إلكترونيات القدرة الكهربائية-2

مسائل محلولة في أنظمة

المقطعات والمعرجات والمدرجات

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

إلكترونيات القدرة الكهربائية-2

مسائل محلولة في أنظمة المقطعات والمعرجات والمدرجات

الدكتور
هاشم ورقوزق
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور
جمال الناصير
أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

جامعة دمشق

1442-1443 هـ
2020-2021 م

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

1 Contents

1 الفصل الأول..... - 15 -

دارات الحجز القسرية للثيرستور والمقطعات..... - 15 -

1- دارات الحجز القسرية Forced Commutation of Thyristor ..... - 16 -

1.1 دارات الحجز القسرية للثيرستور..... - 16 -

1.1.1 مثال(1-1) دارة حجز قسري..... - 16 -

1.2 دراسة دارة مهتزة وديود: ..... - 19 -

1.2.1 مثال(1-2) دارة مهتزة ..... - 19 -

1.3 استخدام ديود مع الدارة المهتزة: ..... - 22 -

1.3.1 مثال(1-3) دارة مهتزة مع ديود..... - 22 -

1.4 آلية الفصل لمقطع ثيرستوري ذي حمل أومي: ..... - 25 -

1.4.1 مثال(1-4) فصل الثيرستور ذي حمل أومي..... - 25 -

1.5 المقطعات التسلسلية buck converters ..... - 28 -

1.5.1 مثال (1-5) مقطع تسلسلي..... - 28 -

1.5.2 مثال (1-6) مقطع تسلسلي (مثالي) ..... - 30 -

1.5.3 مثال (1-7) مقطع تسلسلي..... - 32 -

1.6 نظرية عمل المقطع التسلسلي BUCK Converters (خافض التوتر): ..... - 34 -

1.6.1 مثال (1-8) مقطع تسلسلي (حالة عمل)..... - 39 -

1.6.2 مثال (1-9) مقطع تسلسلي (تغير التوتر والتيار ثابت) ..... - 40 -

1.7 المقطع التفرعي Boost Converter (المقطع الرافع للتوتر) ..... - 45 -

1.7.1 مثال (1-10) مقطع تفرعي (مبدأ العمل)..... - 45 -

1.7.2 مثال (1-11) مقطع تفرعي (مثالي)..... - 48 -

1.7.3 مثال (1-12) مقطع تفرعي (تغير التيار والتوتر ثابت)..... - 50 -

1.8 *المقطع العكسي بالتيار ، غير المباشر ذو المجمع التحريضي، أو المقطع الخافض الرافع Buck-Boost Regulator; Inverting Regulator: ..... - 55 -*

1.8.1 مثال (1-13) مقطع عكسي بالتيار ..... - 55 -

1.8.2 مثال (1-14) مقطع تفرعي (du/dt =con)..... - 61 -

1.9 المقطعات غير المباشرة ذات المجمعات السعوية (CÛK Regulators) .... - 65 -

1.9.1 مثال (15-1) مقطع غير مباشر (ذي مجمع سعوي) ..... - 65 -

1.10 مقطع ذو مجمع تحريضي (Inductive Accumulation Chopper) ..... - 72 -

1.10.1 مثال (16-1) تصميم مقطع ..... - 73 -

2 الفصل الثاني ..... - 81 -

المعرجات الثيرستورية والترانزستورية ..... - 81 -

(معرجات التوتر ومعرجات التيار) ..... - 81 -

2.1 مجموعة مسائل محلولة ..... - 82 -

2.1.1 مثال (2-1) معرج تيار أحادي الطور ..... - 82 -

2.1.2 مثال (2-2) الفرق بين دارة معرج التيار ومعرج التوتر ..... - 85 -

2.1.3 مثال (2-3) معرج جسري أحادي الطور ..... - 86 -

2.1.4 مثال (2-4) معرج جسري أحادي الطور (حمل أومي) ..... - 89 -

2.1.5 مثال (2-5) معرج نصف جسري ..... - 97 -

2.1.6 مثال (2-6) معرج تسلسلي نصف جسري ..... - 100 -

2.1.7 مثال (2-7) معرج نصف جسري (حمل مختلط) ..... - 102 -

2.1.8 مثال (2-8) معرج جسري أحادي الطور ..... - 105 -

2.1.9 مثال (2-9) معرج جسري (حمل تحريضي) ..... - 107 -

2.1.10 مثال (2-10) معرج توتر ثلاثي الطور ..... - 110 -

2.1.11 مثال (2-11) دراسة فرن تحريضي ..... - 115 -

2.1.12 مثال (2-12) معرج توتر ثلاثي الطور ..... - 120 -

2.1.13 مثال (2-13) محرك تزامني ذاتي القيادة ..... - 122 -

3 الفصل الثالث ..... - 126 -

المدرجات الثيرستورية، منظمات الطور ..... - 126 -

AC-AC- Converter Phase Regulator, ... - 126 -

3.1 مجموعة مسائل محلولة ..... - 127 -

3.1.1 مثال (3-1) مدرج تيار أحادي الطور ..... - 127 -

3.1.2 مثال (3-2) شرح آلية عمل المدرج الأحادي الطور ..... - 129 -

3.1.3 مثال (3-3) منظم توتر أحادي الطور ..... - 132 -

3.1.4 مثال (3-4) مدرج توتر أحادي (التحكم بعرض نبضة القدح) ..... - 135 -

3.1.5 مثال (3-5) مدرج ثيرستوري أحادي الطور ..... - 141 -

3.1.6 مثال (3-6) مدرج أحادي الطور مقاد ..... - 144 -

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الأشكال

الشكل(1-1) دارة الاستطاعة..... - 16 -
الشكل(1-2) الدارة المكافئة..... - 17 -
الشكل(1-3) منحنيات التوتر والتيار..... - 18 -
الشكل(1-4): دارة مهتزة (L و C)..... - 19 -
الشكل(1-5) منحنيات التوتر والتيار في حالات التشغيل المختلفة. ..... - 22 -
الشكل(1-6) دارة الاستطاعة..... - 22 -
الشكل(1-7) تغيرات التوتر والتيار عندما يكون المكثف غير مشحون. ..... - 23 -
الشكل(1-8) تغيرات التوتر والتيار عند وجود شحنة أولية للمكثف. ..... - 24 -
الشكل(1-9) إعادة شحن المكثف. ..... - 25 -
الشكل(1-10) دارة الاستطاعة للمقطع التسلسلي مع دارة التبديل القسري. ..... - 26 -
الشكل(1-11) أشكال الأمواج لمختلف عناصر الدارة. ..... - 27 -
الشكل(1-12) دارة الاستطاعة – التوترات والتيارات..... - 29 -
الشكل(1-13) مقطع تسلسلي خافض للتوترa- دارة الاستطاعة ، b - التوترات والتيارات. - 32 -
الشكل(1-14) مقطع تسلسلي..... - 33 -
الشكل(1-15) a-دارة الاستطاعة..... - 34 -
الشكل(1-15) b-الدارة المكافئة في حالة العمل الأولى والثانية ..... - 34 -
الشكل(1-15) C-أشكال الأمواج خلال مراحل العمل للمقطع التسلسلي..... - 38 -
الشكل(1-16) حالات عمل المقطع التسلسلي: (a) دارة المقطع، (b): حالة توصيل القاطع، (c):حالة القاطع مفتوح..... - 41 -
الشكل(1-16) d- التوترات والتيارات في مختلف أجزاء الدارة ..... - 43 -
الشكل(1-17)القيمة الحدية لتيار الملف..... - 44 -
الشكل(1-18) دارة مقطع رافع للتوتر..... - 46 -
الشكل(1-19) التوتر عبر الملف وتغيرات تيار الملف. ..... - 47 -
الشكل(1-20) دارة الاستطاعة- التوترات والتيارات. ..... - 48 -
الشكل(1-21) دارة الاستطاعة والدارة المكافئة..... - 51 -
الشكل(1-22) التوترات والتيارات..... - 53 -
الشكل(1-23) الحالة الحدية لاستمرار تيار الملف..... - 54 -
الشكل(1-24) a- دارة الاستطاعة للمقطع العكسي..... - 56 -
الشكل(1-24) b-الدارات المكافئة خلال كلا فترتي التشغيل..... - 57 -
الشكل(1-24) c-أمواج التوتر والتيار لعناصر المقطع العكسي..... - 58 -
الشكل(1-25) – دارة الاستطاعة. - الدارات المكافئة. - التوترات والتيارات ..... - 64 -
الشكل(1-26) التيار الحدي كتابع لعامل الدور..... - 65 -
الشكل(1-27) دارة الاستطاعة للمقطع العكسي ذي المجمع السعوي CÛK. ..... - 66 -
الشكل(1-28) (27) الدارات المكافئة: حالة شحن المكثف C_1 وتفريغ قدرة L_1..... - 66 -
a- Mode1 (Q_1 موصل- D_m حاجز) – تفريغ المكثف C_1 وتخزين قدرة في L_1..... - 66 -
b- Mode2 الديود D_m موصل والترانزستور Q1 حاجز..... - 66 -
الشكل(1-29) تغيرات التوترات والتيارات في الزمن..... - 69 -

الشكل(30-1) دارة الاستطاعة الممكن استخدامها في حالة التوصيل الدائم. ..... - 74 -
الشكل(31-1) التوترات والتيارات لمقطع بمجمع تحريضي..... - 75 -
الشكل(32-1) تيار الملف وتوتره عند التشغيل بتيار متقطع. ..... - 77 -
الشكل(33-1) تغيرات تيارات وتوترات الخرج مع الزمن..... - 79 -
الشكل(1-2) دارة الاستطاعة لمعرج التيار. ..... - 83 -
الشكل(2-2) a- معرج تيارb- معرج توتر أحادي الطور جسري ثيرستوري وديودات العودة- - 86
الشكل(3-2) a دارة الاستطاعة، (b) شكل توتر الخرج الناتج عن جسر التقويم. ..... - 87 -
الشكل(4-2) توتر الخرج وتيار الحمل. ..... - 89 -
الشكل(5-2) جسر تعريج أحادي الطور..... - 90 -
الشكل(6-2) شكل توتر الخرج..... - 90 -
الشكل(6-2) تغيرات تيار الحمل للحمل أو τ. ..... - 93 -
الشكل(7-2) التيار عند حمل تحريضي. ..... - 94 -
a- دارة الاستطاعة..... - 98 -
الشكل(8-2) a– دارة الاستطاعة. b– التوترات والتيارات. ..... - 98 -
a- دارة المعرج نصف الجسري التسلسلي..... - 100 -
الشكل(9-2) التيار والتوتر على طرفي الحمل السعوي. ..... - 101 -
الشكل(10-2) a– دارة الاستطاعة. b– توتر الحمل وتيار الحمل..... - 103 -
الشكل(11-2) نبضات القدح للقواطع. ..... - 104 -
a- دارة الاستطاعة..... - 106 -
الشكل(12-2) a– دارة الاستطاعة لمعرج جسري أحادي الطور ، (b) توتر وتيار الخرج. .... - - 106
دارة الاستطاعة للمعرج..... - 108 -
الشكل(13-2) a– دارة الاستطاعة. - توتر الحمل وتيار الحمل وتيار المنبع. ..... - 108 -
الشكل(14-2) دارة الاستطاعة لمعرج ثلاثي الطور VSI..... - 111 -
الشكل(15-2) حالات عمل المعرج المختلفة ..... - 111 -
الشكل(16-2) حالة تشغيل لمعرج ثلاثي الطور VSI..... - 112 -
الشكل(17-2) مراحل التوصيل المختلفة، التيارات والتوترات، الدارات المكافئة عند عرض نبضات 180^o..... - 112 -
الشكل(18-2) الدارات المكافأة خلال فترة العمل..... - 113 -
الشكل(19-2) توترات الأطوار والخطوط عند عرض نبضات 180 درجة. ..... - 115 -
الشكل(20-2) دارة الاستطاعة للفرن التحريضي..... - 117 -
الشكل(21-2) توتر الحمل وتياره. التوتر العكسي على T_1 وتيار المنبع. ..... - 117 -
الشكل(23-2) دارة المعرج الثلاثي الطور..... - 121 -
الشكل(24-2) دارة الاستطاعة..... - 123 -
الشكل(25-2) المخططات الشعاعية تبعاً لتسلسل عمل القواطع وشكل تيارات الأطوار ونبضات القدح ،وإشارات موضع الدائر للتحكم بالقدح . ..... - 124 -
الشكل(1-3) مبدل الطور الأحادي ..... - 129 -
الشكل(2-3) a -دارة الاستطاعة للمدرج الأحادي الطور. ..... - 130 -
الشكل(3-2) شكل التوتر ونبضات القدح والتوتر العكسي على T_1 عند حمل أومي..... - 131 -

الشكل(3-4) شكل التوتر ونبضات القدح والتوتر العكسي على T_1 عند حمل تحريضي .- 132 -
الشكل(3-5) دارة الاستطاعة..... - 133 -
الشكل(3-6) موجة توتر وتيار الخرج ونبضات القدح لـ T_1,T_2 ..... - 134 -
الشكل(3-7) دارة الاستطاعة..... - 136 -
الشكل(3-8) نبضات القدح – توتر الخرج وتيار الخرج ومكوناته. ..... - 137 -
الشكل(3-9) نبضات قدح عريضة- توتر الخرج وتيار الحمل. ..... - 138 -
الشكل(3-10) شكل التوتر عند $\alpha>\varphi$ ، وفترات التوصيل لكل عنصر ..... - 139 -
الشكل(3-11) منظم توتر يعمل عند زاوية إزاحة بالطور أكبر من زاوية عامل الاستطاعة للحمل , $\alpha > \varphi$ ..... - 140 -
الشكل(3-12) لمنظم توتر يعمل عند زاوية إزاحة بالطور أصغر من زاوية عامل الاستطاعة للحمل $\alpha<\varphi$ ..... - 140 -
الشكل(3-13) دارة الاستطاعة..... - 141 -
الشكل(3-14) علاقة توتر الخرج الفعال مع زوايا التأخير بالطور..... - 143 -
الشكل(3-15) موجة توتر الدخل V_S، وتوتر الخرج V_0، وتيار الخرج i_0 ونبضات القدح للثيرستور T_1 و T_2..... - 144 -
الشكل(3-16) a– دارة الاستطاعة. b - زاويا الوصل والفصل..... - 145 -

المقدمة Introduction:

منذ عام 1976 ولغاية العام 2020عملنا على تدريس علم الكترونيات القدرة الكهربائية لطلبة قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق. ووضعنا خلال هذه الفترة من الزمن عدة كتب نظرية ومخبرية أطلقنا عليها اسم الكترونيات القدرة (1) و(2). تعرضنا فيها لبنية الثيرستور وخواصه، زمن الوصل وزمن الفصل، ثم باشرنا بدراسة عملية التقويم وتحليل عمل أنظمة التقويم لمختلف التركيبات والجسور الثيرستورية. أشرنا للتطبيقات العملية لأنظمة التقويم، وبينا كيف تعمل في الإحداثيات الأربعة للتوتر والتيار، وكيف يمكن بواسطتها قيادة محركات التوتر المستمر، ونقل الطاقة الكهربائية بالتوتر المستمر. بعد ظهور الترانزستور كقاطع ساكن وتطوير الخطة الدراسية في الكلية عملنا على تدريس أنظمة الحجز القسرية والدوائر المستخدمة، ثم تحليل عمل المقطعات بكافة أشكالها والمعرجات والمدرجات ومبدلات التردد.

بعد أكثرمن أربع وأربعون عاماً من تدريس هذا المقرر، وجدنا أنه من الضروري وضع كتاب شامل وحديث لمسائل محلولة في الكترونيات القدرة الكهربائية بكافة فروعها من أجل توسيع أفق طالب المرحلة الجامعية الأولى وتوجيهه وتشجيع طالب الدراسات العليا للتمكن من الخوض في المسائل الصعبة في هذا المجال. كما حاولنا تقديم معلومات إضافية عن المنهاج المقرر حتى يتمكن الطالب من الحصول على الثقة بالنفس وتمكنه من معالجة أية مشكلة هندسية في هذا المجال. وهذا يفرض علينا نوعية المسائل وسويتها ،وطريقة حلها ،وتسلسل الأفكار الواجب عرضه ،ومحاولة إعادة الفكرة العلمية بأساليب متنوعة، وبقالب مختلف حتى لا يعتمد الطالب على الحفظ .ولهذه الغاية ونظراً لكبر حجم المعلومات التي تم وضعها، اضطررنا إلى وضع كتابين للمسائل المحلولة، الأول "مسائل محلولة في أنظمة التبديل من التيار المتناوب إلى التيار المستمر والتحكم بالمحركات"، يدرس في الفصل الأول، والثاني "مسائل محلولة في أنظمة المقطعات والمعرجات والمدرجات يدرس في الفصل الثاني. (عملية تأخير الطباعة، وإنقاص عدد المسائل والصفحات فرض علينا من مجلس الشؤون العلمية بالجامعة)

وردت العلاقات الرياضية والقوانين الواردة في الكتب الموضوعة بشكل مفصل في الكتب النظرية لإلكترونيات القدرة الكهربائية التي ندرسها ولم نتعرض لاستخرج كل القوانين بشكل نظري، بل عمدنا إلى شرحها من خلال مسائل تطبيقية مباشرة، وكما تم أحياناً التوسع بالشرح وفي التفاصيل نظراً لأهمية العلاقة ومفهومها الفيزيائي. أيضاً في بعض المسائل عمدنا إلى اعتماد رموز أخرى حتى يعتاد الطالب على تفهم المبدأ وليس حفظ العلاقة. تم حل جميع المسائل حلاً كاملاً مع رسم أمواج التوتر في الدخل والخرج ومتابعة التيارات والتوترات العكسية، وتم رسم معظم النتائج على الحاسب. ترتيب المسائل لم نراعي فيه البدء بمسائل سهلة والانتقال لمسائل أكثر صعوبة، بل تعمدنا طرح المسائل بشكل عشوائي، ضمن الجزء الواحد حتى نفرض على الطالب مراجعة جميع المسائل وقراءة حلها.

تمثل مسائل الكتاب هذه المفاهيم الأساسية لعلم الكترونيات القدرة الكهربائية وبدراسة هذه المسائل يتمكن الطالب أو المهندس من فهم كافة التطبيقات الهندسية لهذا العلم. حيث تم البدء بطرح الدرات الكهربائية المشكلة من نصف ناقل وحيد وصولاً لأكثر التطبيقات الهندسية دقة وحداثة. وعليه نكون قد غطينا جسور التقويم المقادة والنصف مقادة التفرعية البسيطة والمضاعفة والتسلسلية. كما وضعنا العديد من المسائل على أنظمة ربط المجموعات على التفرع وعلى التسلسل وصولاً للمجموعات ذات الاتجاه المزدوج للتيار وتطبيقاتها على المحركات التسلسلية وخطوط النقل بالتيار المستمر عالي التوتر، والقيادة الذاتية للمحركات التزامنية. في الكتاب الثاني بدءنا بالتبديل والحجز القسري ثم عرضنا مسائل شاملة على المقطعات الثيرستورية والترانزستورية. وبعدها وضعنا مسائل على معرجات التوتر والتيار وتطبيقاتها، ثم وضعنا مسائل على منظمات التوتر المتناوب أو المدرجات ومبدلات التردد الثيرستورية، وقيادة المحركات التحريضية والتزامنية ذاتية القيادة.

بعد انتشار وتطور علوم الطاقات المتجددة كان لا بد من توسيع مدارك الطلاب في علم الكترونيات القدرة الكهربائية، نظراً لكون مختلف مجالات الطاقة المتجددة (الشمسية والريحية وخلايا الوقود، وتخزين القدرة)، والتي تعتمد على علم الكترونيات القدرة الكهربائية وأصبح من الضروري تفهم مرحلة الربط بين هذه المصادر (المنابع) المتنوعة والشبكة العامة أو المستثمر المباشر. كما أن تطبيقات الجر الكهربائي وتنظيم السرعة سواء

للمحركات الصناعية أو المولدات الريحية يتطلب التحكم بتوتر وتردد العمل لهذه الآلات، وعليه فإن حل مسائل على هذه التطبيقات كان ضرورياً لتحقيق التكامل بين الكترونيات القدرة الكهربائية وكافة التقنيات الصناعية المتداولة عالمياً.

قسم كل كتاب إلى فصول متعددة، في كل فصل تم حل ما أمكن من المسائل بحيث يستوفي الموضوع حقه دون تكرار وإطالة. في الكتاب الاول "مسائل محلولة في أنظمة التبديل من التيار المتناوب إلى التيار المستمر والتحكم بالمحركات "تم معالجة مسائل التبديل من التوتر المتناوب إلى التوتر المستمر. وفي الكتاب الثاني " مسائل محلولة في أنظمة المقطعات والمعرجات والمدرجات"، تم معالجة أنظمة التبديل من المستمر إلى المستمر، ومن المستمر إلى المتناوب، وكذلك من المتناوب إلى المتناوب سواء عند نفس التردد أو عند تردد أقل.

المؤلفون

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

1 الفصل الأول

دارات الحجز القسرية للثيرستور والمقطعات

Forced Commutation Circuits for Thyristor and choppers

Damascus University

1- دارات الحجز القسرية Forced Commutation of Thyristor

1.1 دارات الحجز القسرية للثيرستور

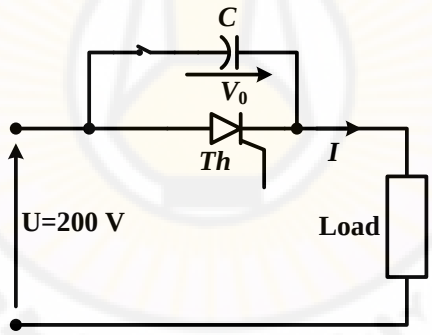
1.1.1 مثال(1-1) دارة حجز قسري

منبع توتر مستمر U=200V يعطي تياراً مستمراً I=20A للحمل. استخدم ثيرستور Th على التسلسل مع الحمل كما في الشكل(1−1) أدناه. زمن الفصل للثيرستور $t_0=24\mu s$. مع إهمال هبوط التوتر على الثيرستور. دارة الحجز المستخدمة مكونة من مكثف C وقاطع K، المكثف ذو توتر شحن أولي $V_0=140V$، حسب الاتجاه المشار إليه بالشكل. احسب سعة المكثف اللازم لحجز الثيرستور في الحالتين التاليتين:

1- بقاء تيار الحمل ثابتاً.

2- اعتبار أن الحمل مقاومة صرفة قدرها 10Ω.

الحل:



الشكل(1−1) دارة الاستطاعة

1- الفصل عند تيار حمل ثابت:

في هذه الحالة على المكثف تقديم تيار الحمل الكامل 20A وعليه فإن المكثف عليه أن يملك شحنة قدرها:

$$Q = I.t_0 = 20\times 24\times 10^{-6} = 480\times 10^{-6}\ [C]$$

خلال فترة تفريغ المكثف سوف يهبط توتر المكثف من القيمة 140V إلى الصفر ولدينا دائماً Q=C.V، وعليه فإن: $480\times 10^{-6} = C\times 140$ ومنه فإن القيمة الدنيا للمكثف:

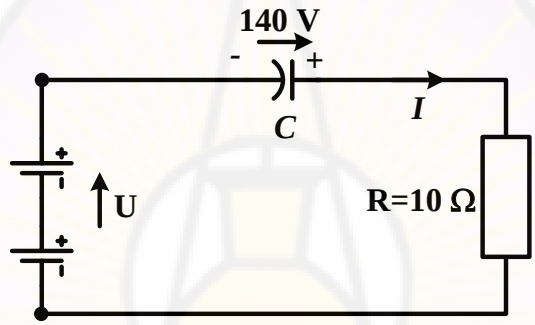
$$C = 480/140 = 3.43\,[\mu F]$$

2- دارة الحجز (الفصل) ذات مقاومة حمل أومية:

في هذه الحالة التيار المار في المكثف سوف لن يكون ثابتاً، يجب حسابه، الدارة المبينة أدناه في الشـــكل(2−1)، لدى إغلاق القاطع K، نرى من الدارة المكافئة وجود مولدين على التسلسل، وهذا يفسر لنا سبب بدء التيار بقيمة كبيرة ثم تخامد التيار، ويحسب التيار الذي سيبدأ بالتفريغ من العلاقة:

$$I_{\max} = \frac{U + V_0}{R} = \frac{200 + 140}{10} = 34A.$$

والدارة كما نرى مكونة من (R و C) متخامدة والعلاقة التالية توصف الدارة:



الشكل(2−1) الدارة المكافئة.

$$R.C\frac{dv}{dt} + v = U$$

باعتبار $v(0) = -v_0 = -140V$

$$v = V\left(1 - e^{-\frac{t}{R.C}}\right) + v(0) =$$

$$v = V\left(1 - e^{-\frac{t}{R.C}}\right) - 140$$

بتثبيت ثابت التكامل V لأن القيمة النهائية v=U=200V

$$U = V - 140 \Rightarrow V = 340V$$

$$v = 340\left(1 - e^{-\frac{t}{R.C}}\right) - 140, \qquad i = 34e^{-\frac{t}{R.C}}$$

يوضح الشكل(3–1) أدناه تغيرات I و v.

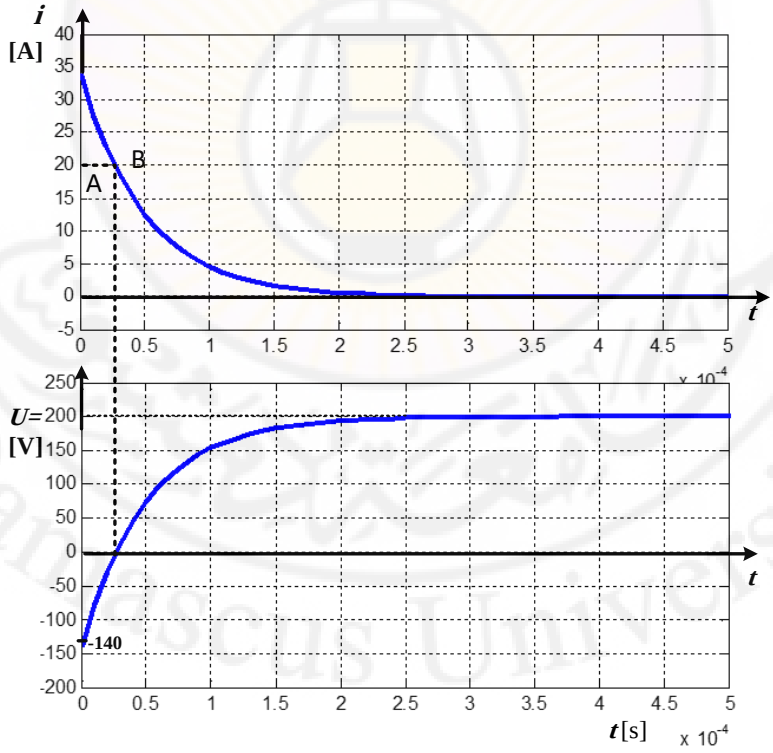
نرى أنه بدءاً من النقطة B التي يكون فيها التيار المار في المكثف 20A، وتوتره يساوي الصـفر، وبعد تلك الفترة سـوف يبدأ توتر المكثف بالانعكاس. يجب على الثيرسـتور أن ينتقل للفصل. أي أن الفترة الزمنية AB تمثل زمن الفصل ويجب أن تكون مساوية أكثر من 24μs. من المنحني لدينا:

$$\frac{20}{34} = e^{-\frac{t}{\tau}}; \qquad \frac{34}{20} = e^{+\frac{t}{\tau}}$$

ومنه فإن: $t_{AB} = \tau \ln 1.7 = 0.53RC$

أي أن: $0.53RC > 24\times10^{-6} Sec$

– نلاحظ أن قيمة المكثف C الآن أكبر من القيمة المحسوبة سابقاً (3.5μF) وذلك لأن التيار هنا ليس مستمراً، له قيمة عظمى ومتناقص.



الشكل(3–1) منحنيات التوتر والتيار.

1.2 دراسة دارة مهتزة وديود:

1.2.1 مثال(2-1) دارة مهتزة

في الدارة المبينة أدناه شكل(4-1)، E توتر منبع مستمر مثالي، L حثية صرفة، C مكثف مثالي ذو توتر شحن أولي v_0. بإهمال مقاومة جميع العناصر. نفرض أن : $v = V_A - V_B$.

1) نغلق القاطع K عند الزمن t=0 حيث v_0=0، ما هي العلاقات الناظمة للتوتر v (t) وللتيار i (t).

2) في الحالات الأربع التالية، نفرض أن:

a) E = 100V, v_0 = +50V.
b) E = 100V, v_0 = 150V.
c) E = 100V, v_0 = 250V.
d) E = 100V, v_0 = -50V.

ارسم منحنيات تغير كل من توتر المكثف v والتيار i.

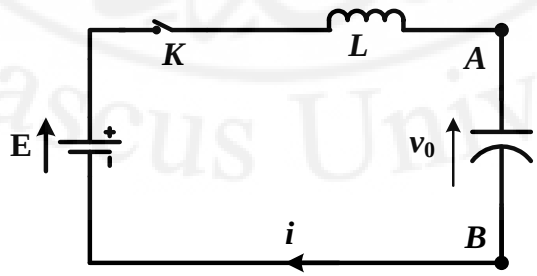
3) بإضافة ديود مثالي في الدارة السابقة، أعد رسم منحنيات v (t) و i (t) من أجل:

a) E = 100V, v_0 = 100V.
b) E = 100V, v_0 = 0.
c) E = 100V, v_0 = -100V.

حدد في كل حالة القيمة النهائية للتوتر v.

4) كما في السؤال (3) أعلاه اعتبر أن E=0 و v_0=-100V، حدد القيمة النهائية للتوتر v.

الحل:



الشكل(4-1): دارة مهتزة (**L** و **C**).

1- المعادلة التفاضلية للدارة المبينة أعلاه هي:

$$E = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i dt$$

حيث: $i = C\frac{dv}{dt}$

$$LC\frac{d^2v}{dt} + v = E.....(1)$$

الحل العام للمعادلة:

$$v = A\cos\omega t + B\sin\omega t + E.....(2)$$

حيث : $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

هنالك ثابتان A و B يجب تثبيتهما، لذا يجب إيجاد شرطين أوليين وهما:

a- $v(0) = v_0$ عند الزمن t=0 وعليه

$$v_0 = A + E.....(3)$$

b- $i(0)=0$ ، التيار معدوم عند t=0 ، وأيضاً بعد الصفر بقليل $t=0^+$ ، وذلك استناداً لقانون استمرارية التيار المار في المفاعلة L.

لدينا $\frac{dE}{dt} = 0$ ولدينا:

$$\frac{i}{C} = -A\omega\sin\omega t + B\omega\cos\omega t.....(4)$$

إذاً $i(0) = C.B.\omega = 0$ B=0

والحل الخاص المناسب للمسألة هو

$$v = (v_0 - E)\cos\omega t + E.....(5)$$

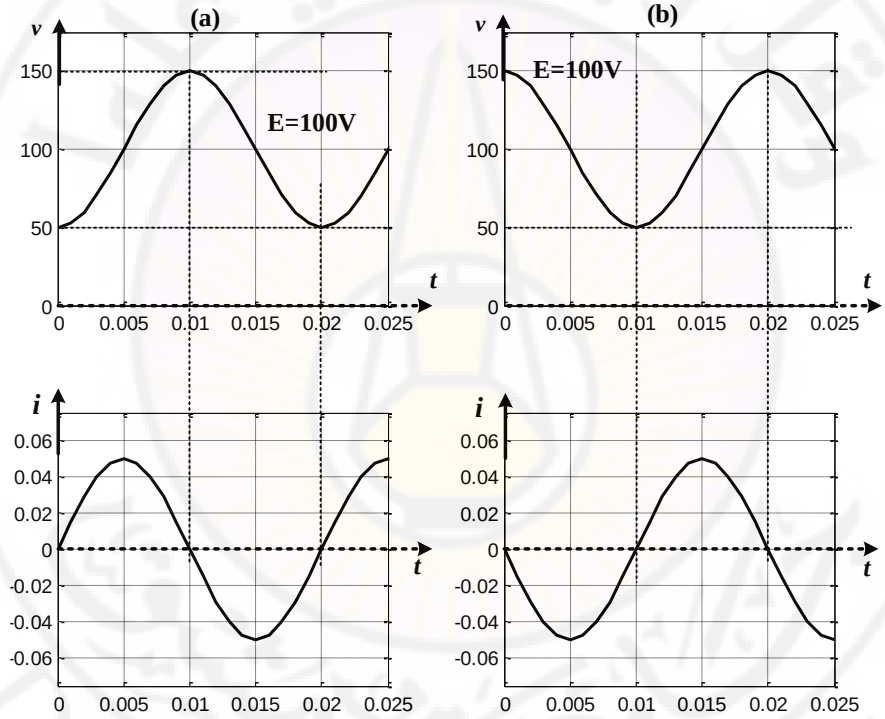
$$i = C.\omega(E - v_0)\sin\omega t.....(6)$$

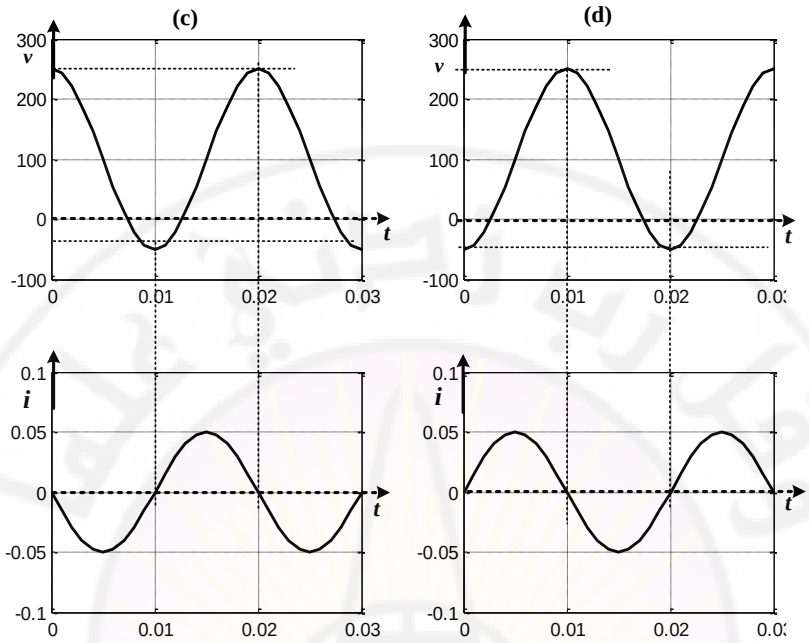
2- منحنيات التوتر والتيار:

شكل الحل يمكن أن يكون مختلفاً، حسب القيم الأولية المعطاة لـ v_0. ونلاحظ أن كمون A غالباً ما يكون سالباً.

3- تبقى المعادلات الأســاســية للتوتر V والتيار I كما هي، لكن خلال نصــف دور، ســوف يصــبح التيار معدوماً، حيث يتم حجز الديود i=0. ويبقى النظام في حالة حجز في الحالة التي وصــل إليها عند التبديل، وســيبقى المكثف مشــحوناً عند التوتر v الذي وصل إليه. عملياً، يكفي أن يحتفظ المكثف بهذه الشحنة لأجزاء من الثانية. وعليه:

a- عندما يكون التوتر E= 100V و v_0= 100V. سوف لن يحدث شيء، لعدم إمكانية مرور التيار I في الدارة (الشكل (5-1)).

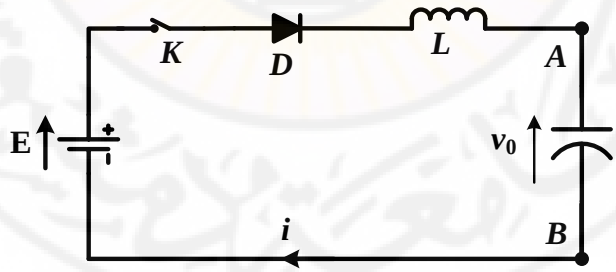




الشكل(5-1) منحنيات التوتر والتيار في حالات التشغيل المختلفة.

