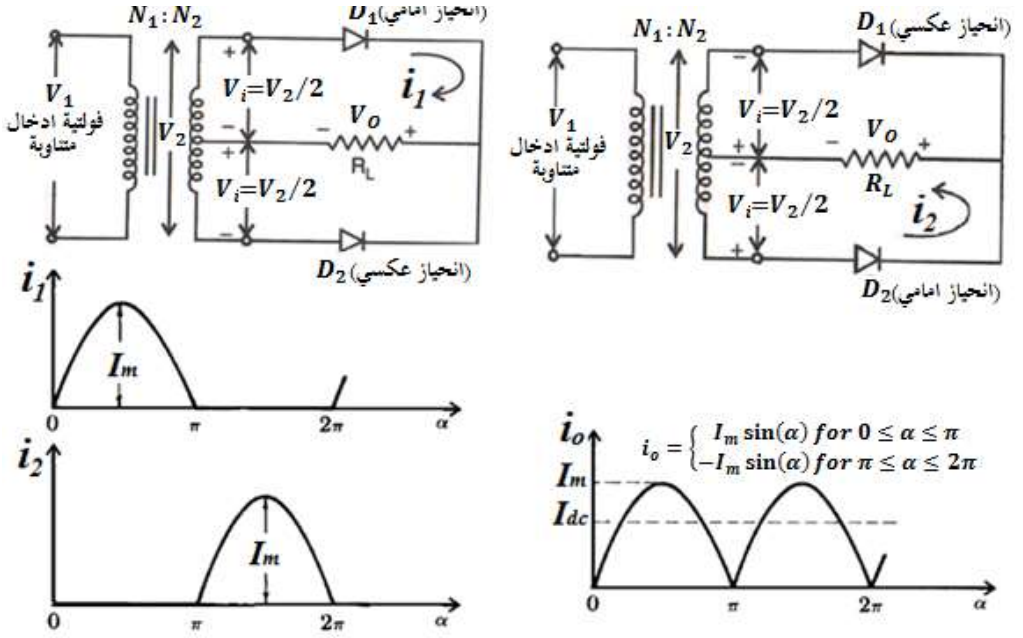
يلاحظ ان نتائج التقريب الثاني قريبة من نتائج المحاكات وذلك لأخذ تأثير جهد الحاجز بنظر الاعتبار، غير انها لا تعتبر تامة الدقة لعدم اخذ تأثير مقاومة الثنائي الأمامية بنظر الاعتبار.

٢.١.٣ مقوم الموجة الكاملة (Full-Wave Rectifier):

هنالك نوعان من مقومات الموجة الكاملة وهما:

أولا: مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي

الشكل (٣-٦) يوضح تركيب وعمل مقوم الموجة الكاملة الذي يستخدم محولة ذات تفرع مركزي (center-tapped transformer)، حيث يتكون هذا النوع من المقومات من ثنائيين (D_1, D_2) ومحولة تفرع مركزي والتي تختلف عن المحولات الاعتيادية بكون ملفها الثانوي مقسوم على ملفين متساويين، وبالتالي تكون الفولتية الخارجة منه مقسمة إلى جزئيين متساويين.



شكل (٣-٦) دائرة مقوم الموجة الكاملة

خلال النصف الأول من الموجة الداخلة يكون الثنائي (D_1) منحاز أماميا ويمر تيار (i_1) وبالاتجاه المبين بالشكل، اما الثنائي (D_2) فيكون منحازاً عكسياً ولا يسمح بمرور التيار من خلاله. وخلال النصف السالب من موجة الإدخال (حيث تنقلب قطبية اطراف المحولة) يصبح الثنائي (D_1) منحازاً عكسياً اما الثنائي (D_2) فيكون منحازاً أماميا فيمر تيار (i_2) عبره وبنفس الاتجاه التيار (i_1)، وبالنتيجة نلاحظ مرور تيار في الحمل خلال النصف الأول والثاني وبنفس الاتجاه، أي ان مقوم الموجة الكاملة يعمل على الاستفادة من نصفي الموجة في حين كان مقوم نصف الموجة يستفاد من نصف واحد فقط.

