تأثير دائرة الشحن على تشغيل منظومة ليزر ثنائي أوكسيد الكاربون النبضي ذي التهيج المستعرض والضغط الجوي

د.عدوية جمعة* أ.د.وليد خلف حمودي* أ.د.فالح حسن حمزة*
*قسم العلوم التطبيقية / الجامعة التكنولوجية
تاريخ التسلم: ٢٠٠٢/٣/٢٥
تاريخ القبول: ٢٠٠٥/٥/١٥

الخلاصة :

في هذا البحث جرت دراسة تأثير نوع وشكل دائرة الشحن الكهربائي على تشغيل وأداء منظومة ليزر ثنائي أوكسيد الكاربون النبضي ذي التهيج المستعرض والضغط الجوي . كذلك فقد جرى تقديم تحليلا للدائرة الكهربائية المستخدمة وأوضحت النتائج المستحصلة امكانية الحصول على أعظم كفاءة لتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ليزر خارجة بأستخدام دائرة الشحن ذات المتسعة المفردة . لقد تم تحديد خصائص دائرة الشحن وتأثيرها على أداء منظومة الليزر من خلال قياسات فرق جهد- تيار وحساب معلمات الدائرة الكهربائية وبالتالي تحديد كفاءة شحن الدائرة التي بلغت ٧٠٪

The Effect Of Charging Circuit In The Operation Of TEA-CO_2 Laser System.

Abstract:

In this search , the effect of type and configuration of electrical charging circuit on the operating and performance of a pulsed TEA-CO_2 laser sysstem were investigated . An analysis of electrical circuit used was presented and the results obtained indicated the possibility of operation with high conversion efficiency of electrical laser energy using a single-capacitor charging circuit. The characteristics of the charging circuit and its effect on laser system performance were introduced through voltage-current measurements. The parameters of electrical circuit were determined and charging efficiency of 70% was deduced.

المقدمة :

يتحدد تصنيع منظومة الليزر بأبعاد الرأس الليزري وتبعا لطاقة وعرض نبضة الليزر المنبعثة ، كما أن هنالك العديد من العوامل التي يجب أن تؤخذ بنظر الأعتبار عند تصنيع منظومة الليزر لأجل الحصول على خرج ليزري يتوافق مع التطبيق الذي من أجله صممت المنظومة ،أن لشكل وتصميم الأقطاب الرئيسية في حجرة

* قسم العلوم التطبيقية / الجامعة التكنولوجية

https://doi.org/10.30684/etj.24.3B.12
2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq
This is an open access article under the CC BY 4.0 license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

التفريغ لمنظومة الليزر الغازي علاقة وثيقة بأنتظامية التفريغ الكهربائي على طول الأقطاب الرئيسية المسماة أقطاب المجال المنتظم (Uniform Field Electrodes).

يؤخذ بنظر الأعتبار قصر نبضة تيار التفريغ الكهربائي التي تكون أقصر من زمن تكوّن الأقواس الكهربائية البالغة sec (10^{-4}-10^{-3}) [1] . كذلك فأن اختيار تصميم المؤين الأولي (Preionizer) ، ونوعه والفاصلة الزمنية بينه وبين التفريغ الرئيسي هي أمور يستوجب أخذها بنظر الأعتبار وبشكل دقيق.

أن الأختيار الموفق للعوامل سالفة الذكر يؤدي الى امكانية التحكم بكفاءة تحويل الطاقة الكهربائية المخزونة بالمتسعات الى التفريغ التوهجي اللازم لتحقيق التوزيع المعكوس في ليزر CO_2 وهذا يعتمد بشكل أساسي على نسبة المجال الكهربائي الى الكثافة الالكترونية (E/N) والتي تتغير تبعا لنوع الدائرة الكهربائية المتسخدمة وتعد الخصائص الكهروكيمياوية للخليط الغازي من العوامل المؤثرة على خصائص نقل الطاقة اللازمة للتهيج في منظومات الليزر الغازية[2] .