1.3 استخدام ديود مع الدارة المهتزة:

1.3.1 مثال(1-3) دارة مهتزة مع ديود

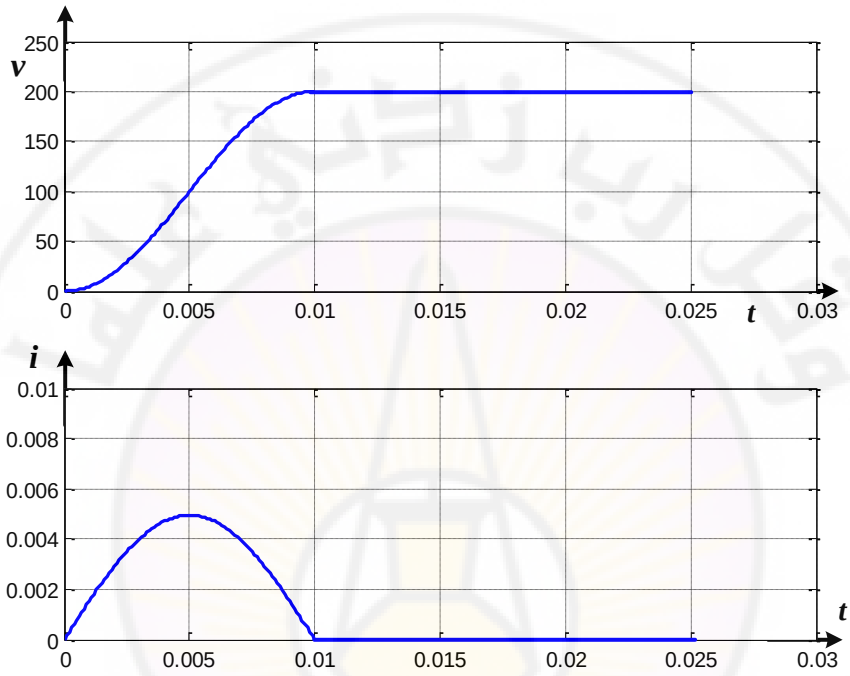


الشكل(**6**-1) دارة الاستطاعة.

b- في هذه الحالة E = 100V و $v_0=0$ (أي المكثف غير مشـــحون) ، وســـوف يبدأ الشحن من القيمة صفر.

لدينا: $v = E\left(1-\cos\omega t\right)$

سيصل توتر المكثف إلى القيمة المساوية لضعف توتر المنبع E. V=2.E .كما في الشكل(7-1)، التيار سيمر حسب العلاقة: $i = E.C.\omega.\sin \omega t$



الشكل(7-1) تغيرات التوتر والتيار عندما يكون المكثف غير مشحون.

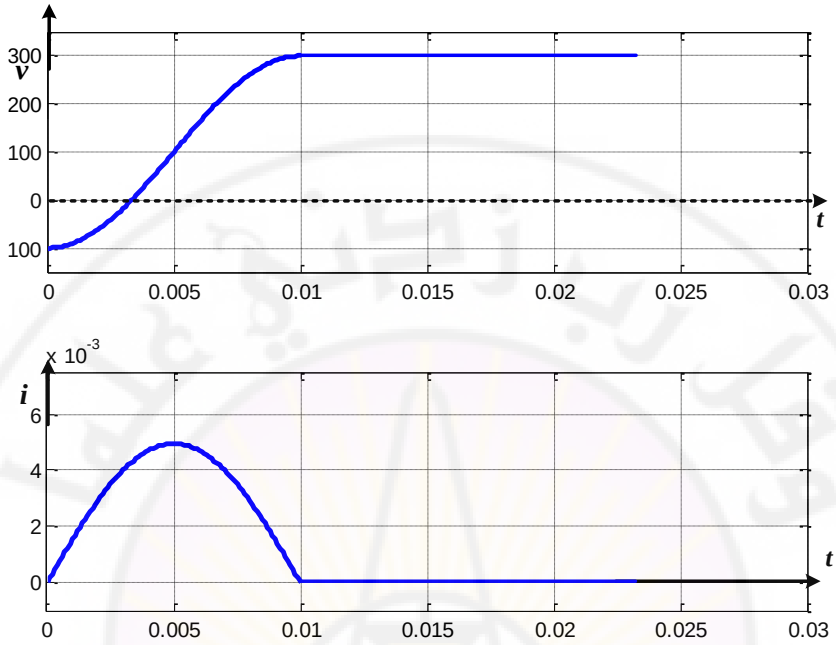
c - في حال كون E = 100V و v_0 = -100V، أي أن المكثف ذو شـــحنة أولية معكوسة وتساوي توتر المنبع. العلاقة الناظمة لتوتر المكثف:

$$v = -200\cos \omega t + 100$$

ســيصـــل توتر المكثف النهائي عندئذ للقيمة v = 300V. التيار المار في الدارة يمر حسب العلاقة:

$$i = 2E.C.\omega.\sin \omega t$$

والشكل(8-1) أدناه يوضح شكل التوتر والتيار.



الشكل(8–1) تغيرات التوتر والتيار عند وجود شحنة أولية للمكثف.

4) عندما يكون E=0 و v_0 = -100V.

هذه الحالة تمثل إعادة شحن المكثف بقطبية معاكسة، علماً أنه ذو توتر شحن أولي:

$$v_0 = -100V$$

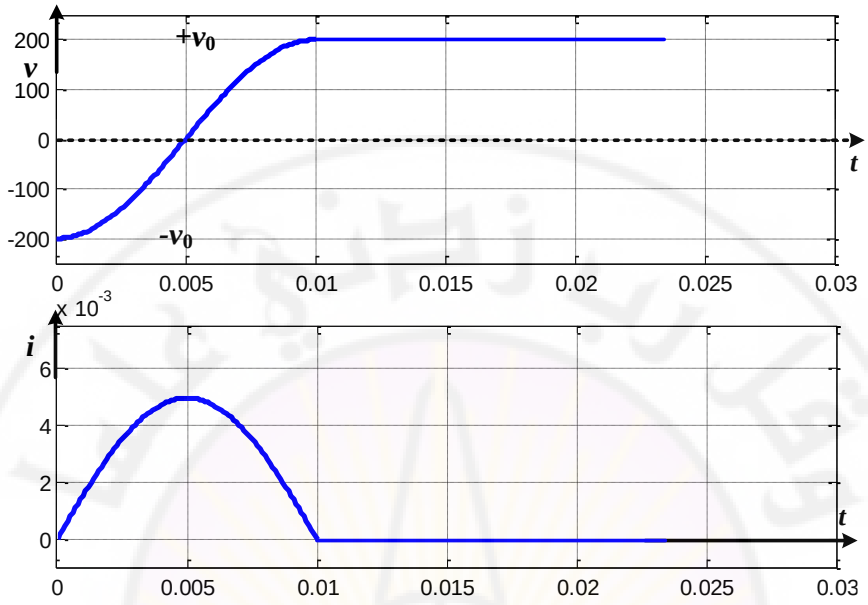
بالعودة للعلاقات الناظمة للتوتر والتيار وبوضع E= 0، وإضافة شرط إضافي $i \geq 0$، نجد العلاقات التالية الجديدة:

$$v = v_0 \cos \omega t$$

$$i = -C.v_0.\omega.\sin \omega t$$

$$i \geq 0$$

يعكس المكثف شحنته ويمر التيار خلال عكس القطبية.



الشكل(9–1) إعادة شحن المكثف.

1.4 آلية الفصل لمقطع ثيرستوري ذي حمل أومي:

1.4.1 مثال(1-4) فصل الثيرستور ذي حمل أومي

حدد أبعاد العناصر غير الفعالة (Passives) ومواصفات الثيرستورات المستخدمة في المقطع التسلسلي المبين بالشكل(10–1). حيث يعمل المقطع عند تردد عمل 200Hz، وحمل أومي قدره 5Ω. ومنبع تغذية 24V. افرض أن زمن الفصل للثيرستور 100µs، أهمل المفاقيد.

الحل:

يمثل الشكل(11–1) أشكال الأمواج لاختيار المكثف، يمكن الملاحظة، أنه حسب شكل موجة التوتر العكسي لـــ V_{T1} (الثيرستور الرئيسي)، زمن فصل T_1 يمكن الحصول عليه في منتصف الموجة الآسية من E– حتى E+، وتبعاً للعلاقة:

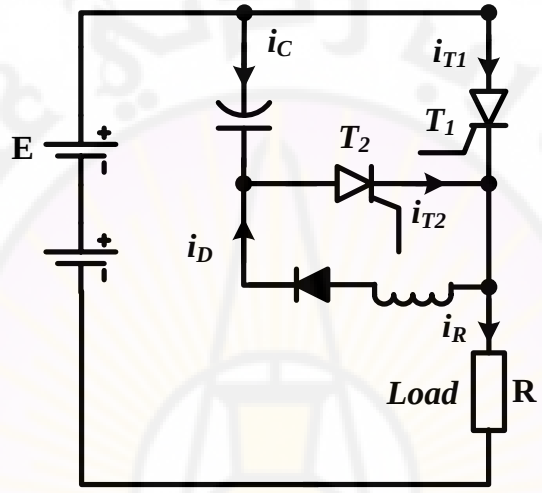
$$V = E + Ae^{-\frac{t}{T}}$$

نجد عند t = 0 بداية فترة فصل T_1 أن: $V = E - 2Ee^{-\frac{t}{T}}$

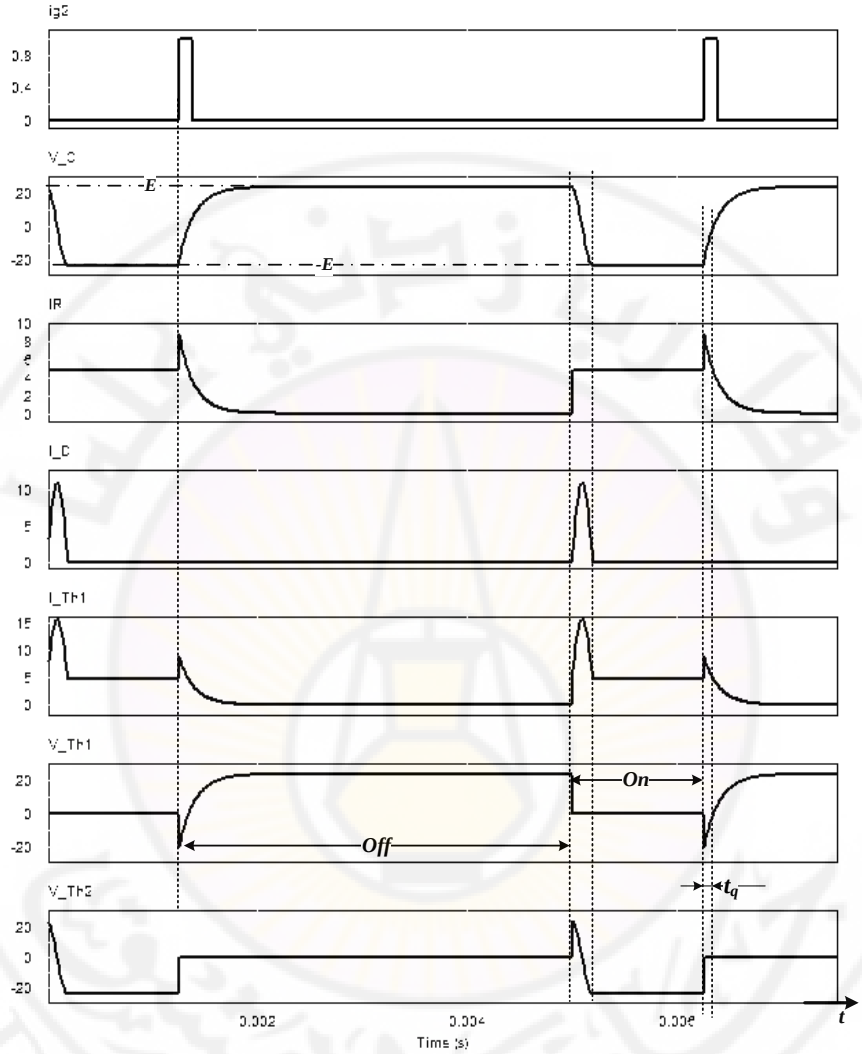
عندما يكون التوتر V = 0 ← زمن الحجز t = 100μs وعليه بالتعويض:

$$0 = 24 - 2(24)e^{-\frac{100\times10^{-6}}{T}}$$

حيث $T = 1.44\times10^{-4}\,s$.



الشكل(10–1) دارة الاستطاعة للمقطع التسلسلي مع دارة التبديل القسري.



الشكل(11-1) أشكال الأمواج لمختلف عناصر الدارة.

ومن العلاقة T = R.C، نجد:

$$C = T / R = 1.44 \times 10^{-4} / 5 = 29 \mu F .$$

- من أجل فصل الثيرستور T_2. يمكن ملاحظة شكل التوتر العكسي على T_2 وهو V_{T2}. نجد أن زمن الفصل يساوي ربع الفترة لدور الاهتزاز للدارة (LC) حيث:

$$\frac{1}{4} \times 100 \times 10^{-6} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}$$

ومنه فإن الحثية اللازمة لتحقيق الاهتزاز L=0.14mH.

- المساواة بين القدرة المخزنة في المكثف والملف تعطي:

$$\frac{1}{2}C.V^2 = \frac{1}{2}.L.I^2$$

وعليه فإن تيار الاهتزاز:

$$I = \left(\frac{29\times10^{-6}\times24^2}{0.14\times10^{-3}}\right)^{\frac{1}{2}} = 19.9A$$

- تيار الحمل الدائم يساوي: $i_R = \frac{U}{R} = \frac{24}{5} = 4.8A$

- خواص الثيرستور T_1:

- تيار الثيرستور في حالة التشغيل الدائم = 4.8 أمبير.

- التيار الأعظمي: 4.8 + 10.9 =15.7 أمبير.

- **خواص الثيرستور T_2 المستخدم للحجز:**

الثيرستور T_2 سوف لن يمر به سوى التيار اللازم لشحن المكثف.

$$i = \frac{2\times24}{5}e^{-\frac{t}{T}} = 1.16A$$

وكي يمكنه تحمل التيار الأعظمي يمكن اختيار ثيرستور بتيار 1.5A، وتوتر عكسي 24V.

- الديود يمكن اختيار تياره بحدود 2A وذلك من حساب المفاقيد فيه.

1.5 المقطعات التسلسلية buck converters

1.5.1 مثال (1-5) مقطع تسلسلي

يعمل المقطع التسلسلي (Buck regulator) عند توتر دخل 300 فولت ومقاومة حمل R=20Ω، وحثية قدرها L=12mh، وتردد f=5kHz، وعامل دور k=0.8، بين ما يلي:

1- ما أصغر قيمة لحظية لتيار الحمل I_1.

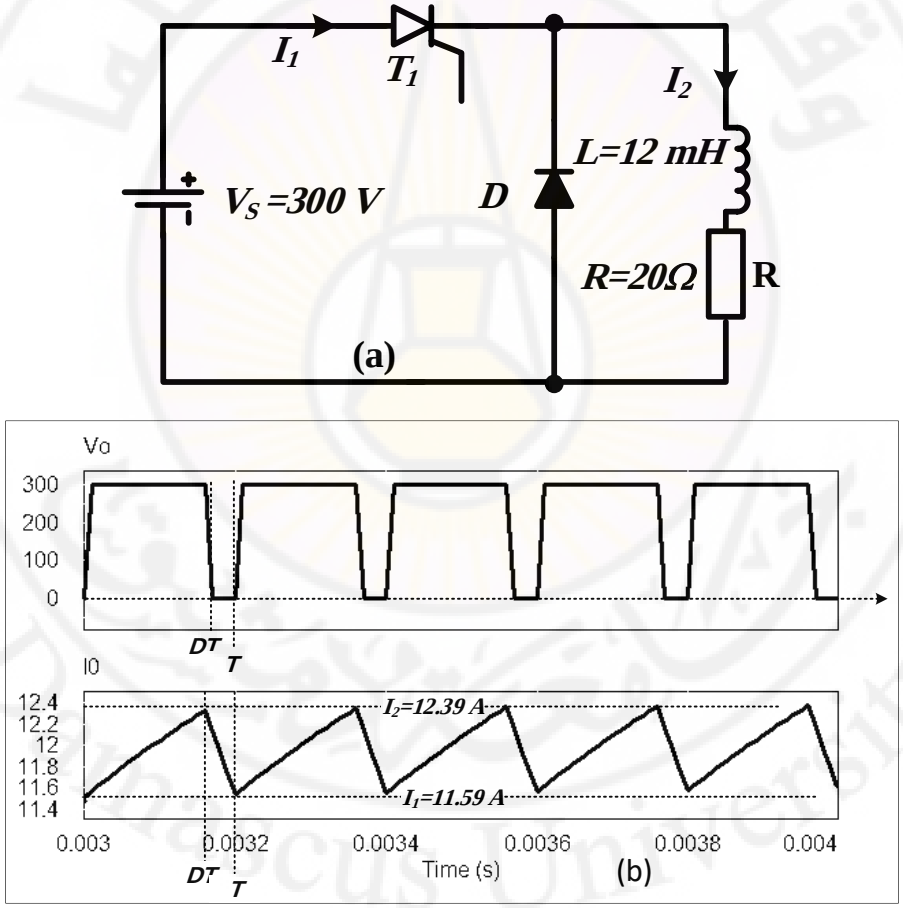
2- ما أصغر قيمة لحظية لتيار الحمل I_2.

3- ما القيمة المتوسطة لتيار الحمل I_a.

الحل:

1- يعطى التيار الأصغري بالعلاقة:

$$I_1 = I_2 e^{-(1-D)T.\frac{R}{L}} - \frac{E}{R}\left(1 - e^{-(1-D)T.\frac{R}{L}}\right)$$



الشكل(12-1) دارة الاستطاعة – التوترات والتيارات.

كما يعطى التيار الأعظمي بالعلاقة:

$$I_2 = I_1 e^{-DT.\frac{R}{L}} + \frac{V_S - E}{R}\left(1 - e^{-DT.\frac{R}{L}}\right)$$

$$\Delta I = I_2 - I_1$$

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{5\times10^3}$$

$$I_2 = I_1 e^{-0.266} + \frac{V_S}{20}\left(1 - e^{-0.266}\right)$$

$$I_2 = 0.766 I_1 + \frac{300}{20}(1 - 0.766)$$

$$I_2 = 0.766 I_1 + 3.51$$

$$I_1 = I_2 . e^{-(1-0.8)\frac{1}{5\times10^3}.\frac{20}{12\times10^{-3}}} - 0$$

$$I_1 = I_2 e^{-0.0666} = 0.9356 I_2$$

بالتعويض في I_2 أعلاه نجد:

$$I_2 = 0.766(0.9356) I_2 + 3.51$$

$$I_2 = 0.7166 I_2 + 3.51 \Rightarrow I_2 = 12.39A$$

$$I_1 = 0.9356 \times 12.39 = 11.59A$$

التيار المتوسط:

$$I_a = \frac{12.39 + 11.59}{2} = 11.99A$$

1.5.2 مثال (1-6) مقطع تسلسلي (مثالي)

يغذى مقطع تسلسلي خافض للتوتر (Buck Conv) من منبع 100V، يعمل الثيرستور المستخدم عند تردد تقطيع يساوي 1000Hz. والاستطاعة العظمى المقدمة للحمل تساوي 10kW. إذا كان المقطع مثالياً، احسب قيمة حثية المفاعلة بحيث أن التيار الأصغري لها يصل إلى الصفر مرة في الدور إذا كانت استطاعة الحمل 5kW.

الحل: يوضح الشكل(12−1 a) دارة الاستطاعة والتوترات والتيارات المارة بشكل عام. لكن بفرض أن التيار I سوف يصل للقيمة صفر مرة كل دور. فإنه يمكن القول أن التيار شبه متواصل وأن $I_{min}=0$. استطاعة الخرج تعطى عادة بالعلاقة:

$$P_0 = \frac{V_l^2}{R}$$

تعطى استطاعة الدخل من المنبع بالعلاقة : $P_i = V_S . I_{av}$

وبما أن المردود 100% فإن استطاعة الدخل تساوي استطاعة الخرج.

- تيار الملف المتوسط: $I_{av} = \frac{I_{\max}}{2}$

- التوتر على طرفي الملف (المفاعلة) يساوي: $V_{L1} = L\frac{I_{\max}}{t_{ON}}$

$$I_{\max} = \frac{V_{L1}}{L} t_{ON} = \frac{V_{L1}.D}{L.F} = \frac{V_S - V_l}{L} . \frac{D}{F}$$

- باعتماد العلاقة:

$$L = \frac{(1-D)R}{2.F}$$

نجد أن الاســتطاعة في الحمل تزداد بزيادة عامل الدور D، أي عند D=1 وعندئذ توتر الحمل $V_S = 100V$ V_l والمقاومة:

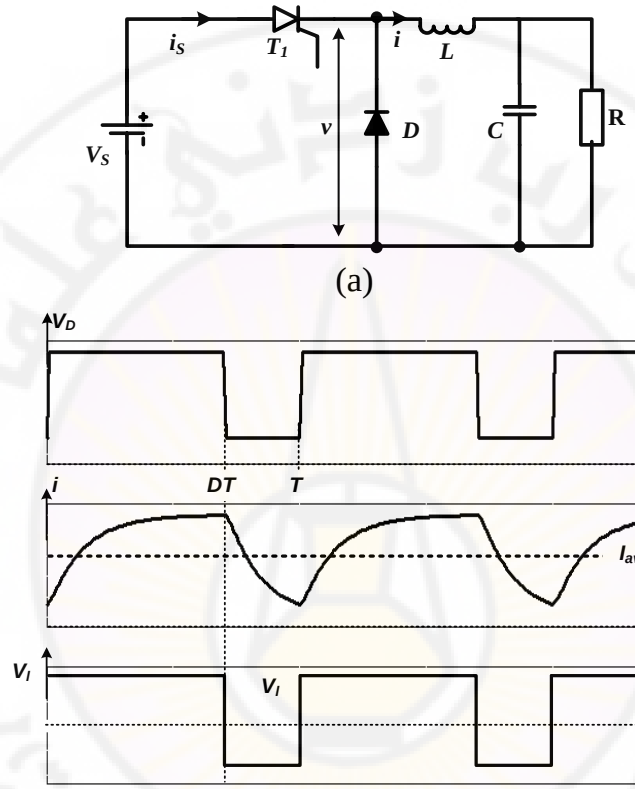
$$R = \frac{V_l^2}{P} = \frac{(100)^2}{10000} = 1\Omega$$

وعليه إذا كانت الاستطاعة المحقونة في الحمل 5kW عندئذ:

$$D = \frac{1}{V_S}\sqrt{P.R} = \frac{1}{100}\sqrt{5000} = 0.707$$

وعليه:

$$L = \frac{(1-D)R}{2.F} = \frac{1\times(1-0.707)}{2\times1000} = 0.147mH$$

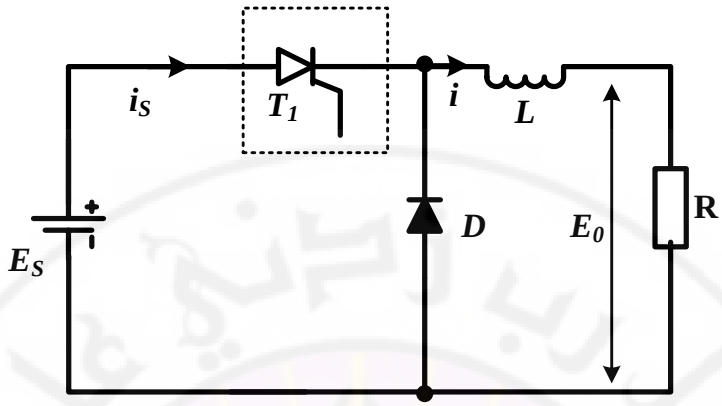


الشكل(13–1) مقطع تسلسلي خافض للتوتر **a-** دارة الاستطاعة ، **b** – التوترات والتيارات.

1.5.3 مثال (7-1) مقطع تسلسلي

يعمل مقطع تسلسلي مبين في الشكل(14–1) عند تردد 4kHz، زمن التوصيل 20µs.
احسب المقاومة الظاهرية للمنبع، علماً أن مقاومة الحمل $R_0=12\Omega$.

الحل:



الشكل(14-1) مقطع تسلسلي.

- عامل الدور هو:

$$D = \frac{T_a}{T} = T_a f$$

$$D = 20 \times 10^{-6} \times 4000 = 0.08$$

- المقاومة الظاهرية للمنبع R_S تعطى بالعلاقة:

$$R_S = \frac{E_S}{I_S} = \frac{E_0 / D}{I_0 . D} = \frac{E_0}{I_0 . D^2}$$

$$R_S = \frac{R_0}{D^2}$$

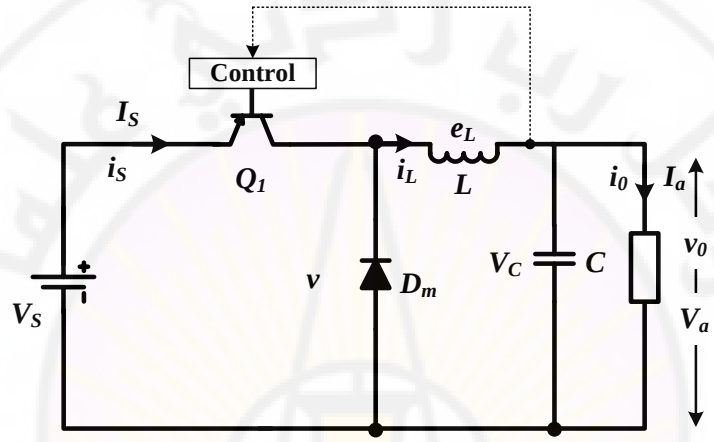
وعليه:

$$R_S = \frac{12}{(0.08)^2} = 1875\Omega$$

في هذا المثال، نرى أن القيمة الحقيقية للمقاومة (Actual)، يمكن أن تزداد كثيراً باستخدام المقطع. وعليه يمكن مقارنة المقطع بالمحول، مع وجود اختلاف كبير بينهما. لأن المحول يسمح بجريان الاستطاعة في كلا الاتجاهين، من جهة التوتر العالي إلى جهة التوتر المنخفض وبالعكس. بينما المقطع الخافض للتوتر (Step- down) يمكنه فقط تحويل الاستطاعة من جهة التوتر العالي إلى جهة التوتر المنخفض.

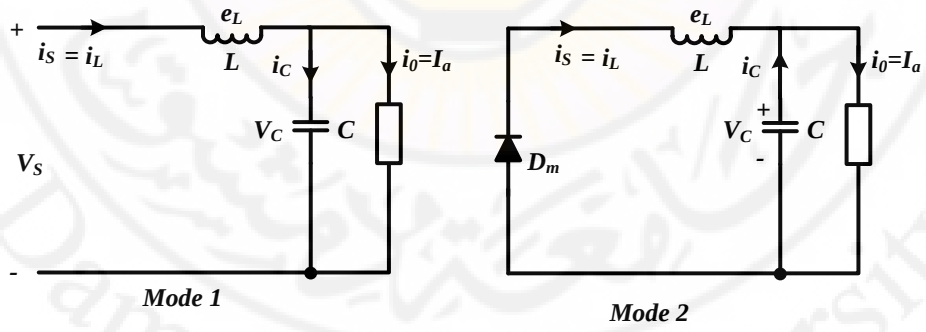
1.6 نظرية عمل المقطع التسلسلي BUCK Converters (خافض التوتر):

في المقطع التسلسلي المبين في الشكل(15−1 a) توتر الخرج دائماً أقل من توتر الدخل. اشـرح مرحلتي العمل، الأولى عند وصـل Q_1 والثانية عند فصـله. اعتبر أن التيار في الحمل مستمر.



الشكل(15−1) **a**−دارة الاستطاعة.

الحل: الدارة المكافئة في حالتي العمل الأولى والثانية مبينة أدناه بالشكل(15−1 b):



الشكل(15−1) **b**−الدارة المكافئة في حالة العمل الأولى والثانية

− يعطى التوتر عبر الممانعة L بشـكل عام بالعلاقة: (هذه هي ممانعة المرشـح في الخرج)

$$e_L = L\frac{di}{dt} \quad \text{.....(1)}$$

بفرض أن تيار الممانعة يرتفع من I_1 إلى I_2 خلال الزمن t_1 وهو زمن توصـــيل القاطع Q_1، وعليه:

$$V_S - V_a = L\frac{I_2 - I_1}{t_1} = L\frac{\Delta I}{t_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

ومنه: $$t_1 = \frac{\Delta I \times L}{V_S - V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

– بالمقابل لدى فصـل القاطع Q_1 فإن الدارة المكافئة mod2 سـتطبق والتيار الذي كان ماراً سوف يستمر المرور بـــ D_m لكن سينخفض من القيمة I_2 إلى I_1 خلال الزمن t_2 وعليه يمكن القول أن:

$$-V_a = -L\frac{\Delta I}{t_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

(لأن توتر المكثف مساوٍ لـ V_a وهو توتر الحمل قبل فصل القاطع).

$$t_2 = \frac{\Delta I \times L}{V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

$\Delta I = I_2 - I_1$، تمثل تغيرات تيار الملف من القمة للقمة (Peak- to- Peak ripple) بالمساواة بين العلاقات (4) و (2) نجد:

$$\Delta I = \frac{(V_S - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a.t_2}{L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

بالتعويض عن t_1=D.T و t_2=(1-D)T، يمكن حســاب القيمة المتوســطة لتوتر الخرج حسب العلاقة:

$$V_a = V_S\frac{t_1}{T} = DV_S \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

وبإهمال المفاقيد في الدارة يمكن أن نكتب:

$$V_S.I_S = V_a.I_a = DV_S.I_a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

وعليه فإن:

$$I_S = D.I_a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(9)$$

– يمكن التعبير عن دور التقطيع T بالشكل:

$$T = \frac{1}{F} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I.L}{V_S - V_a} + \frac{\Delta I.L}{V_a}$$

$$T = \frac{\Delta I.L.V_S}{V_a(V_S - V_a)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

ومنه يمكن حساب تعرجات التيار العظمى:

$$\Delta I = \frac{V_a(V_S - V_a)}{F.L.V_S} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

أو بالشكل:

$$\Delta I = \frac{V_S D(1-D)}{F.L} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

– باستخدام قانون كيرشوف، خلال عملية فصل القاطع Q_1، يمكن أن نكتب تيار الملف i_L بالشكل:

$$i_L = i_C + i_0$$

إذا فرضـــنا أن تغيرات تيار الحمل Δi_0 مهملة فإن $\Delta i_L = \Delta i_C$. وعليه فإن التيار المتوسط للمكثف والذي يمر خلال الفترات:

$$\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} = \frac{T}{2} \quad ، \text{ هو: } \quad I_C = \frac{\Delta I}{4}$$

– وتوتر المكثف يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$V_C = \frac{1}{C}\int i_C dt + V_C(t=0)$$

تعطى تعرجات توتر المكثف بالشكل:

$$\Delta V_C = V_C - V_C(t=0) = \frac{1}{C}\int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I.T}{8C} = \frac{\Delta I}{8.F.C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

بالتعويض عن قيم ΔI السابقة (11) أو (12) نجد:

$$\Delta V_C = \frac{V_a(V_S - V_a)}{8.L.C.F^2.V_S} = \frac{V_S D(1-D)}{8.L.C.F^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

– في حالة كون تيار الملف غير متقطع، دائم مستمر، إذا كان I_L هو متوسط تيار الملف، فإن تعرجات تيار الملف $\Delta I=2I_L$.

باستخدام العلاقات (8) و (12) نجد:

$$\frac{V_S(1-D)D}{F.L} = 2I_L = 2I_a = \frac{2D.V_S}{R} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

وهذا يسمح بمعرفة القيمة الحرجة للمفاعلة L_C حيث:

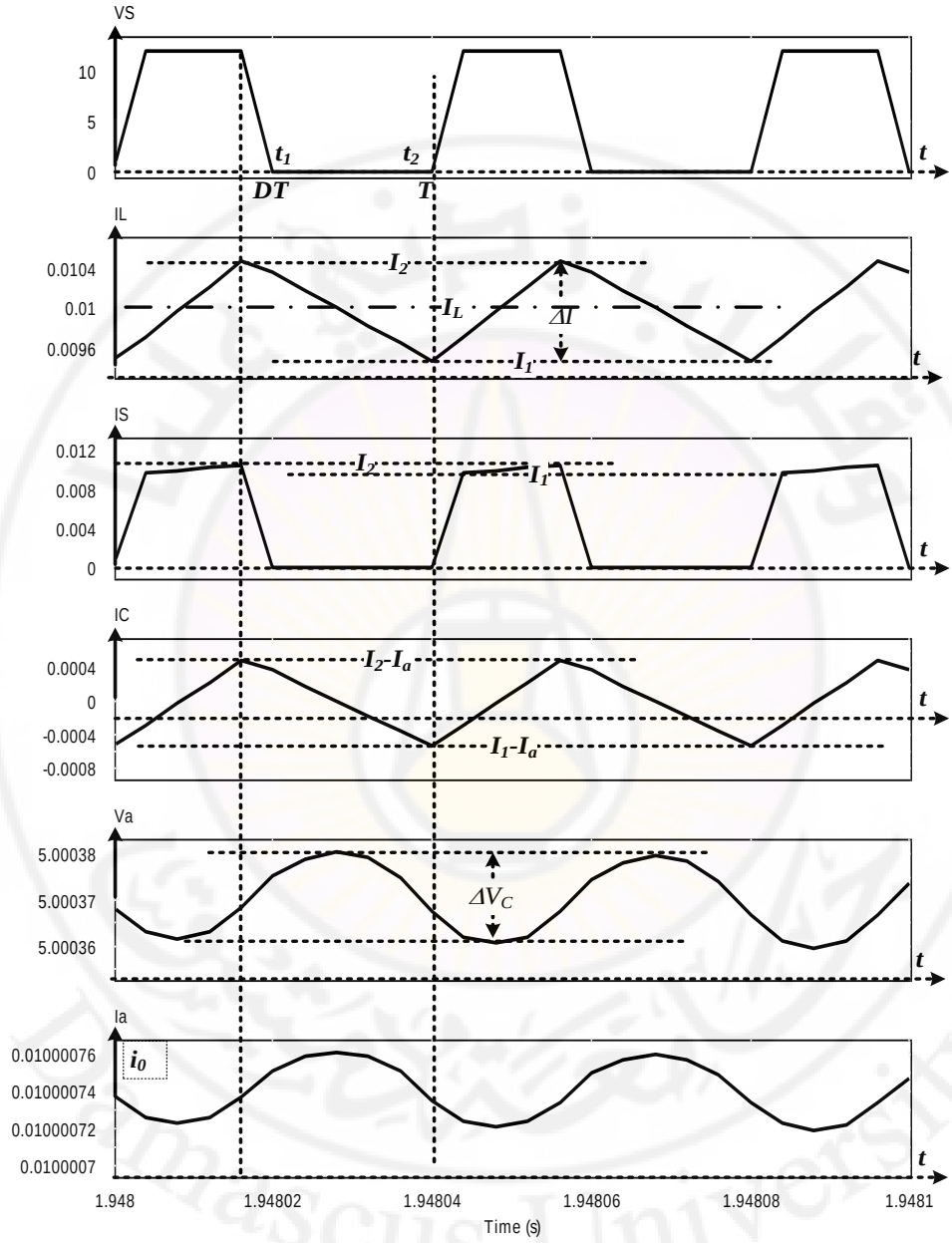
$$L_C = L = \frac{(1-D)R}{2F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (16)$$

– إذا كان V_C هو التوتر المتوسط للمكثف، فإن تعرجات توتر المكثف هي: $\Delta V_C=2V_a$ بالاعتماد على العلاقات (8) و (14) نجد:

$$\frac{V_S(1-D)D}{8.L.C.F^2} = 2V_a = 2DV_S$$

وعليه تكون القيمة الحرجة لسعة المكثف C مساوية:

$$C_C = C = \frac{1-D}{16LF^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (17)$$



الشكل(15–1) **C**–أشكال الأمواج خلال مراحل العمل للمقطع التسلسلي.

1.6.1 مثال (1-8) مقطع تسلسلي (حالة عمل)

في الدارة المبينة سابقاً إذا كان $V_S=12V$، $R=500\Omega$، وإذا كانت تعرجات توتر الخرج (قمة– قمة) تساوي 20mV. وتردد التقطيع 25KHz. وتعرجات تيار الملف (قمة– قمة) تساوي 0.8A. بين ما يلي:

a- عامل الدور المستخدم D.

b- حثية المرشح L.

c- سعة مكثف المرشح C.

d- القيم الحرجة للحثية L والسعة C.

