

تصميم مولد توتر نبضي برقي ذي مرحلتين ونمذجته وتنفيذه بالاعتماد على العناصر الإلكترونية الحديثة

د. جمال الناصر*

د. علي السيد**

الملخص

مع تطور العناصر الإلكترونية الحديثة الترانزستورية واستخدامها كقواطع ساكنة تستخدم في عمليات الفصل والوصل بحيث يمكن التحكم بإغلاق القاطع وفتحه عن طريق تطبيق توتر صغير فقط. إذ تمتاز هذه العناصر بقدرتها على التحكم بتيارات كبيرة. اتجهت الدراسة إلى استخدام مثل هذه العناصر في دارة توليد التوترات النبضية البرقية، وذلك لما لها من ميزات من حيث توتراتها وتياراتها الاسمية وأزمة الفصل والوصل التي أصبحت من مرتبة النانو ثانية، وعليه لن تتعرض هذه القواطع الإلكترونية في أثناء فترة الحجز للتوتر العالي عليها مدة طويلة.

تعرض هذه الدراسة نمذجة مولد نبضي برقي وحيد المرحلة وتصميمه ثم مولد ثنائي المرحلة ثم تطبيق مبدأ النمذجة على دارة مولد نبضي برقي ثلاثي المراحل، ثم تعرض وتناقش النتائج التي تم التوصل إليها ومدى مطابقة هذه النتائج مع الواقع الفعلي.

الكلمات المفتاحية: مولد توتر نبضي برقي إلكتروني، عناصر ترانزستورية حديثة IGBT، قواطع ساكنة .

* قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

** قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

1- مقدمة:

وذلك وفق ما توصي به النظم العالمية IEC. لذلك

لا بد من دراسة المبدأ المستخدم لتوليد هذا التوتر.

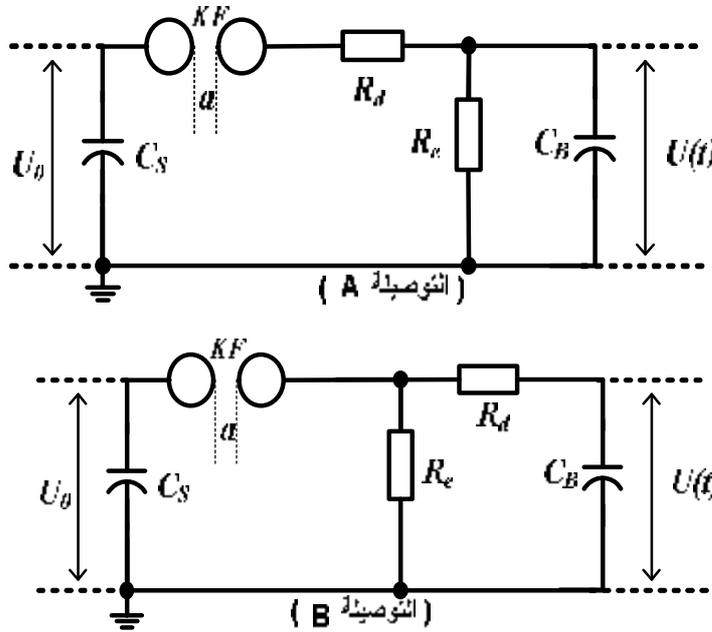
2- مبدأ توليد التوتر العالي النبضي البرقي:

هذا التوتر قابل للتوليد في المخبر، ويبين الشكل (1)

الدارات المستخدمة لهذه الغاية، وأسماء العناصر

المختلفة المستخدمة في الدارة ورموزها.

تستخدم التوترات العالية في نقل القدرة واختبار تجهيزات التوتر العالي وإجراء التجارب المخبرية التي تساعد نتائجها في تصميم هذه التجهيزات. تحتاج هذه المخابر إلى توترات عالية (متناوبة ومستمرة ونبضية)، تصل قيمتها إلى عدة آلاف من الكيلو فولط. ويعدُّ التوتر النبضي البرقي من التوترات الواجب استخدامها لدى اختبار تجهيزات شبكات التوتر العالي،



الشكل (1) مولد توتر نبضي برقي (التوصيلتين A, B)

إن الوظيفة الأساسية للثغرة (KF) هي وظيفة قاطع مثالي حساس بالنسبة إلى التوتر، فإذا ما ارتفعت قيمة التوتر (U_0) على الكرات إلى قيمة كافية، اشتعلت الشرارة بين الكرتين وحدث الانهيار خلال زمن لا يزيد على 10^{-8} ثانية، إن تبعثر قيم هذا الزمن حول هذه القيمة الوسطية قليل مادامت بقيت الكرتان نظيفتين ولا يوجد عليهما أي غبار، ويمكن التعبير عن مقدرة مولد التوتر النبضي البرقي وجودته بقيمة مميزة تصميمية مهمة هي القدرة التي تخزنها سعة الصدم وتعطى بالمعادلة:

إذ إن :

U_0 : توتر الشحن المستمر.

C_S : سعة الصدم.

C_B : سعة التحميل.

R_d : مقاومة الشحن.

R_e : مقاومة التفريغ.

K_F : ثغرة الكرات (البعد بينهما متغير وهو a).

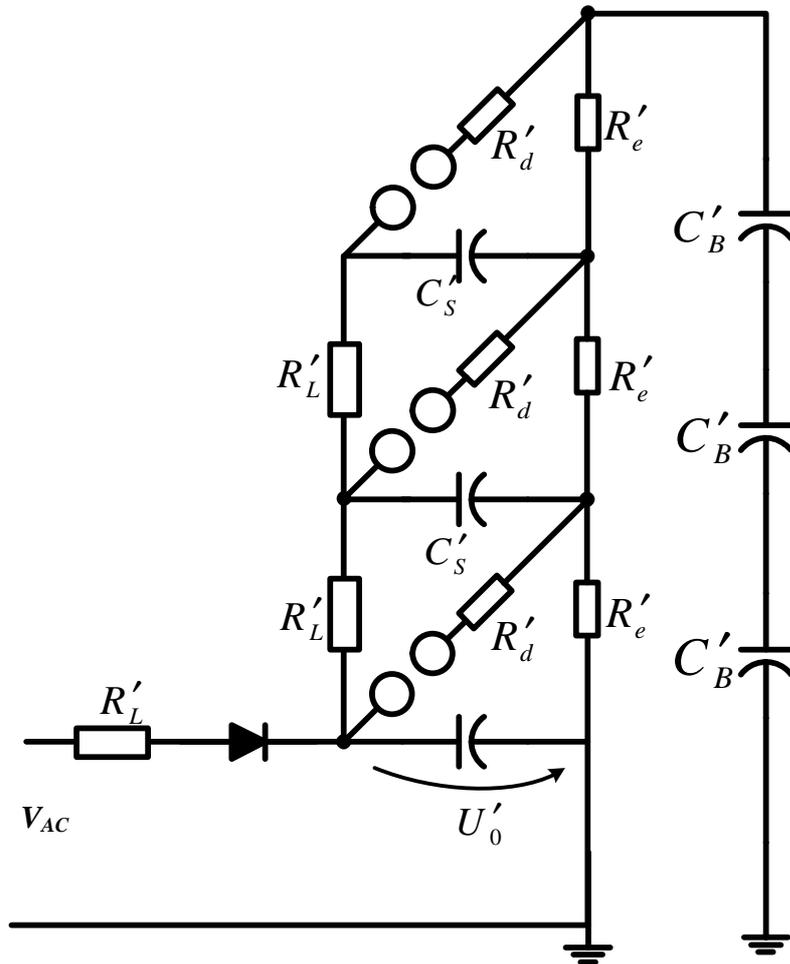
$U(t)$: التوتر النبضي كتابع للزمن.