يتم نقل الطاقة من متسعات الخزن (متسعات الشحن) الى التفريغ التوهجي (التفريغ الرئيسي) عادة باستخدام دائرة شحن خرجية . وهي ذات أهمية كبيرة لأن عملية ضخ وتهيج جزيئات ثنائي أوكسيد الكاربون تتم اما بالتصادم المباشر مع الالكترونات أو بالتصادم غير المباشر عن طريق انتقال الطاقة الرنيني بين جزيئات N_2 الى جزيئات CO_2 وهذا الأمر يتطلب امرار تيار عالي الشدة (يتجاوز الالاف الامبيرات) خلال فترات زمنية قصيرة جدا تقل عن المايكروثانية (ms)عند قيم عالية جدا لفرق الجهد (العديد من الكيلو فولتات) (KV) [2]، يستدعي هذا الأمر تقليل الحث الكهربائي الى أقل ما يمكن لضخ جزيئات الغاز والحصول على زمن نهوض تيار قصير وبالتالي تيار نبضي عالي يضمن حصول التوزيع المعكوس ، أي ان

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{L}\frac{dV}{dt} = \frac{V_o - V_d}{L} \quad (1)$$

أذ تمثل dI/dt المعدل الزمني لتغير التيار من 10% الى 90% من قيمته العظمى و(V_d) تمثل الفولتية المسلطة على الأقطاب الرئيسية و(V_o) الفولتية الرئيسية (المصدر)، و(L) هي حثية الدائرة الكهربائية .

هنالك أربعة أنواع شائعة الأستخدام من مولدات النبضة المستخدمة لتهيج ليزرات CO_2 النبضية ولكل نوع مواصفات معينة تؤثر في خصائص نبضة التيار والفولتية ومقدار الطاقة الداخلة (المخزونة)، وهيئة الخرج الليزري يتم استخدام نفس دائرة الشحن الكهربائية لأقطاب التفريغ الرئيسي والثانوي معا في الأنواع الأربعة وكما يأتي [3]:

أ- دائرة التفريغ المباشر (دائرة انتقال الشحنة) وأحيانا تسمى دائرة الشحن ذات المتسعة المفردة (Single Capacitor Discharge Circuion) والموضحة في الشكل (1_a).

ب- دائرة LC المعكوسة (LC Inversion) : هنا تم ربط أقطاب التأين الأولي على التوالي مع التفريغ الرئيسي ، وكما موضح في الشكل (1b) .

ج- هنا يتم استبدال حثية الملف (L) بالدائرة من النوع الثاني بحثية أقطاب التأين الأولي لتقليل الحثية ، وكما موضح في الشكل (1c).

د- دائرة مولد ماركس (Marx Generator) لمضاعفة الفولتية الى قيم عالية ، وكما موضح في الشكل (1d)[4,5]

الجزء العلمي :

تم تصنيع حجرة الليزر من مادة البيرسبكس بقطر خاجي (100mm) وقطر داخلي (60mm) وبطول (200mm) وتحتوي على فتحات رئيسية لدخول وخروج الغاز وفتحات أخرى للتوصيلات الكهربائية للفولتية العالية والقطب الأرضي .

يتكون المرنان البصري المستخدم في منظومة ليزر CO_2 في هذا البحث من مرآتين متوازيتين احداهما عاكسة كليا (100%) مصنوعة من النحاس المطلي بالذهب سمكها 5mm، والأخرى عاكسة جزيئا (60%) مصنوعة من الجرمانيوم (Ge) سمكها 3mm وقطر كل من المرآتين 50mm والمسافة بينهما 200mm.

كانت الأقطاب المستخدمة في حجرة التفريغ لهذه المنظومة من نوع (4th-order Ernst Profile) وكانت قيمة (K_o=0.02) وهو متغير يمثل النسبة ما بين المسافة مرتين الأقطاب وعرض القطب (Aspect Ratio) كان المقطع العرضي للأقطاب mm (20x160) والمسافة بين القطبين (6mm)، أما أقطاب التاين الأولي فهي عبارة عن خمسة أزواج من الأوتاد المسننة من الأعلى ومكورة من الأسفل بطول (15mm) وقطر (3mm) ، وتم ترتيبها على جانبي الأقطاب الرئيسية . جرى استخدام خلطة غازات بالنسب ($8CO_2$:$8N_2$:82He:2CO) وتم تشغيل المنظومة عند الضغط الجوي الأعتيادي (1atm).