الحل:

a- من العلاقة (8) نجد أن عامل الدور يعطى:

$$V_a = D.V_S$$

نجد أن:

$$D = \frac{V_a}{V_S} = \frac{5}{12} = 0.4167.$$

b- من العلاقة (11) نحسب حثية الملف L:

$$1.9549\,\Delta I = \frac{V_a(V_S - V_a)}{F.L.V_S} =$$

$$L = \frac{V_a.(V_S - V_a)}{\Delta I \times F \times V_S}$$

$$L = \frac{5(12-5)}{0.8 \times 25000 \times 12} = 145.83\mu H$$

c- تحسب سعة المكثف من العلاقة:

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I}{8.F.C}$$

$$C = \frac{\Delta I}{8 \times F \times \Delta V_C} = \frac{0.8}{8 \times 20 \times 10^{-3} \times 25000}$$

$$C = 200 \mu F$$

d- يمكن من العلاقة (16) حساب القيمة الحرجة لحثية الملف L وهي:

$$L_C = \frac{(1-D)R}{2F} = \frac{(1-0.4167) \times 500}{2 \times 25 \times 10^3} = 5.83 mH$$

كما تحسب السعة الحرجة من العلاقة:

$$C_C = \frac{1-D}{16.L.F^2}$$

$$C_C = \frac{1-0.4167}{16 \times 5.83 \times 10^2 \left(25 \times 10^3\right)^2} = 0.4 \mu F$$

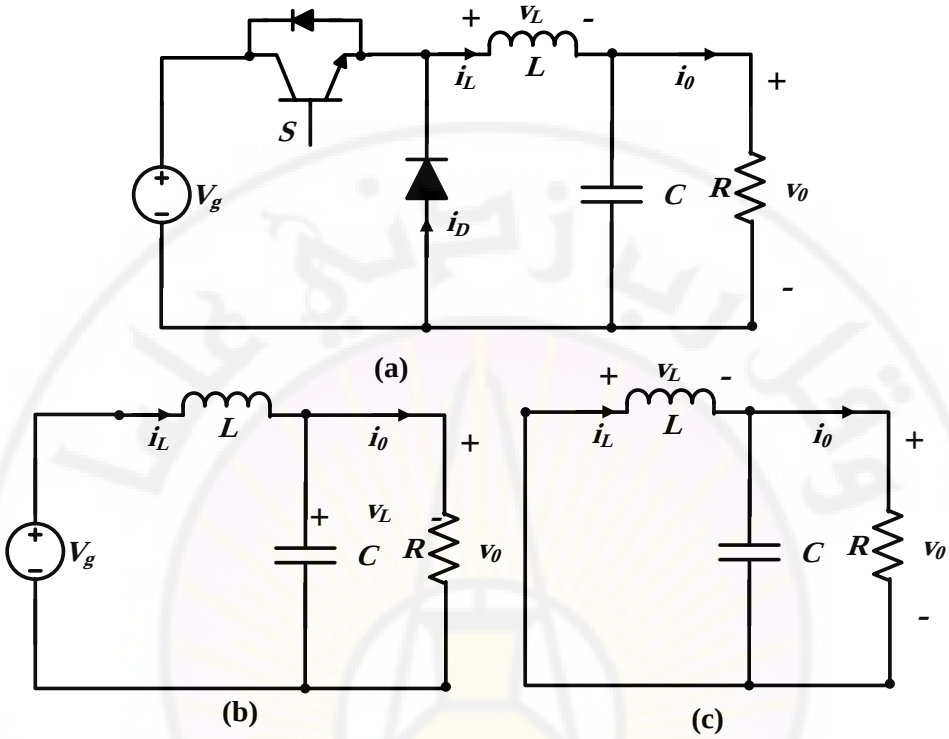
1.6.2 مثال (9-1) مقطع تسلسلي (تغير التوتر والتيار ثابت)

لدينا دارة المقطع التسلسلي (Buck converter)، باعتبار أن: $di/dt = c,\ dv/dt = c$

إذا علمت أن فترة توصيل القاطع هي $T_{ON}=D.T$، وفترة الحجز هي $T_{OFF}=(1-D)T$. المطلوب كتابة معادلات التيار المارة في المفاعلة وتعريج التيار وتيار الديود، قيمة المفاعلة الأصغرية، حساب عامل التعريج، حساب قيمة السعة اللازمة للحصول على عامل تعريج محدد الجهد.

الحل:

بما أن $di/dt = c,\ dv/dt = c$ سيكون هبوط التوتر الوسطي على المفاعلة خلال دور كامل مساوي الصفر أي خلال الزمن T.



الشكل(16-1) حالات عمل المقطع التسلسلي: **(a)** دارة المقطع، **(b)**: حالة توصيل القاطع، **(c)**:حالة القاطع مفتوح

$$v_L = \int_0^{DT} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0$$

$$(V_g - V_0)DT + (-V_0)(1-DT) = 0$$

$$V_0 = DV_g$$

$$V_g I_g = V_0 I_0 = DV_g I_0$$

$$\Rightarrow I_g = DI_0$$

في هذا المقطع لدينا: $I_L = I_0$

يعطى تغير التيار المار بالمفاعلة بالمعادلة : $\Delta i_L = \frac{1}{L}\int_0^{DT} v_L dt$

أي تساوي المساحة المحصورة تحت موجة التوتر الهابط على المفاعلة مقسوماً على قيمة المفاعلة L أي:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L}\left(V_g - V_0\right)DT = \frac{1}{L}V_0\left(1-D\right)T$$

وعليه:

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$I_{L,\min} = I_L + \frac{1}{2}\Delta i_L$$

يمكن حساب قيمة تيار المفاعلة الوسطي من العلاقة:

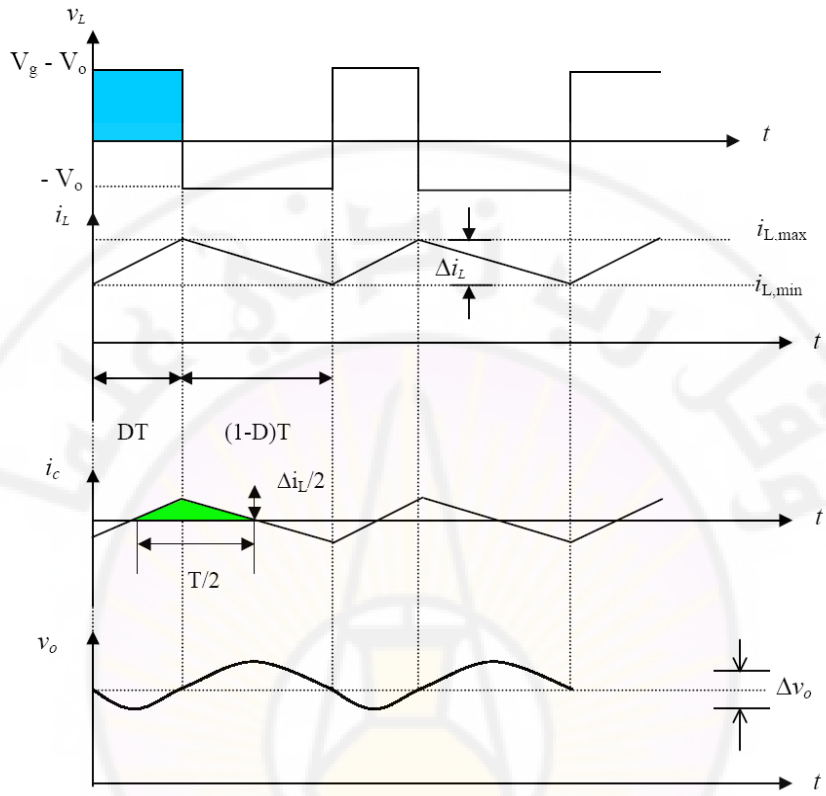
$$I_D = I_0 = \left(1-D\right)I_L \Rightarrow$$

$$I_L = I_0 = \frac{V_0}{R}$$

يتغير التوتر الهابط على المكثف، ضمن المجال Δv_0 (وهو هبوط التوتر)، يمكن الحصول هبوط التوتر من خلال التيار المار في السعة i_C حيث:

$$\Delta v_0 = \Delta v_C = \frac{1}{C}\int i_C dt$$

ويمثل التكامل المساحة المحصورة بين تيار السعة ومحور الزمن (أي مساحة المثلث).



الشكل(16−1) **d-** التوترات والتيارات في مختلف أجزاء الدارة

$$\Delta v_0 = \frac{1}{C}\frac{1}{2}\frac{T}{2}\frac{\Delta i_L}{2}$$

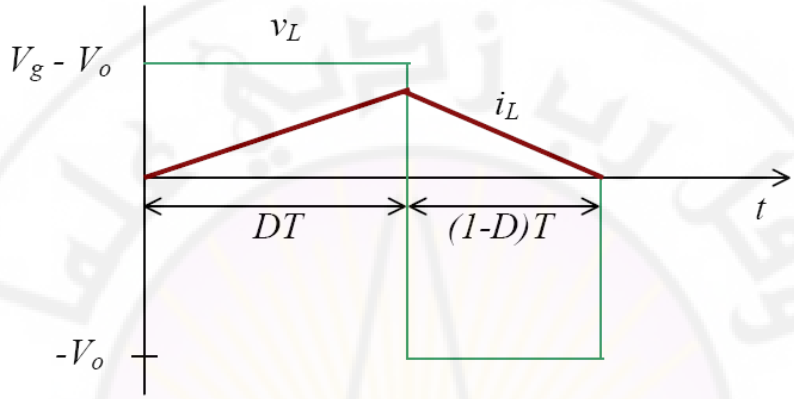
$$\Delta v_0 = \frac{\Delta i_L}{8fC}$$

$$\Delta i_L = \frac{V_0}{L}(1-D)T$$

$$\Rightarrow \Delta v_0 = \frac{V_0(1-D)T}{8fCL}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta v_0}{V_0}\% = \frac{(1-D)}{8CLf^2}\%$$

إن الحد الفاصـــل بين شـــروط اســـتمرار التيار بالمرور، وحدوث انقطاع في التيار يمكن تحديده وذلك عندما تصـــبح قيمة تيار المفاعلة مســـاوية للصـــفر في نهاية الدور، أي أن التيار المار في المفاعلة يتغير كما هو مبين في الشكل(17-1).



الشكل(17-1)القيمة الحدية لتيار الملف.

أي:

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

في هذا المقطع لدينا:

$$I_0 = I_L = \frac{V_0}{R} \Rightarrow$$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L}\left(V_g - V_0\right)DT = \frac{1}{L}V_0\left(1-D\right)T$$

يمكن من خلال المعادلة الســـابقة تحديد القيم الحدية الصـــغرى: لتيار الحمل ولمقاومة الحمل والمفاعلة وتردد عمل المقطع كما يلي:

$$I_L = I_0 = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$\Rightarrow I_{0,\min} = \frac{1}{2L}V_0\left(1-D\right)T$$

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$\frac{V_0}{R} = \frac{1}{2L} V_0 (1-D) T$$

$$\Rightarrow L_{\min} = \frac{(1-D)T \times R}{2} = \frac{(1-D)R}{2f}$$

$$\Rightarrow f_{\min} = \frac{(1-D)R}{2L}$$

$$\Rightarrow R_{\min} = \frac{2Lf}{(1-D)}$$

علماً أن حساب أي من القيم السابقة يتم عندما تكون هناك مجهول واحد في المعادلة.

يحسب تعريج التيار كما يلي:

$$CR\% = \frac{\Delta i_L}{I_L}$$

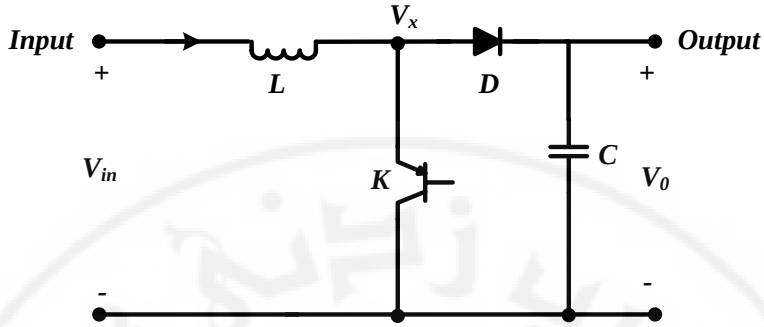
$$\frac{V_0}{R} = \frac{1}{L} V_0 (1-D) T$$

$$\Rightarrow CR\% = \frac{R}{Lf}(1-D)\%$$

1.7 المقطع التفرعي Boost Converter (المقطع الرافع للتوتر)

1.7.1 مثال (1-10) مقطع تفرعي (مبدأ العمل)

في الشكل(18−1) أدناه، لدينا مقطع تفرعي أساسي بسيط، نستخدم عادةً هذه الدارة للحصول على توتر خرج أكبر من توتر الدخل المتوفر أو المطبق المراد رفع قيمته. بين آلية رفع التوتر.



الشكل(18-1) دارة مقطع رافع للتوتر.

الحل:

الدارة المبينة أعلاه، تحتوي قاطعاً الكترونياً قد يكون من نوع MOSFET أو IGBT، ومن ملف خانق (مفاعلة) Inductor، وديود D ومكثف C.

العلاقة بين توتر الخرج V_0 وتوتر الدخل V_{in} يتم تحديدها بدلالة تردد عمل القاطع الالكتروني وبدلالة عامل دور التشغيل D (Duty cycle ratio).

- خواص وآلية عمل الدارة يمكن تحليلها بحالتين، الأولى خلال فترة وصل القاطع K والثانية خلال فترة كون القاطع مفصولاً. ومن أجل هذا المقطع لمعرفة العلاقة بين توتر الدخل وتوتر الخرج يمكن البدء بحالة وصل القاطع، وسوف نرمز للتوتر على طرفي القاطع بـ V_X. وعليه:

$$V_{in} = L\frac{di}{dt} + V_X$$

$$L\frac{di}{dt} = V_{in} - V_X$$

$$L\frac{di}{dt} = (V_{in} - V_X)_{On} + (V_{in} - V_X)_{Off} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

وخلال دور كامل $\frac{di}{dt} = 0$، عندما يكون الترانزستور موصلاً (ON) فإن $V_X=0$ وعندما يكون القاطع (OFF)، تيار الملف سوف يتابع مروره عبر الديود D جاعلاً التوتر $V_X=V_0$. (نعتبر هنا أن تيار الملف مستمر، غير متقطع (Continuous Conduction).

– التوتر عبر الملف مبين في الشكل(19–1) أدناه ومتوسط هذا التوتر يجب أن يساوي الصفر حتى يكون التيار المتوسط في حالة مستقرة Steady State. هذا الشرط يعبر عنه بالعلاقة (2):

$$V_{in}.t_{On} + (V_{in} - V_0)t_{Off} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

ويمكن تنظيم العلاقة بالشكل:

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{T}{t_{Off}}$$

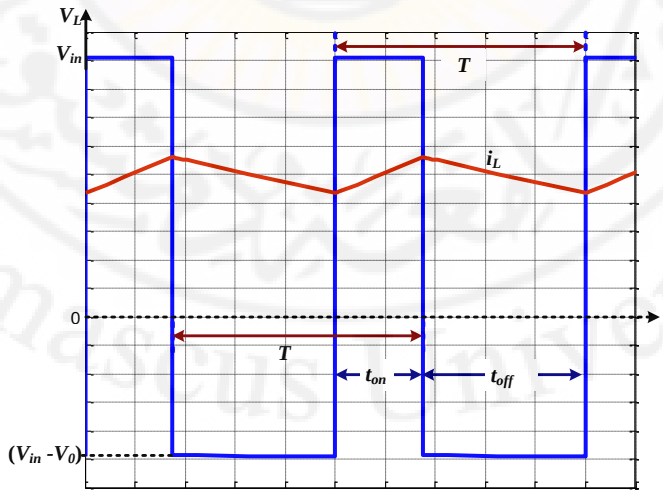
وبفرض $t_{Off} = T - t_{On}$.

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{T}{T - t_{On}} = \frac{1}{1 - \frac{t_{On}}{T}} = \frac{1}{1 - D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

ومن أجل دارة بدون مفاقيد يمكن القول أن:

$$\frac{I_0}{I_{in}} = (1 - D) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

بما أن قيمةعامل الدور D تتراوح بين الصفر والواحد، فإن توتر الخرج سيكون دائماً أكبر من توتر الدخل بالقيمة.



الشكل(19–1) التوتر عبر الملف وتغيرات تيار الملف.

1.7.2 مثال (1-11) مقطع تفرعي (مثالي)

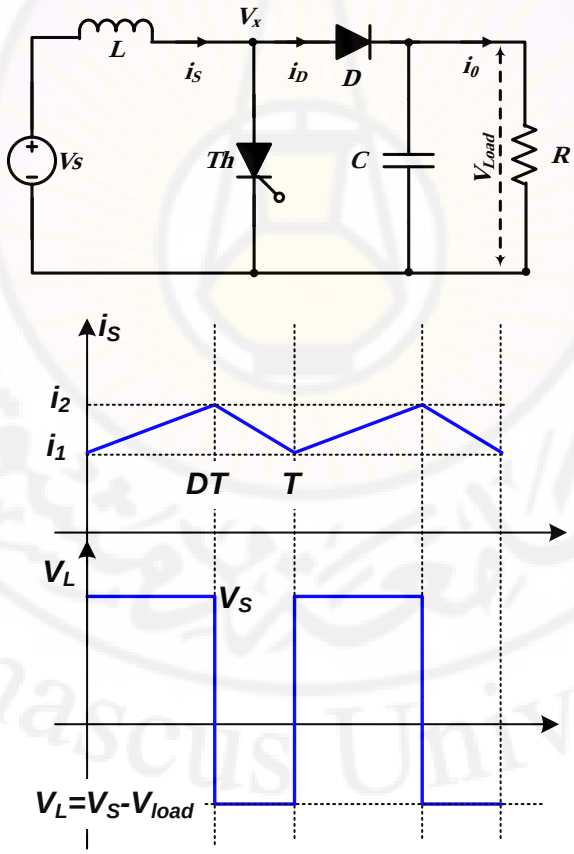
مقطع تفرعي مثالي مبين في الشـــكل(20–1)، ينقل الاســـتطاعة من منبع ذي توتر 100V مستمر إلى حمل بمقاومة 3Ω. إذا كان التيار المتوسط الاسمي للديود 100A. وتردد التقطيع 1KHz. حدد ما يلي:

a- ما هي الاستطاعة المتوسطة العظمى المستهلكة في الحمل.

b- ما هو عامل الدور D للثيرستور Th.

c- ما هو معدل التيار المتوسط للثيرستور المستخدم.

الحل:



الشكل(20–1) دارة الاستطاعة– التوترات والتيارات.

a- يمكن اعتبار تيار المكثف عند التشغيل المستمر مساوياً للصفر.

لذا فإن التيار المتوسط I_l في الحمل هو نفس التيار القادم من الديود D. أي أن $I_l=100A$. وبما أن المكثف يحافظ نظرياً على V_l ثابتاً فإن الاستطاعة المتوسطة P المستهلكة في الحمل تحسب بالشكل:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T V_l.i_p dt = \frac{V_l}{T}\int_0^T i_l dt = V_l.I_l = I_l^2.R$$

$$P = (100)^2 \times 3 = 30\times 10^3 Watt.$$

b- يمكن حساب التوتر المتوسط على الحمل V_l من العلاقة:

$$V_l = \frac{P}{I_l} = \frac{30\times 10^3}{100} = 300V$$

ونحن نعلم أن:

$$V_l = \frac{V_S}{1-D}$$

وعليه فإن:

$$D = 1 - \frac{V_S}{V_l} = 1 - \frac{100}{300}$$

$$D = 0.6667$$

c- بما أن المقطع مثالي $\eta=100\%$. فإن استطاعة الدخل تساوي استطاعة الخرج. أي أن استطاعة الدخل $V_S.I_S$ تساوي 30×10^3 وات.

$$I_S = \frac{P}{V_S} = \frac{30\times 10^3}{100} = 300A$$

ومنه فإن التيار اللحظي للثيرستور i_{Th} ، يمكن حسابه بتطبيق كيرشوف في العقدة x حيث:

$$i_{Th} = i_S - i_D$$

وحسب القيم المتوسطة للتيارات:

$$I_{Th} = I_S - I_D = I_S - I_l$$

$$I_{Th} = 300 - 100 = 200A$$

هذا ويجب أن يكون تيار الثيرستور الفعلي أكبر من هذه القيمة لتأمين كامل الاستطاعة للحمل مع عامل أمان للحالات العابرة، وحالة تغير أو انخفاض لمقاومة الحمل المتغير. وإن اختيار ثيرستور يستطيع تحمل تيار المنبع سيكون هو الخيار المثالي.

1.7.3 مثال (12-1) مقطع تفرعي (تغير التيار والتوتر ثابت)

لدينا دارة المقطع التفرعي (Boost Converter)، باعتبار أن $dv/dt = ct,\ \ di/dt = ct$. و إذا علمت أن فترة توصيل القاطع هي $T_{ON}=D.T$، وفترة الحجز هي $T_{OFF}=(1-D)T$، المطلوب كتابة معادلات التيار المارة في المفاعلة وتعريج التيار وتيار والديود، قيمة المفاعلة الأصغرية، حساب قيمة السعة اللازمة للحصول على عامل تعريج محدد للجهد.

الحل:

بما أن $dv/dt = ct,\ \ di/dt = ct$، سيكون هبوط التوتر الوسطي على المفاعلة خلال دور كامل مساوٍ الصفر أي خلال الزمن T:

$$\int_0^{DT} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0$$

$$V_g \times DT + (V_g - V_0)(1 - DT) = 0$$

$$V_0 = \frac{1}{1-D} V_g$$

$$V_g . I_g = V_0 . I_0$$

$$\Rightarrow I_g = \frac{I_0}{1-D}$$

في هذا المقطع لدينا : $I_g = I_L$

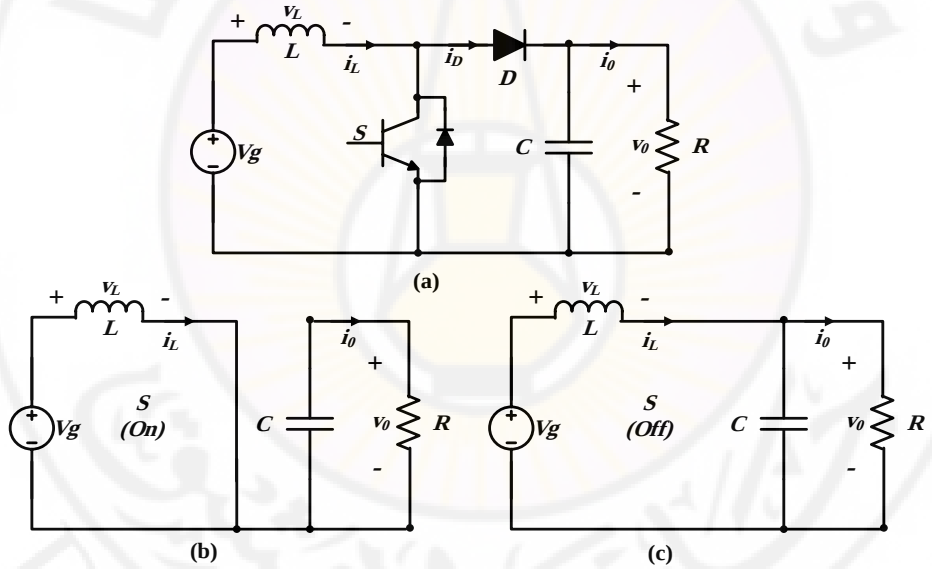
يعطى تغير التيار المار في المفاعلة بالمعادلة: $\Delta i_L = \frac{1}{L}\int_0^{DT} v_L dt$ ، أي المساحة المحصورة تحت موجة التوتر الهابط على المفاعلة مقسوماً على قيمة المفاعلة L أي:

وعليه : $$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_g \times DT$$

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{1}{2}\Delta i_L$$
:
$$I_{L,\min} = I_L - \frac{1}{2}\Delta i_L$$

يمكن حساب قيمة تيار المفاعلة الوسطي من العلاقة:

$$I_D = I_0 = (1-D)I_L \Rightarrow$$
$$I_L = \frac{I_0}{(1-D)} = \frac{V_0}{(1-D)R}$$



الشكل(21-1) دارة الاستطاعة والدارة المكافئة

يتغير التوتر الهابط على المكثف ضمن المجال Δv_0، ويمكن الحصول عليها من خلال التيار المار في السعة i_C، حيث أن المساحة المحصورة تحت موجة $\Delta v_0 = \Delta v_C = \frac{1}{C}\int i_C dt$، تمثل تيار السعة على المفاعلة مقسوماً على قيمة المفاعلة L أي:

$$\Delta v_0 = \frac{1}{C} \times \frac{V_0}{R} DT$$

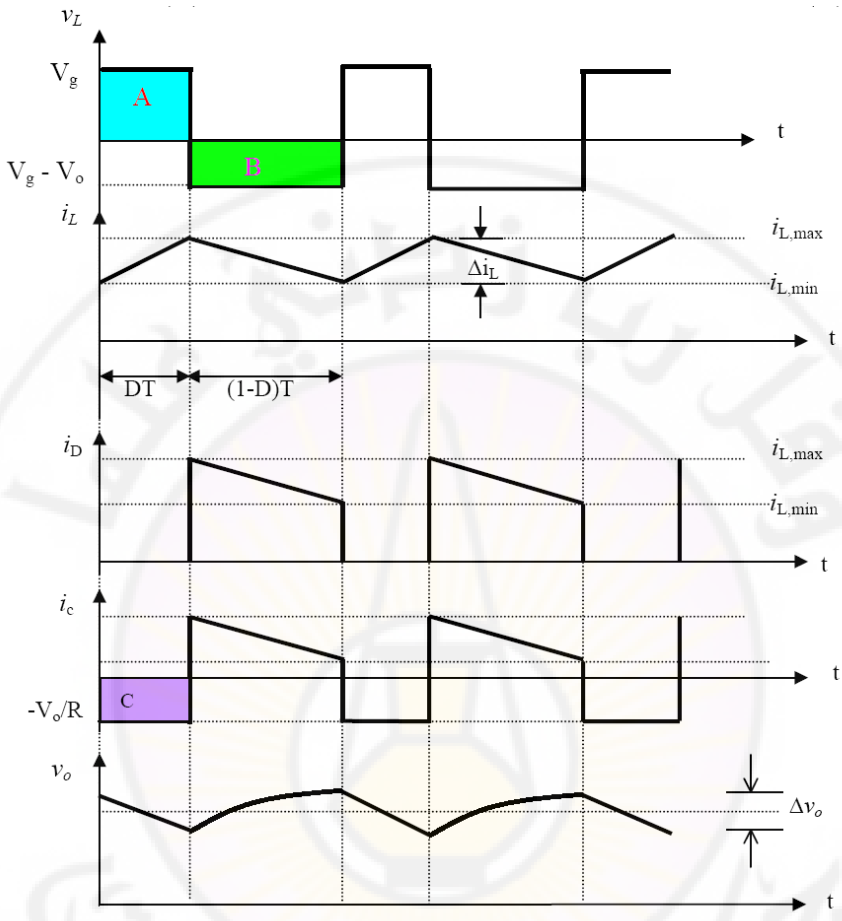
$$\Rightarrow \frac{\Delta v_0}{V_0} \% = \frac{D}{CRf} \%$$

إن الحد الفاصـــل بين شـــروط اســـتمرار التيار بالمرور وحدوث انقطاع في التيار يمكن تحديده، وذلك عندما تصـبح قيمة تيار المفاعلة مسـاوية للصـفر في نهاية الدور أي أن التيار المار في المفاعلة يتغير كما هو مبين في الشكل التالي:

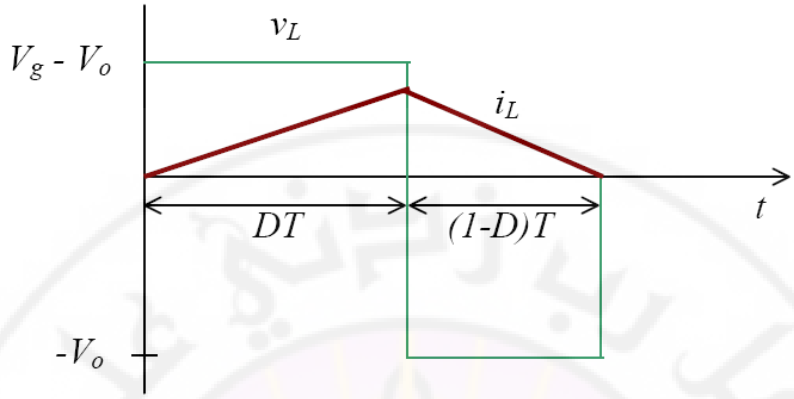
$$I_L = \frac{1}{2} \Delta i_L$$

في هذا المقطع لدينا

$$I_D = I_0 = \frac{V_0}{R} \Rightarrow \Delta i_L = \frac{1}{L} V_g DT = \frac{1}{L} (V_g - V_0)(1 - D)T$$



الشكل(22–1) التوترات والتيارات.



الشكل(23–1) الحالة الحدية لاستمرار تيار الملف.

أي يمكن من خلال المعادلة السابقة تحديد القيمة الحدية الصغرى لتيار الحمل ولمقاومة الحمل والمفاعلة وتردد عمل المقطع كما يلي:

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L = \frac{1}{2L}V_g DT$$

$$I_0 = (1-D)I_L \Rightarrow$$

$$\frac{I_0}{1-D} = \frac{1}{2}\Delta i_L = \frac{1}{2L}V_g DT$$

$$\Rightarrow I_{0.\min} = \frac{1}{2L}V_g (1-D)DT$$

$$\Rightarrow I_{0.\min} = \frac{1}{2L}V_0 D(1-D)^2 T$$

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$\frac{V_0}{R(1-D)} = \frac{1}{2L} V_g .DT = \frac{1}{2L} V_0 (1-D)DT$$

$$\Rightarrow L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 \times DT \times R}{2} = \frac{D(1-D)^2 \times R}{2f}$$

$$\Rightarrow f_{\min} = \frac{D(1-D)^2 \times R}{2L}$$

$$\Rightarrow R_{\min} = \frac{2Lf}{D(1-D)^2}$$

علماً أن حساب أي من القيم السابقة يتم عندما يكون هناك قيمة مجهولة فقط. إن تعريج التيار يحسب كما يلي:

$$CR\% = \frac{\Delta i_L}{I_L}$$

$$\frac{V_0}{(1-D)R} = \frac{1}{L} V_0 (1-D)DT$$

$$\Rightarrow CR\% = \frac{R}{Lf} D(1-D)^2 \%$$

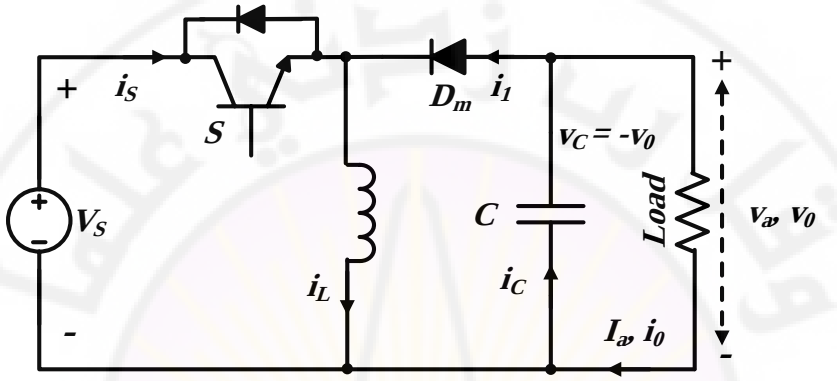
1.8 المقطع العكسي بالتيار ، غير المباشر ذو المجمع التحريضي، أو المقطع الخافض الرافع Buck-Boost Regulator; Inverting Regulator:

1.8.1 مثال (13-1) مقطع عكسي بالتيار

هذا المقطع يمكنه أن يقدم توتر خرج أصـــغر أو أكبر من توتر الدخل. تكون قطبية توتر الخرج معاكسـة لقطبية توتر الدخل.يوضـح الشـكل(24−1 a) دارة الاسـتطاعة. وتوضح الأشكال (b) و (c) الدارة المكافئة خلال مرحلتي العمل Mode1 و Mode2 وكذلك أشكال التوترات والتيارات في مختلف عناصر المقطع.

خلال فترة تشغيل القاطع Q_1، الديود D_m يكون في حالة حجز قسري. يتزايد تيار الدخل عبر الممانعة L و Q_1، وهي المرحلة الأولى. وخلال المرحلة الثانية تعمل على حجز Q_1 لكن التيار الذي كان ماراً في الحثية L ســوف لن يتوقف، لذا ســوف يتابع المرور

عبر (L و C و D_m والحمل). القدرة التي تم تخزينها في الملف L سـوف تحول وتنتقل للحمل لذا ســوف يتناقص تيار الملف حتى نعود ونعمل على تشــغيل القاطع Q_1 بدور جديد.



الشكل(24-1) **a**- دارة الاستطاعة للمقطع العكسي.