انهيار الثغرة (انظر الشكل(2))، عندها تنهار الثغرة الهوائية، وتبدأ هذه المكثفات بالتفريغ على التسلسل عبر المقاومات R'_d حتى تشحن المكثفات C'_B ، بعدها تفرغ مجموعة المكثفات C'_S, C'_B شحنتها عبر R'_e . يبيّن الشكل(2) مولد توتر نبضياً برقياً توصيلة A بثلاث مراحل [7].

$$W = \frac{1}{2} C_S (U_0)^2 \quad (1)$$

3- مولدات التوتر النبضي البرقي متعددة المراحل:

تدعى هذه المولدات غالباً بمولدات ماركس كما هو مبين في الشكل(2)، وتستعمل للحصول على توتر نبضي برقي تزيد قيمته على 200kV، أمّا المبدأ الذي تعمل بموجبه فيتلخص فيما يأتي:
تُشحنُ مكثفات الصدم C'_S على التوازي، حتى تصل قيمة توتر الشحن على طرفيها إلى قيمة تساوي توتر



الشكل(2) مولد ماركس النبضي البرقي توصيلة A ثلاثي المراحل

إذ:

C'_S : مكثفة الصدم لكل مرحلة.

U_0 : توتر الشحن المستمر.

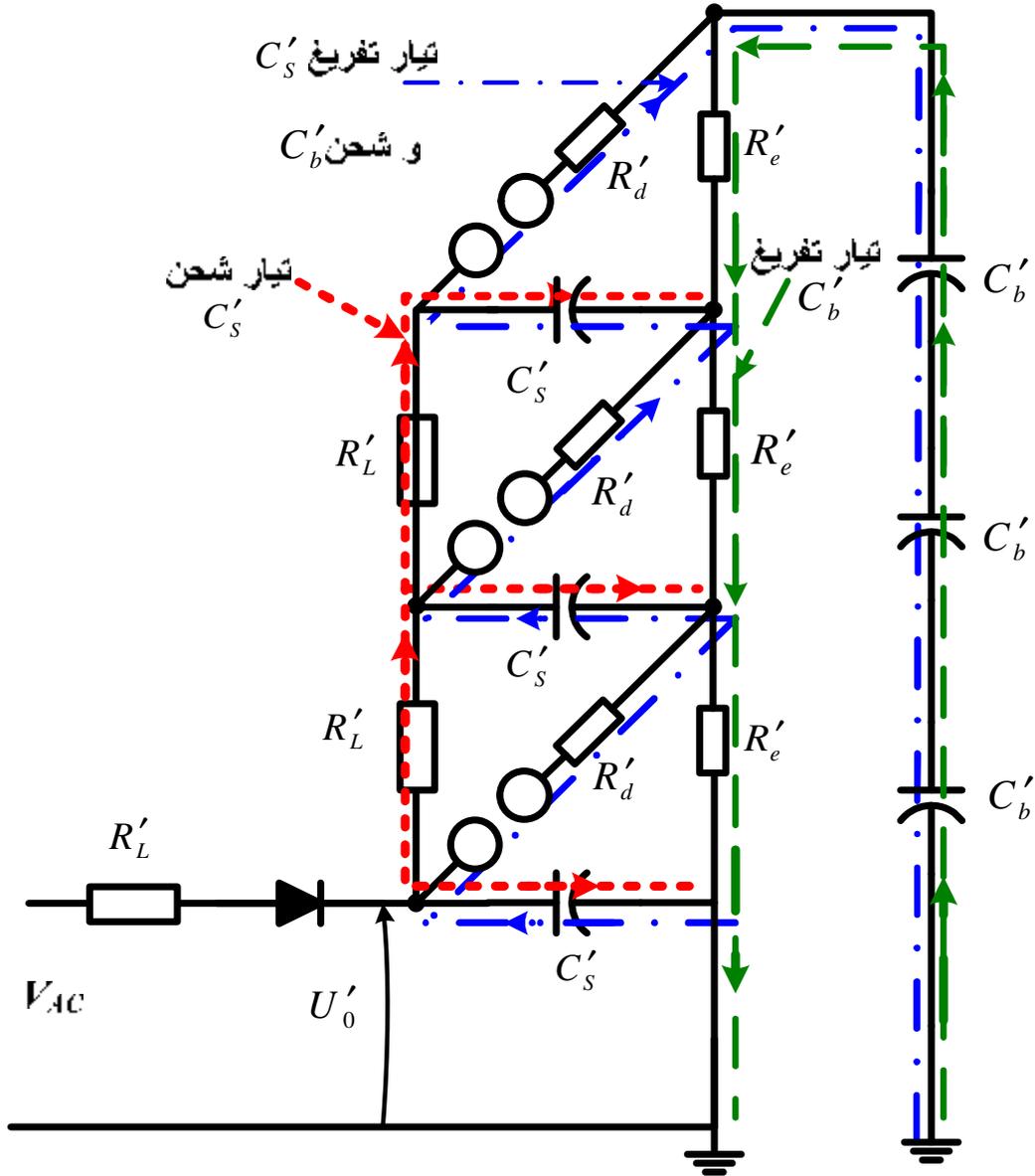
ويبين الشكل (3) دارة مولد ماركس نبضية برقية ثلاثية

R'_L : مقاومة الشحن للمكثفات C'_S .

المراحل مع دارات الشحن والتفريغ للمكثفات C'_S و C'_B . [8]

R'_e : مقاومة التفريغ لكل مرحلة.

R'_d : مقاومة الإخماد لكل مرحلة.



الشكل (3) مولد ماركس نبضي برقي ثلاثي المراحل (توصيلة A) مع دارات الشحن والتفريغ (دارة الشحن والتفريغ ل C'_S و C'_B)

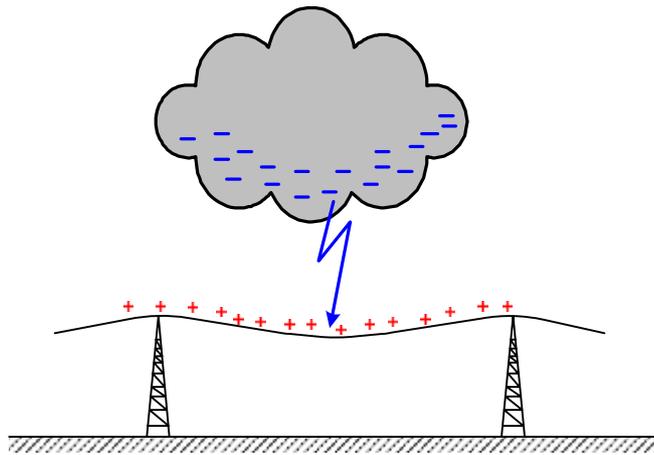
4- الجزء العملي:

زمنياً، تم الاتفاق عليه وفق النظم القياسية العالمية $IEC - pub165$. ويبين الشكل (5) موجة نبضية معتمدة وفق النظم العالمية. وقد قمنا بثلاثة إجراءات مخبرية هي:

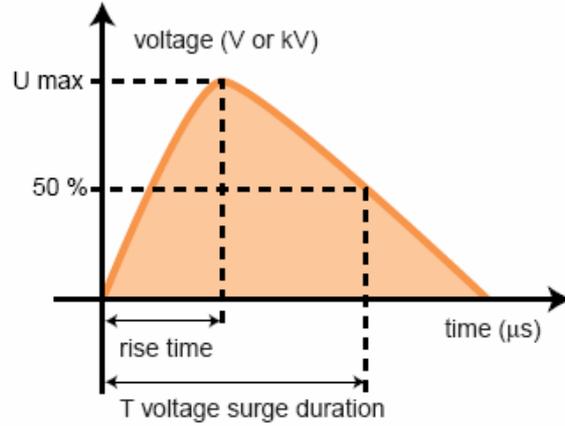
4-1 توليد التوتر العالي النبضي البرقي مخبرياً:

تحوي مخابر التوتر العالي في جامعة دمشق، كلية الهندسة الميكانيكة والكهربائية، قسم هندسة الطاقة الكهربائية على مولد نبضي حقيقي مؤلف من ثماني مراحل بتوتر يصل إلى (2.4MV) بنوعيه البرقي والفصل والوصل، كما أن هناك نموذجاً مصغراً بمرحلة واحدة لتوليد التوتر العالي النبضي، ويبين الشكل (6) هذا النموذج، وقد ربط مع راسم إشارة وحاسب لمعالجة النتائج وقياس الزمن الجبهي وزمن نصف الظهر لكل حالة من الحالات.