استخدمت دائرة انتقال الشحنة (دائرة التفريغ المباشر) المبينة في الشكل (1a) لتوليد النبضات اللازمة للضخ لما تمتاز به هذه الدائرة من سرعة التفريغ والحثية القليلة وأحتوائها على متسعة منفردة ذات حث قليل. تمت السيطرة على فتح وغلق دائرة الشحن بأستخدام مفتاح كهربائي للفولتيات العالية مؤلف من فجوة القدح ثلاثية الأقطاب (3- Electrode Spark Gap)[6] .

عند تشغيل مجهز القدرة يتم شحن متسعة الخزن الرئيسية (C_s=6nF) الى فولتية المصدر (V_o=10KV) عند غلق فجوة القدح تفرغ المتسعة

(C_s) شحنتها بمتسعات التأين الأولي الصغيرة (C_i=7pF). بصورة متعاقبة (متتالية) وعندها تبدأ الأنهيارات المتعاقبة والسريعة من الأوتاد ابتداءا من الوتد الأول حتى الوتد الأخير المرتبط بالقطب الرئيسي ويتم التفريغ الرئيسي كما موضح بالدائرة الكهربائية المبينة بالشكل (2).

تم التأكد من قيمة فرق الجهد المسلط على المتسعة وعلى الأقطاب الرئيسية باستخدام مجس الفولتية العالية (وكانت الفولتية المقاسة على الأقطاب الرئيسية (4KV) تقريبا وهي أقل من نصف قيمة الفولتية الأصلية (V_o) .

يقاس التيار المار بالمنظومة باستخدام مقاومة ذات حثية واطئة (R-shunt) والمسماة (CVR) (Current Viewing Resistor) [7] قيمتها قليلة جدا تربط على التوالي مع المنظومة بقطبها الأرضي او باستخدام ملف روغوفسكي [8].

تحليل الدائرة الكهربائية (خصائص فرق جهد -تيار)

يمكن التعبير عن فروق الجهد المتولدة لحظة غلق دائرة التفريغ الرئيسي(RLC) بالمعادلة (2)[9] وكما موضح بالشكل (2) :-

$$V_o=V_L+V_R+V_c \qquad (2)$$

تعطى قيم الفولتية لكل مركبة كما يلي:

$$V_L = L\frac{dI}{dt} \qquad (3a)$$

$$V_R = I * R \qquad (3b)$$

$$V_C = \frac{1}{C}\int Idt \qquad (3c)$$

وبتعويض تلك القيم واجراء التفاضل للتخلص من حد التكامل فأن :

$$\frac{d^2I}{dt^2}+\left(\frac{L}{R}\right)\left(\frac{dI}{dt}\right)+\frac{I}{LC}=0 \qquad (4)$$

المعادلة (4) تمثل علاقة خطية متجانسة من الدرجة الثانية وحلها العام يأخذ الصيغة الآتية :

$$I = K_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 e^{\lambda_2 t} \qquad (5)$$

اذ أن K_1 و K_2 ثوابت يمكن ايجاد اقيامها من الشروط الحدودية (Boundary Conditions) وتأخذ λ_1 و λ_2 التي تأخذ القيم

$$\lambda_1 = -R/2L - \left[\begin{matrix}(R_2/4L_2)\\-(1/LC)\end{matrix}\right]^{1/2}$$

$$,\lambda_1 = -\alpha - \omega \qquad (6a)$$

$$\lambda_2 = -R/2L + \left[\begin{matrix}(R_2/4L_2)\\-(1/LC)\end{matrix}\right]^{1/2}$$

$$,\lambda_2 = -\alpha + \omega \qquad (6b)$$

اذ ان (α) يمثل معامل الخمود (Damping Factor) و(ω) معامل التذبذب الطبيعي (Natural Oscillation Factor) وبالأعتماد على قيم λ_1 و λ_2 فان لدينا أربع حالات مبينة في الجدول (1) .