- بفرض أن تيار الملف يتزايد بشــكل خطي من القيمة I_1 حتى I_2 خلال الزمن t_1:

$$V_S = L\frac{I_2 - I_1}{t_1} = L\frac{\Delta I}{t_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$$t_1 = \frac{\Delta I \times L}{V_S} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

- لدى فتح القاطع Q_1. تيار الملف يتناقص من I_2 إلى I_1 خلال الزمن t_2:

$$V_a = -L\frac{\Delta I}{t_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

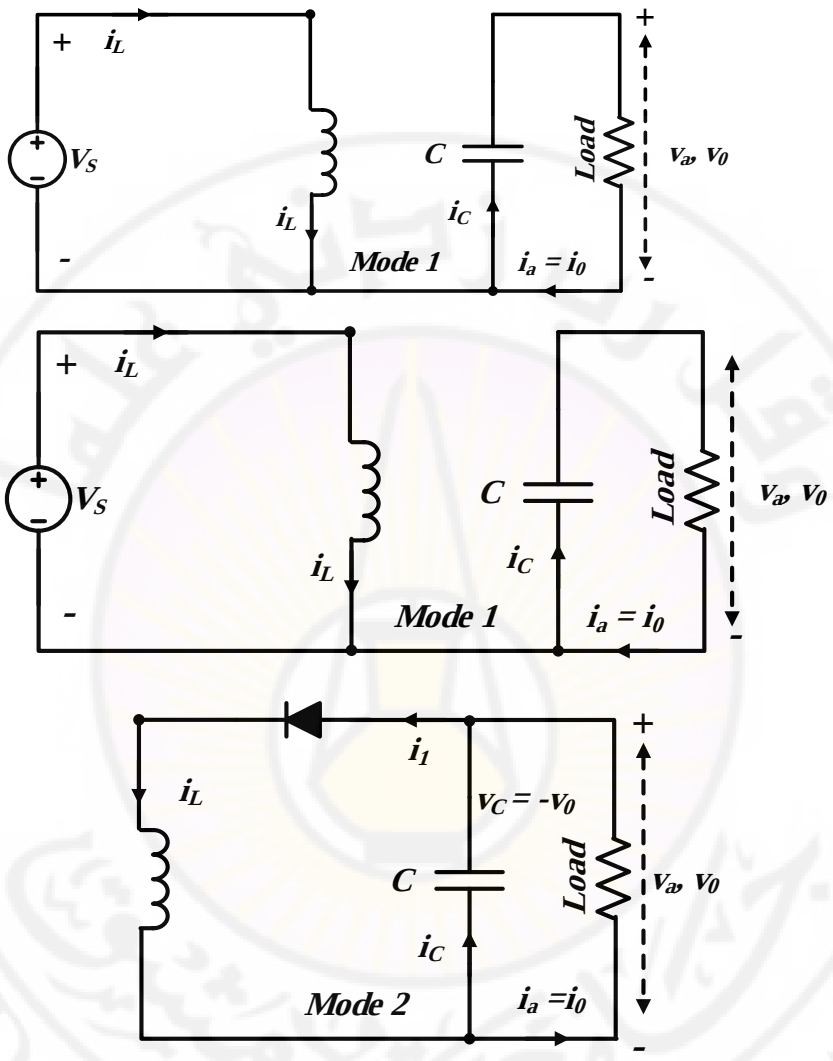
-

$$t_2 = \frac{-\Delta I.L}{V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

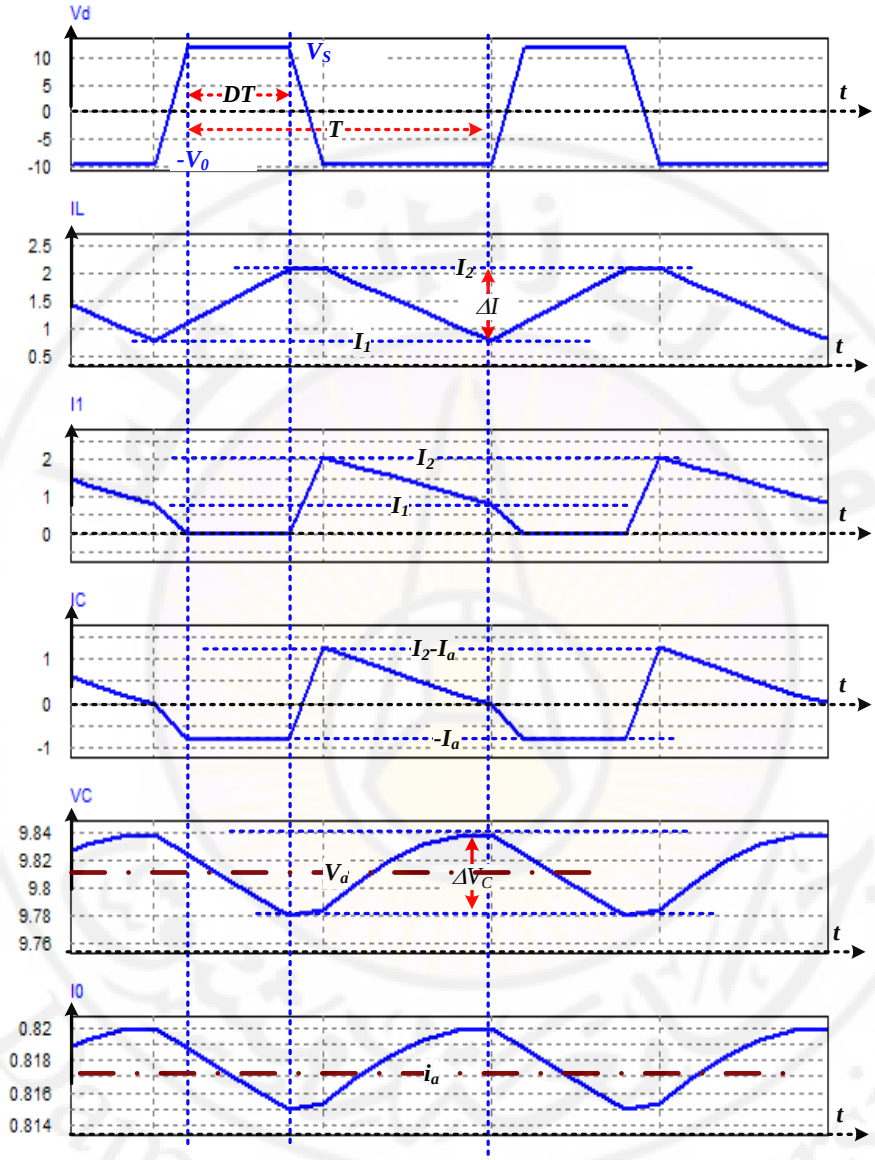
$$\Delta I = I_2 - I_1 \quad -$$

- من العلاقة (1) و (3) لدينا:

$$\Delta I = \frac{V_S.t_1}{L} = \frac{-V_a.t_2}{L} \quad -$$



الشكل(24-1) **b**-الدارات المكافئة خلال كلا فترتي التشغيل.



الشكل(24-1) **c**-أمواج التوتر والتيار لعناصر المقطع العكسي.

- بالتعويض عن $t_1=D.T$ وعن $t_2=(1-D)T$، فإن التوتر المتوسط للخرج سيكون:

$$V_a = \frac{-V_S.D}{1-D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

- ومنه

$$\frac{V_a}{V_S} = \frac{D}{1-D} \quad \text{.....(6)}$$

- بالتعويض عن $t_1=DT$ و $t_2=(1-D)T$ بالعلاقة (6) نجد:

$$\frac{V_a}{V_S} = \frac{t_1/T}{\left(1-\frac{t_1}{T}\right)} = \frac{t_1}{T+t_1} = \frac{t_1}{\frac{1}{F}+t_1}$$

$$V_a\left(\frac{1}{F}+t_1\right) = V_S.t_1$$

$$\frac{V_a}{F} + V_a t_1 = V_S t_1$$

$$\frac{V_a}{F} = t_1\left(V_S - V_a\right)$$

$$t_1 = \frac{V_a}{\left(V_S - V_a\right)F} \quad \text{.....(6)}$$

- بفرض عدم وجود مفاقيد في الدارة، لذا فإن:

$$V_S.I_S = -V_a.I_a = V_S.I_a\frac{D}{(1-D)}$$

- القيمة المتوســـطة لتيار الدخل I_S مرتبطة بالقيمة المتوســـطة لتيار الخرج I_a بالعلاقة:

$$I_S = \frac{I_a.D}{1-D} \quad \text{.....(7)}$$

- يمكن تحديد دور التقطيع T من العلاقة التالية:

$$T = \frac{1}{F} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I.L}{V_S} + \frac{\Delta I.L}{V_a} = \frac{\Delta I.L\left(V_a - V_S\right)}{V_S.V_a} \quad \text{.....(8)}$$

- من العلاقة أعلاه نحدد التعرجات العظمى للتيار:

$$\Delta I = \frac{V_S.V_a}{F.L.\left(V_a - V_S\right)} \quad \text{.....(9)}$$

- أو أن:

$$\Delta I = \frac{V_S.D}{F.L} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

- عندما يوصل الترانزستور Q_1، يقوم مكثف المرشح بتقديم تيار الحمل خلال الفترة $t=t_1$. متوسط تيار التفريغ للمكثف هو $I_C=I_a$ وتعرجات التوتر العظمى للمكثف تحسب بالشكل:

$$\Delta V_C = \frac{1}{C}\int_0^{t_1} I_C dt = \frac{1}{C}\int_0^{t_1} I_a.dt = \frac{I_a.t_1}{C} \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

- بالتعويض عن $t_1 = \frac{V_a}{(V_a - V_S).F}$ أعلاه نجد:

$$\Delta V_C = \frac{I_a.V_a}{(V_a - V_S)F.C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

$$\Delta V_C = \frac{I_a.D}{F.C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

- شروط العمل عند تيار مستمر في المفاعلة (inductor) وتوتر المكثف:
- إذا كان I_L التيار المتوسط للمفاعلة، فإن تعرجات تيار الممانعة $\Delta I = 2I_L$ وبالاعتماد على العلاقة $\left(V_a = \frac{V_S.D}{1-D}\right)$ والعلاقة $\Delta I = \frac{V_S.D}{F.L}$ نجد:

$$\frac{V_S.D}{F.L} = 2I_L = 2I_a = \frac{2D.V_S}{(1-D)R}$$

- ومنه نجد قيمة الحثية الحرجة للملف:

$$L_C = L = \frac{(1-D)R}{2.F} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

- إذا كانت V_C هي القيمة المتوسطة لتوتر المكثف، فإن تعرجات توتر المكثف $\Delta V_C = 2V_a$. باعتماد العلاقات (13)، نجد:

$$\frac{I_a.D}{F.C} = 2V_a = 2I_a.R$$

- ومنه فإن السعة الحرجة:

$$C_C = C = \frac{D}{2.F.R} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (15)$$

1.8.2 مثال (1-14) مقطع تفرعي (du/dt =con)

لدينا دارة المقطع التسلسلي التفرعي Buck- Boost Converter

باعتبار أن: $dv/dt = c,\ di/dt = c$

إذا علمت أن فترة توصيل القاطع هي $T_{ON}=D.T$، وفترة الحجز هي $T_{OFF}=(1-D)T$، المطلوب كتابة معادلات التيار التي تمر في المفاعلة وتعريج التيار وتيار الديود، قيمة المفاعلة الأصغرية، حساب قيمة السعة اللازمة للحصول على عامل تعريج محدد للجهد.

- **<u>الحل:</u>**
- لدينا خلال دور كامل فإن هبوط التوتر الوسطي على المفاعلة يساوي الصفر أي خلال الزمن T

$$v_L = \int_0^{DT} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0$$

$$V_g DT + (-V_0)(1-DT) = 0$$

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_g$$

$$V_g I_g = V_0 I_0 = \frac{DV_g}{1-D} I_0$$

$$\Rightarrow I_g = \frac{D}{1-D} I_0$$

- في هذا المقطع لدينا : $I_L = I_g + I_0$

- تعطى تغيرات التيار المار في المفاعلة بالمعادلة:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_g \times DT$$

- وعليه :

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{1}{2}\Delta i_L$$

-

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{1}{2}\Delta i_L$$

- يمكن حساب قيمة تيار المفاعلة الوسطي من العلاقة:

$$I_D = I_0 = (1-D)I_L \Rightarrow I_L = \frac{I_0}{1-D} = \frac{V_0}{(1-D)R}$$

- إن التوتر الهابط على المكثفة يتغير أي أن هبوط التوتر Δv_0 يمكن الحصـــول عليها من خلال التيار المار في السعة i_C حيث:

$$\Delta v_0 = \Delta v_C = \frac{1}{C}\int i_C dt$$

- أي المساحة المحصورة تحت موجة تيار السعة على المفاعلة مقسوماً على قيمة المفاعلة L أي

- $\Delta v_0 = \frac{1}{C} \times \frac{V_0}{R} \times DT \qquad \Rightarrow \frac{\Delta v_0}{V_0}\% = \frac{1}{CR} DT\% = \frac{D}{CRf}\%$

- الحد الفاصل بين شروط استمرار التيار بالمرور وحدوث انقطاع في التيار يمكن تحديده وذلك عندما تصـبح قيمة تيار المفاعلة مسـاوية للصـفر نهاية الدور أي أن التيار المار في المفاعلة يتغير كما هو مبين في الشكل(25-1).

- أي

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

- في هذا المقطع لدينا

$$I_D = I_0 (1-D) I_L = \frac{V_0}{R} \Rightarrow$$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_g DT = \frac{1}{L} V_0 (1-D) T$$

- يمكن من خلال المعادلة السابقة تحديد القيم الحدية الصغرى لتيار الحمل والمفاعلة وتردد عمل المقطع كما يلي:

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$I_0 = (1-D)I_L \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{I_0}{(1-D)}$$

$$\frac{I_0}{(1-D)} = \frac{1}{2L}V_0(1-D)T$$

$$\Rightarrow I_{0,\min} = \frac{1}{2L}V_0(1-D)^2 T$$

$$I_L = \frac{1}{2}\Delta i_L$$

$$\frac{V_0}{(1-D)R} = \frac{1}{2L}V_0(1-D)T$$

$$\Rightarrow L_{\min} = \frac{(1-d)^2 T \times R}{2} = \frac{(1-D)^2 R}{2f}$$

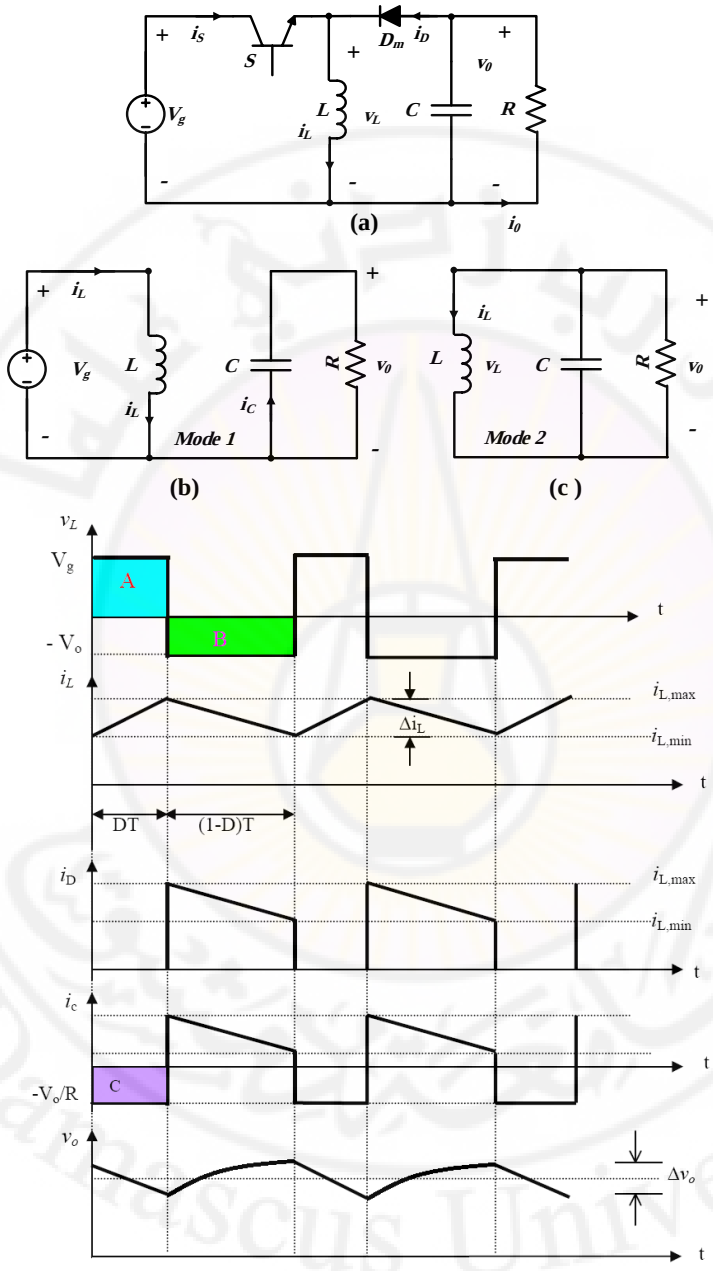
$$\Rightarrow f_{\min} = \frac{(1-D)^2 \times R}{2L}$$

$$\Rightarrow R_{\min} = \frac{2Lf}{(1-D)^2}$$

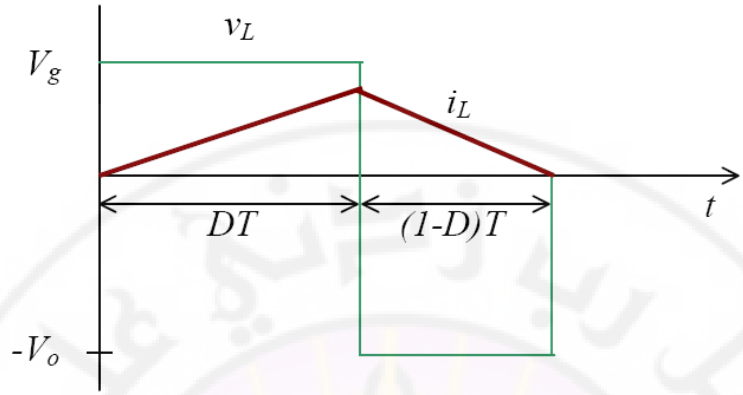
- علماً أن حساب أي من القيم السابقة يتم عندما يكون هناك قيمة مجهولة فقط.
- إن تعريج التيار يحسب كما يلي:

$$CR\% = \frac{\Delta i_L}{I_L}$$

$$\frac{V_0}{(1-D)R} = \frac{1}{L}V_0(1-D)T \Rightarrow CR\% = \frac{R}{Lf}(1-D)^2$$



الشكل(25-1) – دارة الاستطاعة. – الدارات المكافئة. – التوترات والتيارات



الشكل(26–1) التيار الحدي كتابع لعامل الدور.

1.9 المقطعات غير المباشرة ذات المجمعات السعوية (CÛK Regulators)

1.9.1 مثال (1-15) مقطع غير مباشر (ذي مجمع سعوي)

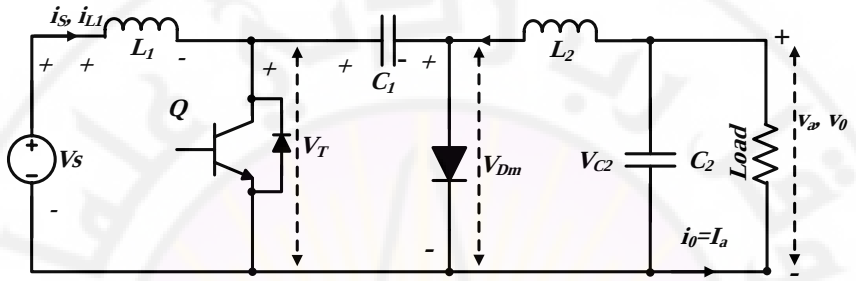
يشـابه المقطع (CÛK) للمقطع غير المباشـر العكسـي ذي التخزين بالملف أو الرافع–الخافض للتوتر، يستطيع أيضاً إعطاء توتر في الخرج قد يكون أصغر أو أكبر من توتر الدخل، مع قطبية معكوسة عن توتر الدخل. وقد أخذ هذا الاسم تبعاً للعالم الذي اخترعه. عند تطبيق توتر الدخل، وكون الترانزستور Q_1 مفصولاً. الديود D_m يكون منحازاً باتجاه أمامي وسوف يمر تيار لشحن المكثف C_1 عبر L_1 و D_m انطلاقاً من المنبع (الشكل(27–1).

– عمل الدارة يقسم إلى مرحلتين: Mode1 يبدأ عند توصيل الترانزستور Q_1 عند الزمن $t=0$. التيار في المفاعلة L_1 سـوف يتزايد. وتوتر المكثف C_1 سـوف يحجز الديود D_m لذا سـيكون مفصـولاً (Off). المكثف C_1 يفرغ شـحنته في الدارة المكونة من C_1 و C_2، والحمل، و L_2. هنا سـيمر تيار في الترانزسـتور يمثل تيار قصـر المنبع وتيار تفريغ المكثف C_1.

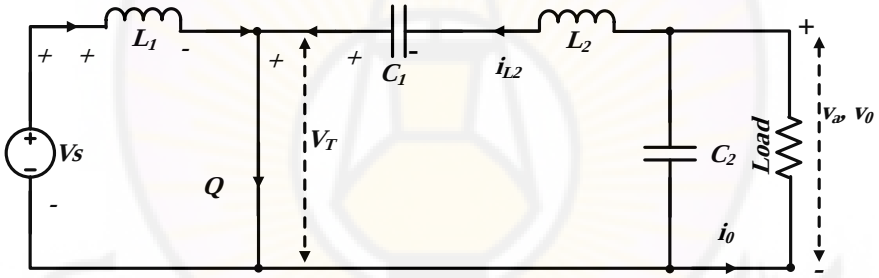
– المرحلة الثانية من التشغيل Mode2 تبدأ فور فصل الترانزستور Q_1 عند الزمن $t=t_1$. سوف يشحن المكثف C_1 من المنبع، والقدرة التي كانت مخزنة في L_1 سوف تنتقل للحمل.

الديود D_m سيكون بالتأكيد موصلاً، وهو يشكل مع Q_1 دارة متزامنة أحدهما موصل والأخر حاجز.

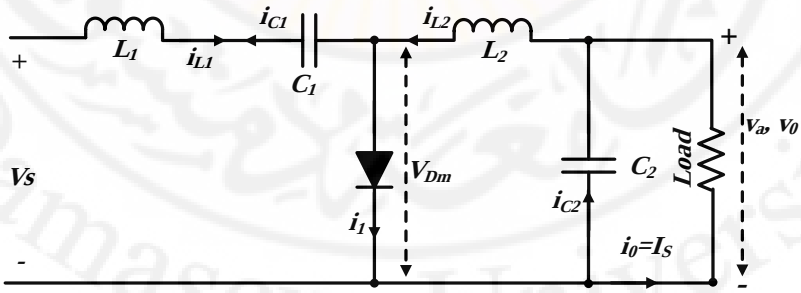
المكثف C_1 هو الوسيط لنقل القدرة من المنبع إلى الحمل. الأشكال أدناه (51) توضح الدارات المكافئة لحالات التشغيل والتوترات والتيارات المارة في كل مرحلة.



الشكل(27–1) دارة الاستطاعة للمقطع العكسي ذي المجمع السعوي **CÛK**.



(a)



(b)

الشكل(28–1) **(27)** الدارات المكافئة: حالة شحن المكثف C_1 وتفريغ قدرة L_1.

a- Mode1 (Q_1 موصل– D_m حاجز) – تفريغ المكثف C_1 وتخزين قدرة في L_1

b- Mode2 الديود D_m موصل والترانزستور **Q1** حاجز.

– بفرض أن التيار في المفاعلة (الملف) L_1 يتزايد خطياً خلال الزمن t_1 من I_{L11} إلى I_{L12} وعليه:

$$V_S = L_1 \frac{I_{L12} - I_{L11}}{t1} = L_1 \frac{\Delta I}{t_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

أو أن:

$$t_1 = \frac{\Delta I_1 \times L_1}{V_S} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

– خلال الزمن t_2 ونتيجة شحن المكثف C_1، تيار الملف L_1 يتناقص خطياً من I_{L12} إلى I_{L11}.

$$V_S - V_{C1} = -L_1 \frac{\Delta I_1}{t_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

أو أن: $$t_2 = \frac{-\Delta I_1 \times L_1}{V_S - V_{C1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

حيث أن التوتر V_{C1} هو التوتر المتوسط للمكثف C_1 وإن:

$$\Delta I_1 = I_{L12} = I_{L11}$$

من العلاقة (1) و (3) نجد:

$$\Delta I_1 = \frac{V_S . t_1}{L_1} = \frac{-(V_S - V_{C1}) t_2}{L1}$$

بالتعويض عن $t_1=DT$ وعن $t_2=(1-D)T$. فإن التوتر المتوسط للمكثف C_1 سيكون:

$$V_{C1} = \frac{V_S}{1-D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

– بفرض أن تيار ملف المرشح L_2 تزايد بشكل خطي من I_{L21} إلى I_{L22} خلال الزمن t_1 .

وعليه: $$V_{C1} + V_a = L_2 \frac{I_{L22} - I_{L21}}{t_1} = L_2 \frac{\Delta I_2}{t_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

ومنه فإن:

$$t_1 = \frac{\Delta I_2 \times L_2}{V_{C1} + V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

وتيار الملف L_2 يتناقص خطياً من I_{L22} إلى I_{L21} خلال الزمن t_2 وعليه:

$$V_a = -L_2 \frac{\Delta I_2}{t_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

أو أن:
$$t_2 = \frac{\Delta I_2 \times L_2}{V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

حيث أن:

$$\Delta I_2 = I_{L22} - I_{L21}$$

ومن العلاقات (6) و (8)

$$\Delta I_2 = \frac{(V_{C1} + V_a)t_1}{L_2} = \frac{V_a . t_2}{L_2}$$

بالتعويض عن t_1 و t_2 فإن القيمة المتوسطة لتوتر المكثف C_1 هو:

$$V_{C1} = \frac{V_a}{D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

بمساواة العلاقات (5) و (10) نجد القيمة المتوسطة لتوتر الخرج حيث:

$$\frac{V_S}{1-D} = \frac{V_a}{D} \Rightarrow V_a = \frac{DV_S}{1-D} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

ومنه

$$D = \frac{V_a}{V_a - V_S} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

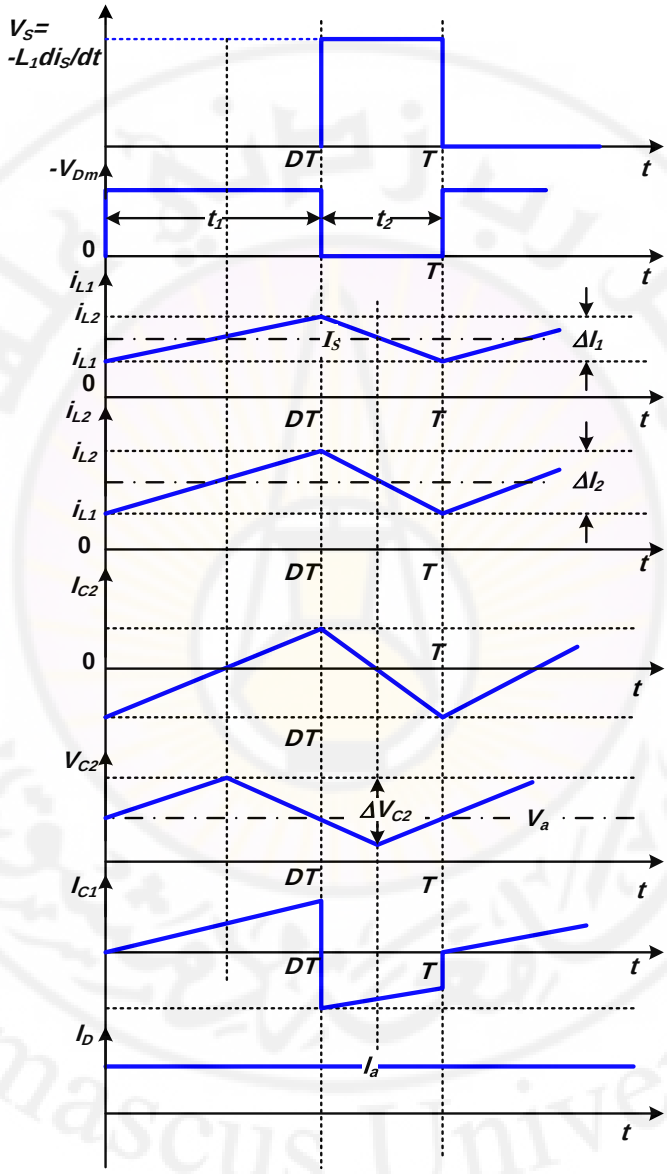
و
$$1 - D = \frac{V_S}{V_S - V_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

– بفرض عدم وجود مفاقيد في الدارة، يمكن القول أن:

$$V_S . I_S = -V_a . I_a = \frac{V_S . I_a . D}{1-D}$$

ومنه فإن متوسط تيار الدخل:

$$I_S = \frac{D.I_a}{1-D} \quad \text{.....(14)}$$



الشكل(29–1) تغيرات التوترات والتيارات في الزمن.

– دور التقطيع T يمكن إيجاده من العلاقات (2) و (4):

$$T=\frac{1}{F}=t_1+t_2=\frac{\Delta I_1\times L_1}{V_S}-\frac{\Delta I_1\times L_1}{V_S-V_{C1}}=\frac{-\Delta I_1.L_1.V_{C1}}{V_S(V_S-V_{C1})}.....(15)$$

من هذه العلاقة نحدد التعرجات العظمى لتيار المفاعلة L_1 بالشكل:

$$\Delta I_1=\frac{-V_S(V_S-V_{C1})}{F.L_1.V_{C1}}.....(16)$$

أو:

$$\Delta I_1=\frac{V_S.D}{F.L_1}.....(17)$$

– دور التقطيع T يمكن أيضاً إيجاده من العلاقة (7) و (9):

$$T=\frac{1}{F}=t_1+t_2=\frac{\Delta I_2\times L_2}{V_{C1}+V_a}-\frac{\Delta I_2\times L_2}{V_a}=\frac{-\Delta I_2\times L_2\times V_{C1}}{V_a(V_{C1}+V_a)}.....(18)$$

هذا يعطي تعرجات تيار الملف L_2 حيث:

$$\Delta I_2=\frac{-V_a(V_{C1}+V_a)}{F\times L_2\times V_{C1}}.....(19)$$

أو:

$$\Delta I_2=\frac{-V_a(1-D)}{F.L_2}=\frac{D.V_S}{F.L_2}.....(20)$$

عند فصل Q_1، مكثف التخزين وتحويل القدرة C_1، سوف يشحن بتيار الدخل خلال الزمن $t=t_1$.

متوسط تيار الشحن للمكثف C_1 هو $I_{C1}=I_S$، والقيمة العظمى لتعرجات توتر المكثف C_1 تعطى بالعلاقة:

$$\Delta V_{C1}=\frac{1}{C_1}\int_0^{t_2} I_{C1}dt=\frac{1}{C_1}\int_0^{t_2} I_S.dt=\frac{I_S.t_2}{C_1}.....(21)$$

العلاقات (13) تعطي:

$$t_2=\frac{V_S}{(V_S-V_a)F}$$

وعليه فالعلاقة (21) تصبح:

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_S . V_S}{(V_S - V_a) F . C_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

أو:

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_S (1 - D)}{F . C_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (23)$$

– إذا فرضنا أن تعرجات تيار الحمل Δi_0 مهمة، فإن

$$\Delta i_{L2} = \Delta i_{C2}$$

تيار الشحن المتوسط للمكثف C_2، والذي يمر خلال $\frac{T}{2}$ هو $I_{C2} = \frac{\Delta I_2}{4}$

وأن أقصى تعرجات لتوتر المكثف C_2 هو:

$$\Delta V_{C2} = \frac{1}{C_2} \int_0^{T/2} I_{C2} dt = \frac{1}{C_2} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I_2}{4} dt = \frac{\Delta I_2}{8F . C_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (24)$$

أو

$$\Delta V_{C2} = \frac{V_a (1 - D)}{8 . C_2 . L_2 . F^2}$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{D V_S}{8 . C_2 . L_2 . F^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (24)$$

<u>شروط استمرارية تيار الملف وتوتر المكثف</u>:

إذا كان التيار I_{L1} هو متوسط تيار الملف L_1، فإن تعرجات تيار الملف $\Delta I_1 = 2 I_{L1}$.

باعتماد العلاقة (14) و (17) نجد أن:

$$\frac{V_S}{F . L_1} = 2 I_{L1} = 2 I_S = \frac{2 D I_a}{1 - D} = 2 \left(\frac{D}{1 - D} \right)^2 \frac{V_S}{R}$$

وهذا يعطي القيمة الحرجة، الحدية للحثية L_{C1} وهي:

$$L_{C1} = L_1 = \frac{(1 - D)^2 . R}{2 . D . F} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (26)$$

– إذا كان I_{L2} هو متوســـط التيار للمفاعلة L_2، فإن تعرجات المفاعلة $\Delta I_1 = 2 I_{L2}$

وباعتماد العلاقات (11) و (20) نحصل على:

$$\frac{D.V_S}{F.L_2} = 2I_{L2} = 2I_a = \frac{2V_a}{R} = \frac{2D.V_S}{(1-D)R}$$

مما يعطينا القيمة الحرجة الحثية L_{C2} وهي:

$$L_{C2} = L_2 = \frac{(1-D).R}{2.F} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (27)$$

إذا كان V_{C1} هو التوتر المتوسط للمكثف، فإن تعرجات التوتر $\Delta V_{C1} = 2V_a$

باعتماد العلاقات $\Delta V_{C1} = 2V_a$ وتعويضها في العلاقة (22) نحصل على:

$$\frac{I_S(1-D)}{F.C_1} = 2.V_a = 2I_a.R$$

وبعد التعويض عن I_S نحصل على القيمة الحدية للمكثف C_{C1} وهي:

$$C_{C1} = C_1 = \frac{D}{2.F.R} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (28)$$

إذا كانت V_{C2} القيمة المتوســـطة لتوتر المكثف، فإن تعرجات التوتر: $\Delta V_{C2} = 2V_a$

وباعتماد العلاقات (11) و (25) نحصل على:

$$\frac{D.V_S}{8C_2L_2.F^2} = 2.V_a = \frac{2D.V_S}{1-D}$$

والتي بعد التعويض عن L_2 من العلاقة (27) نحصـل على السـعة الحدية للمكثف C_{C2} وهي:

$$C_{C2} = C_2 = \frac{1}{8.F.R} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (29)$$

– يعتمد المقطع CÛK على القدرة المحولة من المكثف. وعليه فإن تيار الدخل مستمر. عند وصـــل القاطع Q_1، عليه أن يحمل تيار الملف L_1 و L_2، وهذا يســبب مرور تيار كبير في الترانزستور Q_1.

بما أن المكثف هو الذي يحول القدرة، فإن تعرجات تيار المكثف C_1 ســتكون كبيرة. مثل هذه الدارة تحتاج إلى مكثف وملف إضافيين.

1.10 مقطع ذو مجمع تحريضي (Inductive Accumulation Chopper)

1.10.1 مثال (1-16) تصميم مقطع

يراد بناء مقطع يربط بين منبع توتر مثالي E (مدخرة) وحمل يمكن تمثيله بثنائي قطب R//C (dipole) حيث RC>>T.

a- <u>بنية دارة الاستطاعة</u>:

1- ما هو شكل وبنية المقطع المطلوب تحقيقه.

2- حدد العناصر الواجب توصيلها حسب طبيعة التشغيل المطلوبة.

b - <u>حالة تشغيل عند تيار حمل دائم</u>:

وبفرض وجود مرشـــح مثالي لتوتر الخرج، أي أن U(t)=cte=U على كامل الدور T. في هذه الحالة بين:

1- ارســم بيانياً، من أجل عامل دور α، التيارات K, J, I ، والتوتر على طرفي الملف V_L. وبرهن رياضياً شكل هذه التيارات.

2- برهن أنه توجد علاقة بين E و U و α. واحسـب القيم المتوسـطة للتيارات K, J, I. وارسم بيانياً $\frac{V}{E}$ كتابع لـ α.

احسب الاستطاعة المقدمة من المنبع والمستلمة من قبل الحمل. وعلق على النتائج.

3- بفرض أن E=24V و α=0.8، f=20000Hz، R=10Ω، L=50mH. احسب U، القيمة المتوسطة i، والاستطاعة المبددة قي R.

تأكد من أن التشغيل بتيار مستمر متواصل.

c- <u>حالة تشغيل عند تيار متقطع</u>:

بفرض دائماً وجود المرشح المثالي لتوتر الخرج. وأن K(t) تنعدم قبل نهاية الدور.

1- ارسم بيانياً K, J, I. ومن أجل عامل دور α، برهن أنه لا يمكن التوصل لأن يكون تيار الحمل متقطعاً ما لم يكن [U>Eα(1-α)].

2- احسب القيمة المتوسطة لـ i، الاستطاعة المبددة في الحمل. استنتج وجود علاقة بين U و α و R و T و L و E.

3- بأخذ القيم الرقمية الواردة أعلاه (ماعدا L) برهن أنه حتى يكون التوصـــيل غير متقطع، يجب أن تكون L أكبر من قيمة L_0 يمكن حسابها.

d- ترشيح توتر الخرج:

في الحقيقة، الترشـيح الذي يتم عبر RC ليس مثالياً. مع ذلك نفرض أن RC>>T. في هذه الحالة نفرض أن K(t) ثابت ويســـاوي القيمة المتوســـطة مع اعتبار L=50mH. ارسم منحنيات U(t)، احسب C من أجل $\Delta U \leq 1V$.

الحل:

a- بنية دارة الاستطاعة:

1- دارة المقطع مبينة أدانه:

U: توتر الحمل.

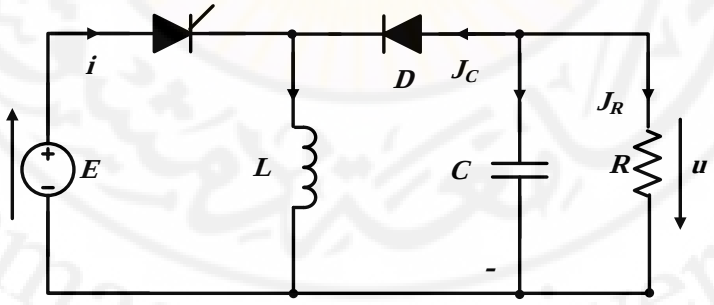
i: تيار المدخرة (المنبع).

J_C: تيار المكثف.

J_r: تيار المقاومة.

J: تيار الديود.

K: التيار المار في عنصر التخزين L.