بنفس الطريقة السابقة يمكننا ان نجد قيمة ذروة تيار الحمل عند اخذ قيمة المقاومة الأمامية للثنائي بالصورة:

$$I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L} \qquad (3-7)$$

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز للثنائي نجد:

$$I_m = \frac{V_m - V_B}{R_f + R_L} \qquad (3-8)$$

من ملاحظة شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة نجد ان زمن الموجة الخارجة هو نصف زمن الموجة الداخلة وبالتالي يكون تردد الفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة هو ضعف تردد الإدخال أي ان:

$$T_o = \frac{T_i}{2} \quad so, \quad f_o = 2f_i$$

بنفس الطريقة المتبعة في مقوم نصف الموجة يمكننا ان نجد المركبة المستمرة والقيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم التفرع المركزي وكما يلي:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_o \, d\alpha \quad , \quad i_o = \begin{cases} I_m \sin(\alpha) & for \ 0 \le \alpha \le \pi \\ -I_m \sin(\alpha) & for \ \pi \le \alpha \le 2\pi \end{cases}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} I_m \sin(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} (-I_m \sin(\alpha) d\alpha)\right]$$

$$= \frac{I_m}{2\pi}[-\cos(\alpha)]_0^{\pi} + \cos(\alpha)]_{\pi}^{2\pi} = \frac{I_m}{2\pi}[-(-1-1)+1-(-1)]$$

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} \qquad (3-9)$$

وبنفس الطريقة يكون ($V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$).

من النتيجة السابقة تستنتج ان قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي هي ضعف قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم نصف الموجة.

اما القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة فتكون:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} (i_o)^2 d\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} [I_m \sin(\alpha)]^2 d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} [-I_m \sin(\alpha)]^2 d\alpha}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi}\int_0^{\pi} \sin^2(\alpha)d\alpha + \frac{I_m^2}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} \sin^2(\alpha)d\alpha}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \qquad (3-10)$$

أي ان القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة هو اكبر من القيمة الفعالة للمركبة الخارجة من مقوم نصف الموجة (وذلك لان مقوم الموجة الكاملة يمرر تيار في الحمل خلال نصفي الموجة)، كما نلاحظ ان العلاقة الخاصة بالقيمة الفعالة هي ذاتها للإشارة المتناوبة.

ذكرنا سابقاً ان محولة التفرع المركزي تعمل على تجزئة الفولتية الخارجة منه إلى نصفين وبالقطبية الموضحة في الشكل (راجع الشكل السابق) لذا فانه خلال النصف الموجب من موجة الإدخال فان الثنائي (D_2) يتعرض إلى جهد عكسي مقداره ($2V_m$) ، ونفس الأمر ينطبق على الثنائي (D_1) خلال النصف السالب، أي ان:

$$PIV = 2V_m$$

من ذلك نجد ان جهد الذروة العكسية (PIV) في حالة مقوم الموجة الكاملة الذي يستعمل محولة التفرع المركزي هو ضعف جهد الذروة العكسية لمقوم نصف الموجة ولذلك يجب اختيار الثنائي هنا بحذر اكبر (بتعبير آخر ان جهد الانهيار التهدمي للثنائي المستعمل يجب ان يكون اكبر من ضعف جهد ذروة الإدخال).

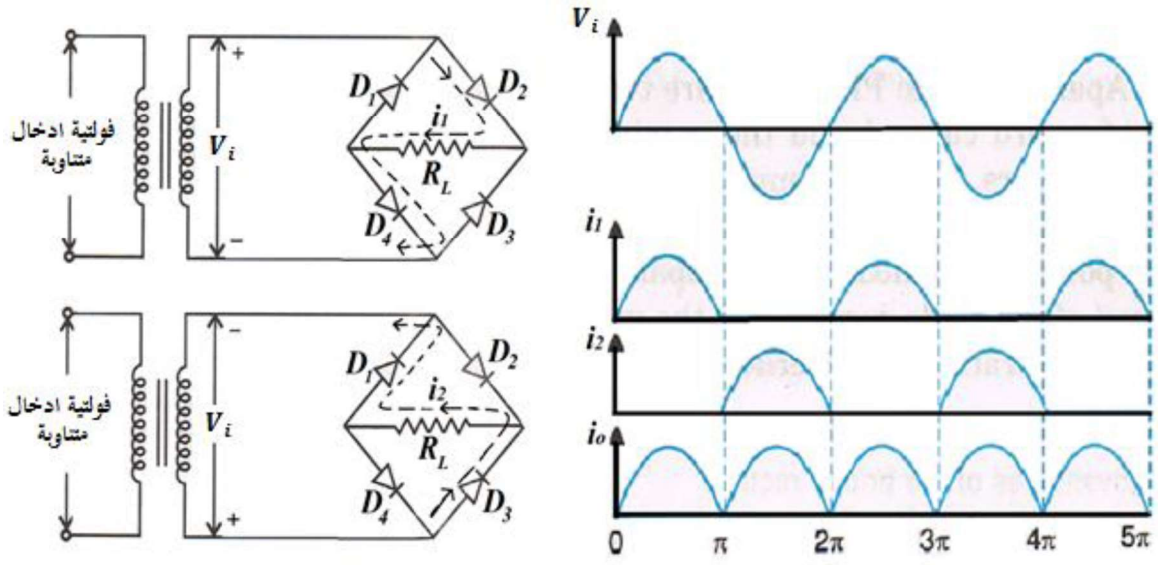
ثانيا: مقوم القنطرة (Bridge Rectifier)