ان ما يهمنا هو حالة التذبذب R<2 $(L/C)^{1/2}$ (Oscillation Condition) التي ظهرت لنا أثناء العمل ويتم قياس المعلمات الأساسية للدائرة أعلاه مع مراعاة أن الحثية أقل ما يمكن بأستخدام أسلاك ربط على شكل شرائح نحاسية بدلا من أسلاك المحورية ، وتستخدم متسعات سيراميكية واطئة الحث .

في حالة التذبذب تحت التخميد ، يمكن التعبير عن التيار المار بدائرة (RIC) بالمعادلة الآتية بعد حل المعادلة (4)

$$I=I_m e^{-at}\sin(\omega t+\phi) \qquad (7)$$

حيث ان I_m تمثل أعظم تيار مار بالدائرة (لاحظ الشكل (3))

$$I=(V_o/\omega L)e^{\alpha t}\sin\omega t \qquad (8)$$

$$\omega=[(1/LC)-(R_2/4L_2)]^{1/2} \qquad (9)$$

$$R=2aL \qquad (10)$$

من خلال شكل نبضة تذبذب التيار المستحصلة وفق المعادلات أعلاه ، تم حساب قيم R و L و C الفعلية للدائرة المبينة بالشكل (2) وكالآتي :

تم حساب قيمة (α) (مقدار التناقص اللوغاريتمي لعامل الخمود) ، من شكل التذبذب وبأخذ قمتين (I,I_m) لتذبذب التيار لقمتين متتاليتين وكما في المعادلة التالية:-

$$I=I_m e^{-\alpha t} \qquad (11)$$

يمثل I_m أول قمة لنبضة التذبذب (الشكل (3)) و I قمة النبضة اللاحقة، وبتطبيق المعادلة (8) أمكن حساب قيمةα .

من الشكل (3) كانت t=100nsec ومنها $\alpha = 2.2*100^6$Hz ، اما قيمة ω فتساوي (6.28Hz)، وبأخذ مشتقة المعادلة (7) ومساواتها بالصفر كانت أعظم قيمة للتيار I_m مساوية الى :-

$$I_m=(V_O/\omega L)\exp[(-R\pi)/(4L\omega)] \qquad (12)$$

ويمكن كتابتها بشكل آخر

$$I_m=(V_o/\omega L)\exp[(-\alpha\pi)/(2\omega)] \qquad (13)$$

ومنها تم استخراج قيمة L كما يلي :-

$$L=(V_o/\omega I_m)\exp[(-\alpha\pi)/(2\omega)] \qquad (14)$$

بتعويض قيم ω و a و I_m من الشكل (3) تم ايجاد قيمة L مساوية الى (0.05uH) عند جهد (V_o=10kV).

تم احتساب قيمة R من المعادلة (10) وهي (0.3) ومن المعادلة (8) تم احتساب قيمة كل من C و ω :-

$$\omega^2=(1/LC)-\alpha^2 \qquad C=1/[L(\omega^2+\alpha^2)] \qquad (15)$$

من المعادلة (15) يمكن ايجاد قيمة المتسعة نظريا اذ تساوي (C=5nF) وهي اقل من القيمة المنتخبة عمليا (6nF)

ان هذا الأنخفاض طبيعي لأن شحن المتسعة لايصل الى قيمة الفولتية

المسلطة بل أقل دائما أما قيمة المقاومة فأنها حاصل جمع المقاومات الفعلية وقيمتها العملية ناتجة عن مقاومة فجوة القدح والوسط البلازمي، علما أن مقاومة المتسعات السيراميكية منخفضة جدا وليس لها تأثير في قيمة المقاومة الكلية ومقاومة (CVR).