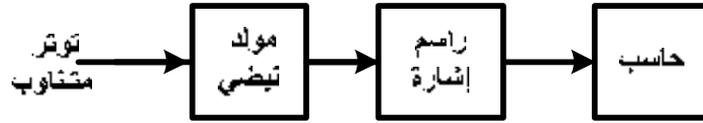
تنشأ التوترات النبضية نتيجة الضربات المباشرة أو غير المباشرة للصواعق على خطوط النقل الهوائية ويبين الشكل (4) أثر الصاعقة في خطوط النقل الهوائية. فعند حدوث ضربة صاعقة مباشرة على خط نقل هوائي كما في الشكل (4)، يرتفع كمون نقطة الإصابة إلى مطال كبير جداً يصل إلى بضعة MV وينتقل هذا الارتفاع على طول خط النقل على شكل موجة مسافرة. تؤثر هذه الموجة في تجهيزات الشبكة كلها وتؤدي إلى انهيار التجهيزات التي لا تكون مجهزة بحماية من الصواعق لذلك لا بد من اختبار تلك التجهيزات قبل تركيبها في الشبكة. ولهذا يجب أن تكون مخابر التوتر العالي مجهزة بمولدات تعطي توترات نبضية برقية مشابهة لتلك الناتجة على خطوط النقل بسبب الصواعق، وتعطي هذه المولدات توترات نبضية بمطال كبير ولها شكل محدد



الشكل (4) أثر الصاعقة في خطوط النقل الهوائية



الشكل (5) موجة توتر نبضية نظامية



الشكل (6) مخطط صندوقي لتوليد التوتر العالي النبضي

علماً أن ذلك يتطلب فقط استطاعة تحكم صغيرة عبارة عن جهد صغير يطبق على بوابة القاطع. زادت استخدامات هذه القواطع في المدة الأخيرة في التطبيقات الصناعية. اتجهت الدراسة إلى استخدام مثل هذه العناصر في دارة توليد التوترات النبضية البرقية، وذلك لما لها من ميزات من حيث توتراتها وتياراتها الاسمية وأزمنة الفصل والوصل التي أصبحت من مرتبة النانو ثانية. لن نتعرض هذه القواطع الإلكترونية لتطبيق التوتر العالي عليها مدة طويلة في مثل هذه الاستخدامات. تعرض هذه الدراسة نمذجة مولد نبضي ثنائي المرحلة وتصميمه، مع إمكانية تطبيق ذلك على دارة مولد نبضي برقي متعدد المراحل. وتتألف دارة المولد النبضي البرقي الذي تمت نمذجته كما هو مبين في الشكل (7) من العناصر الآتية:

1- مكثفات الشحن والتفريغ C_1, C_2 .

يمكن من خلال نموذج المولد وحيد المرحلة تغيير كل من R_d بثبوت R_e وقياس كل من T_r, T_s ثم تغيير R_e بثبوت R_d وقياس كل من T_r, T_s ثم حساب هذه الأزمنة ومقارنتها بالنتائج المقيسة وحساب الخطأ في القياس. علماً أن هذه الأزمنة T_r, T_s بالنسبة إلى التوصيلة B تعطى بالعلاقات الآتية:

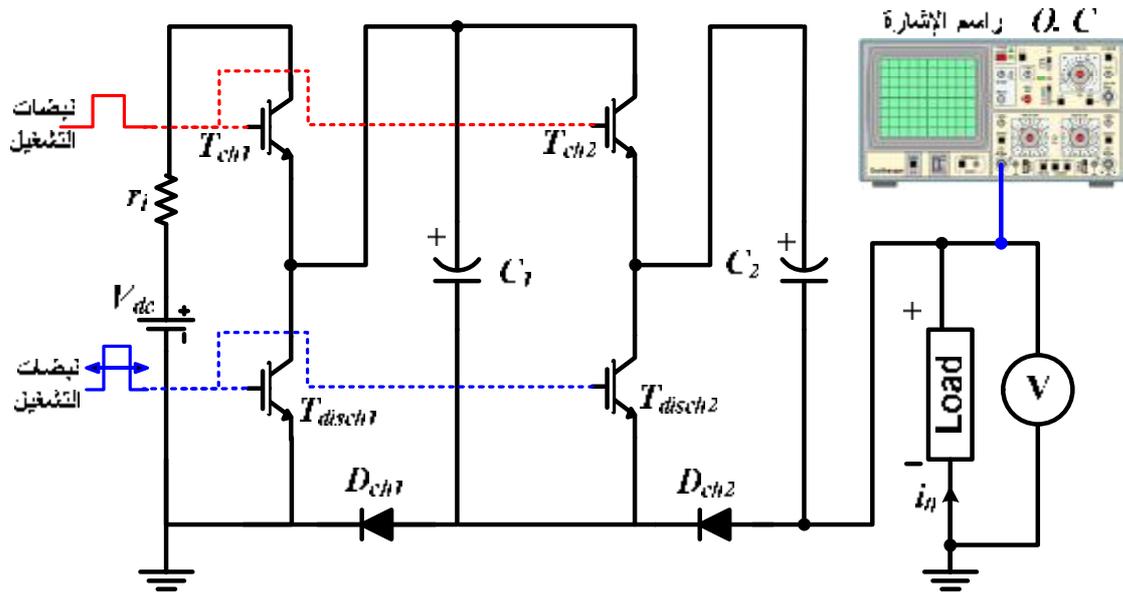
$$\begin{aligned} T_r &= 0.73 R_e (C_B + C_s) \\ T_s &= 2.96 R_d ((C_B C_s) / (C_B + C_s)) \end{aligned} \quad (2)$$

2-4 نمذجة المولد النبضي المقترح باستخدام

البيئة البرمجية Matlab/Simulink:

تستخدم العناصر الإلكترونية الحديثة كقواطع ساكنة بحيث يمكن التحكم بإغلاق القاطع وفتحه عن طريق تطبيق توتر ضمن مجال 15 فولطاً على بوابته. تمتاز هذه الترانزستورات بقدرتها على التحكم بتيارات كبيرة

- 2- منبع توتر مستمر V_{dc} .
 3- القواطع الإلكترونية للشحن والتفريغ: $T_{ch1,2}$, $T_{disch1,2}$.
 4- مقياس الفولط V .
 5- راسم الإشارة O.C.
 6- دارة توليد نبضات تشغيل القواطع الإلكترونية.