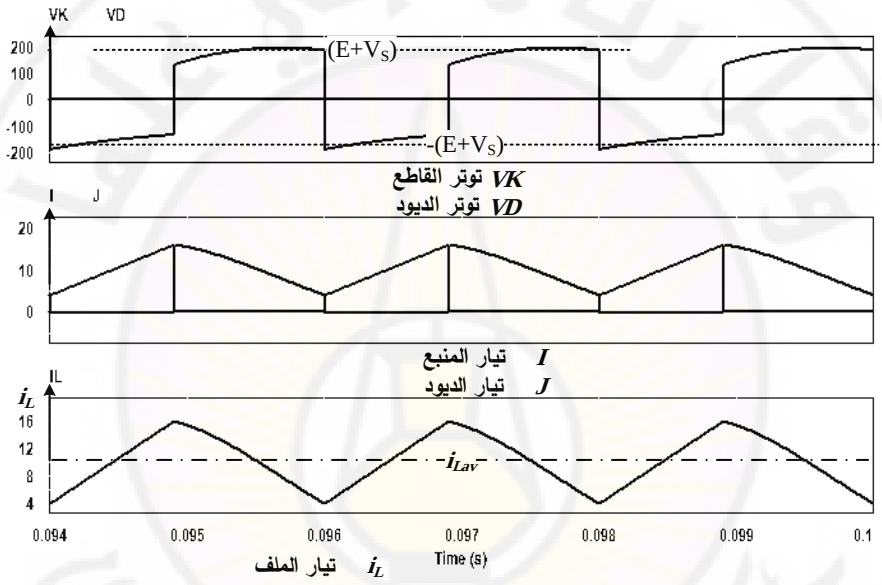


الشكل(30-1) دارة الاستطاعة الممكن استخدامها في حالة التوصيل الدائم.

2- خلال الفترة $0< t < \alpha t$ يتم توصـيل القاطع K وعندئذ شـحن الملف وتخزين القدرة. ويمر تيار I متزايد. وخلال باقي الدور $\alpha T < t < T$ يتم فصـل K وتوصـيل D ليحقن القدرة المخزنة في الملف في دارة الحمل.

b- <u>حالة تشغيل عند تيار حمل دائم:</u>

1- باعتبار التشغيل عند تيار حمل دائم، وباعتبار عامل الدور α. يمكن رسم المنحنيات التالية لمختلف التوترات والتيارات في النظام شـــكل (30)، وهذا النظام هو الذي نطلق عليه التخزين بمجمع تحريضـــي، أو مقطع غير مباشـــر، وهو عادةً يربط بين منبع توتر وحمل توتر، وتستخدم الحثية كعنصر تخزين.



الشكل(31-1) التوترات والتيارات لمقطع بمجمع تحريضي.

2- إن التوتر المتوسط على طرفي الملف خلال الدور يساوي الصفر.

$$V_{L,av} = 0$$

$$\alpha E = (1-\alpha)U$$

ومنه: $$U = \frac{\alpha}{1-\alpha} E$$

ومن أجل α=0.8 نجد حسب القيم المعطاة:

$$U = \frac{0.8}{1-0.8} \times E = 96V$$

- الاستطاعة المقدمة من المنبع تساوي الاستطاعة المقدمة للحمل:

$$P = E.i_{av} = U.J_r = \frac{U^2}{R} = 921.6W$$

3- <u>التطبيق العددي</u>:

$$\frac{96(V)}{10(\Omega)} = 9.6A = J_{av} = J_{r,av}, \quad J_{C,av} = 0$$

استطاعة الدخل:

$$P = E.i_{av}$$

$$i_{av} = 34.4A$$

$$K_{av} = I_{av} = J_{av} = \frac{U}{R(1-\alpha)} = 48A$$

وللتحقق من أن تيار الملف دائم يجب دائماً أن يكون التيار K>0

$$K_{\min} = K_{av} - \frac{\Delta K}{2} > 0$$

لدينا

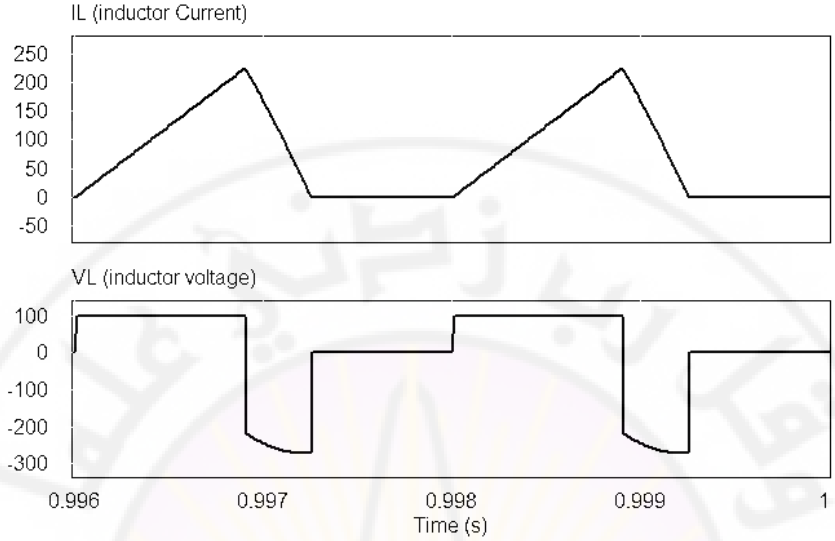
$$\Delta K = \frac{E}{L}\alpha T \Rightarrow \Delta K = 19.2A$$

$$K_{av} = 48A > \frac{\Delta K}{2}(19.2A)$$

وهذا يؤكد أن التشغيل يتم عند تيار دائم.

c- <u>حالة التشغيل عند تيار متقطع</u>:

1- منحنيات التشغيل عند تيار متقطع مبينة في الشكل(32-1) أدناه



الشكل(32-1) تيار الملف وتوتره عند التشغيل بتيار متقطع.

- في حالة التشغيل عند تيار متقطع لدينا:

$$V_{Lav} = 0 \Rightarrow \alpha E = (\theta - \alpha)U$$

حيث: $\theta = \dfrac{\alpha(E+U)}{U} < 1$ وعليه:

$$U > \frac{\alpha}{1-\alpha} E$$

2- تيار المنبع المتوسط:

$$i_{av} = \frac{E}{L}\alpha.T.\frac{\alpha}{2}$$

الاستطاعة المتوسطة أو الدخل:

$$P = E.i_{av} = \frac{V^2}{R} = \frac{E^2.\alpha^2.T}{2.L}$$

ولدينا:

$$\frac{U}{E} = \alpha\sqrt{\frac{R.T}{2.L}}$$

3- عند القيم الحدية بين التشـــغيل عند تيار متواصـــل، أو عند التشـــغيل عند تيار غير متواصل وكلا العلاقتين متساويتين وعليه:

$$\alpha\sqrt{\frac{R.T}{2.L_0}}=\frac{\alpha}{1-\alpha}$$

$$L_0=\frac{R.T}{2}(1-\alpha)^2$$

$$L_0=10\mu H$$

d- <u>ترشيح توتر الخرج</u>:

لدينا:

$$J_r+J_r=J$$

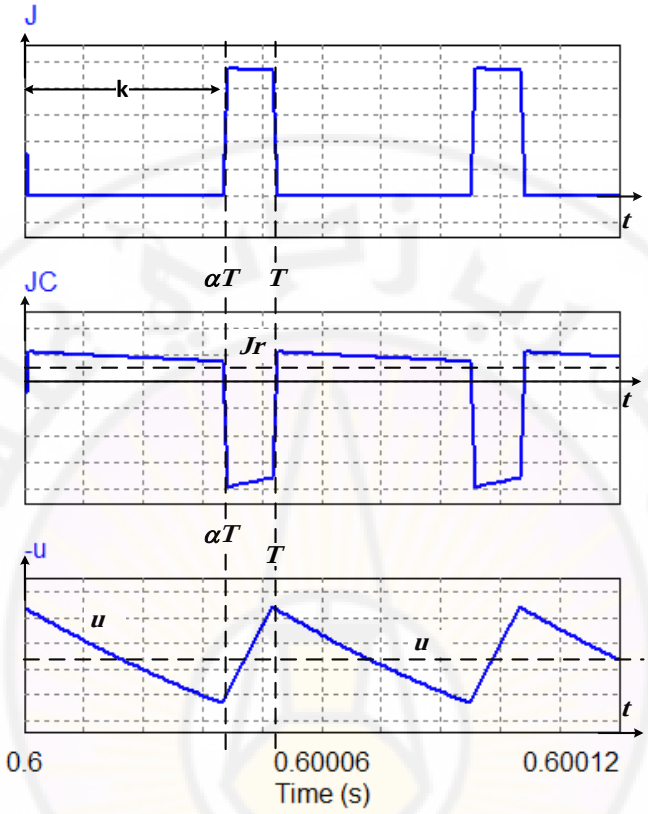
$$J_r=\frac{U}{R}=J_{av}$$

$$u=\frac{1}{C}\int J_C dt$$

ومنه نحصل في الشكل(33-1) على تغيرات تيارات وتوترات الخرج مع الزمن.

$$\Delta U=\frac{J_r}{C}.\alpha.T$$

$$\Delta U<1\Rightarrow C>7.68m.F$$



الشكل(33-1) تغيرات تيارات وتوترات الخرج مع الزمن.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

2 الفصل الثاني

المعرجات الثيرستورية والترانزستورية

(معرجات التوتر ومعرجات التيار)

INVERTERS
CURRENT SOURCE INVERTER&VOLTAGE SOURCE INVERTERS

Damascus University

2.1 مجموعة مسائل محلولة

2.1.1 مثال (1-2) معرج تيار أحادي الطور

معرج تيار أحادي الطور، يغذي حملاً أومياً مقاومته 12Ω. توتر دخل المنبع المستمر 120V. وتردد العمل 20Hz. احسب قيمة ممانعة المنبع وسعة مكثف التبديل (الحجز) المستخدم. اعتبر أن زمن فصل الثيرستور 50μs.

1- إذا تم إضافة حثية L=0.06H إلى الحمل، حلّل أثر ذلك على توتر المكثف وسعته.

2- اشرح بالتفصيل آلية عمل المبدلات ذات التبديل عن طريق الحمل ،وحاول الربط بينها وبين معرجات التيار ذات التبديل القسري .

الحل:

يوضح الشكل(1-2) دارة الاستطاعة لمعرج التيار الأحادي الطور. يعتمد اختيار حثية الملف (L) على ثابت الزمن لتيار المنبع، لدى حدوث تغيرات في تيار الحمل. تيار الحمل الدائم يساوي:

$$\frac{120}{12}=10A$$

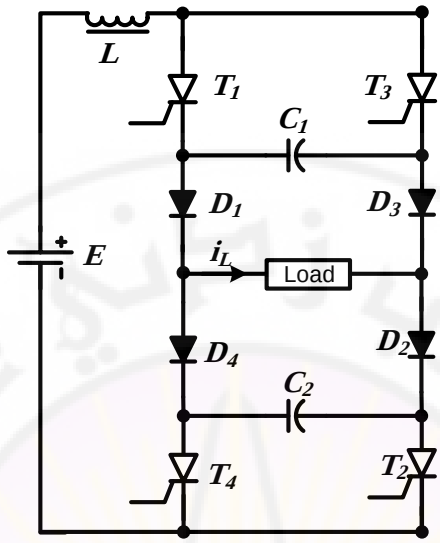
بفرض حدوث زيادة في تيار الحمل وازداد التيار بمعدل (1) أمبير لكل دور. عندئذ:

$$\frac{di}{dt}=1\times 20$$

وعليه فإن :

$$L\frac{di}{dt}=120Volts.$$

$$L=\frac{120}{20}=6H.$$



الشكل(1-2) دارة الاستطاعة لمعرج التيار.

- تنتقل الديودات للتوصيل مباشرةً بعد حجز الثيرستورات T_1 و T_3 كما في الشكل(1-2)، وبما أن تيار المكثفات C_1 و C_2 متماثل، فإن فرق التوتر بين المنبع والحمل سوف يتواجد على طرفي L، مما يولد تغيرات سريعة للتيار. بما أن هذه التغيرات صغيرة، يسمح ذلك لنا بالقول أن تيار المنبع يحافظ على قيمته 10A.

- معادلات الدارة هي:

$$2i_C + i_L = 10A$$

$$12.i_L = \frac{1}{C}\int i_C.dt$$

بما أن C تكون عادة مشحونة بشحنة أولية تساوي توتر المنبع 120V-، فإن تحويل لابلاس للعلاقات السابقة يصبح :

$$2i_C + i_L = \frac{10}{S}$$

$$12i_L = \frac{i_C}{S.C} - \frac{120}{S}$$

يعطى حل هذه المعادلات كما يلي:

$$i_L(t) = 10 - 20e^{-t/24C} \quad A$$
$$i_C(t) = 10e^{-t/24C} \quad A$$

– ينحاز التوتر على طرفي الثيرستور T_1 أو (T_2) ويصبح عكسياً عندما ينعدم توتر الحمل أو تيار الملف i_L، زمن الحجز t_Q=50µs بالعلاقة أعلاه يعطي سعة المكثف اللازم استخدامه وهي C=3µF.

2- إضافة حثية للحمل يعني تعديل المعادلات التفاضلية التي استخدمت أعلاه وسوف تصبح الآن بالشكل:

$$2i_C + i_L = \frac{10}{S}$$

$$12i_L + 0.06(Si_L + 10) = \frac{i_C}{S.C} + \frac{V_0}{S}$$

– بأخذ C=3µF، وتوتر الشحن الأولي V_0= -120V، حل المعادلات أعلاه يعطى بالشكل:

$$i_L = 10 - e^{-100t}(20Cos1664t + 0.6Sin1664t) \quad A$$
$$i_C = e^{-100t}(10Cos1664t + 0.6Sin1664t) \quad A$$
$$V_C = 120 + e^{-100t}(1990Sin1664t - 240Cos1664t) \quad V$$

– حسب العلاقات أعلاه، ينعدم تيار المكثف سوف خلال 980µs، وذلك عند حجز D_1 و D_3. بالمحافظة على تيار الحمل منعكس كلياً عند القيمة 10A وتوتر حمل 120V. خلال الفترة 980µs المكثف سوف يشحن ويصل توتر الشحن إلى 1933V. وهو توتر كبير (excessive) قادر على تحطيم المكثف وكذلك تحطيم الثيرستور المحجوز. هذا يعني أن فرضية شحن المكثف بشكل أولي للتوتر 120V ليست جيدة.

كي نخفض من التوتر المطبق على الثيرستور، يجب رفع سعة المكثفات. إذا كانت مثلاً C=20µF. وعند توتر شحن أولي للمكثف يساوي 110V- فإن العلاقات السابقة تصبح:

$$i_L = 10 - e^{-100t}(20Cos638t + 28.75Sin638t) \quad A$$
$$i_C = e^{-100t}(10Cos638t + 14.37Sin638t) \quad A$$
$$V_C = 120 + e^{-100t}(593Sin638t - 1220Cos638t) \quad V$$

حسب هذه العلاقات الجديدة، تيار المكثف i_C سوف ينعدم بعد 4ms. مما يسمح برفع توتر المكثف فقط حتى القيمة 1000V. زمن الحجز الموفر للثيرستورات هو الزمن المحسوب عند جعل التوتر $V_C=0$ أي 1.59ms، هذا الزمن واضح أنه أكبر بكثير من زمن الفصل اللازم للثيرستور 50µs. أي أن سعة المكثف وتوتر المعرج مترابطين.

2.1.2 مثال (2-2) الفرق بين دارة معرج التيار ومعرج التوتر

– ارسم دارة الاستطاعة لمعرج تيار أحادي الطور، ومعرج توتر أحادي الطور. بيّن الفرق بينهما.

الحل:

الأشكال التالية توضح دارة معرج التيار الثيرستوري أحادي الطور ومعرج التوتر الأحادي الطور

1–معرج التيار يحتاج لمنبع تيار، بينما معرج التوتر يحتاج لمنبع توتر.

2– لا يتأثر معرج التيار بتغيير توتر المنبع، بينما معرج التوتر يحتاج لمنبع توتر.

3- الديودات في معرجات التيار وضعت على التسلسل مع الثيرستور، بينما في معرج التوتر وضعت على التفرع معه.

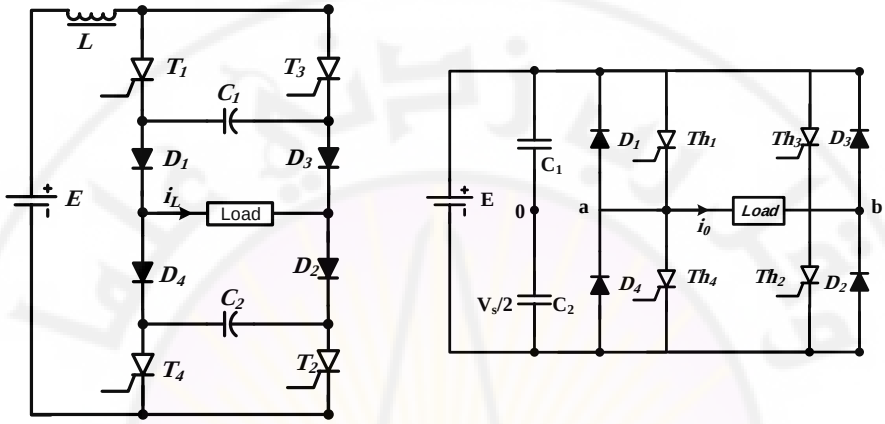
4- مهمة الديودات في معرج التيار عدم انعكاس التيار على المكثف من الحمل وعدم تطبيق توتر الحمل على الثيرستورات. بينما مهمة الديودات في معرج التوتر تمرير التيار السالب في حال عدم إمكانية مروره في الثيرستور وخاصةً في الأحمال التحريضية.

5- لا يمكن استعادة القدرة من الحمل في معرج التيار، بينما يتم ذلك في معرج التوتر.

6- يتم في معرج التيار تبديل التيار، بينما في معرج التوتر يتم التبديل في اتجاه توتر الخرج.

7- المكثفات C_1 و C_2 في معرج التيار كافية لفصل الثيرستورات، لكن في معرج التوتر الثيرستوري، نضيف ملفات مترابطة على التسلسل مع الثيرستور، لتوليد توتر عكسي على الثيرستورات إضافةً للمكثفات C_1 و C_4. لدى عمل Th_4 مثلاً وكون Th_1 موصلاً يقوم المكثف C_4 بالتفريغ في الثيرستور Th_4 عبر الملف (ob) وهذا يولد توتراً معاكساً عبر

الملف (oa) المترابط معه. التوتر الموجب المطبق على مهبط Th_1 يعمل على نقله لحالة الحجز. بعد حجز Th_1 التيار الذي كان يمر في الحمل باتجاه موجب، يستمر بالمرور بمساعدة الديود الحر D_4.



الشكل(2–2) **a-** معرج تيار **b-** معرج توتر أحادي الطور جسري ثيرستوري وديودات العودة

8- يعطى التوتر المتناوب الناتج عن المعرج الجسري الأحادي الطور بالعلاقة:

$$V = E\sqrt{1-\frac{\beta}{\pi}}$$

حيث β زاوية التأخير في التشغيل لقواطع الجسر.

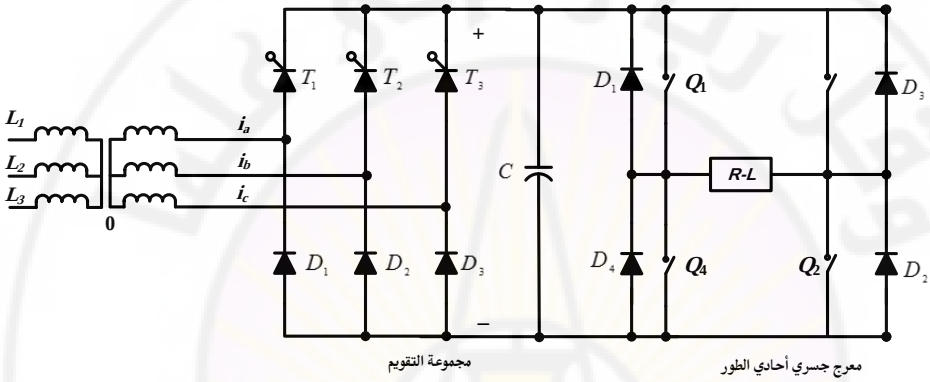
2.1.3 مثال (2-3) معرج جسري أحادي الطور

احسب القيمة الفعالة لتوتر الخرج الناتج عن معرج جسري أحادي الطور، غذي هذا المعرج من جسر تقويم ثلاثي الطور مقاد يعمل عند زاوية إزاحة بالطور قدرها 30 درجة كهربائية، علماً أن توتر الخط في ثانوي المحول 410 فولت توتر خط. مقاومة الحمل 40 أوم وحثية الحمل 12 ميلي هنري. مقاومة ثانوي المحول والابتدائي والشبكة منسوبة للشبكة تساوي 1Ω أوم وحثية الشبكة 3mH. ارسم مخطط الدارة المقترحة، وارسم الشكل والقيمة الفعالة لتيار الحمل وتوتر الخرج، وبين زاوية التأخير الناشئة عندئذ. سعة المكثف على خرج جسر التقويم كانت 8000 ميكرو فاراد بقصد تحقيق توتر مستمر جيد على خرج جسر التقويم.

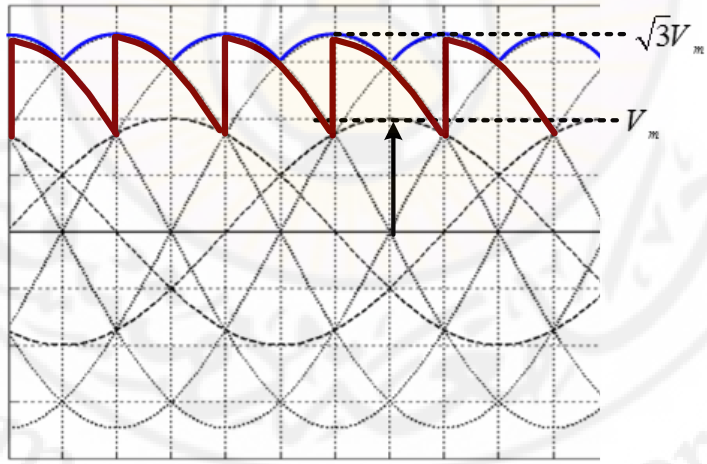
الحل:

دارة الاستطاعة موضحة بالشكل(3–2 a) أدناه. كما يوضح الشكل((3–2 b)) شكل التوتر المقوم الناتج عن جسر التقويم ثلاثي الطور المقاد عند $\psi=30^o$.

– يمكن للمكثف (C) المربوط على التفرع مع الجسر أن يأخذ القيمة المتوسطة لتوتر خرج الجسر لدى تحميل المعرج، كما أنه يمكن أن يأخذ التوتر المساوي لقمة التوتر المقوم الناتج، وخاصةً عند اللاحمل.



(a)



الشكل(3–2) **a** دارة الاستطاعة، **(b)** شكل توتر الخرج الناتج عن جسر التقويم.

لدى تشغيل الجسر الثيرستوري عند $\psi=30^o$، نجد أن قمة التوتر الناتج تبدأ من قمة التوتر الذي قيمته $\sqrt{3}.V_m$ وبما أن المكثف ذو سعة كبيرة فإن التوتر المستمر الأعظمي سيكون مساوياً $\sqrt{3}.V_m$ للتوتر الثانوي (وسوف نعتمد هذه القيمة).

$$V_m = \frac{410}{\sqrt{3}}.\sqrt{2}$$

ومنه فإن قمة التوتر ستكون

$$\sqrt{3}V_m = 410\sqrt{2} = 579.827Volts$$

– القيمة الفعالة لتوتر الخرج تعطى بالعلاقة:

$$V = E\sqrt{1-\frac{\beta}{\pi}}$$

أو

$$V_1 = \frac{4V_S}{\sqrt{2}\pi} = 0.9V_S$$

$$V_0 = \sum_{n=1,3,5}^{\alpha} \frac{4V_S}{n\pi} Sinn\omega t$$

$$i_0 = \frac{4V_S}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} Sin(n\omega t - \varphi)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{n\omega L}{R}$$

ملاحظة : يجب الانتباه إلى أن توتر الخرج المتناوب المطبق بالعلاقة أعلاه قيمته العددية تحسب على أساس القيمة العظمى للتوتر V_m، وعليه إذا كان توتر الخرج 230 فولت قيمة فعالة فإن توتر الدخل المستمر يجب أن لا يقل عن : 361 فولت مستمر للمعرج الأحادي الطور . بأخذ n=1:

$$i_0 = \frac{4V_S}{\pi\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} Sin(\omega t - \theta_n)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{2\pi \times 50 \times 12 \times 10^{-3}}{40}$$

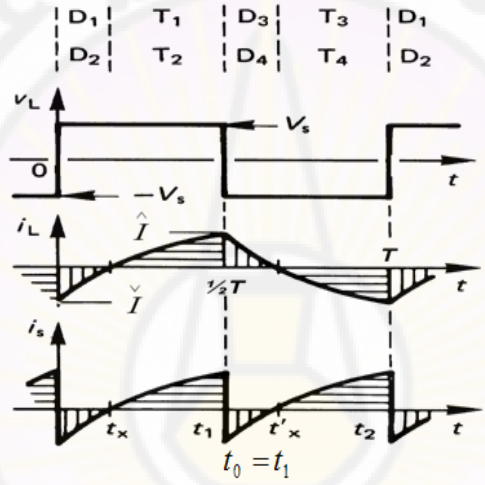
$$\varphi = \tan^{-1}\frac{3.778}{40} = \tan^{-1} 0.0942$$

$$\varphi = 5.4°$$

يوضح الشكل(4–2) شكل التوتر المتناوب الناتج عن المعرج، والتيار المار في الحمل عند عامل استطاعة يمكن حسابه من مقاومة الحمل وحثية الحمل. حيث $\varphi = 5.4°$.

$$i_0 = \frac{4 \times 579.8}{3.14\sqrt{(40)^2 + 14}} = \frac{2319.2}{126.14} = 18.386A$$

$$i_0 = 18.386Sin(\omega t - 5.4)$$

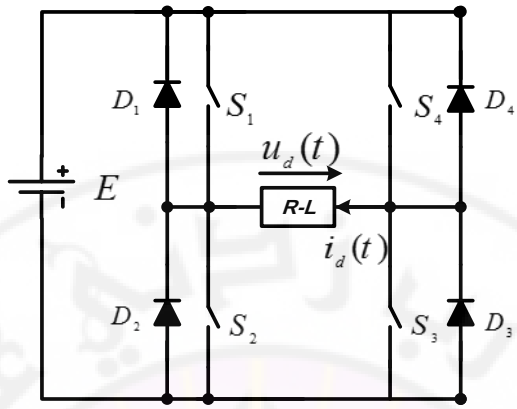


الشكل(4–2) توتر الخرج وتيار الحمل.

2.1.4 مثال (4-2) معرج جسري أحادي الطور (حمل أومي)

لدينا معرج جسري أحادي الطور حسب الشكل(5–2) باعتبار أن الحمل أومي، بين شكل التوتر خلال دور التشغيل. وفي حالة حمل مختلط أومي وتحريضي بين معادلات التوتر والتيار للحمل.

الحل:



الشكل(5-2) جسر تعريج أحادي الطور.

1- بما أن الحمل مقاومة أومية صرفة:

لدينا في كل لحظة العلاقة:

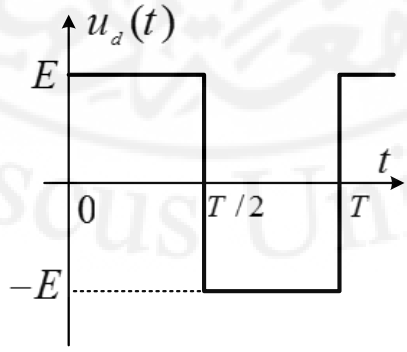
$$U_d(t) = R.i_a(t)$$

من أجل $0 < t < \frac{T}{2}$ القواطع (1 و3) موصلة (ON)، والقواطع (2 و4) مفتوحة (Off)، التوتر $U_d(t) = +E$.

من أجل $\frac{T}{2} < t < T$ القواطع (1 و 3) مفتوحة (Off)، والقواطع (2 و4) مغلقة (ON).

- التوتر $U_d(t) = -E$.

- **التيار** $i_d(t) = \frac{U(t)}{R}$



الشكل(6-2) شكل توتر الخرج

2- <u>حالة تطبيق حمل مختلط أومي تحريضي على المعرج</u>:

كتابع لعامل الجودة في كل لحظة يعطى توتر الحمل حسب العلاقة:

$$U_d(t) = R.i_d(t) + L\frac{di_d}{dt}$$

هنا أيضاً من أجل $0 < t < \frac{T}{2}$ القواطع (1 و3) موصلة (ON)، ومن أجل $\frac{T}{2} < t < T$ القواطع (2 و 4) سوف يتم توصيلها.

- نعتبر الحالة الأولية $i_d(t) = 0$.

- خلال الفترة الزمنية $0 < t < \frac{T}{2}$ وكون (3+1) موصلة و (2 و 4) مفصولة off لدينا:

$$U_{d1}(t) = R.i_{d1}(t) + L\frac{di_{d1}}{dt} = E$$

الرمز (1) يشير للعمل خلال نصف الدور الأول من موجة التوتر المتناوب. حل المعادلة التفاضلية أعلاه هو عبارة عن مجموع التيار في الحالة الدائمة والحالة العابرة ويكتب بالشكل:

$$i_{d1}(t) = K.e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$$

- عند t=0 لدينا:

$$i_{d10}(t) = K + \frac{E}{R}$$

ومنه:

$$K = i_{d10} - \frac{E}{R}$$

وبالتعويض في معادلة $i_{d1}(t)$ نجد:

$$i_{d1}(t) = \left(i_{d10} - \frac{E}{R}\right).e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$$

حيث $i_{d10}(t)$ هو التيار المار بالحمل عند t=0، التيار $i_{d1}(t)$ يتزايد باتجاه القيمة النهائية $\frac{E}{R}$ وذلك بشكل أسي (من الرتبة الأولى). وخلال نصف الدور الأول، اعتبرنا الحالة الأولية معدومة أي $i_{d10} = i_{d1}(0) = 0$ أي أن:

$$i_{d1}(t) = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

- عند الزمن $t = \frac{T}{2}$، القواطع (2 و 4) موصلة (ON). لا يمكن لهذه القواطع أن تمرر التيار لأن اتجاه التيار موجب عند الزمن $t = \frac{T}{2}$ ومعادلة التيار كما رأينا أعلاه في (1) ستكون مساوية:

$$i_{d1}(t) = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-T/2\tau}\right)$$

هذا التيار موجب لذا فإنه سوف يمر في D_1 و D_3 التي تصبح موصلة. القواطع (T_1 و T_3) ستكون مفتوحة (off) .

- طالما أن التيار في الحمل موجب، لدينا خلال نصف الدور الثاني توتر الحمل بالشكل:

$$U_{d2}(t) = R.i_{d2}(t) + L\frac{di_{d2}}{dt} = -E$$

كما سبق حل هذه العلاقة يكتب بالشكل:

$$i_{d2}(t) = \left(i_{d20} + \frac{E}{R}\right).e^{-\left(t-\frac{T}{2}\right)/\tau} - \frac{E}{R}$$

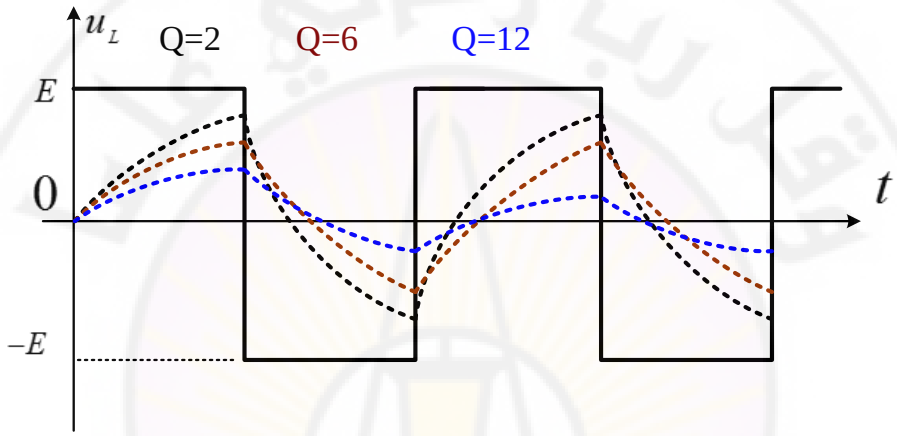
حيث i_{d20} هو التيار عند الزمن $t = \frac{T}{2}$، أي أن

$$i_{d20} = i_{d1}\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-T/2\tau}\right)$$

يتجه التيار $i_{d2}(t)$ نحو القيمة النهائية المحددة بالقيمة $-\frac{E}{R}$ وبشكل أسي. وسوف ينتهي عند الزمن $t_{10}<T$ بحيث أن $i_{d20}>0$.

من أجل $t_{10}<T$، القواطع (2 و 4) ستنتقل للتوصيل وتحجز الديودات D_1 و D_3.

– هذا وتبعاً لعامل الجودة Q للحمل، كلما زادت Q كلما استلزم أو وجب زمن أطول للوصول لحالة الاستقرار أو التيار الدائم ومن أجل دور تشغيل قدره T ثابت الزمن $\tau = \frac{L}{R}$ سيزداد. يوضح الشكل(6–2) ثلاث حالات للتشغيل عند Q=2.5 أو 6 أو Q=12.

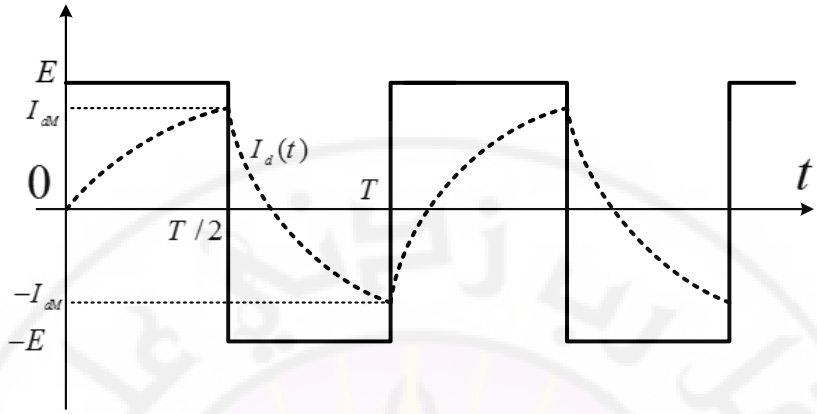


الشكل(6–2) تغيرات تيار الحمل للحمل أو τ.

– **حالة التشغيل الدائم Regime Permanent**

انطلاقاً من شروط التشغيل الأولية وذلك باعتبار أن المعرج بدء من تيار يساوي الصفر نرى كيف يستقر التيار خلال عدة أدوار، وتعتمد قيمة التيار وشكله على عامل الجودة Q (quality Factor)، $Q = \frac{L\omega}{R}$.

في حالة العمل الدائم التيار يهتز بين القيمة I_{dM} و $-I_{dM}$ ، كما في الشكل(7–2) أدناه. والآن سوف نحسب خواص التيار المستقر في هذه الحالة.



الشكل(7–2) التيار عند حمل تحريضي.

ملاحظة أساسية:

في حالة التشغيل الدائم $i_d(t)$ هو تيار دوري بدور T لأن العلاقة التفاضلية للتوتر $\left(U_d(t)=R.i_d(t)+L\frac{di_d}{dt}\right)$ هي خطية (قيم R و L) لا تعتمد على التيار $i_d(t)$.

وبما أن الحمل تحريضي التيار $i_d(t)$ سيكون متأخراً عن التوتر $U_d(t)$ هذا التأخير بالطور يتراوح من t=0 (عند حمل أومي صرف) إلى $t=\frac{T}{4}$ (عند حمل تحريضي صرف). أي أنه في حالة التشغيل الدائم المستقر، يمر التيار $i_d(t)$ من قيمة سالبة إلى قيمة موجبة عند $t=t_1$ حيث $0<t_1<\frac{T}{4}$.

هذا التيار متناظر، لذا سيمر من قيمة موجبة إلى قيمة سالبة عند $t=\frac{T}{2}+t_1$ وفي كلتا الحالتين، يتبع التيار شكل التوتر $U_d(t)$ مع تأخير زمني t_1.

معادلات التيار $i_d(t)$ والتوتر $U_d(t)$:

خلال دور التشغيل، يمكن تمييز أربعة مراحل تشغيل.