تنقسم الحثية الى قسمين : الأول يعود الى الدائرة الكهربائية ويشمل فجوة القدح والمتسعات السيراميكية واطئة الحثية وحثية أسلاك الربط ، أما القسم الثاني من الحثية فيمثل الجزء الخاص بالمتسعة Cp (متسعة الذروة) والأقطاب الرئيسية وأسلاك ربطها . عند ربط متسعة الذروة على التوازي مع الأقطاب الرئيسية تم الحصول على النبضة الموضحة بالشكل (3) حيث يلاحظ عدم وجود تذبذب وكانت هذه نتائج الدائرة الأولى وبأستخدام الأوتاد كأقطاب تأين أولي كانت كفاءة الشحن (70%) تم حسابها من المعادلة الآتية :-

$$\eta = \left(C_{theoritical} / C_{experimental}\right) x100\% \quad (16)$$

النتائج والمناقشة

لغرض تحديد كفاءة الشحن لكل من الأنواع الأربعة من دوائر الشحن الموضحة في الشكل (1) ، تم دراسة العلاقة بين مقدار الطاقة الخارجة والفولتية المسلطة باستخدام نفس الخلطة الغازية والتشغيل عند الضغط الجوي ، وكما مبين في الشكل (4) ونلاحظ أن الدائرة الأكثر كفاءة هي (1a) لما تمتاز به من تفريغ سريع وحثية قليلة وبالتالي فان هذه الدائرة تمتلك أعظم كفاءة تحويل للطاقة الكهربائية الى قدرة خرج ليزري خارجة وتعمل عند طاقات خزن واطئة بينما في الدائرة (1c) تزداد الأقواس الكهربائية (Arcing) بسبب ربط أقطاب التأين الأولي على التوالي مع أقطاب التفريغ الرئيسي. أما الدائرتان (1b&1d) فتعدان الأفضل في حالة طاقات الخزن العالية (E_s>2J) .

تم دراسة تأثير متسعة الذروة (C_p) المسؤولة عن استقرارية التفريغ الكهربائي على أداء ليزر CO_2 النبضي وجرى تغيير قيمتها وقياس الطاقة الخارجة كدالة للطاقة الداخلة باعتماد ثلاث هي (50,200,500PF) والشكل (5) يوضح تأثير متسعة الذروة على الطاقة الخارجة حيث جرى ربط متسعة الذروة (C_p) على التوازي مع الأقطاب الرئيسية .

تبين نتائج الدراسة زيادة الطاقة الخارجة مع زيادة فرق الجهد المسلط على المتسعة الرئيسية (C_s) اذ تكون العلاقة خطية تصاعدية حتى الوصول الى قيمة فرق جهد 10KV انخفضت الطاقة الخارجة بعدها بسبب التحول الى حالة التفريغ القوسي . يبين الشكل (5) أن استخدام متسعة الذروة بقيمة (200PF) ادى الى زيادة الطاقة الخارجة ، وعند زيادة قيمة متسعة الذروة فان الطاقة الخارجة تنخفض بسبب تغير ممانعة دائرة التفريغ وعدم حصول موائمة بين دائرتي الشحن والتفريغ وبالتالي نقصان

كفاءة الطاقة العظمى من المتسعة الرئيسية الى أقطاب التفريغ الكهربائي .

الأستنتاجات

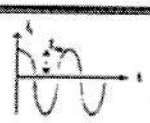
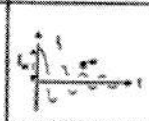
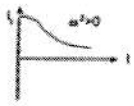
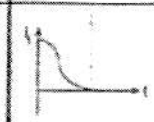
أن دائرة الشحن ذات المتسعة المفردة (النوع الأول) هي الأفضل لتشغيل ليزر CO_2 النبضي وتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة خرج ليزري مقارنة بالأنواع الأخرى شائعة الأستخدام من دوائر الشحن اذ تكون كفاءة التحويل لهذا النوع هي الأعلى (70%) .