الشكل (7) دارة مولد نبضي برقي إلكتروني ثنائي المرحلة

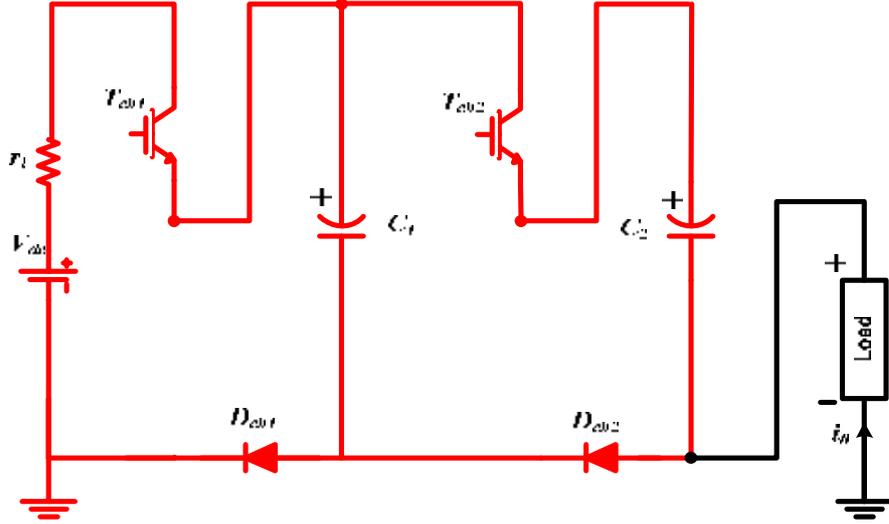
في هذه الدارة المقترحة استبدلت بالعناصر غير الفعالة قواطع استطاعة الكترونية، وبذلك يزداد أداء الدارة التقليدي وتتنخفض التكاليف والضياعات ويزداد تردد التكرار النبضي. تمكن هذه التقنية أيضاً من استخدام بنية المبدلات النصف جسرية المؤلفة من أنصاف النواقل، وتؤكد أن توتر الحجز العكسي للعنصر النصف ناقل يساوي توتر منبع التغذية (وهذا يعني توتر كل مكثفة)، حتى في حال عدم التطابق في عمليات الفصل والوصل المتزامنة وفي ظروف العطل. بسبب استخدام قواطع إلكترونية ساكنة لشحن ساعات تخزين الطاقة المرحلية وتفريغها، تسمى الدارة (مولد ماركس الإلكتروني الكامل) والتقنية الأساسية لهذا المولد المؤلف من

يمكن استخدام العناصر الإلكترونية في دارة مولد ماركس النبضي البرقي التقليدي، وذلك اعتماداً على العناصر السيليكونية المتطورة التي تعمل عند الترددات العالية (KHZ) وتوتر عالٍ (KV) للتطبيقات التي تحتاج إلى نبضات برقية.

4-2-1 مراحل الشحن والتفريغ للمولد المقترح:

يستخدم مولد ماركس التقليدي من أجل تطبيقات التوتر النبضي العالي عناصر القدرة الإلكترونية غير الفعالة (مقاومات وملفات)، وذلك لتغذية ساعات التخزين. لهذا المولد بعض السلبيات من حيث التكاليف والحجم وضياعات الاستطاعة وترددات التشغيل المحددة.

مرحلتين، هو أن يكون قادراً على توصيل توتر خرج نبضي موجب أو سالب وتطبيقه على الحمل. ويبيّن الشكل (8) دائرة شحن المولد النبضي البرقي الإلكتروني.



الشكل (8) دائرة شحن المولد النبضي البرقي الإلكتروني

$$v_0 = -nV_{dc} \quad (3)$$

إذ:

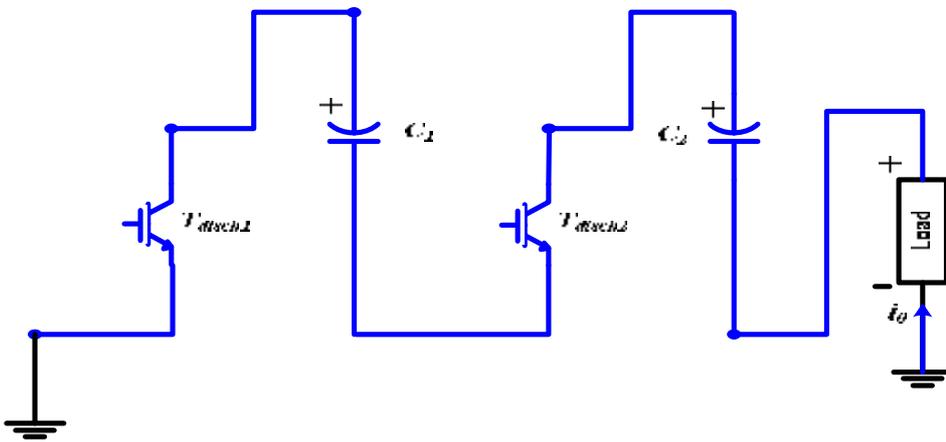
V_{dc} : توتر شحن كل مكثفة.

n : عدد المراحل.

v_0 : توتر خرج المولد.

ويبيّن الشكل (9) دائرة تفريغ المولد النبضي الإلكتروني. في مرحلة التشغيل الثانية تكون وضعية القواطع الإلكترونية كما يأتي:

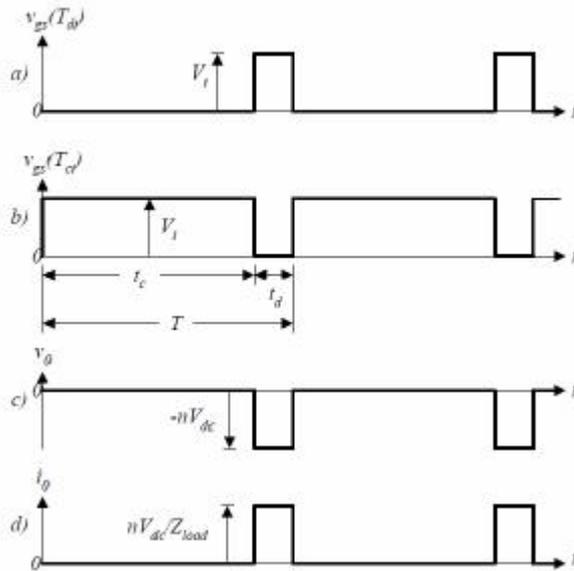
T_{ch} : حالة حيز off، T_{disch} : في حالة التوصيل On. خلال ذلك يتم توصيل السعات C_i بشكل تسلسلي ويصبح التوتر مطبقاً على الحمل تقريباً وقيمه التقريبية:



الشكل (9) دائرة تفريغ المولد النبضي البرقي الإلكتروني

البرقي المبين في الشكل (10)، تحدد كما يأتي:
 زمن عمل كبير $d_c = t_c / T$ ، وزمن عمل
 صغير $d_d = t_d / T$. إذ إن T : الجودة أو
 عامل جودة الفصل والوصل. حالة الحجز
 للديودات D_{chi} تؤكد أنه خلال هذه الفترة لن
 تكون الساعات مقصورة بالقواطع T_{disch} إشارة
 قيادة العناصر النصف ناقلة $T_{di}(T_{disch})$.

وذلك باعتبار أن الساعات كلها مشحونة بالتوتر V_{dc} كما
 هو مبين بالشكل (7)، وهذا محدد بالأمر الآتية:
 • خصائص العناصر المكونة للمولد النبضي.
 • تردد التشغيل.
 • زمن شحن الساعات t_c الذي يجب أن يكون أكبر
 بكثير من زمن تفريغها t_d . وهذا يعني أن
 أزمنة عمل القواطع الساكنة $T_{di}(T_{disch})$ ،
 $T_{ci}(T_{ch})$ وتوتر وتيار خرج المولد النبضي



(a) إشارة قيادة العناصر النصف ناقلة
 $T_{ci}(T_{ch})$
 (b) توتر الخرج v_0
 (c) تيار الخرج i_0
 وذلك عند حمل أومي

الشكل (10) نبضات القدح وتوتر وتيار خرج المولد النبضي البرقي

أكبر ب 100 مرة من الطاقة المقدمة في كل نبضة توتر
 إلى الحمل المبيّنة بالمعادلة:

$$E_{Pulse} = n V_{dc} i_0 t_d \quad (5)$$

إذ t_d : زمن فترة التوصيل لكل حالة توصيل T_{di0} .
 بالنسبة إلى التيار i_0 تيار النبضة، يعطى بالمعادلة.

من المهم خلال فترة التفريغ للطاقة المخزنة في الساعات
 وظهور نبضة التوتر ألا يتجاوز هبوط التوتر على
 الساعات 10% تقريباً. وبذلك نضمن بقاء الاستطاعة
 مخزنة في الساعات، مع العلم أن القدرة المخزنة معطاة
 بالمعادلة:

$$E_{Cap} = \frac{n}{2} C_i U_C^2 \quad (4)$$

إذ إن U_C : التوتر على الساعات n الذي يجب أن يكون

وفقاً لتقنية الدارة المبيّنة في الشكل (10). وبناء على ذلك سيكون هناك زمن ميت بين نبضات تحكم للدخل. لذلك يؤخر زمن التحكم T_{di} للقواطع IGBTs وفقاً لزمن التحكم T_{ci} للقواطع والعكس بالعكس. فضلاً عن ذلك ستكون هناك إشارات تحكم بالقواطع الإلكترونية الساكنة المبيّنة في الشكل (10)، $V_{gs}(T_{ci})$, $V_{gs}(T_{di})$ على التوالي للأزمنة T_{di} , T_{ci} التي يجب أن تقاد بشكل مترام.