1- من أجل $0<t<t_1$:

القواطع (3+1) ON و (4+2) OFF، التيار $i_d(t)$ كان سالباً عند t=0 ويساوي $-I_{dM}$، لذا لا يمكن لهذه القواطع (3+1) تمرير التيار السالب، الديودات D_2 و D_4 تمرر التيار $i_d(t)$ ولدينا:

$$U_d(t) = E = R.i_d(t) + L\frac{di_d}{dt}$$

وعليه:

$$i_d(t) = \frac{E}{R} + \left(-I_{dM} - \frac{E}{R}\right)e^{-t/\tau}$$

حيث $\tau = \frac{L}{R}$.

- عند الزمن $t=t_1$ التيار $i_d(t)=0$.

2- من أجل $t_1 < t < \frac{T}{2}$:

هنا ستبدأ القواطع (3+1) بتمرير التيار ويتم حجز D_1 و D_3، ومعادلات التيار والتوتر تبقى كما في السابق.

3- من أجل $\frac{T}{2} < t < t_1 + \frac{T}{2}$:

يتم نقل القواطع (4+2) للوصل (On) ونقل (3+1) للفصل (0ff). التيار $i_d(t)$ ذي قيمة موجبة عند $t = \frac{T}{2}$ ويساوي $+I_{dM}$، وهنا القواطع (4+2)) لا يمكنها تمرير التيار، الديودات (الثنائيات) D_2 و D_4 تمرر التيار الموجب ولدينا:

$$U_d(t) = -E = R.i_d(t) + L\frac{di_d}{dt}$$

$$i_d(t) = -\frac{E}{R} + \left(I_{dM} + \frac{E}{R}\right)e^{\left(-\frac{t-T/2}{\tau}\right)}$$

عند الزمن $t = \frac{T}{2} + t_1$ ينعدم التيار $i_d(t)$.

4- من أجل $\frac{T}{2}+t_1<t<T$:

القواطع (2+4) تمرر التيار السالب ، الديودات D_1 و D_3 تحجز. معادلات التوتر والتيار تبقى كما هي سابقاً.

- حساب قيمة I_{dM}:

- من أجل $0<t<\frac{T}{2}$ المعادلة التفاضلية تسمح برسم شكل التيار $i_d(t)$ وتكتب بالشكل:

$$E=R.i_{d1}(t)+L\frac{di_{d1}}{dt}\Rightarrow i_{d1}(t)=\frac{E}{R}+\left(-I_{dM}-\frac{E}{R}\right)e^{-t/\tau}$$

الرمز (1) يدل هنا للفترة الزمنية $0<t<\frac{T}{2}$.

- من أجل $\frac{T}{2}<t<T$ لدينا:

$$-E=R.i_{d2}(t)+L\frac{di_{d2}}{dt}\Rightarrow i_{d2}(t)=-\frac{E}{R}+\left(I_{dM}+\frac{E}{R}\right)e^{-T/2\tau}$$

في حالة التشغيل الدائم، التيار $i_d(t)$ هو تيار دوري بدور T ونكتب:

$$i_{d1}(0)=-I_{dM}=i_{d2}(T)=-\frac{E}{R}+\left(I_{dM}+\frac{E}{R}\right)e^{-T/2\tau}.....(1)$$

$$i_{d1}\left(\frac{T}{2}\right)=I_{dM}=i_{d2}\left(\frac{T}{2}\right)=\frac{E}{R}+\left(-I_{dM}-\frac{E}{R}\right)e^{-T/2\tau}.....(2)$$

كلتا المعادلتين تسمح بإعطاء التيار I_{dM}. لنأخذ العلاقة (1) :

$$-I_{dM}=\frac{E}{R}\left(-1+e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)+I_{dM}e^{-T/2\tau}$$

$$I_{dM}\left(1+e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)=\frac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{T}{2\tau}}\right)$$

وليكن:

$$i_{d1}(0) = -I_{dM} = i_{d2}(T) = -\frac{E}{R} + \left(I_{dM} + \frac{E}{R} \right) e^{-T/2\tau} \quad \text{.....(1)}$$

$$I_{dM} = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} = \frac{E}{R} \ln\left(\frac{T}{4\tau} \right)$$

- حساب t_1:

عند $t=t_1$، $i_{d1}(t)=0$ وليكن:

$$0 = \frac{E}{R} + \left(- I_{dM} - \frac{E}{R} \right) e^{-t/\tau}$$

ومنه:

$$t_1 = -\tau \ln \frac{\frac{E}{R}}{I_{dM} + \frac{E}{R}} = -\tau \ln \frac{1}{1 + th\left(\frac{T}{4\tau} \right)}$$

$$t_1 = \tau \ln\left(1 + th\left(\frac{T}{4\tau} \right) \right)$$

2.1.5 مثال (5-2) معرج نصف جسري

معرج نصف جسري كما في الشكل(8−2 a) أدناه. حيث مقاومة الحمل $R=24\Omega$ وتوتر الدخل $V_S=48V$. والمطلوب حدد ما يلي:

a- القيمة الفعالة r m s لتوتر الخرج عند التوتر الأساسي V_{01} (المركبة التوافقية الأولى).

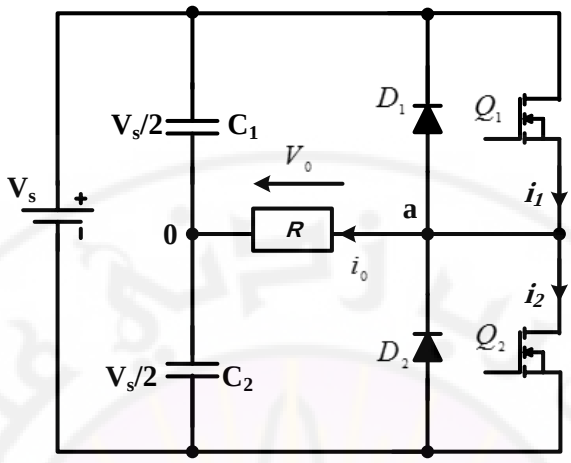
b- استطاعة الخرج P_0.

c- التوتر العكسي الأعظمي (Peak reverse blocking Voltage) $V_{\beta R}$ لكل ترانزستور.

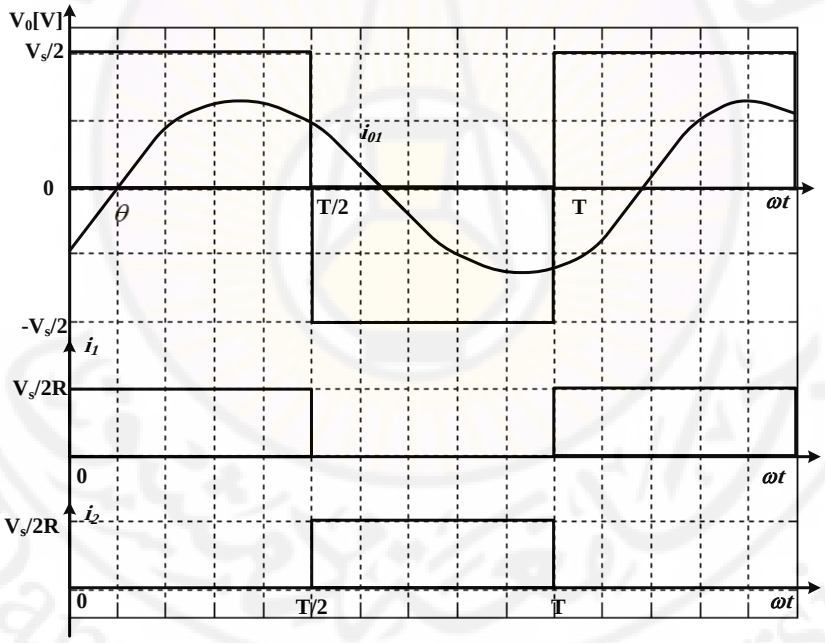
e- THD (Total Harmonic Distortion). عامل التشوه الكلي.

f- عامل التشوه DF.

الحل :



a- دارة الاستطاعة.



الشكل(8-2) **a**– دارة الاستطاعة. **b**– التوترات والتيارات.

a- من العلاقة:

$$V_{01} = \frac{2V_S}{\sqrt{2}\pi} = 0.45V_S$$

$$V_{01} = 0.45 \times 48 = 21.6V$$

b- من العلاقة

$$V_0 = \frac{V_S}{2} = \frac{48}{2} = 24V$$

وعليه فإن

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R}$$

$$P_0 = \frac{(24)^2}{2.4} = 240W$$

c- تيار الترانزستور الأعظمي:

$$I_P = \frac{24}{2.4} = 10A$$

وبما أن كل ترانزستور سيعمل فقط خلال نصف الدور فإن التيار المتوسط = 5A.

d- التوتر العكسي الأعظمي:

$$V_{\beta R} = 2 \times 24 = 48V$$

e- عامل تشوه التوافقيات الكلي: THD (Total Harmonic Distortion) يعطى بالعلاقة:

$$THD = \frac{1}{V_{01}} \left(\sum_{n=2,3...}^{\infty} (V_{0n})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sum_{n=2,3...}^{\infty} (V_{0n})^2 = V_h = \left(V_0^2 - V_{01}^2\right)^{\frac{1}{2}} = 0.2176V_S$$

ومنه فإن

$$THD = \frac{0.2176V_S}{0.45V_S}$$

$$THD = 48.34\%$$

f- عامل التشوه Déformation Factor يعطى بالعلاقة:

$$DF = \frac{1}{V_{01}}\left[\sum_{n=2,3..}^{\infty}\left(\frac{V_{0n}}{n^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{V_{0n}}{V_{01}\times n^2}$$

$$\left[\sum_{n=2,3}^{\infty}\left(\frac{V_{0n}}{n^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{V_{03}}{3^2}\right)^2 + \left(\frac{V_{05}}{5^2}\right)^2 + \left(\frac{V_{07}}{7^2}\right)^2 + ...\right]^{\frac{1}{2}} = 0.024V_S$$

وعليه فإن : $DF = \frac{0.024V_S}{0.45V_S} = 5.382\%$

2.1.6 مثال (6-2) معرج تسلسلي نصف جسري

في المعرج التسلسلي نصف الجسري الثيرستوري بين لنا ما يلي:

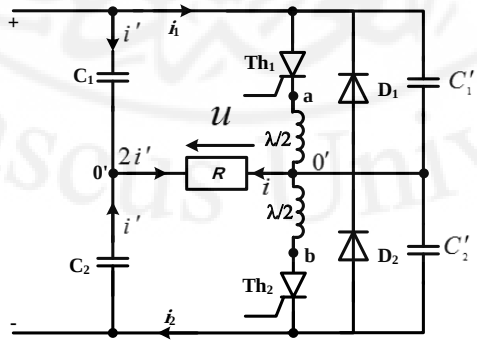
1- كيف تعمل هذه الدارة ولماذا تستخدم؟

2- ما العلاقات الناظمة بين تيار الحمل، تيار شحن وتفريغ المكثف، تيار المنبع، وتيار الثيرستور.

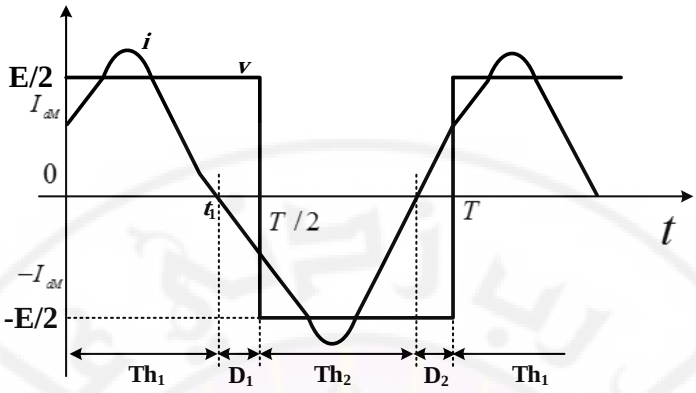
3- ما شكل التيار والتوتر على طرفي الحمل إذا كان الحمل سعوياً، وكيف عندئذ يتم وصل وفصل كل عنصر قطع في الدارة؟

الحل:

يوضح الشكل(9−2) أدناه دارة الاستطاعة لمعرج نصف جسري ثيرستوري تسلسلي، تشغيل الثيرستور Th_1 يعمل على فصل الثيرستور Th_2 وبالعكس. دارة الحجز هي المكثف والملف $\lambda/2$. هذا الملف يشكل توتر على المصعد معاكس لتوتر الثيرستور ويسبب حجز الثيرستور.



a- دارة المعرج نصف الجسري التسلسلي.



الشكل(9-2) التيار والتوتر على طرفي الحمل السعوي.

في حالة الحمل السعوي، يتم توصيل Th_1 عن طريق نبضات القدح الواجب تطبيقها كل نصف دور ويتم فصل Th_1 تلقائياً عند T/2. عن طريق نبضات القدح يوصل أيضاً Th_2 ويفصل تلقائياً قبل نهاية نصف الدور الثاني.

في حالة الحمل التحريضي، عملياً كي يمكن تحقيق عملية الحجز القسري للثيرستور Th_1 أو Th_2، يجب أن نزود هذه الدارة بمكثفات حجز C_1' و C_2'، وأن نزوده بملفين ملفوفين مع بعضهما البعض لفة بلفة، لدى تشغيل Th_1 يمر التيار من المنبع النقطة M إلى الحمل، وتصبح قطبية النقطة 0' موجبة ، وتصبح قطبية النقطة 0 سالبة.

لحظة توصيل Th_1 يتزايد التيار i وبالتالي فإن القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الملف (0'a) ، تنشأ قوة محركة كهربائية عكسية في الملف (0'b) بحيث تطبق توتر سالب على مصعد Th_2 وتسعى لنقله للحجز. خلال تشغيل Th_1 التوتر على C_1' يساوي الصفر، والتوتر على C_2' يعادل توتر المنبع، وبالعكس، فإن تشغيل Th_1 يفصل Th_2 وتشغيل Th_2 يفصل Th_1 والمكثفات C_1' و C_2' تقدم توترات الحجز.

2- العلاقات الناظمة بين التيار والتوتر تعطى بالشكل:

$$U_{C1} + U_{C2} = E$$

$$\frac{dU_{C1}}{dt} + \frac{dU_{C2}}{dt} = 0$$

$$C\frac{dU_{C1}}{dt} = -C\frac{dU_{C2}}{dt}$$

تيار الشحن أو التفريغ 'i للمكثف C_1 يساوي تيار الشحن والتفريغ للمكثف C_2 التيار i_C تيار المنبع، 'i تيار الشحن أو التفريغ. i تيار الحمل

لدينا:

$$i_C = i_1 + i'$$

أو:

$$i_1 = i = -2i' \Rightarrow i' = \frac{-i_1}{2}$$

$$i_C = i_1 - \frac{i_1}{2} = \frac{i_1}{2}$$

$$i_1 = 2i_C$$

2.1.7 مثال (7-2) معرج نصف جسري (حمل مختلط)

لدينا معرج نصف جسري حمل بحمل مختلط، المقاومة الأومية للحمل كانت 3 أوم والممانعة للحمل كانت 12 أوم. توتر الدخل للمنبع المستمر 64 فولت. بين ما يلي:

1- ارسم دارة الاستطاعة لهذا الجسر وبين شروط ومتطلبات قدح عناصر القطع الترانزستورية المقترحة.

2- ما القيمة الفعالة لتوتر الخرج عند التردد 50 هرتز؟

3- ما الاستطاعة المطبقة على الحمل؟

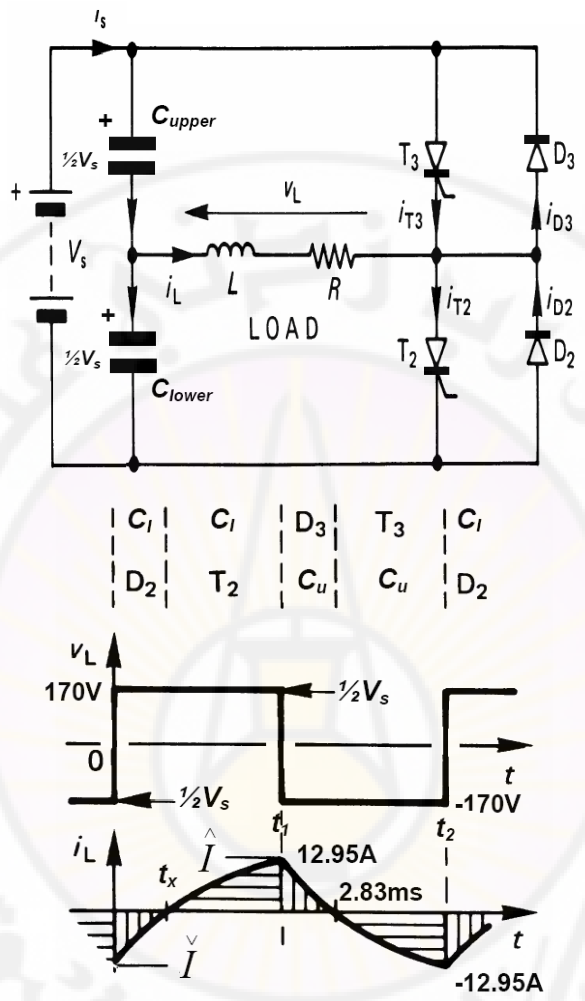
4- بين القيمة العظمى والدنيا لتيار كل ترانزستور.

5- ما القيمة العظمى للتوتر العكسي المطبق على كل ترانزستور؟.

6- ما التوتر الاسمي والتيار الاسمي للديودات الحرة المستخدمة في الجسر؟.

الحل:

دارة الاستطاعة لمعرج نصف جسري ترانزستوري.

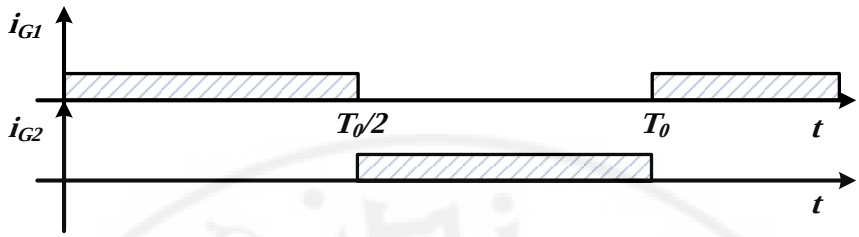


الشكل(10–2) **a**– دارة الاستطاعة. **b**– توتر الحمل وتيار الحمل.

– يعمل القاطع Q_1 خلال نصف الدور $\frac{T_0}{2}$ ويعمل القاطع Q_2 خلال باقي نصف الدور.

عندما يعمل Q_1 فإن توتر الحمل $V_0 = \frac{V_S}{2}$، وعند عمل Q_2 يصبح مساوياً $V_0 = -\frac{V_S}{2}$

تطبق نبضات القدح على كل من Q_1 و Q_2 كما يلي:



الشكل(11-2) نبضات القدح للقواطع.

التطبيق العددي:

1- القيمة الفعالة لتوتر الخرج عند التردد 50Hz تساوي قيمة التوتر المستمر المطبق أي أن:

في حال كنا نعلم القيمة الفعالة، ونرغب بحساب قيمة التوتر المستمر الواجب تأمينه على مدخل المعرج، يلزم استخدام القيمة العظمى للتوتر المتناوب وعامل التكبير لنظام تعديل عرض النبضة PWM.

$$V_0 = \frac{V_S}{2}$$

$$V_0 = \frac{64}{2} = 32V$$

– لحساب الاستطاعة المطبقة على الحمل: نحسب التيار المار ونحسب قيمة الثابت الزمني τ.

$$X_{:L} = 12 \Rightarrow L = \frac{12}{2 \times 50 \times \pi} = 0.0382H$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.0382}{3} = 0.0127 = 12.7m\sec$$

نحسب القيمة العظمى للتيار:

$$\hat{I} = \frac{1}{2}\frac{V_S}{R}\frac{1-e^{-t_1/\tau}}{1+e^{-t_1/\tau}} \qquad :t_1 = \frac{T}{2} = 10$$

$$\hat{I} = \frac{1}{2}\frac{64}{3}\frac{1-e^{-10/12.7}}{1+e^{-10/12.7}} = 3.76A$$

– نحسب معادلة التيار مع الزمن :

$$i_L(t) = \frac{V_S}{2R} - \left(\frac{V_S}{2R} + \hat{I}\right)e^{-t/\tau}$$

$$= 10.667 - 14.43e^{-78.7t}$$

$$P_L = \frac{1}{t_1}\int_0^{t_1} \frac{V_S}{2} i_L(t)dt = \frac{1}{10ms}\int_0^{10ms} 32\left(10.667 - 14.43e^{-78.7t}\right)dt$$

$$P_L = 21.4W$$

– القيمة العظمى والدنيا لتيار الترانزستور هي ±3.76A.

– القيمة العظمى للتوتر العكسي المطبق على كل ترانزستور هي توتر المنبع 64V.

– التوتر الاسمي للديود هو 64V.

التيار الاسمي للديود يساوي تيار الحمل ويساوي 3.76A.

2.1.8 مثال (8-2) معرج جسري أحادي الطور

معرج جسري أحادي الطور كما في الشكل(12−2 a) أدناه. مقاومة الحمل R=2,4Ω وتوتر الدخل V_S=48V حدد ما يلي:

a - القيمة الفعالة r.m.s لتوتر الخرج عند التوتر الاساسي V_{01}.

b - استطاعة الخرج P_0.

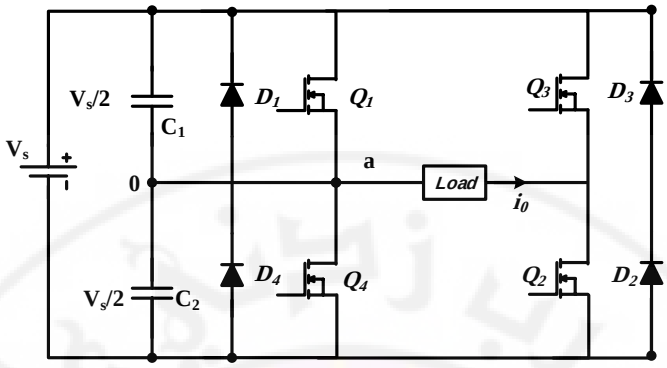
c - التيار المتوسط والأعظمي لكل ترانزستور.

d - التوتر العكسي الأعظمي $V_{\beta R}$ لكل ترانزستور.

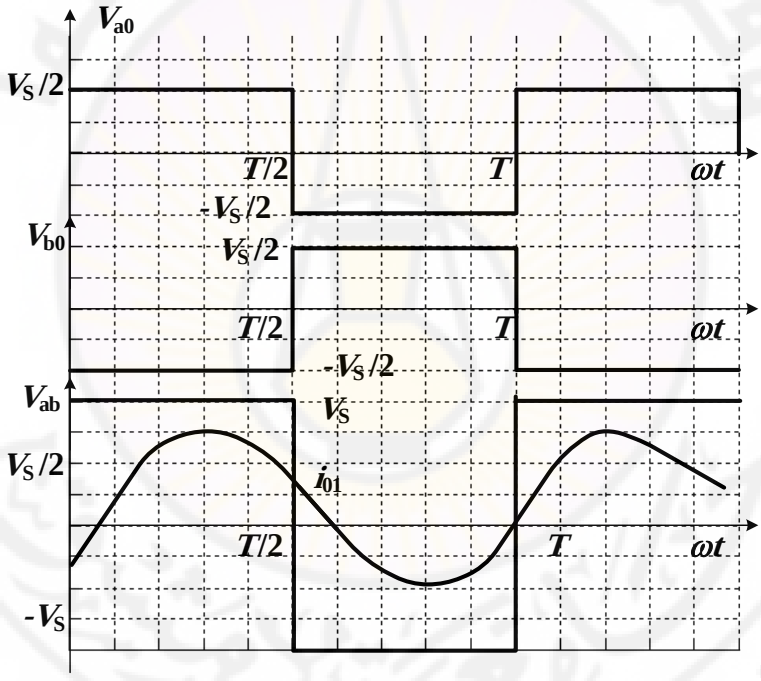
e - THD%.

f - عامل التشوه DF.

الحل:



a- دارة الاستطاعة.



(b)

الشكل(12-2) **a**– دارة الاستطاعة لمعرج جسري أحادي الطور ، **(b)** توتر وتيار الخرج.

b - التوترات والتيارات.

a- من العلاقة:

$$V_1 = \frac{4V_S}{\sqrt{2}\pi} = 0.9V_S$$

لدينا:

$$V_1 = 0.9 \times 48 = 43.2 Volts$$

b- من العلاقة:

$$P_O = \frac{V_S^2}{R} = \frac{(48)^2}{2.4}$$

$$P_0 = 960W$$

c- تيار الترانزستور الأعظمي: $I_P = \frac{48}{2.4} = 20A$

وبما أن الترانزستور الواحد لا يوصل سوى نصف دور، فإن القيمة المتوسطة لتيار الترانزستور $I_Q=10A$.

d- التوتر العكسي الأعظمي: $V_{\beta R} = 48V$

e- لدينا $V_1=0.9V_S$ والقيمة الفعالة. r.m.s لتوتر التوافقيات.

$$V_h = \left(\sum_{n=2,3...}^{\infty} V_{0n}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left(V_0^2 - V_{01}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 0.4352 V_S$$

وعليه:

$$THD = \frac{0.4352 V_S}{0.9 V_S} = 48.34\%$$

f- عامل التشوه DF:

$$\left[\sum_{n=2,3..}^{\infty} \left(\frac{V_{0n}}{n^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.048 V_S$$

وعليه :

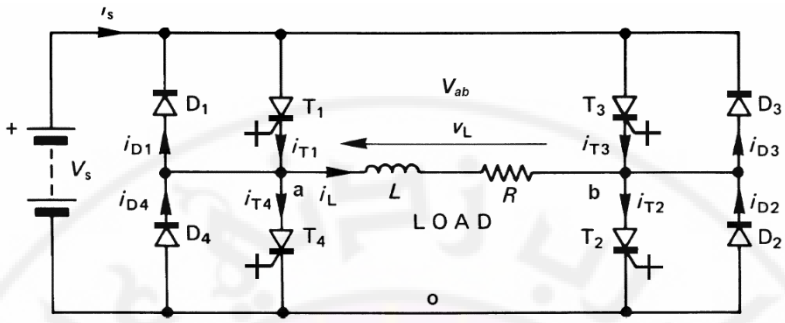
$$DF = \frac{0.048 V_S}{0.9 V_S} = 5.382\%$$

2.1.9 مثال (9-2) معرج جسري (حمل تحريضي)

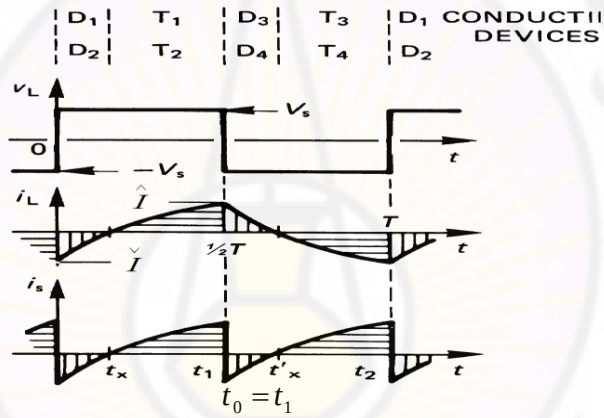
لدينا دارة المعرج الجسري التالي Full Bridge Inverter، الذي يغذي حملاً تحريضياً $R=10\Omega$, $L=50mH$ من منبع توتر مستمر $V_S=340V$ ويعمل عند تردد $f=50Hz$ حدد ما يلي:

1- حدد تيار المنبع الوسطي والقيمة الفعالة لتيار الحمل وتوتره.

2- ارسم أمواج التيار للحالة المستقرة عندما يعمل الجسر بموجة مربعة.



دارة الاستطاعة للمعرج



الشكل(13–2) **a**– دارة الاستطاعة. – توتر الحمل وتيار الحمل وتيار المنبع.

الحل:

لدينا الثابت الزمني وأزمنة العمل كما هي مبينة في الشكل السابق:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{50}{10} = 5ms$$

$$t_1 = 10ms, \quad t_2 = 20ms$$

$$t_0 = t_1$$

قيم التيار الأعظمي المار في الحمل تحسب وفق العلاقة:

$$\hat{I} = -\check{I} = \frac{V_S}{R}\frac{1-e^{-t_0/\tau}}{1+e^{-t_1/\tau}} = \frac{340}{10}\frac{1-e^{-2}}{1+e^{-2}} = 25.9A$$

إن توتر الحمل هو $V_L = 340V$

- لدينا المعادلة الزمنية للتيار:

$$i_L(t) = \frac{V_S}{R} - \left(\frac{V_S}{R} + \breve{I} \right) e^{-t_1/\tau}$$

$$i_L(t) = \frac{340}{10} - \left(\frac{340}{10} + 25.9 \right) e^{-200t}$$

$$= 34 - 59.9e^{-200t}$$

$$for \quad 0 \le t \le t_1 = 10ms = \frac{1}{2}T$$

عندما يكون التوتر:

$$V_L = -340V$$

$$i_L(t) = -\frac{V_S}{R} + \left(\frac{V_S}{R} + \hat{I} \right) e^{-t_1/\tau}$$

$$= -\frac{340}{10} + \left(\frac{340}{10} + 25.9 \right) e^{-200t}$$

$$= -34 + 50.9e^{-200t}$$

$$for \quad 0 \le t \le t_2 - t_1 = 10ms = \frac{1}{2}T$$

علماً أن نقطة التقاطع مع المحور تحسب وفق المعادلة:

$$t_x = \tau \ln\left(1 + \frac{\hat{I} \times R}{V_S} \right) = 2.83ms$$

الاستطاعة المقدمة للحمل هي:

$$P_L = \frac{1}{t_1}\int_0^{t_1} V_S \times i_L(t)dt$$

$$P_L = \frac{1}{10ms}\int_0^{10ms}(340)\times\left(34 - 50.9e^{-200t}\right)dt = 2755W$$

$$P = i^2 \times R$$

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{P_L}{R}} = \sqrt{\frac{2755}{10}}$$

$$\bar{I}_S = \frac{P_L}{V_S} = \frac{2755}{340} = 8.1A$$

2.1.10 مثال (2-10) معرج توتر ثلاثي الطور

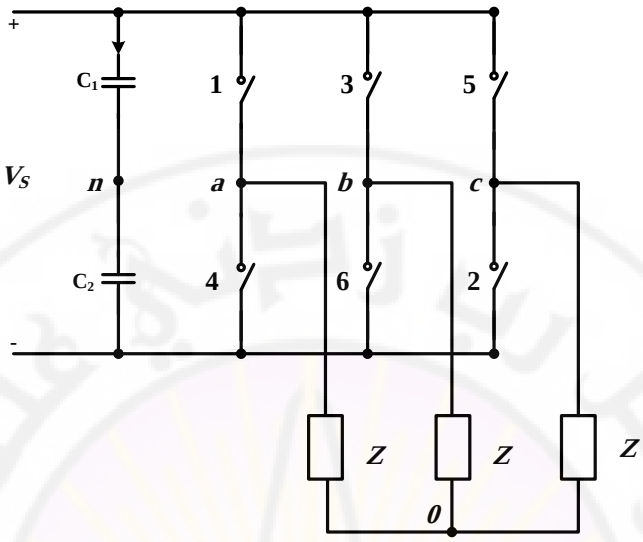
لدينا معرج توتر ثلاثي الطور Voltage Source Inverter(VSI) . يتم توصيل القواطع المستخدمة في الجسر لمدة 180^o درجة (نصف الدور)، حيث أن القواطع (T_1 و T_4) للذراع الأول و (T_3 و T_6) للذراع الثاني و (T_5 و T_2) للذراع الثالث، توصيل T_4 يفصل T_1 وبالعكس.

1-1- ارسم شكل التوترات الناتجة للأطوار وللخطوط. عند عرض نبضات قدح أو فترة توصيل 180^o درجة.

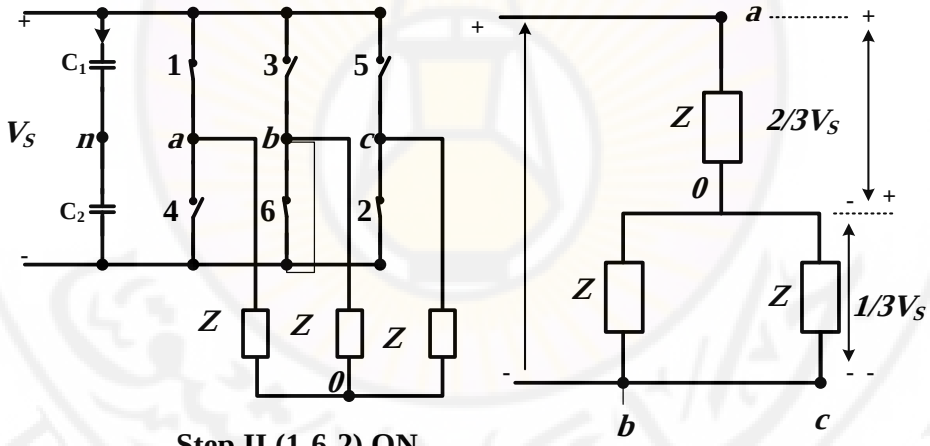
2-1- ارسم نفس الأشكال للتوترات الناشئة على الأطوار والخطوط عند عرض نبضات قدرها 120 درجة و 150^o درجة.

الحل:

دارة الاستطاعة مبينة بالشكل(14-2) التالي.



الشكل(14–2) دارة الاستطاعة لمعرج ثلاثي الطور **VSI**.

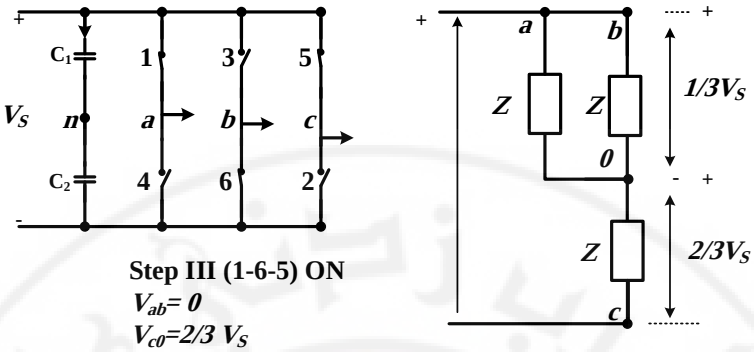


Step II (1-6-2) ON

$V_{ab}= V_S,\ V_{a0}=2/3\ V_S,\ V_{b0}=V_{c0}=-1/3\ V$

الشكل(15–2) حالات عمل المعرج المختلفة

– الزمن من (120^o حتى 180^o)



Step III (1-6-5) ON

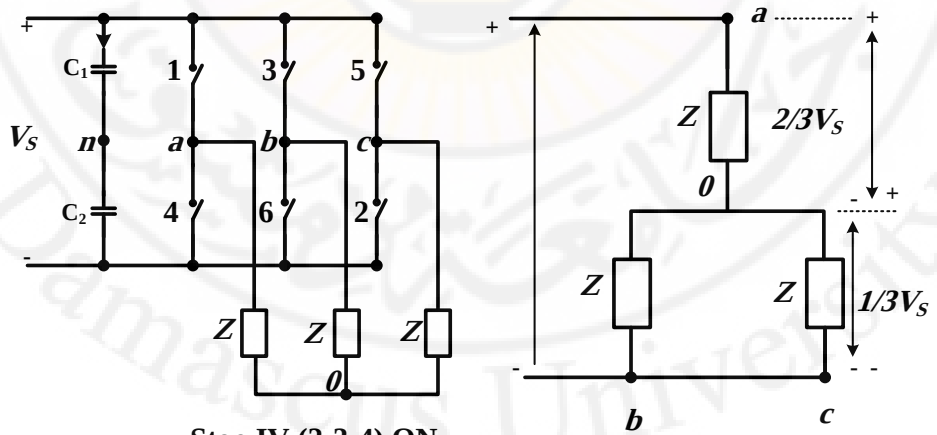
$V_{ab}= 0$

$V_{c0}=2/3\ V_S$

$V_{a0}=V_{b0}=-1/3\ V_S$

الشكل(16–2) حالة تشغيل لمعرج ثلاثي الطور **VSI**.