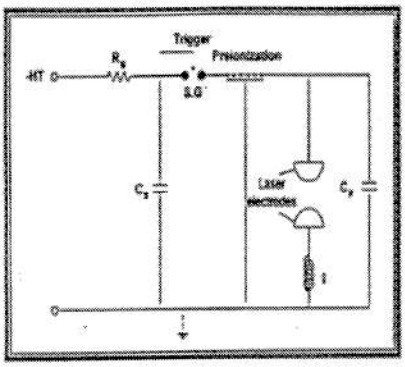
تم الحصول على موائمة جيدة بين دائرتي التفريغ الرئيسي والشحن باستخدام متسعة ذروة بقيمة 200PF، وان تغيير قيمة المتسعة أو عدم وجودها في الدائرة الكهربائية يؤدي الى حدوث التذبذب في شكل نبضة التيار مما يعنى أن لها تأثيرا كبيرا على انتظام واستقرارية التفريغ الكهربائي .

المصادر

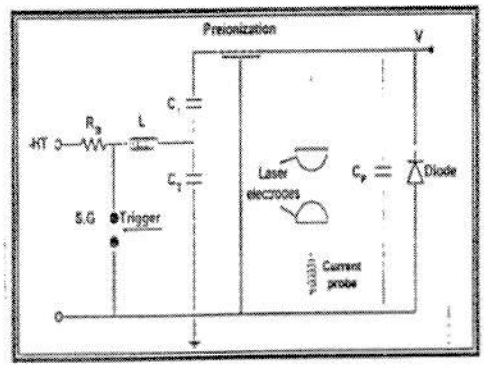
1. D.S. Stark, P.H. Cross and H. Soster, IEEE J. Quantum Electron, vol. 11, 1975, p.774.
2. W.J. Witteman, *The CO_2Lasers,*Springer-Verlag (Berlin), 1987
3. J.V. Gridland and S. Howells, J. Appl. Phys., vol.53, no.6, 1982,p.4016. Engineering ,Butter worth - Heinemann,2000,p.52.
4. Kuffel E., Zaengl W.S. and Fuffel J. "High voltage engineering", Butter work-Iteinemann, 2000 p.62.
5. Jim Lux, "Marx generators, Marx banks, Impulse voltage generators", Retrieved from www.Home Town.aol.com lyonelb, Marx.htm, (2004) e-mail:lynonelb @ adol.com. V. Nassisi and A. Luches, Rev. Sci. Instrum., vol.50,no.7,1979,p.900.
6. Priret paper*Shunts* ,Internet,2002.
7. B.L.Theraja *Electrical technology* ,Published by Publication Division of Nirja Construction & Development co. (p)Ltd.,(1988),p.136.
8. V. Migulin, *Basic Theory of Oscillation,* MIR Pub. (USSR), 1983.

جدول (١) يبين حالات التذبذب في نبضة التيار [8]

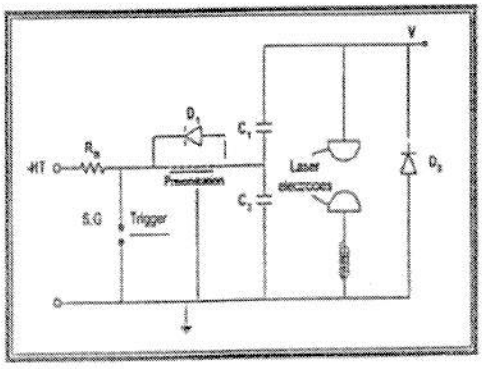
Cases	Name	(i.e.)	It	Wave-Shape
I	Laser Free Circuit R=0	Un-damped	$I_m \sin(\omega t-\phi)$	
II	Low Loss Circuit $(R_2/4L_2)<(1/LC)$	Under-damped	$I_m e^{-\alpha t}\sin(\omega t+\phi)$	
III	High Loss Circuit $(R_2/4L_2)>(1/LC)$ or $R>2(L/C)^{1/2}$	Over-damped	$e^{-\alpha t}(A\cosh\gamma t+B\sin\gamma t)$	
IV	Critical Damping $(R_2/4L_2)=(1/LC)$	Critical damping	$(K_1+K_2t)e^{-\alpha t}$	