يتزايد تعقيد نظام القيادة مقارنة بالدارة في الشكل (7). فضلاً عن ذلك فإن كافة القواطع الإلكترونية تقع تحت جهود مختلفة، وهذا يتطلب دارات قيادة مع عزل غلفاني (أي تستخدم ألياف بصرية لنقل الإشارات إلى البوابات).

2-2-2 نتائج نمذجة المولد النبضي المقترح

باستخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink:

تتمتع البيئة البرمجية Matlab/Simulink بمجموعة من السمات التي تمكن من استخدامها للنمذجة، حيث توجد مكتبة حاوية على العناصر الإلكترونية كلّها مثل الديودات والثايرستورات والترانزستورات بأنواعها، والمقاومات والمفاعلات والمكثفات وعناصر أخرى يمكن من خلالها تركيب دارات توليد النبضات الملائمة للمولد النبضي البرمقي. كما أن هذه البيئة البرمجية تعطي نتائج جيدة وقريبة من الواقع التجريبي؛ وذلك لاعتمادها على المعادلات الرياضية الواصفة لكل عنصر من العناصر الموجودة فيها. يبيّن الشكل (11) نموذج مولد نبضي برمقي موجب باستخدام البيئة المكتبيّة Matlab/Simulink، وذلك بما يتوافق مع المولد النبضي البرمقي المراد تنفيذه عملياً:

$$i_0 = n V_{dc} / Z_{load} \quad (6)$$

بالنسبة إلى الثابت الزمني لتخادم الموجة فهو مرتبط بنوعية الحمل، وفي مثالنا الحمل أومي، كما أن السعات مشحونة بتوتر يساوي توتر المنبع V_{dc} ، وعليه سيكون التخادم أسياً بحسب المعادلة:

$$V_0 = n V_{dc} e^{(-t/(R_{eq} \times C_{eq}))} \quad (7)$$

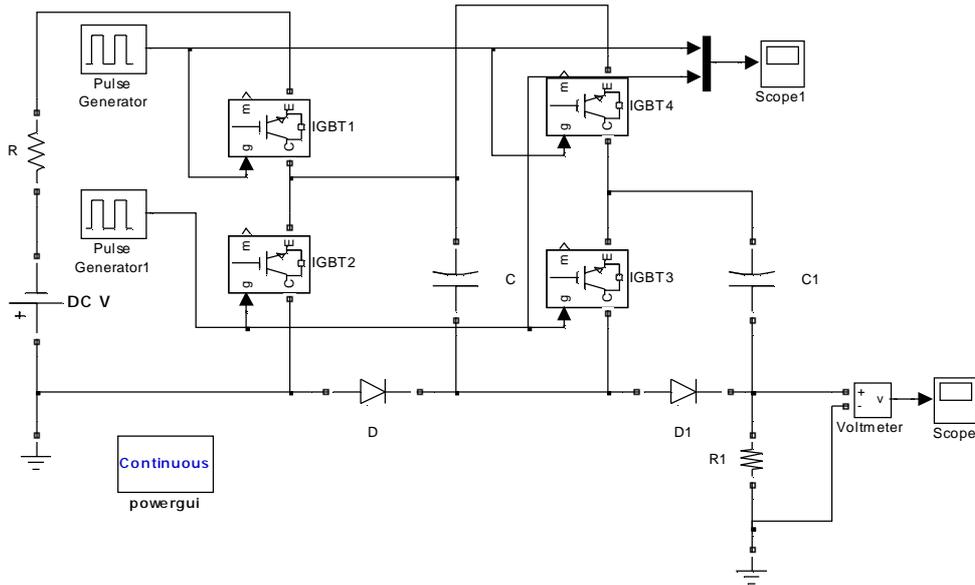
مع العلم أن C_{eq} : السعات المكافئة للسعات المربوطة على التسلسل C_i .

R_{eq} : تمثل المقاومة الأومية المكافئة للمقاومات التسلسلية خلال فترة التفريغ وقيمتها صغيرة نسبياً. تضمن التقنية المستخدمة في هذا المولد إذا حدثت مشكلة في عمليات تزامن الفصل والوصل أو حالة حدوث عطل، فإن كل قاطع الكتروني يحجز التوتر V_{dc} (أعظم توتر شحن للسعات C_i).

مثال على ذلك إذا انتقل القاطع $T_{dn}(T_{ch})$ إلى حالة التوصيل لسبب ما لأبعد من الزمن المتبقي للقواطع $T_{di}(T_{disch})$ ، سيبقى الديود D_n بحالة التوصيل خلال هذه الفترة، ويحافظ بذلك على التوتر على النهايات خلال الزمن T_{dn} ومساوياً إلى التوتر على طرفي السعة C_n (أي يبقى التوتر على طرفي الحمل الأومي مساوياً لتوتر C_n) خلال هذه الفترة فإن توتر الحمل يبقى مساوياً القيمة:

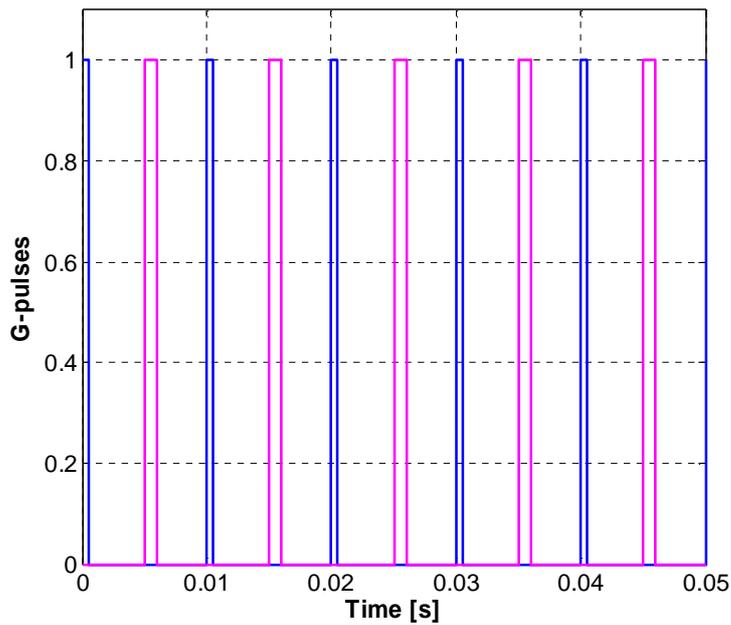
$$V_0 = -(n-1)V_{dc} \quad (8)$$

وفقاً للميزات المذكورة سابقاً وتسلسل عمليات الفصل والوصل وترتيب القواطع المبيّن في الشكل (7)، يُمكن ذلك من وضع التركيبة السابقة للعناصر الإلكترونية في دارة واحدة مغلقة، أي ضمن صندوق، وهذه ميزة لبناء الدارة اللازمة لقيادة العناصر الإلكترونية النصف ناقلة. يجب تجنب حدوث تقاطع بأزمنة التوصيل T_{ci} , T_{di} .



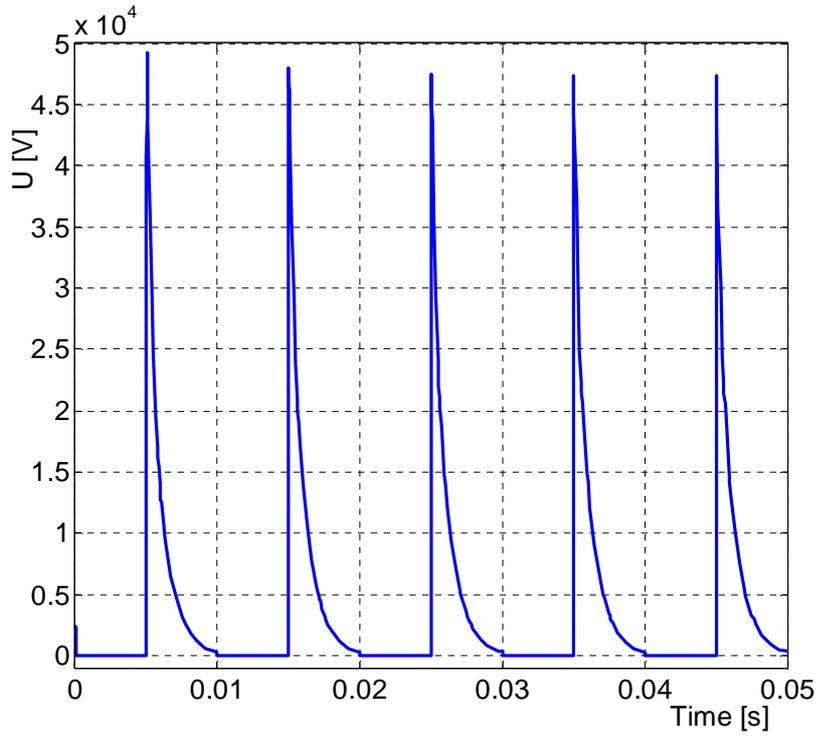
الشكل (11) نمذجة مولد نبضي برفي موجب باستخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink

يبين الشكل (12) نبضات القيادة للتحكم بعمل الترانزستورات:



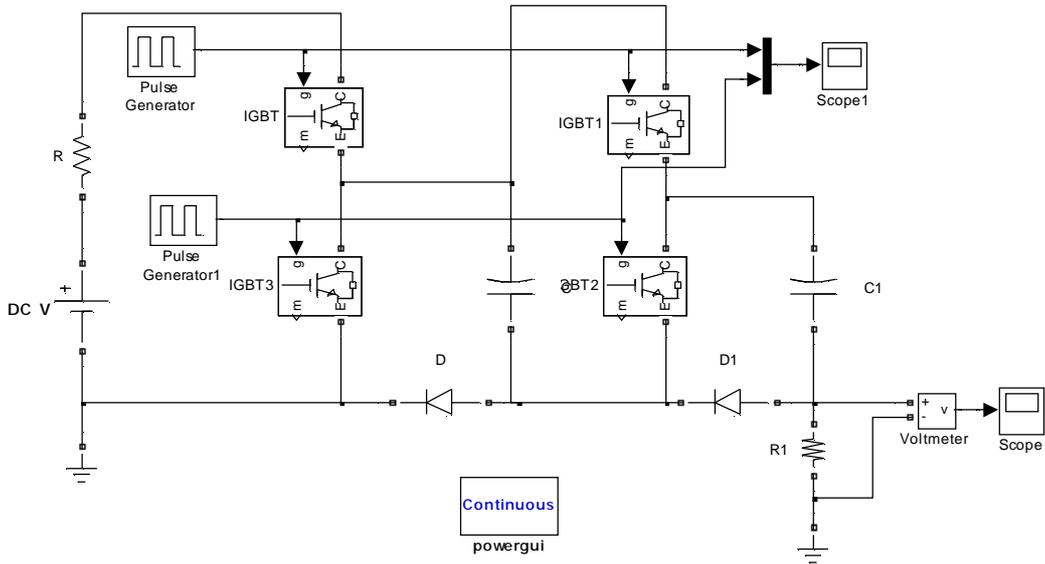
الشكل (12) نبضات القيادة للتحكم بعمل الترانزستورات

ويبين الشكل (13) الموجة النبضية البرقية الموجبة الناتجة:



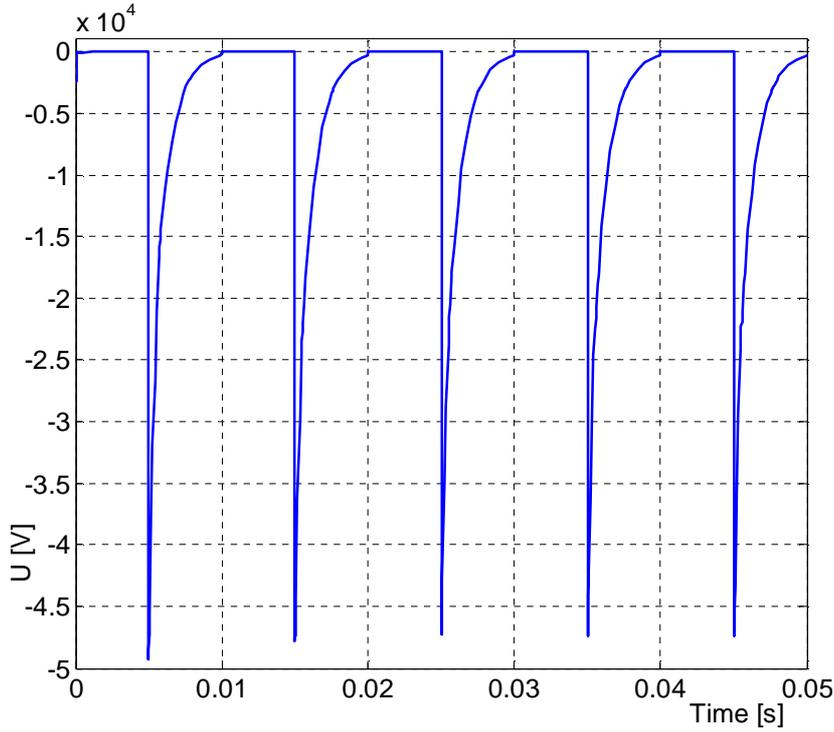
الشكل (13) الموجة النبضية البرقية الموجبة الناتجة

ويبين الشكل (14) نمذجة مولد نبضي برقي سالب باستخدام البيئة المكتبية Matlab/Simulink



الشكل (14) نمذجة مولد نبضي برقي سالب باستخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink

عند تطبيق نبضات القذح المبينة في الشكل (12) نفسها سالبية، ويبين الشكل (15) الموجة النبضية البرقية السالبة على القواطع الإلكترونية سوف نحصل على نبضة برقية الناتجة.

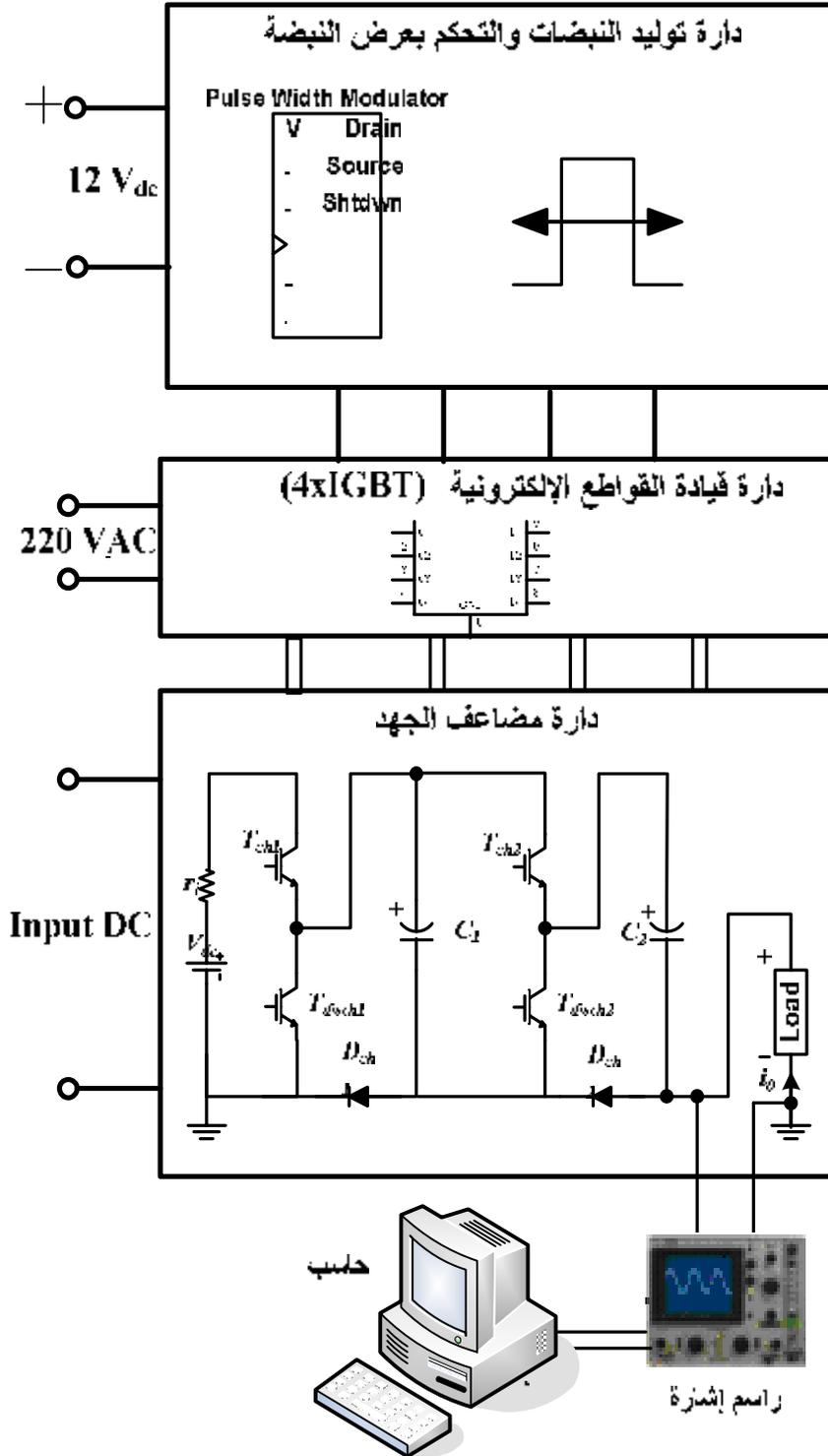


الشكل (15) الموجة النبضية البرقية السالبة الناتجة

5- النتائج التجريبية:

التي تحتوي على منابع توتر مستمرة ومكبرات عمليات ومحولات عزل وديودات عزل وعناصر إضافية، ودارة مضاعف التوتر التي تحوي على أربعة قواطع ومكثفات وديودات والحمل. ويبين الشكل (16) مخطط الدارة المنفذة للمولد النبضي الإلكتروني.

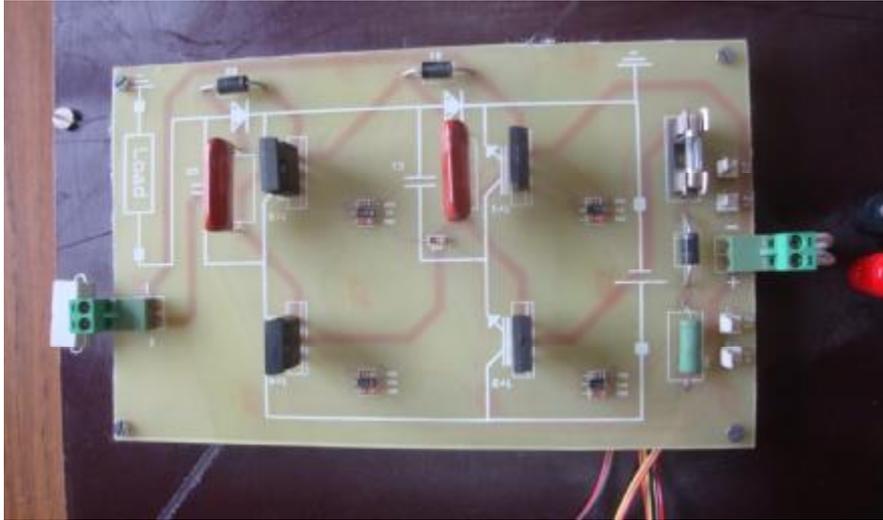
نقد نموذج مخبري للمولد النبضي المبين في الشكل (7) بمرحلتين. تتألف الدارة من دائرة إلكترونية لتوليد النبضات اللازمة لعمل القواطع الإلكترونية التي تزودنا بأربع نبضات مستطيلة الشكل، ومن دائرة قيادة للقواطع



الشكل (16) المخطط العام للدائرة المنفذة للمولد النبضي الإلكتروني.

الإلكترونية الحديثة بحيث تعطي على خرجها التوتر النبضي البرقي المطلوب.

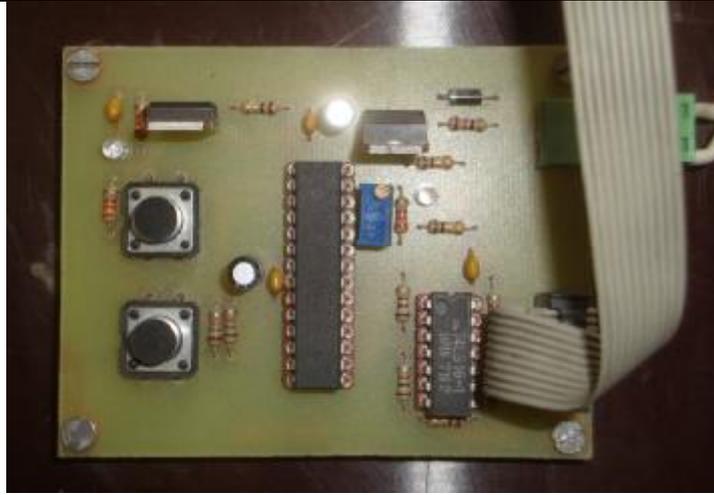
تبيّن الأشكال (17) و(18) و (19) التالية الدارات العملية المنفذة، وهي دارة الاستطاعة ودارة التحكم ودارة توليد النبضات التي ستطبق بدورها على القواطع



الشكل (17) دارة الاستطاعة المنفذة للمولد النبضي الإلكتروني.

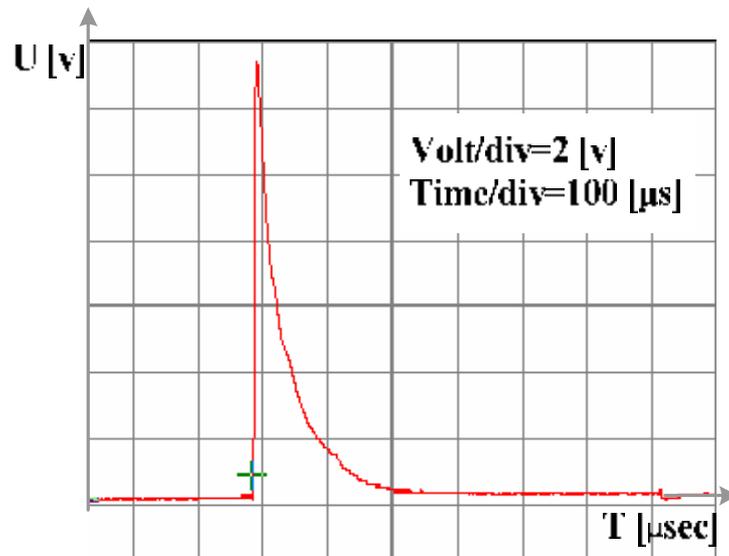


الشكل (18) دارة التحكم المنفذة للمولد النبضي الإلكتروني.

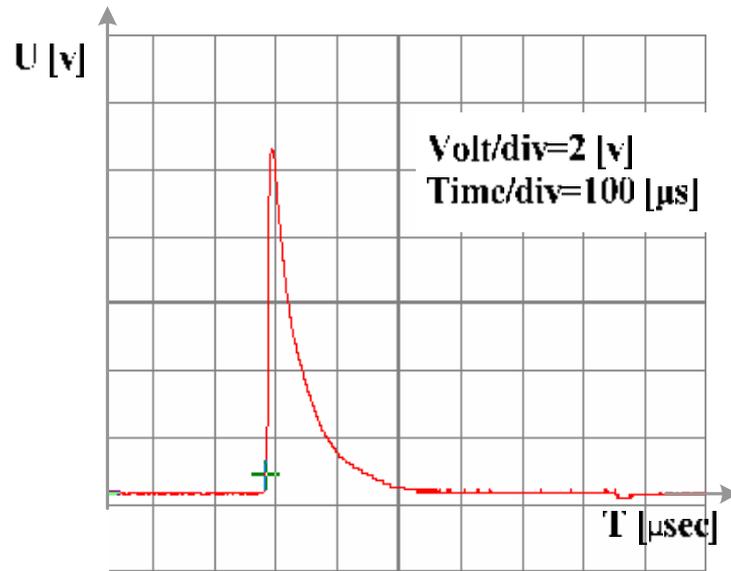
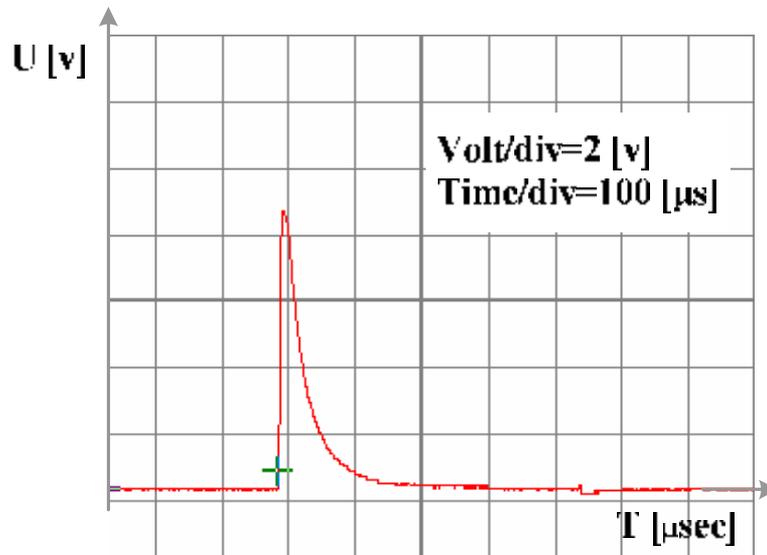


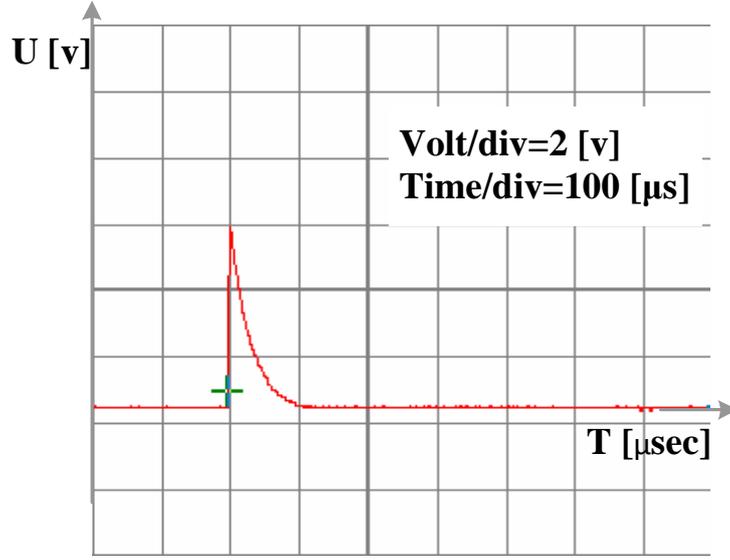
الشكل (19) دائرة توليد النبضات المنفذة للمولد النبضي الإلكتروني.

تبيّن الأشكال (20) و (21) و (22) و (23) التالية أشكال موجة التوتر النبضي البرقي التي تم الحصول عليها في الدارة المنفذة، وقد تم التحكم بمطال الموجة وزمن الموجة، مع العلم أن مقياس الرسم مبين على كل شكل.



الشكل (20) موجة نبضية برقية بزمن $T_r = 50 \text{ msec}$

الشكل (21) موجة نبضية برقية بزمن $T_r = 46 \text{ msec}$ الشكل (22) موجة نبضية برقية بزمن $T_r = 40 \text{ msec}$



الشكل (23) موجة نبضية برقية ب زمن $T_r = 30 \text{ msec}$

ترانزستور من النوع IGBT توتره الاسمي $600V$ ،
 وأماً بالنسبة إلى الديودات فإن توترها الاسمي $600V$ ،
 مع العلم أن تردد العمل $10kHz$. أمماً نبضات القدح
 المستخدمة فكانت بعرض $10ms$ وزمن جبهي $30ns$.
 يمكن بالاعتماد على المولد النبضي المقترح الحصول
 على توترات نبضية برقية بمطال عالٍ (عشرات
 الكيلوفولط) باستخدام الترانزستورات المذكورة بتوترات
 اسمية من رتبة الكيلوفولط.

5- الخاتمة :

إن دارة مولد التوتر النبضي البرقي المقترحة الذي يعتمد
 على العناصر الإلكترونية بالكامل، يمكن استخدامها
 لتوليد التوترات العالية بتردد عالٍ، وخاصة للتطبيقات
 التي تحتاج إلى نبضات برقية (توتر نبضي برقي). إن
 عناصر الاستطاعة المستخدمة في مولد ماركس التقليدي
 لشحن مكثفات التخزين وتفريغها، سوف تستبدل بقواطع
 إلكترونية، وسوف يؤدي ذلك إلى زيادة أداء الدارة
 وخفض التكاليف بشكل كبير، وعليه يزداد تردد التكرار
 النبضي. تستخدم هذه التقنية المبدلات نصف جسرية،
 التي يكون توتر الحجز العكسي الأعظمي للقواطع
 الالكترونية فيها مساوياً لتوتر التغذية حتى في حال عدم
 التطابق في عمليات الوصل والفصل للقواطع الإلكترونية
 أو في حالة الأعطال.

تمت نمذجة وتنفيذ نموذج مخبري لمولد توتر نبضي
 برقي ذي مرحلتين، وقد استخدم في هذا المولد معالج
 صغري لقيادة القواطع الإلكترونية التي كانت عبارة عن

المراجع:

- [1] د. محمد نضال الرئيس: الصواعق (ماهيته، آليتها، خواصها، والأسس النظرية للحماية منها)، دورة شبكات التأسيس والحماية منها ، نقابة المهندسين السوريين - دمشق 26-28 /9/ 1992.
- [2] د. محمد نضال الرئيس: نظم الحماية من الصواعق، وأخطارها.
- [3] مجلة العلوم، المجلد 6، العدد (5) - 1990
- [4] د. محمد نضال الرئيس: حماية المنشآت من الصواعق، ندوة الحماية من الصواعق - نقابة المهندسين السوريين، دمشق 1995.
- [5] M. Uman, The lightning discharge international geophysics series . Volume 39.
- [6] Haydon . S. C. The physics of lightning Proceedings Symposium on Non-conventional Lightning Protection, Paper No, 1, Inst. Eng, Aust, Sydney, October, 1986.
- [7] د. إحسان الفهد، هندسة التوتر العالي 2، -جامعة دمشق .
- [8] HIGH VOLTAGE IMPULSE GENERATOR USING HV-IGBTs, M. Giesselmann, B. Palmer, A. Neuber Texas Tech University, Center for Pulsed Power & Power Electronics Dept. of Electrical & Computer Engineering. USA
- [9] An Impulse Generator Simulation Circuit, S. E. Meiners, Miami University 1997.