– توضح الأشكال التالية نبضات القدح للثيرستورات أو الترانزستورات المستخدمة في الجسر، تقدح القواطع T_1 و T_3 و T_5 بالتتابع كل قاطع بعد 120 درجة من الآخر. وتقدح القواطع (T_2 –T_6 –T_4) أيضاً بالتتابع، كل قاطع بعد 120 درجة من الآخر، لكن T_4 يقدح بعد 180 درجة من T_1 وكذلك T_6 بعد 180 درجة من T_3. T_2 يقدح بعد 180 درجة من T_5. وإن تسلسل القدح يكون من T_1 إلى T_2 ثم T_3 – T_4 – T_5 – T_6. كل 60 درجة يتم قدح أحد القواطع.



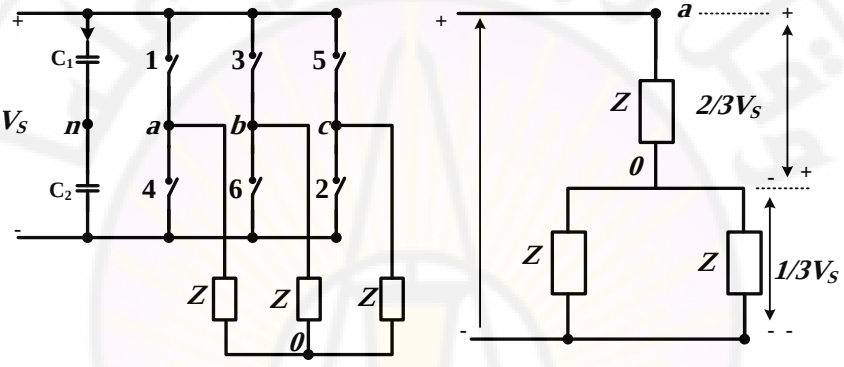
Step IV (2-3-4) ON

$V_{ab}= V_S,\quad V_{a0}=2/3\ V_S,\quad V_{b0}=V_{c0}=-1/3\ V_S$

الشكل(17–2) مراحل التوصيل المختلفة، التيارات والتوترات، الدارات المكافئة عند عرض نبضات **180°**.

– نلاحظ أنه خلال 60^o يوجد قاطع موجب في حالة توصيل وقاطعين من القواطع السفلية في حالة توصيل، أي خلال المرحلة الأولى Step 1 لدينا القواطع (1، 6، 5) موصلة، وعندما يستمر القاطع الأول بالتوصيل لـ 60 درجة ثانية ،تكون القواطع (6، 2) في حالة توصيل (الجهة السفلية). وهكذا تتابع القواطع بالوصل والفصل.

توضح الأشكال التالية المراحل الأربعة للتشغيل، وسوف تساعد هذه الأشكال في معرفة مسار التيار وقيمته بدلالة التوتر وعدد الأطوار، الزمن من (0) حتى (60^O).



Step IV (2-3-4) ON

$V_{ab}= V_S,\quad V_{a0}=2/3\ V_S,\quad V_{b0}=V_{c0}=-1/3\ V_S$

الشكل(18–2) الدارات المكافأة خلال فترة العمل

– خلال المرحلة الأولى Step I حيث $0 \le \omega t < \frac{\pi}{3}$ الثيرستورات الموصلة 5,6,1 التيار القادم من المنبع I يحسب بالشكل:

$$i_1 = \frac{V_S}{Z + \frac{Z}{2}} = \frac{2}{3}\frac{V_S}{Z}$$

التوتر للطور الواحد يساوي:

$$V_{a0} = V_{c0} = i_1 \frac{Z}{2} = \frac{V_S}{3}$$

$$V_{b0} = i_1.Z = \frac{2}{3}V_S \Rightarrow V_{b0} = -\frac{2}{3}V_S$$

- خلال المرحلة الثانية Step II، حيث $\frac{\pi}{3} \le \omega t < \frac{2\pi}{3}$ الثيرستورات الموصلة 6,1,2

والتيار المار من المنبع: $i_2 = \frac{2}{3}\frac{V_S}{Z}$

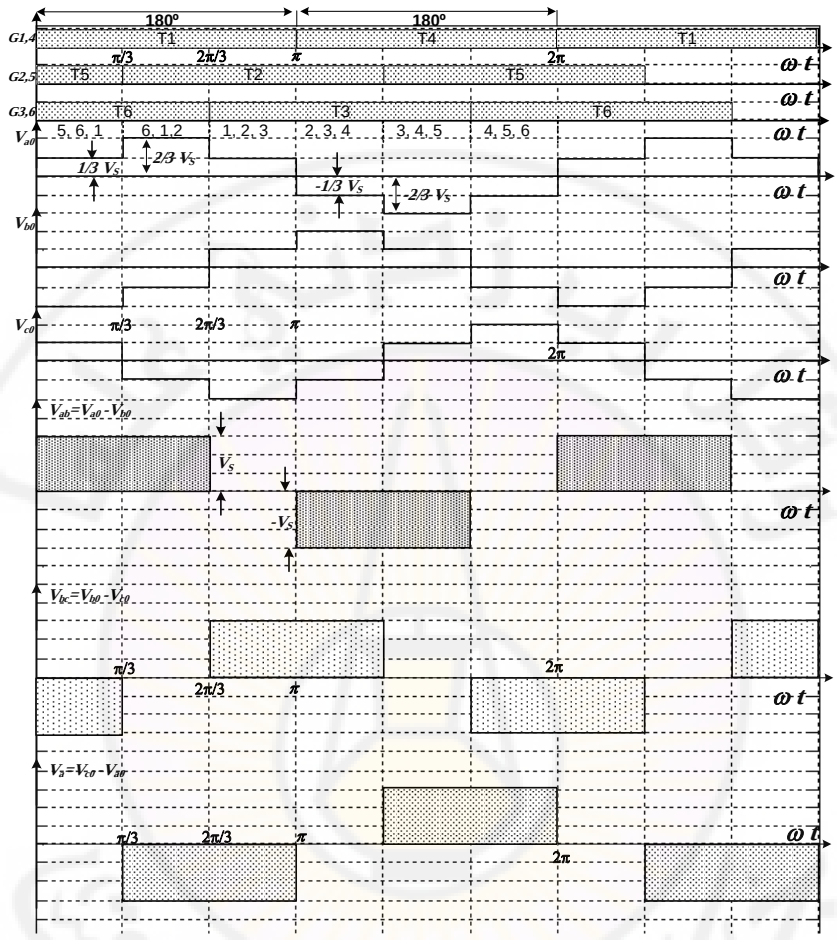
وعليه فإن توترات الأطوار تعطى بالشكل:

$$V_{a0} = i_2.Z = \frac{2}{3}V_S\,; \qquad V_{b0} = V_{c0} = i_2.\frac{Z}{2} = \frac{V_S}{3}$$

وعليه:

$$V_{a0} = \frac{2}{3}V_S\,; \qquad V_{b0} = V_{c0} = -\frac{V_S}{3}$$

- يوضح الشكل(19-2) الرسم البياني لتوترات الأطوار والخطوط المستنتجة حسب المراحل السابقة، ونرى أنه من أجل كل دور لتوتر الطور في الخرج أو الخط يلزم استخدام ست مراحل كل مرحلة بعرض 60 درجة.



الشكل(19–2) توترات الأطوار والخطوط عند عرض نبضات **180** درجة.

2.1.11 مثال (2-11) دراسة فرن تحريضي

نقترح دراسة تغذية فرن تحريضي باستخدام معرج أحادي الطور ذي تردد متوسط. سوف نعتبر أنه يمكن تمثيل الفرن التحريضي بملف ذي حثية L على التسلسل مع مقاومة R.

1- لدى تشغيل الفرن عند توتر وتيار جيبي ذي تردد 600Hz استهلك الفرن:

P=1600KW و I=9100A و V=2000V احسب R و L.

2- تم تنفيذ الفرن بأربعة قواطع وأربعة ديودات، مغذى من منبع توتر مستمر E، قيادة القواطع تتم عند عرض نبضات 180 درجة.

2-1- ارسم مخطط دارة الاستطاعة.

2-2- إذا تم إضافة مكثف C على التسلسل مع الفرن بحيث يصبح تيار الفرن متقدم على التوتر. بين عندئذ ما يلي:

- التوتر على أطراف الحمل.
- تيار الحمل (اعتبر أن التيار جيبي وبقيمة فعالة I).
- التيارات في أحد الديودات وأحد القواطع.
- التوتر على طرفي القاطع.
- التيار القادم من المنبع E.

3- بين أن التركيب يمكنه العمل باستخدام أربعة قواطع ثيرستورية. برّر استخدام المكثف واحسب الإزاحة بالطور بين التيار والمركبة الأساسية للتوتر علماً أن القيمة الفعالة للتيار في الحمل I=9100A احسب التيار المتوسط للمدخرة.

4- احسب التيار المتوسط في الثيرستور وفي ديود. حدد الاجهادات بالتوتر على العناصر عند تيار (I=9100A).

5- احسب السعة C التي تمكننا من العمل عند شروط اسمية. قارن تردد العمل بتردد الطنين. ما التوتر على طرفي المكثف من أجل هذين الترددين؟.

الحل:

1- الاستطاعة $P = R.I^2$ ومنه: $1600 = R.(9100)^2 \Rightarrow R = 1.3m\Omega$

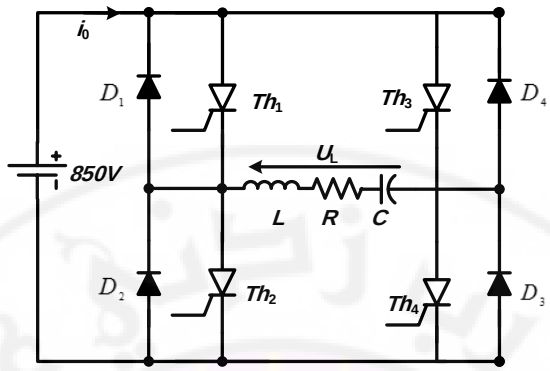
توتر الحمل V=2000V ويساوي:

$$V^2 = \left(R^2 + L^2\omega^2\right).I^2$$

$$(2000)^2 = \left(\left(1.3\times10^{-3}\right)^2 + L^2 \times (2\pi \times 600)^2\right).100^2$$

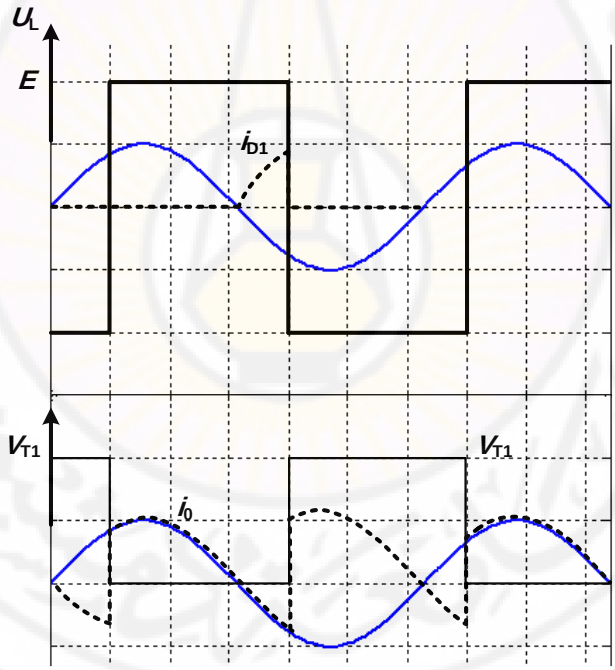
$$L = 58.1\mu H$$

2- التركيب مبين في الشكل(20-2) التالي:



الشكل(20–2) دارة الاستطاعة للفرن التحريضي.

2-2- منحنيات التشغيل:



الشكل(21–2) توتر الحمل وتياره. التوتر العكسي على $\mathbf{T_1}$ وتيار المنبع.

I_0: تيار المدخرة.

3- التوتر على طرفي T_1 سالب طالما أن الديود D_1 موصل. القيمة السالبة للتوتر تستمر لفترة $\Delta t = \frac{\varphi}{w}$. إذا كانت هذه الفترة أكبر من زمن الفصل t_q فإن الثيرستور سيفصل بشكل جيد وتشغيل الجسر سيكون آمناً.

– من أجل I=9100A لدينا الاستطاعة المستجرة

$$P = R.I^2 = 1600KW$$

أو أنّ

$$P = V_{fond}.I.Cos\varphi$$

$$1600 \times 10^3 = \frac{4 \times 500}{\pi\sqrt{2}} \times (9100)^2 Cos\varphi$$

حيث $V_{fond} = \frac{4E}{\pi.\sqrt{2}}$ وبالتعويض نجد:

$$Cos\varphi = 0.23 \Rightarrow \varphi = 73.7°(Lead)$$

– التيار المتوسط القادم من المدخرة E يعطى من العلاقة:

$$I_{av} = \frac{P}{E} = \frac{1600}{850.2} = 1882A$$

$$V_{fond} = \frac{4E}{\pi.\sqrt{2}}$$

$$E = \frac{V.\pi.\sqrt{2}}{4} = 850V$$

للجسر الأحادي الطور

$$V = 0.9E$$

$$V_{fond} = 765V$$

4- التيار المتوسط للثيرستور يحسب من العلاقة:

$$i_{Tav} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi-\varphi} I.\sqrt{2}Sin(\theta+\varphi)d\theta$$

$$i_{Tav} = \frac{I.\sqrt{2}}{2\pi}(1+Cos\varphi)$$

$$i_{Dav} = \frac{9100\times\sqrt{2}}{2\times 3.14}\times 1.23 = 2519A$$

$$i_{Tav} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\varphi}^{0} I.\sqrt{2}Sin(\theta+\varphi)d\theta$$

$$i_{Dav} = \frac{I.\sqrt{2}}{2\pi}(1-Cos\varphi)$$

$$i_{Dav} = \frac{9100\times\sqrt{2}}{2\times 3.14}\times 0.77 = 1577A$$

يمكن التأكد من أن تيار المنبع المتوسط يساوي:

$$I_{0av} = \frac{(i_{Tav}+i_{Dav})}{2} = 2048A$$

وهي قريبة من التيار 1882A.

- التوتر العكسي على الثيرستور يساوي هبوط التوتر على الديود وهو ذو قيمة صغيرة.
- التوتر الأمامي المباشر الواجب أن يتحمله الثيرستور

$$V_T = E = 850V$$

- التوتر العكسي على الديود الواجب تحمله يساوي

$$V_{Dinv} = E = 850V$$

5- حساب سعة المكثف:

تعطى ممانعة الحمل من العلاقة:

$$Z = \frac{V_{fond}}{I} = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

حيث:

$$V_{fond} = \frac{4E}{\sqrt{2}.\pi} = \left(\frac{4 \times 850}{\sqrt{2} \times 3.14} \right)^{\sqrt{2}} = 1083V$$

$$Z = \frac{1083}{9100} = 0.119\Omega$$

ومنه:

$$C = 0.88mF$$

- تردد الطنين:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

حيث

$$LC\omega_0^2 = 1$$

$$58.1 \times 10^{-6} \times 0.88 \times 10^{-3} \times (2\pi f_0)^2 = 1$$

$$f_0 = 703Hz.$$

- نلاحظ أن $f < f_0$ مما يوافق القول أن $\frac{1}{C\omega} > L\omega$ هذا يعني أن النظام يعمل عند حالة سعوية مسيطرة والتيار متقدم على التوتر.

- عند تردد العمل لدينا توتر المكثف الأعظمي:

$$V_{C\max} = \frac{I.\sqrt{2}}{C.\omega} = 3879V$$

- عند تردد الطنين لدينا:

$$V_{C0} = \frac{1}{C\omega_0} = V_C \frac{f}{f_0}$$

هذا يعني أن هنالك ارتفاع في توتر المكثف إذا كان تردد العمل أكبر من تردد الطنين.

2.1.12 مثال (12-2) معرج توتر ثلاثي الطور

معرج توتر ثلاثي الطور يغذي محرك تحريضي باستطاعة P=22KW، عند تردد f=36Hz. بمعرفة أن ملفات المحرك موصلة بشكل نجمي ويمر بها تيار جيبي ذو قيمة

فعالة I=80A، عند عامل استطاعة Cos φ = 0.8. احسب القيمة الفعالة للمركبة الأساسية للتوتر (طور– حيادي). يقاد الجسر بنبضات عرض 180^o. حدد تردد القيادة f_H للقواطع. واحسب E_0. واحسب التيار المتوسط I_0 القادم من المنبع. وارسم دارة الاستطاعة للنظام.

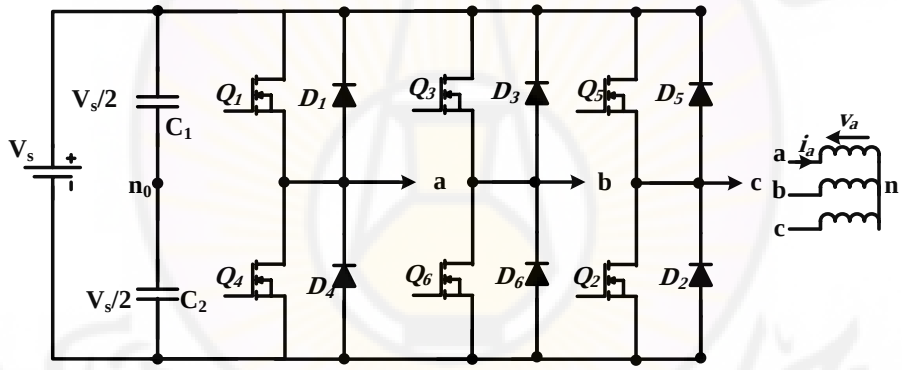
الحل:

– الاستطاعة المستجرة من المحرك هي 22KW وعليه:

$$P = 22\times10^3 = 3V_{fond}.I.Cos\varphi$$

$$22\times10^3 = 3.V_{fond}\times80\times0.8$$

$$V_{fond} = 114.6V.$$



الشكل(23–2) دارة المعرج الثلاثي الطور.

– لحساب توتر المدخرة لدينا العلاقة:

$$V_{fond} = \frac{E_0.\sqrt{2}}{\pi}$$

$$E_0 = \frac{\pi\times114.6}{\sqrt{2}} = 255.5V.$$

– التيار المتوسط بما أن الاستطاعة قادمة كلها من المدخرة (المنبع) لدينا:

$$P = E_0.I_{av}$$

$$I_{av} = \frac{22\times10^3}{255.5} = 86.11A$$

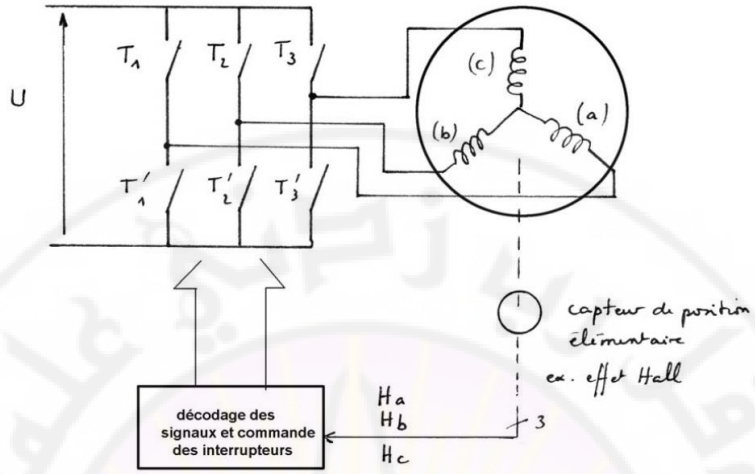
2.1.13 مثال (13-2) محرك تزامني ذاتي القيادة

في المحرك التزامني ذاتي القيادة Self Controlled Synchro nous Motors بفرض وجود قطب واحد في الدائر (N&S) وثلاثة ملفات في الثابت. باستخدام جسر ثيرستوري مقاد ذي ست عناصر من الثيرستور بين لنا خلال دورة واحدة من دورات الدائر، شعاع الحقل المحصل لتوترات الثابت في الثغرة الهوائية، وحدّد عناصر القطع العاملة، علماً أن الجسر يغذى بتوتر مستمر وكل عنصر يعمل 120 درجة كهربائية. وضح المراحل مستنداً إلى التيارات التي تمر في ملفات الآلة.

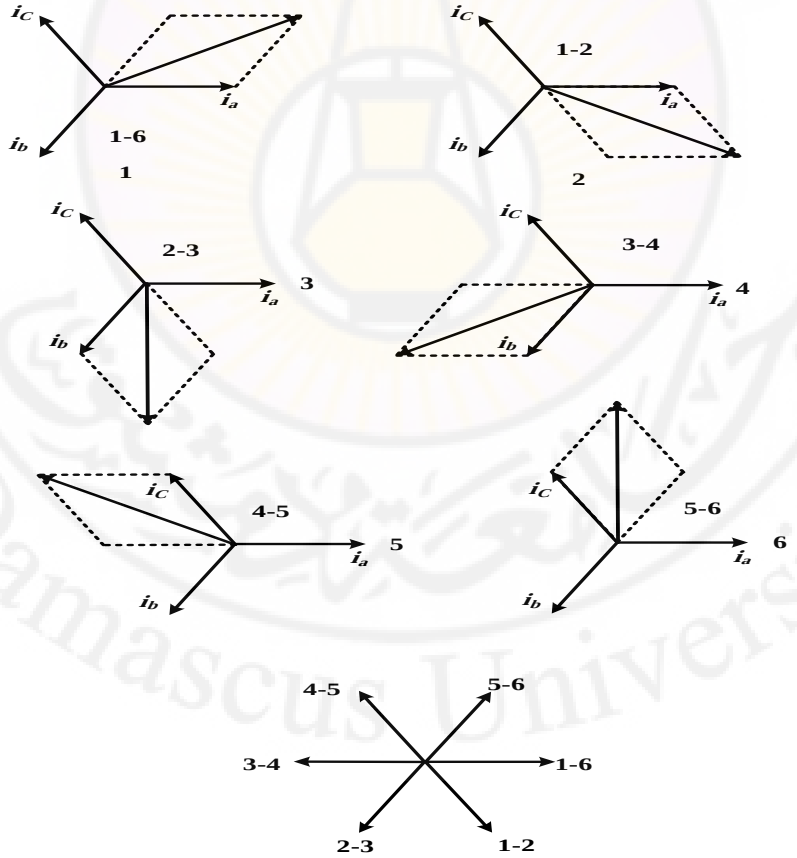
الحل:

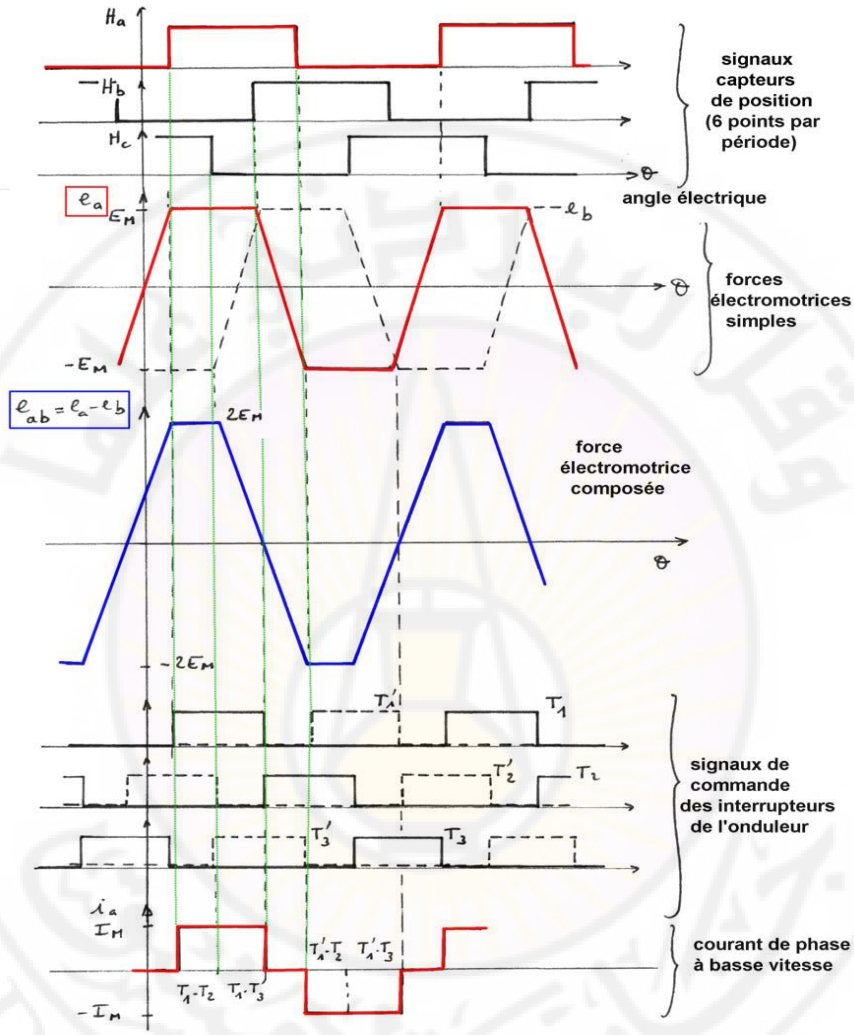
تتابع عمل العناصر هو كما في المعرجات الثلاثية أو جسور التقويم الثلاثية كل 60 درجة يعمل عنصر ،وعليه إذا بدأ بالعنصر الأول الموجب في الطور الأول ،بتمرير التيار الموجب إلى الحمل ،سيعود التيار بالعنصر السادس التابع للطور الثاني السالب ،ويستمر مرور التيار السالب في العنصر الثاني السالب للطور الثالث ،أي خلال فترة عمل العنصر الأول يمر التيار في عنصرين من الجهة السالبة .بعد 120 درجة يبدأ عنصر موجب من الطور الثاني بالتوصيل وهكذا تتابع العناصر .

بتعبير آخر ،عندما يعمل القاطع (1) لفترة (120) درجة يشاركه بالعمل خلال ال (60) درجة الأولى القاطع (6) ثم القاطع (2). وهكذا عندما يعمل القاطع (3) يشاركه بالعمل (2) ثم (4). وعندما يعمل القاطع (5) يشاركه العمل (4) ثم (6). وبناءً عليه يمكن رسم أشعة التوتر في ملفات الثابت ومتابعة مراحل العمل خلال دورة واحدة. بأخذ تتابع عمل باتجاه عقارب الساعة مثلاً. نجد المراحل التالية:



الشكل(24-2) دارة الاستطاعة.





الشكل(25-2) المخططات الشعاعية تبعاً لتسلسل عمل القواطع وشكل تيارات الأطوار ونبضات القدح ،وإشارات موضع الدائر للتحكم بالقدح .

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

3 الفصل الثالث

المدرجات الثيرستورية، منظمات الطور

Phase Regulator, AC-AC- Converter

3.1 مجموعة مسائل محلولة

3.1.1 مثال (3-1) مدرج تيار أحادي الطور

مدرج أحادي الطور، توتر الدخل المتناوب الجيبي ذو قيمة فعالة V=240V عند تردد 50Hz، إذا كانت ممانعة الحمل Z=(7.1+ j7.1)Ω. احسب تيار الحمل المار عند الزاوية ϕ، وما القيمة الفعالة لتوتر الخرج، وتيار الخرج الفعال ؟ وذلك عندما تكون زاوية التأخير للمدرج $\alpha = \frac{\pi}{6}$. وما عامل الاستطاعة للدخل؟.

الحل:

كما نعلم لدينا في المدرج (Phase Regulator) نتحكم بتشغيل الثيرستور الأول في النصف الموجب والثيرستور الثاني المربوط باتجاه معاكس في النصف السالب من موجة توتر الدخل المتناوب. وهنالك حدود ومجال لتغيير الزاوية (α)، زاوية الإزاحة تبعاً لزاوية عامل الاستطاعة في الحمل φ. ويمكن في الجزء النظري تفهم حالات التشغيل الثلاث.

في حالة الحمل الأومي الصرف يعطى تيار الحمل بالشكل:

$$i_0(t) = \frac{V_0}{R} = \sqrt{2}V_m Sin\frac{\omega t}{R}$$

التوتر الناتج V_0 يمكن حسابه من التكامل:

$$V_0 = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\sqrt{2}.V.Sin\omega t.dt$$

$$V_0 = \frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1+Cos\alpha)$$

وعليه فإن التيار المار في الحمل:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{\sqrt{2}V(1+Cos\alpha)}{R.\pi}$$

- زاوية عامل الاستطاعة للحمل:

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = \frac{\pi}{4}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{(7.1)^2 + (7.1)^2} = 10\Omega$$

بما أن: $\alpha < \varphi \Rightarrow \frac{\pi}{6} < \frac{\pi}{4}$

فإن تيار الحمل متواصل وعليه فإن استطاعة الحمل:

$$P_0 = I_{r.m.s}^2 .R$$

$$= \frac{V^2}{Z}.Cos\varphi = \frac{(240)^2}{10} Cos\frac{\pi}{4}$$

$$P_0 = 4.07KW$$

- التيار الفعال:

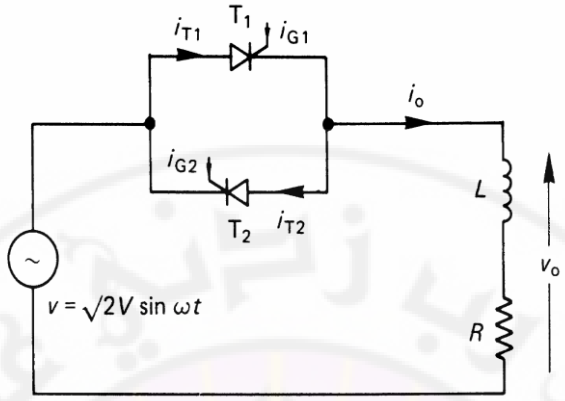
$$I_{r.m.s} = \sqrt{\frac{P_0}{R}} = \sqrt{\frac{4.07}{7.1}}$$

$$I_{r.m.s} = 23.8A$$

- عامل الاستطاعة:

$$P.F = \frac{P_0}{S}$$

$$P.F = \frac{4.07 \times 10^3}{240 \times 23.8} = 0.7$$



الشكل(3–1) مبدل الطور الأحادي

3.1.2 مثال (3-2) شرح آلية عمل المدرج الأحادي الطور

اشرح آلية عمل المدرج الأحادي الطور عند حالة حمل أومي، وتحريضي، وباعتماد أي زاوية تأخيربالطور، احسب العلاقة الناظمة لحساب القيمة الفعالة لتيار الحمل وبين كيف يتم تنظيم التوتر.

الحل:

– يوضح الشكل(3–2 a) أدناه يوضح دارة الاستطاعة للمدرج الأحادي الطور مع حمل أومي، باعتبار الحثية معدومة ، يتم هنا التحكم بزاوية الإزاحة بالطور للثيرستورين T_1 و T_2، ولدى تغيير الزاوية ψ من الصفر حتى π يمكن تغيير قيمة توتر الخرج والتحكم بتيار الحمل.

– تيار الحمل يعطى بالعلاقة: $i = \frac{V_m}{R} Sin\omega t$

– يعطى التيار من العلاقة:

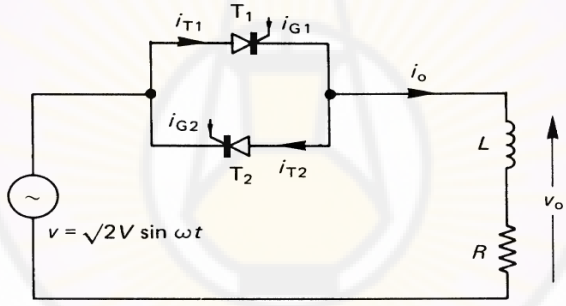
$$I^2 = \frac{1}{\pi}\int_{\psi}^{\pi} \frac{V_m^2}{R^2} Sin^2 Sin\omega t dwt$$

$$= \frac{V_m^2}{R^2}\left[\frac{\omega t}{2\pi} - \frac{Sin2\omega t}{4\pi}\right]_{\psi}^{\pi}$$

$$I^2 = \frac{V_m^2}{R^2}\left[\frac{1}{2} - \frac{\psi}{2\pi} + \frac{Sin2\psi}{4\pi}\right]$$

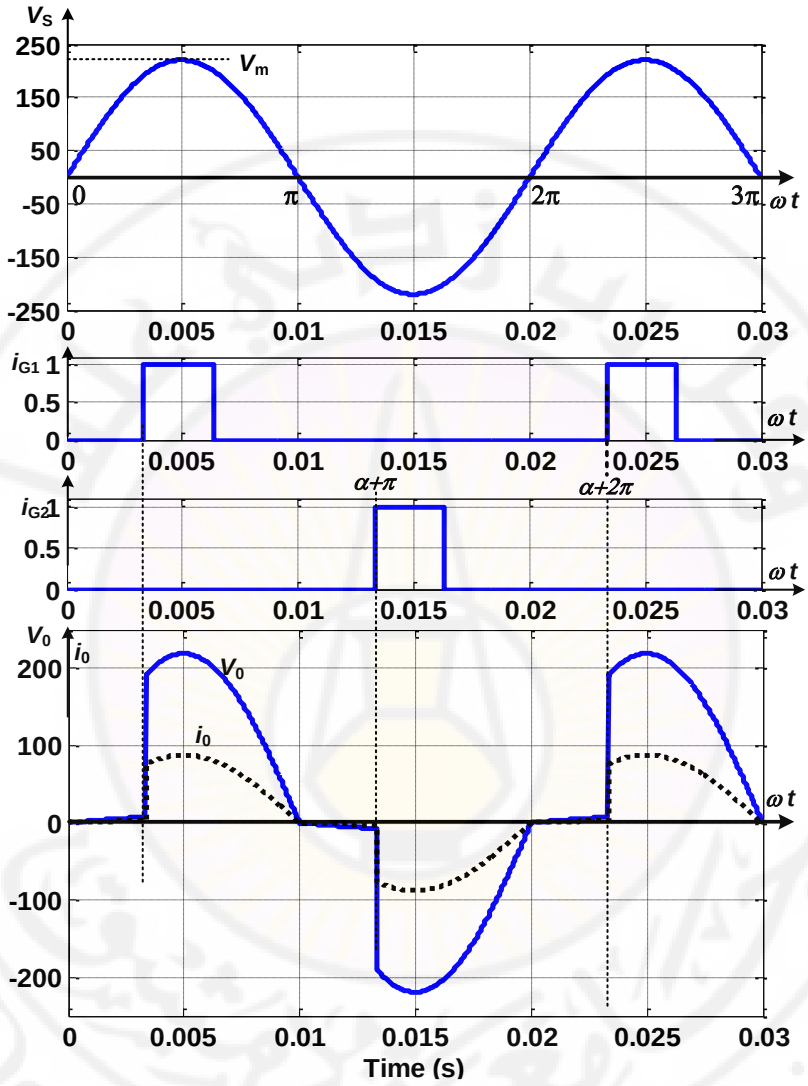
$$I = \frac{V_m}{R}\sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{Sin2\psi}{2\pi}}$$

Ψ تتغير من الصفر حتى π، I تتغير من القيمة العظمى $\frac{V}{R}$ حتى الصفر.

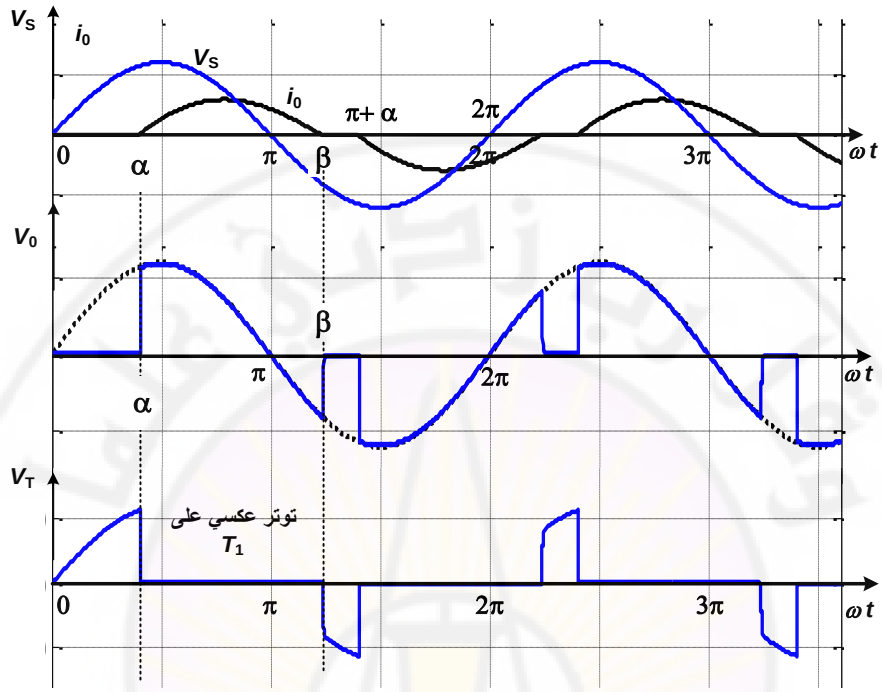


الشكل(3-2) **a** -دارة الاستطاعة للمدرج الأحادي الطور.