على الرغم من الكفاءة العالية التي تتمتع بها دائرة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي بالمقارنة مع مقوم نصف الموجة، إلا ان هناك بعض المساوئ التي تعاني منها وهي:

أ- عدم توفر محولة التفرع المركزي في كل الأوقات، فضلاً عن ان تعيين نقطة المنتصف على الملف الثانوي ليست سهلة، وكذلك فان استعمال محولة التفرع المركزي يعني زيادة حجم الدائرة وزيادة تكاليفها.

ب- الثنائيات أشباه الموصلات المستعملة يجب ان تمتلك جهد انهيار تهدمي عالي (اكبر من ضعف ذروة الإدخال).

للتغلب على تلك الصعوبات وجد نوع آخر من مقومات الموجة الكاملة وهو مقوم القنطرة الذي يستعمل اربع ثنائيات وكما هو موضح بالشكل (٣-٧).



شكل (٣–٧) دائرة مقوم القنطرة

خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون كل من الثنائي (D_2) و (D_4) منحازين أماميا ويمر التيار عبر الحمل بالاتجاه الموضح بالشكل، بينما يكون الثنائيان (D_1, D_3) في حالة انحياز عكسي، اما خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيكون الثنائيان (D_2, D_4) في حالة انحياز عكسي والثنائيان (D_3,D_1) في حالة انحياز أمامي، فيمر عبرهما تيار في الحمل وبنفس اتجاه التيار الأول. وبالمحصلة يمر بالحمل تيار بنفس الاتجاه للنصف الموجب والسالب من موجة الإدخال.

نلاحظ ان شكل الموجة الخارجة عن مقوم القنطرة لا يختلف عن شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي، ومنه يمكن ان تستنتج ان:

$$\left.\begin{array}{c} f_o = 2f_i \\ I_{dc} = \dfrac{2I_m}{\pi}, V_{dc} = \dfrac{2V_m}{\pi} \\ I_{rms} = \dfrac{I_m}{\sqrt{2}}, V_{rms} = \dfrac{V_m}{\sqrt{2}} \end{array}\right\} \qquad (3-11)$$

من ملاحظة الشكل السابق نجد ان اقصى جهد عكسي يمكن ان يتعرض له الثنائي في حالة مقوم القنطرة هو:

$$PIV = V_m$$

بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد, وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائيات بنظر الاعتبار نحصل على:

$$I_m = \frac{V_m}{2R_f + R_L} \qquad (3-12)$$

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز بنظر الاعتبار يكون:

$$I_m = \frac{V_m - 2V_B}{2R_f + R_L} \qquad (3-13)$$

ان مقوم القنطرة يعتبر من اكثر المقومات استعمالاً اما عيبه الرئيسي فهو امتلاكه لأربعة ثنائيات يقوم اثنان منها بالتوصيل في نصف ذبذبة ويقوم الاثنان الآخران بالتوصيل بالنصف الآخر من الذبذبة وهذا يؤدي إلى مشكلة عندما تكون الفولتية المراد تقويمها صغيرة، ففي حالة استعمال ثنائيات السليكون يكون هبوط الفولتية على الثنائيان ($2V_B$=1.4V) وهي قيمة مؤثرة، ولهذا السبب فان مقوم التفرع المركزي يفضل في التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة لوجود هبوط فولتية واحد (0.7V) على ثنائي واحد. في بعض التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة يستعمل ثنائيان من مادة الجرمانيوم في مقوم التفرع المركزي حيث يؤدي ذلك إلى هبوط بالفولتية على الثنائي مقداره (0.3V) فقط.

لتحديد كفاءة وجودة أي دائرة تقويم موجي هناك عاملين أساسيين وهما كفاءة التعديل وعامل التموج وفيما يلي شرح لكل منها:

أولا: كفاءة التعديل (η) (Rectification Efficiency)

تعرف كفاءة التعديل لأي دائرة مقوم بانها النسبة بين القدرة المستمرة التي يجهزها المقوم لمقاومة الحمل إلى القدرة المتناوبة التي تدخل إلى دائرة التقويم ويرمز لها بالرمز (η) أي ان:

$$\eta = \frac{\text{D.C.power delivered to the load}}{\text{A C.input power from the transformer secondary}}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

وتعرف القدرة المستمرة المجهزة للحمل بالصيغة: $P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_L$

اما القدرة المتناوبة التي يستلمها المقوم فتعطى بالصيغة: $P_{ac} = I_{rms}^2 \times (R_L + R_f)$