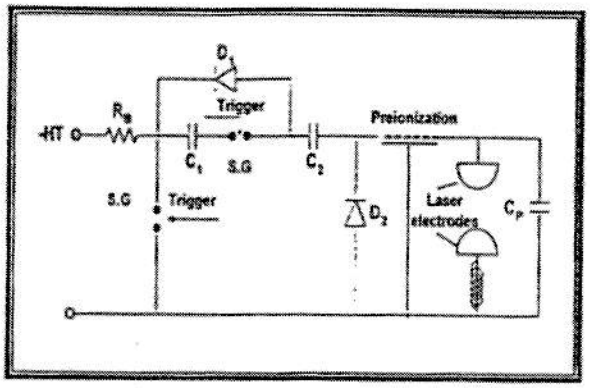
شكل (1a) دائرة انتقال الشحنة [3]



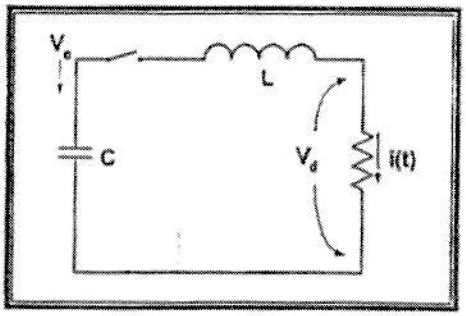
شكل (1b) دائرة LC المعكوسة [3]



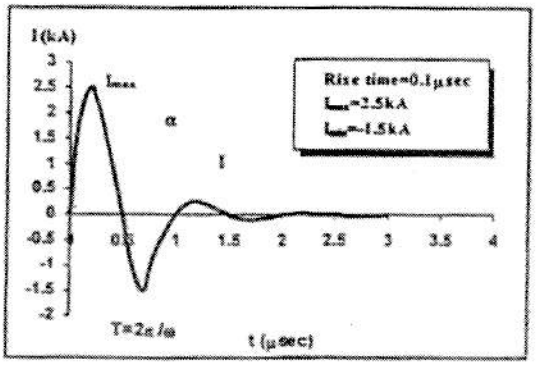
شكل (1c) دائرة LC المعكوسة باستبدال L بأقطاب التأين الأولي [3]



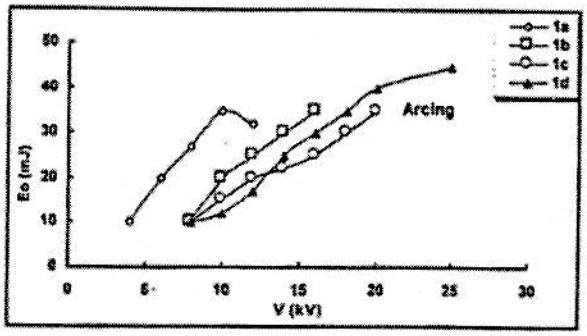
شكل (1d) دائرة موك ماركس [3].



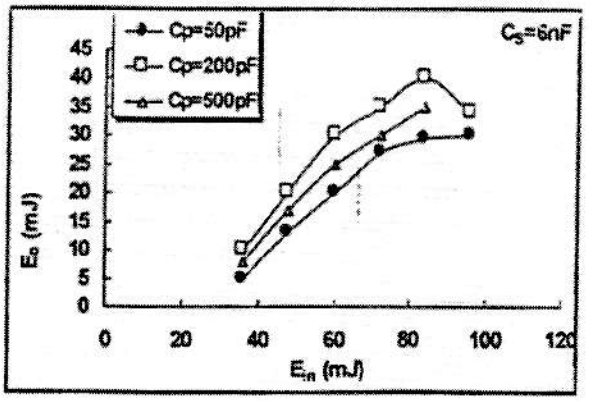
شكل (٢) الدائرة المكافئة للتفريغ الرنيني RLC النوع الاول(1a)



شكل (٣) نموذج تذبذب التيار لدائرة تحت التخميد (Under-damped) المستحصلة.



شكل (٤) العلاقة بين مقدار الطاقة الخارجة والفولتية المسلطة لكل نوع من الأنواع الأربعة من دوائر الشحن



شكل (٥) علاقة الطاقة الخارجة بالطاقة الداخلة لقيم مختلفة لمتسعة الذروة (C_p)