من الأشكال المرسومة التالية، نجد أن موجة التوتر تنقطع عند الحمل الأومي لدى مرورها بمحور الزمن، كما يتوقف مرور التيار ,بينما في حالة الحمل التحريضي لا ينقطع تيار الحمل عند مرور موجة التوتر بالصفر ولدى انعدام القدرة المخزنة في الحثية ينقطع التيار ويعود التوتر للصفر. يظهر التوتر العكسي في منطقة عدم التوصيل للثيرستور .



الشكل(3-2) شكل التوتر ونبضات القدح والتوتر العكسي على T_1 عند حمل أومي



الشكل(4–3) شكل التوتر ونبضات القدح والتوتر العكسي على $\mathbf{T_1}$ عند حمل تحريضي .

3.1.3 مثال (3-3) منظم توتر أحادي الطور

منظم توتر متناوب أحادي الطور مبينة دارته في الشكل(5–3)، حُمل بمقاومة أومية $R=10\Omega$. توتر الدخل $V_S=120V$ و $60Hz$. زاوية التأخير للثيرستور T_1، $\alpha=\frac{\pi}{2}$.

بيّن ما يلي:

a- القيمة الفعالة لتوتر الخرج V_0.

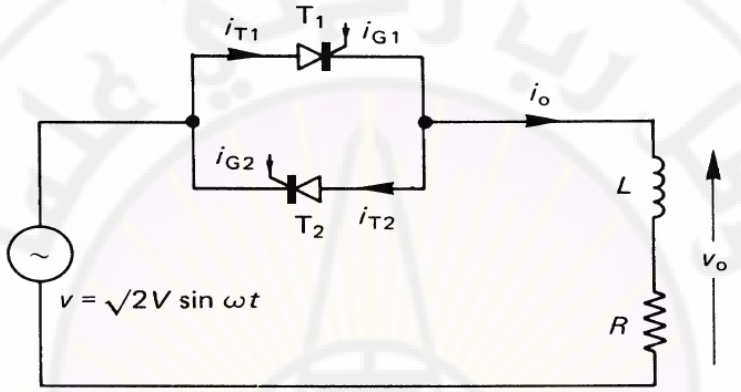
b- عامل استطاعة الدخل PF.

c- تيار الدخل المتوسط.

الحل:

$$V_0 = \left\{ \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} 2V_S Sin^2 \omega t.d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 2V_S Sin^2 \omega t.d(\omega t) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$V_0 = \left\{ \frac{2V_S^2}{4\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} (1 - Cos2\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} (1 - Cos2\omega t) d(\omega t) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$



الشكل(5-3) دارة الاستطاعة.

$$V_0 = \left[\frac{1}{2\pi} \left(2\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} .....(1)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V_S Sin^2 \omega t.d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} \sqrt{2} V_S Sin^2 \omega t.d(\omega t) \right]$$

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2} V_S}{2\pi} (Cos\alpha - 1).....(2)$$

A – من العلاقة الواردة أدناه نحسب القيمة الفعالة لتوتر الخرج.

– القيمة المتوسطة لتوتر الخرج:

بأخذ القيم الرقمية:

$$V_0 = 120\sqrt{\frac{3}{4}} = 103.92V$$

b- القيمة الفعالة لتيار الخط:

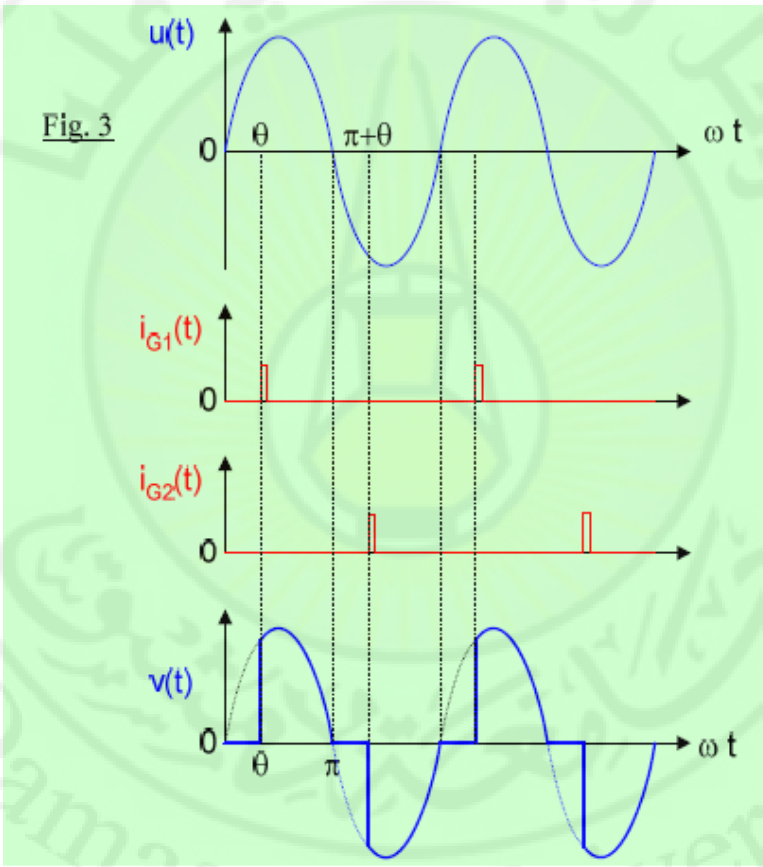
$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{103.92}{10} = 10.392A$$

استطاعة الحمل

$$P_0 = I_0^2.R = (10.392)^2 \times 10 = 1079.94W$$

بما أن تيار الدخل هو نفس تيار الحمل، فإن استطاعة الدخل بـ VA هي:

$$V.A = V_S.I_S = V_S.I_0 = 120 \times 10.392 = 1247.04V.A$$



الشكل(6-3) موجة توتر وتيار الخرج ونبضات القدح لـ T_1,T_2 .

عامل الاستطاعة للدخل:

$$PF = \frac{P_0}{V.A} = \frac{1079.94}{1247.04} = 0.866(Lagging)$$

$$PF = \frac{P_0}{V.A} = \frac{V_0}{V_S} = \left[\frac{1}{2\pi}\left(2\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$PF = \sqrt{\frac{3}{4}}$$

c- القيمة المتوسطة لتوتر الدخل:

$$V_{dc} = -120\frac{\sqrt{2}}{2\pi} = -27V$$

وتيار الدخل المتوسط:

$$I_D = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{-27}{10} = -2.7A$$

3.1.4 مثال (3-4) مدرج توتر أحادي (التحكم بعرض نبضة القدح)

مبدل طور (مدرج توتر) أحادي الطور Mono Phase Regulator، يغذى من منبع توتر متناوب عند توتر 220 فولت. حمل بحمل تحريضي ذي عامل استطاعة قدره 0.7، مقاومة الحمل 4 أوم، تردد العمل 50 هرتز. طبق على الثيرستورات زاوية إزاحة قدرها 25 درجة كهربائية. ارسم شكل التوتر والتيار المار والممكن تطبيقه على الحمل في الحالتين التاليتين:

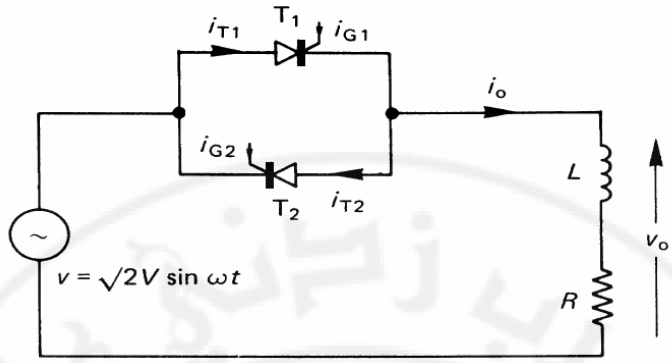
1- حالة كون عرض نبضة القدح ضيقة لا تتجاوز 3 درجات كهربائية.

2- حالة كون عرض نبضات القدح عريضة وتتجاوز 60 درجة كهربائية.

افرض أية قيمة تحتاجها أو احسبها بدلالة باقي القيم.

الحل:

مبدل الطور الأحادي هو من الشكل(7−3) التالي:

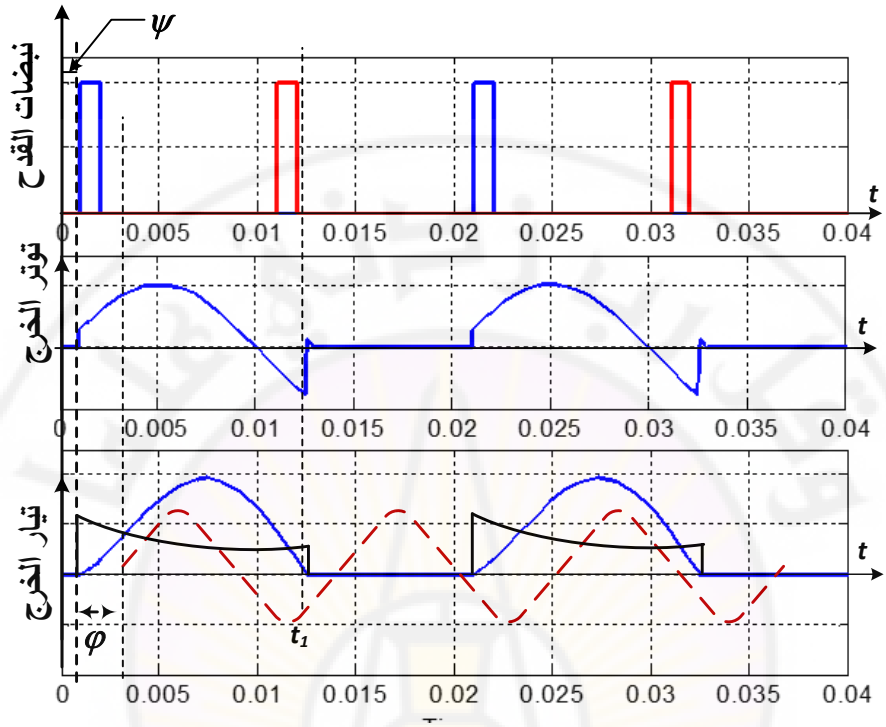


الشكل(7–3) دارة الاستطاعة.

بما أن Cos φ = 0.7، أي ما يعادل زاوية 45º. بما أن زاوية الإزاحة بالطور المطبقة على النظام 25 درجة، هذا يعني أن مبدل الطور يعمل عند المجال φ >ψ >0، لرسم شكل التوتر والتيار في الحالتين المطلوبتين لدينا ما يلي:

الحالة الأولى: عرض النبضة لا تتجاوز (3) درجات:

$$i = i_f + i_l = \frac{V_m}{Z} Sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_m}{Z} Sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}(t-)}$$



الشكل(8-3) نبضات القدح – توتر الخرج وتيار الخرج ومكوناته.

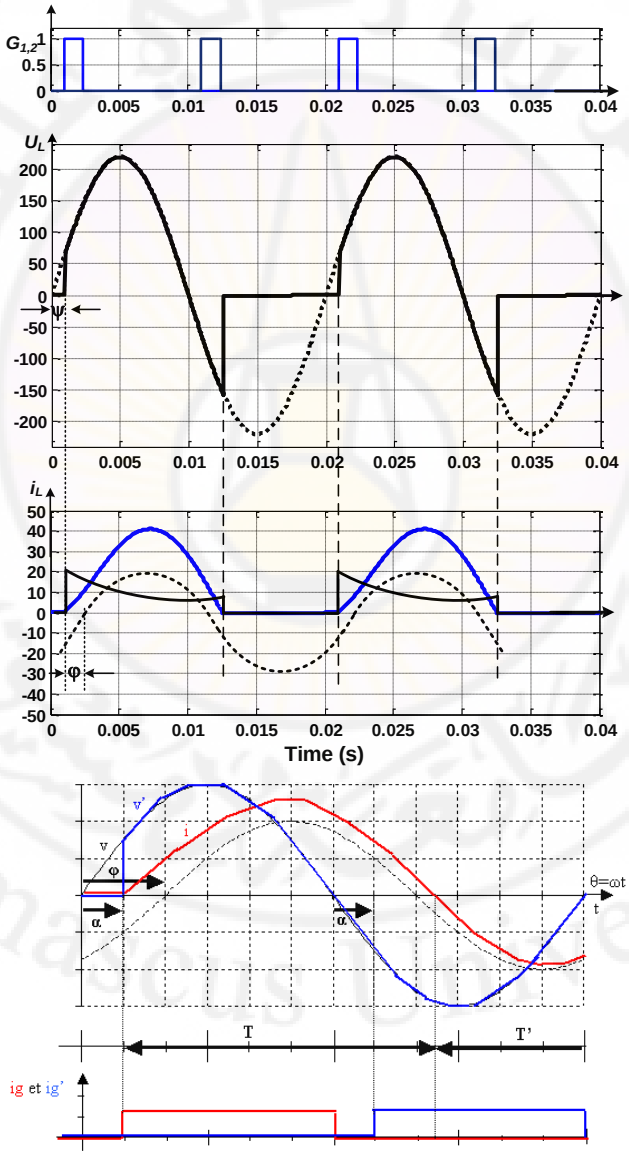
لدى تطبيق النبضة على الثيرستور الأول، ينتقل هذا الثيرستور للتوصيل وسيعطى التيار حسب العلاقة السابقة. هنا i_f و i_1 من نفس الإشارة وسينعدم التيار عند الزمن $\omega t_1 > \pi+\varphi$ وهو بالتأكيد أكبر من $\pi+\psi$ وبما أن عرض النبضة 3 درجات عندئذ ستكون النبضة قد انتهت قبل السماح للثيرستور الثاني بالتوصيل، لذا لا يمكن أن ينتقل لحالة التوصيل.

في الدور الثاني يعود الثيرستور الأول أيضاً للعمل. وهكذا إذاً في هذه الحالة لا يعمل مبدل الطور خلال نصفي الدور، وهو يعمل كمقوم أحادي (ثيرستور وحيد). إذاً لا يمكن الاستمرار بالعمل في هذه الحالة كمبدل طور.

– بفرض أننا طبقنا النبضة على الثيرستور الأول. نجد أن هذا الثيرستور سيبدأ بالتوصيل ويستمر التيار حتى الزمن t_1. عند هذا الزمن يكون الثيرستور الثاني Th_2 واقعاً تحت توتر موجب، وعليه نبضة موجبة مطبقة من الزمن $(t=\pi+\psi)$ وبما أن النبضة عرضها 60 درجة. فإن Th_2 سوف ينتقل للتوصيل وهكذا يستمر تيار الحمل حتى الزمن t_2، حيث

يعاد تطبيق النبضة على Th_1 والذي سوف ينتقل للتوصيل لأن النبضة مازالت مطبقة وهكذا يستمر التوصيل.

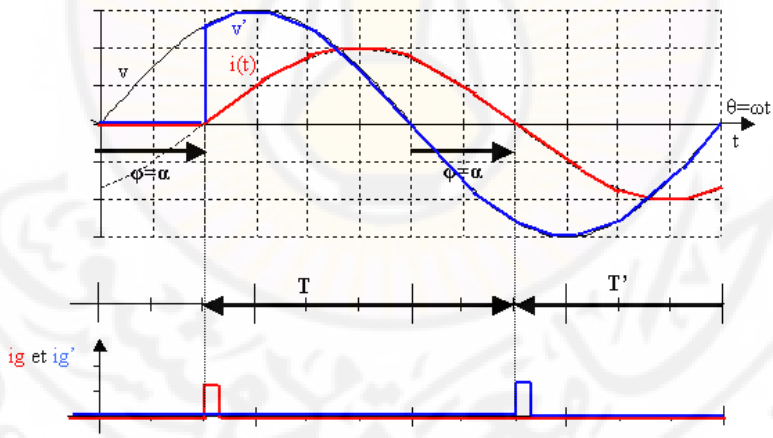
- التيار الفعال $I = \frac{V}{Z}$ والمدرج يعمل عندئذ كقاطع مغلق.



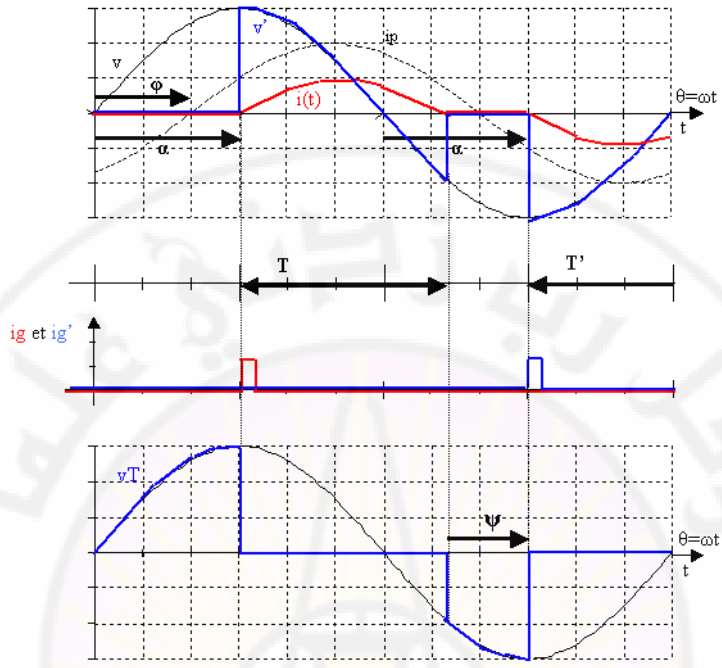
الشكل(9-3) نبضات قدح عريضة- توتر الخرج وتيار الحمل.

ملاحظة :

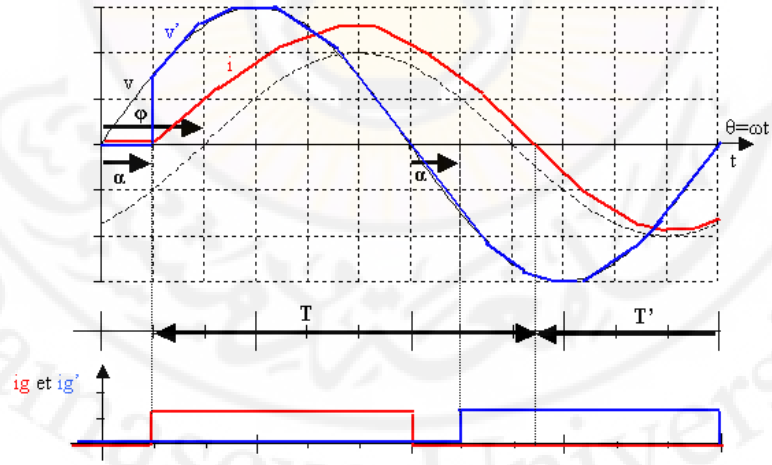
نصادف حالات تشغيل أخرى تكون فيها زواية الإزاحة بالطور مساوية لزاوية عامل الاستطاعة، كما نصادف حالات تكون فيها زاوية الإزاحة بالطور أكبر من زاوية عامل الاستطاعة، والأشكال التالية توضح هذه الحالات ونرى كيف أنه عندما تكون $\alpha=\varphi$، ونبضة القدح كافية العرض فإن المدرج سيعمل كقاطع الكتروني ويمرر موجة تيار متناوب، وعندما تكون $\alpha > \varphi$، ونبضة القدح ذات عرض كاف سوف يعمل القاطع الأول ويستمر العمل في النصف السالب ويقف عن العمل قبل تطبيق نبضة القدح على الثيرستور الثاني لذا فور تطبيق النبضة على الثيرستور الثاني سوف يبدأ بالعمل ويستمر بالعمل في النصف الموجب ويتوقف عن العمل قبل لحظة تشغيل القاطع الأول مرة ثانية. ينشأ التوتر العكسي على كل ثيرستور في الفترة التي لا يعمل بها ويساوي توتر الطور خلال تلك الفترة.



الشكل(10-3) شكل التوتر عند $\alpha>\varphi$ ، وفترات التوصيل لكل عنصر



الشكل(3-11) منظم توتر يعمل عند زاوية إزاحة بالطور أكبر من زاوية عامل الاستطاعة للحمل , $\alpha > \varphi$



الشكل(3-12) لمنظم توتر يعمل عند زاوية إزاحة بالطور أصغر من زاوية عامل الاستطاعة للحمل $\alpha<\varphi$

3.1.5 مثال (3-5) مدرج ثيرستوري أحادي الطور

لدينا مدرج ثيرستوري أحادي الطور Single- Phase Full-Wave Controller، يغذى من منبع توتر متناوب جيبي وحمل بحمل أومي. حسب الشكل(13−3) أدناه. V_S=220V, 50Hz بين لنا ما يلي:

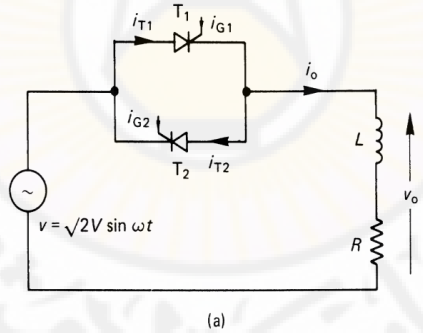
1- آلية العمل وتنظيم التوتر.

2- شكل توتر الخرج والتيار المار بالحمل الأومي.

3- ارسم شكل التوتر V_0 (الخرج) كتابع لزاوية التأخير بالقدح.

الحل:

1= خلال نصف الدور الموجب لتوتر الدخل V_S، يتم التحكم بجريان الاستطاعة عن طريق تغيير زاوية التأخير بالطور (delay angle) للثيرستور T_1 و T_2 للنصف الثاني من الدور. زاوية التأخير يمكن تغييرها من صفر حتى 180 درجة. الشكل (3−50−b) أدناه يوضح شكل التوتر المتناوب المعدل الناتج وتيار الحمل.



الشكل(13−3) دارة الاستطاعة.

2-1- إذا كانت $V_S = V_m \text{ Sin } (\omega t)$ معادلة توتر الدخل، باعتبار $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$ زاوية التأخير المطبقة على الثيرستورات T_1 و T_2. فإن القيمة الفعالة V_0 لتوتر الخرج يمكن حسابها من العلاقة:

$$V_{0,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\left[V_m Sin\omega t\right]^2 d(\omega t)}$$

$$V_{0,rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{Sin2\alpha}{2\pi}}$$

$$V_{0,rms} = V_{S,rms}\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{Sin2\alpha}{2\pi}}$$

لدى تغيير α من (0 حتى π)، $V_{0,rms}$ يمكن أن تتغير من $V_{S,rms}$ حتى 0 والشكل (b–3–50) يوضح ذلك. (الزاوية α يجب أخذها بالراديان لدى التعويض في العلاقات الموضحة أعلاه).

تطبيق:

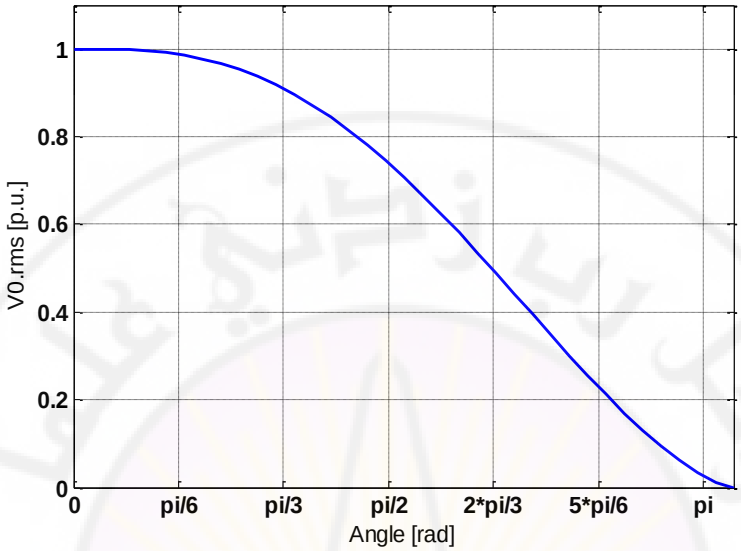
باعتبار $V_S=240V$، $\alpha=30^o$، $R=100\Omega$ احسب $V_{0,rms}$، وتيار الحمل i_0.

$$V_{0,rms} = 240\sqrt{1-\frac{0.5233}{\pi}+\frac{Sin2\times 30}{2\pi}}$$

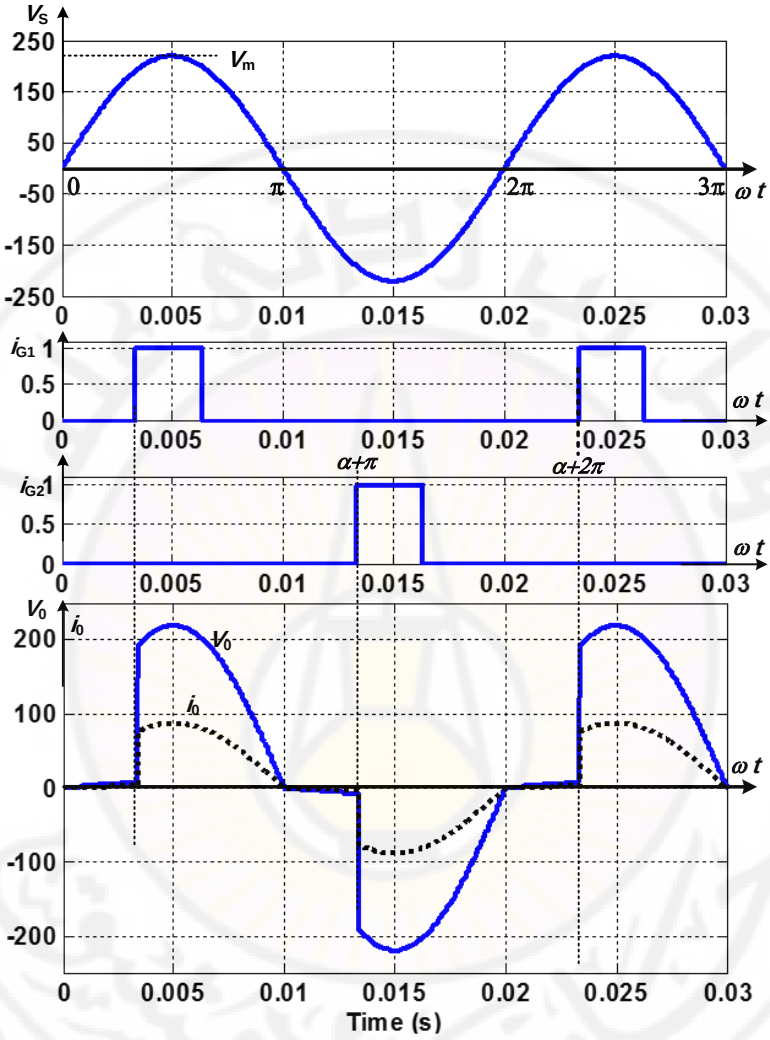
$$= 240\sqrt{1-0.1667+0.147} = 240\sqrt{0.6963}$$

$$V_{0,rms} = 200.3 Volts.$$

$$I_0 = \frac{V_{0,rms}}{R} = \frac{200.3}{100} = 2.003 A.$$



الشكل(14−3) علاقة توتر الخرج الفعال مع زوايا التأخير بالطور.



الشكل(15-3) موجة توتر الدخل **Vs**، وتوتر الخرج **V0**، وتيار الخرج **i0** ونبضات القدح للثيرستور **T1** و **T2**.

3.1.6 مثال (3-6) مدرج أحادي الطور مقاد

مدرج أحادي الطور مقاد (Single- Phase Full- Wave Controller) كما في

الشكل(16−3) أدناه، يغذي حمل تحريضي. توتر الدخل الفعال V_S=120V، 60H. حثية الحمل L=6.5mH و R=2.5Ω. زاوية التأخير بالطور $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ حدد ما يلي:

a- فترة توصيل الثيرستور T_1 (δ).

b- القيمة الفعالة لتوتر الخرج V_0.

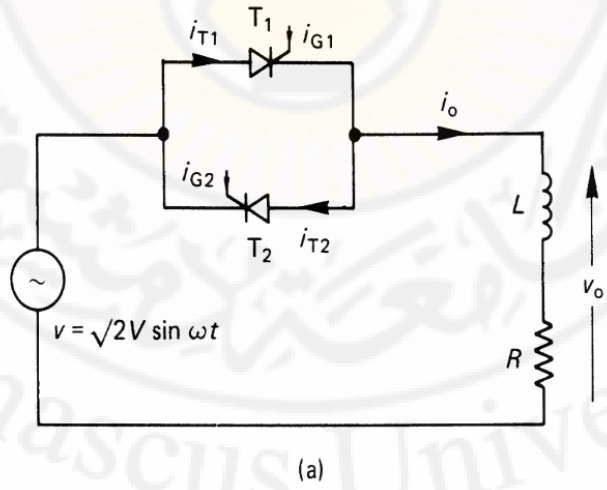
c- تيار الثيرستور الفعال.

d- تيار الخرج الفعال I_0. والمتوسط للثيرستور I_A وعامل استطاعة الدخل.

F − حلل عمل المدرجات الأحادية الطور عند حمل أومي وحمل تحريضي وارسم أشكال التوتر والتيار والتوتر العكسي وبين فترات التوصيل والعمل في كل حالة.

G− حلل عمل المدرجات الثلاثية الطور عند حمل أومي وحمل تحريضي وارسم أشكال التوتر والتيار والتوتر العكسي وبين فترات التوصيل والعمل في كل حالة. اذكر طرق التوصيل المختلفة للمدرجات الثلاثية الطور,

الحل:



الشكل(16−3) **a**− دارة الاستطاعة. **b** − زاويا الوصل والفصل.

إذا كانت $v_S = \sqrt{2}V_S Sin\omega t$ توتر الدخل الحظي، α_1 زاوية التأخير للثيرستور T_1 و i_1 تياره، فإنه لدى القدح ستكن لدينا العلاقة:

$$L\frac{di}{dt} + R.i_1 = \sqrt{2}V_S Sin\omega t.....(1)$$

حل العلاقة أعلاه سيكون من الشكل:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_S}{Z} Sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-(R/L)t} .....(2)$$

ممانعة الحمل:

$$Z = \left(R^2 + (\omega L)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

وزاوية الحمل

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$$

الثابت A_1 يمكن تحديده من الشروط الأولية حيث أنه عند:

$$\omega t = \alpha \Rightarrow i_1 = 0$$

وبالتعويض أعلاه (2) نجد:

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}V_S}{Z} Sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}\right)} .....(3)$$

بالتعويض عن A_1 من العلاقة أعلاه في العلاقة الأساسية (2) نجد:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_S}{Z}\left[Sin(\omega t - \theta) - Sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} \right].....(4)$$

الشروط β- الزاوية هي التي ينعدم عندها تيار الثيرستور ويمكن تحديدها من الأولية ،بحيث:

$$i_1(\omega t = \beta) = 0$$

وبالتعويض في العلاقة أعلاه:

$$Sin(\beta-\theta)=Sin(\alpha-\theta)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-\beta}{\omega}\right)}.....(5)$$

الزاوية β المعروفة بزاوية الإطفاء (extinction angel) يمكن تحديدها من هذه العلاقة ونحتاج لحلها لاستخدام حل تكراري (iterative solution). لدى معرفة β زاوية التوصيل (أو فترة التوصيل) ،الزاوية δ للثيرستور T_1 يمكن إيجادها من العلاقة:

$$\delta=\beta-\alpha.....(6)$$

- القيمة الفعالة لتوتر الخرج تعطى بالعلاقة:

$$V_0=\left[\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta}V_S^2Sin^2\omega t.d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}}$$

- القيمة الفعالة لتيار الثيرستور يمكن إيجادها من العلاقة (4) حيث:

$$I_R=\left[\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta}i_1^2.d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=\left[\frac{4V_S^2}{4\pi}\int_{\alpha}^{\beta}(1-Cos2\omega t)d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\beta-\alpha+\frac{Sin2\alpha}{2}-\frac{Sin2\beta}{2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}.....(7)$$

$$I_R=\frac{V_S}{Z}\left[\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta}\left\{Sin(\omega t-\theta)-Sin(\alpha-\theta)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega-t}\right)}\right\}^2d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}}.....(9)$$

- تيار الحمل الفعال يمكن تحديده من التيارات الفعالة للثيرستورات:

$$I_0=\left(I_R^2+I_R^2\right)^{\frac{1}{2}}=\sqrt{2}I_R.....(9)$$

- التيار المتوسط للثيرستور:

$$I_A = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i_1 . d(\omega t)$$

$$I_A = \frac{\sqrt{2}V_S}{2\pi Z}\int_{\alpha}^{\beta}\left[Sin(\omega t - \theta) - Sin(\alpha - \theta)e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} \right] d(\omega t) \ldots\ldots\ldots (10)$$

العلاقة (4) تشير إلى أن توتر الحمل (أو التيار) يمكن أن يكون جيبياً إذا كانت زاوية التأخير بالقدح α أقل من زاوية الحمل θ.

إذا كانت α أكبر من θ سيكون تيار الحمل متقطعاً وغير جيبي.

ملاحظات:

1- إذا كانت α= θ من العلاقة (5) نجد:

$$Sin(\beta - \theta) = Sin(\beta - \alpha) = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

$$\beta - \alpha = \delta = \pi \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

2- بما أن فترة التوصيل (زاوية التوصيل) δ لا يمكنها أن تتجاوز القيمة π وأن تيار الحمل يجب أن يمر بالقيمة صفر، فإن زاوية التأخير α يجب أن لا تقل عن θ وعندئذ مجال التحكم بتوتر الخرج سيكون ضمن مجال تغيير α بحيث:

$$\theta \le \alpha \le \pi \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

3 – إذا كانت $\alpha \le \theta$ وكانت نبضات القدح للثيرستورات عريضة وكافية فإن تيار الحمل لن يتغير تبعاً لـ α، وكلا الثيرستورين سيوصلان لفترة π. الثيرستور T_1 سيتم وصله عند الزمن ωt=θ، والثيرستور المعاكس T_2 سيتم وصله عند $\omega t = \pi + \theta$.

التطبيق العملي:

$$\omega = 2\pi f; \quad f = 60Hz; \quad L = 6.5mH \quad R = 2.5\Omega;$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = 44.43°; \quad \alpha = 90°; \quad V_S = 120V; \quad \omega = 377 rad/s.$$

a- زاوية الفصل للثيرستور β يمكن تحديدها من العلاقة (5) والحل التكراري يعطي β=220.35º. وعليه فإن زاوية التوصيل:

$$\delta = \beta - \alpha = 220.43 - 90 = 130.43°$$

b- من العلاقة (7) القيمة الفعالة rms لتوتر الخرج هو:

$$V_0 = 68.09V$$

c- التكامل العددي للعلاقة (8) ضمن الحدود $\omega t = \alpha \rightarrow \beta$ تعطي القيمة الفعالة لتيار الثيرستور

$$I_R = 15.07A$$

d- من العلاقة (9) نجد:

$$I_0 = \sqrt{2} \times 15.07 = 21.3A$$

e- الحل العددي للمعادلة (10) تعطي القيمة المتوسطة لتيار الثيرستور:

$$I_A = 8.23A$$

- استطاعة الخرج:

$$P_0 = (21.3)^2 \times 2.5 = 1134.2W$$

- استطاعة الدخل V.A يعطى بالشكل:

$$V.A = 120 \times 21.3 = 2556W$$

- عامل الاستطاعة للدخل:

$$P.F = \frac{P_0}{V.A} = \frac{1134.200}{2556} = 0.444(Lagg.)$$

المدقق العلمي:

1- الأستاذ الدكتور مصطفى الحزوري.

2- الأستاذ الدكتور نديم مخول.

3- الأستاذ المساعد عبدالله ساميز.

المدقق اللغوي:

الأستاذ الكتورة: لميس داود.

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات