تحسين جودة الطاقة الكهربائية في شبكات التوزيع بالاعتماد على مرمم الجهد الديناميكي

م.علاء ديوب، طالب دكتوراه في قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهمك – جامعة تشرين
د.هيثم دغرور، أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهمك – جامعة تشرين
د. نسمت أبوطبق، مدرس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهمك – جامعة تشرين

الملخص

في هذا البحث ، يتم استخدام مرمم الجهد الديناميكي (DVR) لتحسين جودة الطاقة عن طريق القضاء على التوافقيات وتقليل تدلي الجهد والانتفاخ الملحوظ بكثرة في نظام التوزيع. كما تمت مناقشة مخططات حقن الجهد المختلفة. يتم هنا اقتراح تقنية تحكم جديدة لضمان جودة الطاقة من خلال التحكم في مكثف دعم موصول مع DVR.

تُستخدم نظرية الإطار المرجعي المتزامنٍ SRF لتحويل الجهود من المتجهات الدوارة إلى الإطار الثابت. كما تم توضيح استخدام DVR مع نظام تخزين الطاقة بالبطارية للتخلص من مشاكل جودة الطاقة المذكورة أعلاه.

الكلمات المفتاحية: تدلي الجهد، انتفاخ الجهد، جهاز التعويض التسلسلي، مرمم الجهد الديناميكي، توافقيات الجهد، تحويل بارك.

Abstract

In this paper, a dynamic voltage restorer (DVR) is used to improve power quality by eliminating harmonics and reducing voltage droop and swelling frequently observed in the distribution system. Various voltage injection schemes are also discussed. A new control technology is proposed here to ensure power quality by controlling a support capacitor connected with the DVR.

SRF is used to convert voltages from rotating vectors to the stationary frame. The use of a DVR with a battery energy storage system has also been demonstrated to eliminate the power quality problems mentioned above.

Keywords: voltage sag, voltage swell, serial compensation device, dynamic voltage restorer, voltage harmonics, park transform.

1- المقدمة

أصبحت جودة الطاقة مصدر القلق الرئيسي في أنظمة الطاقة منذ تسعينيات القرن الماضي

تعرف جودة الطاقة الكهربائية على أنها مقياس للطاقة الكهربائية المقدمة للحمل الكهربائي من حيث الجهد والتيار والتردد والشكل الموجي. مع أي انحراف عن هذه البارمترات ، يُقال أن النظام ذو جودة طاقة ضعيفة. بشكل عام ، أي مشكلة فنية تظهر في الجهد أو التيار أو انحراف التردد سوف يؤدي إلى عطل في معدات المستخدم وبالتالي هو مصدر قلق لجودة الطاقة.

في الوقت الحاضر ، تعد جودة الطاقة الكهربائية واحدة من أهم القضايا في العصر الحالي ، حيث لوحظت مشاكل جودة الطاقة في نظام التوزيع مثل تدلي الجهد ، والانتفاخ ، والتوافقيات ، والانقطاعات في جهد التغذية بكثرة أدى الاستخدام الكبير للمعدات الرقمية مثل أجهزة تكنولوجيا المعلومات وتقنيات الاتصال مثل التحكم في سرعة المحركات ووحدات التحكم في معالجة الإشارات التي تعتمد في عملها على دارات الكترونيات القدرة المتقدمة، والإضاءة الموفرة للطاقة إلى تغييرات في تركيب الحمل الكهربائي وجعله أكثر تعقيداً [1].

يتم تعريف تدلي الجهد على أنه انخفاض من (0.9 p.u– 0.1) في القيمة الفعلية لجهد نظام التغذية والذي يستمر من نصف دورة إلى دقيقة واحدة[2,3]، ومن أسباب حدوثه بدء اقلاع الأحمال ذات الاستطاعة العالية– تهييج المحولات وتشغيل المحركات الضخمة – الأحداث الخارجية مثل تخرب الناقل أو تلف الكابلات تحت الأرض، البرق، سرقة النحاس في محطات التوزيع. في حين أن الانتفاخ هو الزيادة في القيمة الفعلية لجهد التغذية بنسبة (% 190 – 110) من الجهد الاسمي عند تردد نظام القدرة لمدة 0.5 دورة إلى دقيقة واحدة[4]. يحدث التدلي / الانتفاخ بسبب بدء / إيقاف الأحمال

ذات الاستطاعة الكبيرة ، وإمدادات الطاقة ذات الأبعاد الضعيفة ، والمحولات سيئة التنظيم (خاصة خلال ساعات الذروة) .

من أجل تجنب هذا النوع من مشاكل جودة الطاقة في نظام التوزيع ، فإننا نستخدم أجهزة طاقة مخصصة. تتكون أجهزة الطاقة المخصصة من ثلاث فئات ، وهي المعوضات المتصلة على التسلسل مع نظام التوزيع والمعوضات المتصلة على التفرع والمُعوضات المتصلة على التسلسل والتفرع معاً.

هنا ، في هذا البحث ، نستخدم معوضاً متصلاً على التسلسل يسمى DVR (مرمم الجهد الديناميكي). DVR عبارة عن معوض متصل على التسلسل مع نظام القدرة يعمل على تنظيم الجهد والحفاظ على قيمة ثابتة لجهد الحمل عند حدوث اضطرابات مثل التدلي والانتفاخ والتوافقيات[5]. لذلك لتحسين جودة الطاقة في نظام التوزيع ، نفضل استخدام DVR والتأكد من أن DVR سيحمي الأحمال الحساسة من الاعطال وتجنب الخسائر الناجمة عنها.

DVR هو أحد أكثر أجهزة الطاقة المخصصة فعالية وكفاءة مع مزايا الاستجابة السريعة والتكلفة المنخفضة والحجم الأصغر. يتكون في بنيته من وحدة تحكم لحساب قيمة الجهد المراد إضافته أو إزالته من أجل الحفاظ على الجهد الثابت [5,6]. يتم التحكم في DVR بواسطة متحكم تناسبي تكاملي (PI) ومولد عرض النبضة PWM. المتحكم PI هو نوع من أجهزة التحكم في التغذية الخلفية (feedback) التي تشغل النظام ليتم التحكم فيه بدقة. تولد الإشارة المرغوبة لمولد النبضات PWM لتشغيل المفاتيح الالكترونية الموجودة في الانفيرتر VSI. تعد حلقة كشف الطور (PLL) وتحويل dq0 أيضاً من المكونات الأساسية لجهاز DVR. يستخدم في هذا البحث نظرية الإطار المرجعي المتزامن لتحويل الجهود من المتجهات الدوارة إلى الإطار ثابت.

في هذا العمل تم تطوير أداء DVR لتحسين جودة الطاقة عند حدوث أعطال ثلاثية الطور في فترتين زمنيتين مختلفتين.

2- هدف البحث

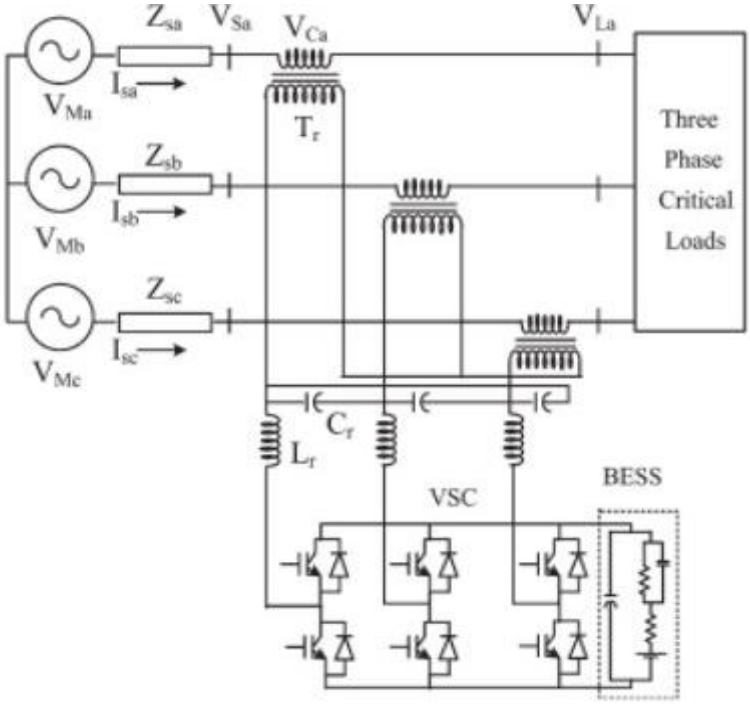
يهدف البحث الى تحسين جودة الطاقة الكهربائية لشبكة توزيع تغذي حمل حساس من خلال استخدام مرمم الجهد الديناميكي DVR ذي الحساسية العالية والاستجابة الديناميكية السريعة بالإضافة الى دراسة النتائج التي يحققها استخدام DVR في تخفيف تدلي الجهد وانتفاخ الجهد الذي يتعرض له الحمل الحساس.

3- مواد وطرق البحث

تعتمد الدراسة على النمذجة وذلك من خلال نموذج يحاكي استخدام جهاز مرمم الجهد الديناميكي مع شبكة توزيع كهربائية تغذي حمل حساس في بيئة (Matlab/siumlink) وذلك من أجل دراسة اضطرابات الجهد وتأثيرها على الحمل الحساس، بما يجعل النموذج مؤهلاً بما فيه الكفاية لتقييم أداء مرمم الجهد الديناميكي في تحسين جودة الطاقة عند ظروف تدلي الجهد وانتفاخ الجهد

3-1- مبدأ تشغيل DVR

في نظام الـ DVR المقترح المتصل بشبكة تغذية ثلاثية الطور تغذي حمل ثلاثي الطور من خلال ثلاثة محولات حقن متصلة على التسلسل . الجهود المكافئة متصلة بنقطة الاقتران المشتركة من خلال ممانعة . عند حدوث أي مشكلة في جودة الطاقة فإن الجهد المطلوب تعويضه سيتم حقنه في الطور باستخدام Lr و Cr والتي تمثل مكونات المرشح ، وبالتالي فإن جهد الحمل سيكون غير مشوه. يتكون الـ DVR المدروس من انفيرتر VSC (محول جهد مصدر التغذية) ثلاثي الطور مفاتيحه الالكترونية من نوع IGBT ومن ناقل للتيار المستمر DC ، يتم توصيل DVR مع نظام تخزين الطاقة بالبطارية BESS. يظهر الرسم التخطيطي DVR المتصل بنظام التغذية في الشكل1 [7].



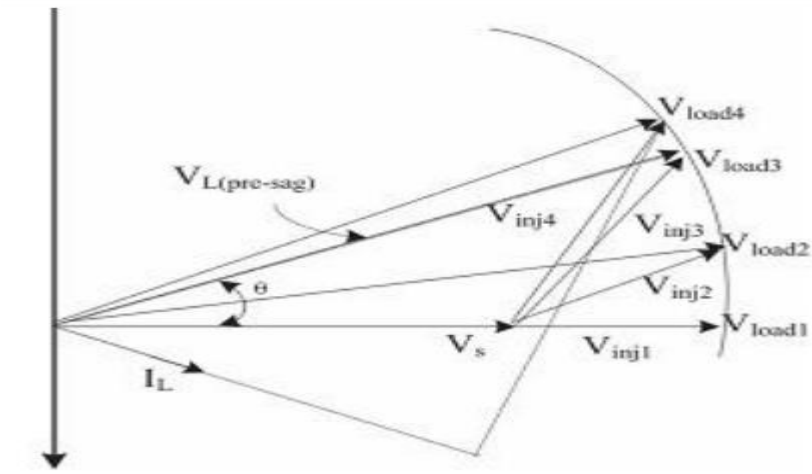
الشكل1 يظهر المخطط التوضيحي للنظام المتصل بـ DVR

3-2- مخططات حقن الجهد

في هذا البحث تم اقتراح تقنية تحكم جديدة للتحكم في DVR. يتم إدخال الجهد Vinj بحيث يكون جهد الحمل Vload ثابت من حيث القيمة وغير مشوه ، على الرغم من أن جهد التغذية Vs ليس ثابتاً في القيمة وقد يكون مشوهاً. يمكن حقن الجهد في أربع طرق. في المخطط الأول ، يكون الجهد المحقون في الطور منطبقاً على جهد التغذية. في المخطط 2 الجهد المحقون من قبل DVR يكون بزاوية صغيرة مع جهد التغذية وفي المخطط 3 يكون الجهد المحقون من قبل DVR يكون بزاوية أكبر من تلك التي في المخطط 2 مع جهد التغذية. الجهد المحقون من قبل DVR يكون عمودياً مع التيار في المخطط 4. بالتالي يكون معدل تعويض DVR في المخطط 1 أقل بالمقارنة مع المخطط 4.

لذلك يكون الجهد المحقون أعلى مقارنةً بالجهد المحقون بالطور. المخطط الطوري لمخططات حقن الجهد من قبل DVR موضحه في الشكل2 و

مقارنة معدلات التعويض التي يقدمها DVR في كل مخطط موضحه في الجدول –1



الشكل 2 مخططات حقن الجهد

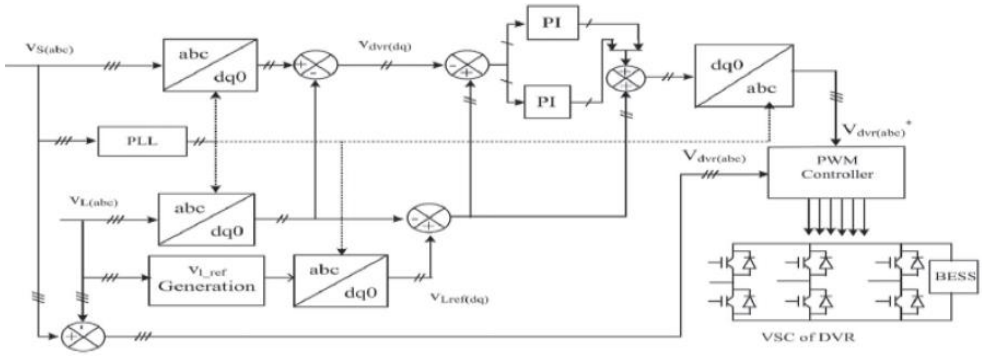
الجدول –1 مقارنة مدى التعويض المقدم من DVR لتخفيف التدلي

	مخطط جهد الحقن الاول	مخطط جهد الحقن الثاني	مخطط جهد الحقن الثالث	مخطط جهد الحقن الرابع
جهد الطور Phase voltage(V)	90	100	121	135
تيار الطور Phase current(A)	13	13	13	13
الاستطاعة المقدمة (VA) per phase	1170	1300	1573	1755
مقدار الاستطاعة المعوضة kVA (% of load)	37.5%	41.67%	50.42%	56.25%

3-2- التحكم في نظام DVR

يتكون DVR مع نظام تخزين الطاقةBESS من انفيرتر ، ومحولات الحقن يتصل بها مرشحات التمرير المنخفض، وحدة تحكم pi وأداة تخزين الطاقة. يوضح الشكل 3- مخطط دارة التحكم لـ DVR مع نظام تخزين طاقة بالبطارية. في حالة تدلي الجهد يمكن إجراء التعويض باستخدام DVR عن طريق امتصاص أو حقن الطاقة الفعلية أو الطاقة الردية [8]. إذا كان جهد الحقن عمودي على تيار الحمل ، فإن التعويض يتم من خلال حقن الطاقة الردية[9]، وفق هذا المخطط فإن DVR ذاتي الدعم بالطاقة المستمرة DC. أما اذا كان الجهد المحقون في الطور متوازي مع تيار الحمل ، عندها يقوم DVR بحقن الطاقة الفعلية وفي هذه الحالة يلزم وجود بطارية تغذي الانفيرتر الخاص بـ DVR عبر ناقل التيار المستمر. تقنية التحكم لها بعض الشروط مثل تحسين حجم تخزين الطاقة ونحسين قدرة حقن الجهد إذا كان الجهد المحقون عمودي مع تيار الحمل فإن الجهد المحقون هو Vinj4 وهذه الحالة مناسبة لـDVR المدعوم ذاتياً كما في هذا الحقن لا يتضمن حقن أي طاقة فعلية. ومع ذلك، في حالة الجهد المحقون في الطور Vinj1متوازي مع تيار الحمل فإن قدرة حقن DVR ستنخفض عند هذه الحالة DVR يعمل مع نظام تخزين الطاقة بالبطارية (BESS).

في مخطط دارة التحكم يتم استخدام حلقة كشف الطور المغلقة (PLL). حلقة كشف الطور المغلقة (PLL) عبارة عن دارة إلكترونية ذات جهد أو تيار متذبذب يتم تعديله باستمرار ليلائم تردد إشارة الدخل. المتحكم PI يزيد من سرعة الاستجابة و مرشحات التمرير المنخفض (LPF) تستخدم أيضاً للقضاء على التوافقيات.



الشكل 3 المخطط الصندوقي لدارة التحكم فيDVR باستخدام نظرية SRF

يمثل الشكل 3 المخطط الصندوقي لدارة التحكم في DVR مع نظرية SRF المستخدمة في تحديد الإشارة المرجعية.

هذه البارمترات (Vla, Vlb, Vlc) هي جهد الحمل الذي يتم تحويله إلى الإطار المرجعي الدوار باستخدام تحويل abc–dqo المعتمد على تحويل بارك ويتم اشتقاقها باستخدام حلقة كشف الطور وفق التالي

$$\begin{bmatrix} vl_q \\ vl_d \\ vl_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} vlaref \\ vlbref \\ vlcref \end{bmatrix} \qquad (1)$$

وبالمثل ، جهد الحمل المرجعي (Vla^*, Vlb^*, Vlc^*) والجهد VS في نقطة الاقتران المشترك PCC يتم تحويلهما أيضا الى الاطار المرجعي الدوار. بعد ذلك ، يتم الحصول على جهد DVR في الإطار المرجعي الدوار كالتالي

$$VD_d = Vs_d - Vl_d \quad (2)$$
$$VD_q = Vs_q - Vl_q \quad (3)$$

يتم الحصول على الجهد المرجعي لـ DVR في الإطار المرجعي الدوار وفق العلاقات التالية

$$VDd^* = Vsd^* - Vld \quad (4)$$
$$VDq^* = Vsq^* - Vlq \quad (5)$$

يتم تنظيم الخطأ بين الجهد المرجعي للـ DVR والجهد الفعلي في الإطار المرجعي الدوار باستخدام اثنين من المتحكمات التناسبية التكاملية (PI).

يتم تنظيم الخطأ باستخدام وحدة تحكم PI بين القيم الفعلية لجهود DVR والقيم المرجعية وفقًا للإطار المرجعي الدوار.

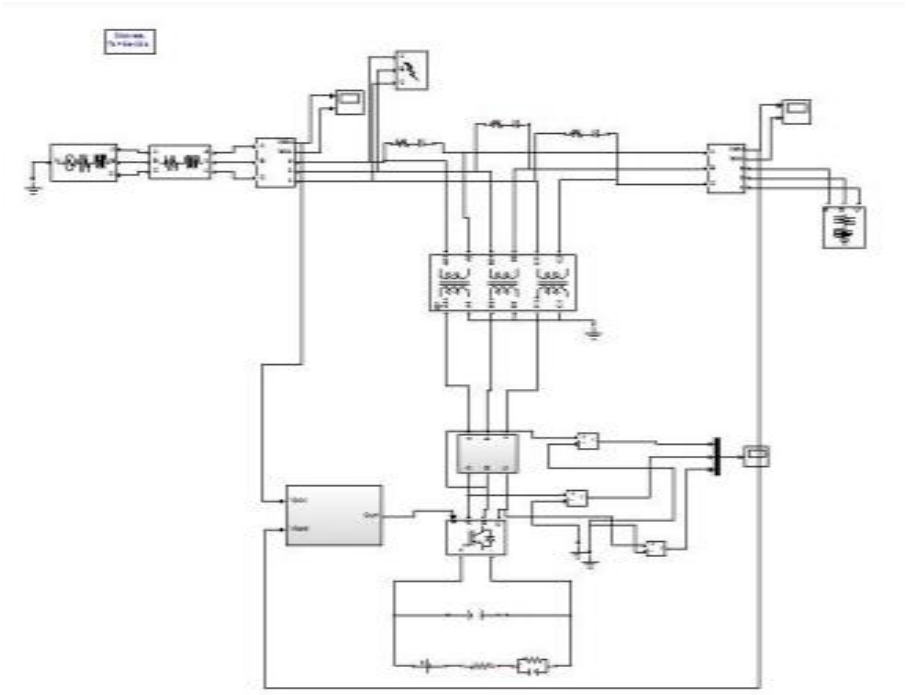
من المعادلة (4) ، نأخذ قيمة VDd^* ومن المعادلة (5) نأخذ قيمة VDq^*، وبالنسبة لـ $VD0^*$ ، نعتبر قيمتها صفر، ثم يتم الحصول على قيم الجهود المرجعية لـ DVR وفقًا لإطار abc باستخدام تحويلات بارك العكسية ، كما هو موضح في العلاقة التالية(6)

$$\begin{bmatrix} V_{DVRa}{}^* \\ V_{DVRb}{}^* \\ V_{DVRc}{}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VDd^* \\ VDq^* \\ VD0^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

نلاحظ أن الجهود المرجعية $(V_{DVRa}{}^*, V_{DVRb}{}^*, V_{DVRc}{}^*)$ والجهود الفعلية $(V_{dvra}, V_{dvrb}, V_{dvrc})$ من DVR تُستخدم لتوليد نبضات بوابة الانفيرتر المستخدم في DVR عبر وحدة التحكم PWM ، والتي تعمل بتردد تبديل يصل الى 10kHz.

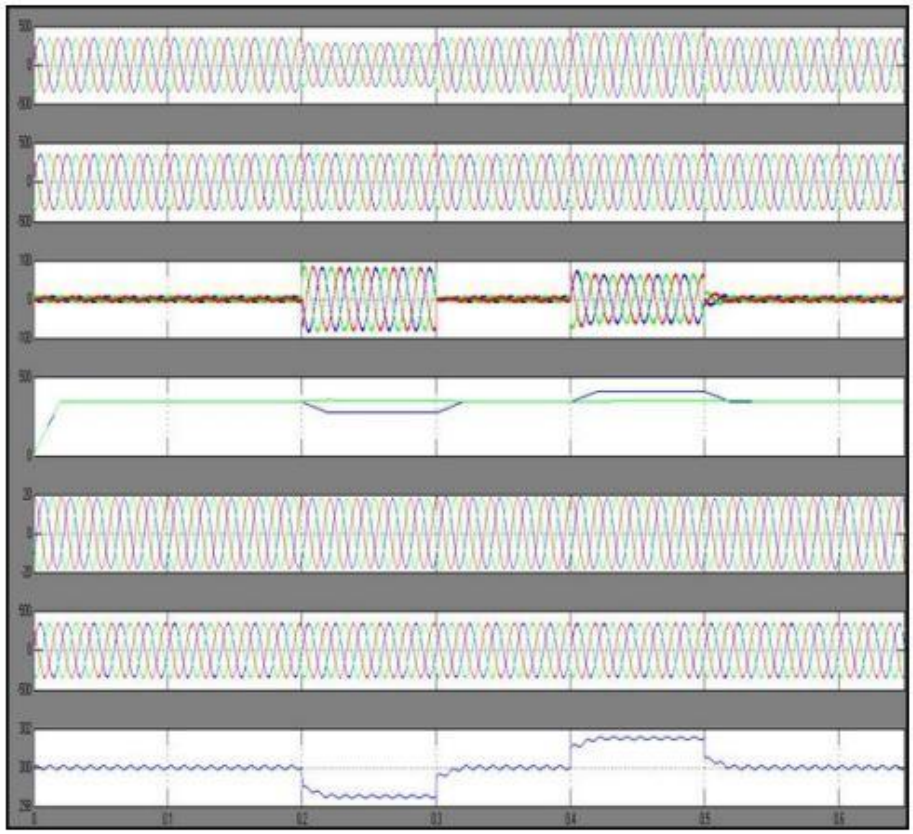
4- نتائج المحاكاة والنمذجة

يتكون نظام التشغيل الذي تتم دراسته في هذا البحث من DVR متصل بنظام تغذية ثلاثي الطور وحمل ثلاثي الطور شديد الحساسية لمشاكل جودة الطاقة . تمت محاكاة DVR المقترح مع نظام تخزين الطاقة بالبطارية BESS وفق برنامج ماتلاب / سيمولينك كما هو موضح في الشكل 4. يعتبر الحمل المدروس حمل خطي استطاعته 10 كيلو فولت أمبير وعامل القدرة له pf=0.8. يتم تحليل أداء DVR عند حدوث اضطرابات مختلفة في جهد التغذية، مثل تدلي الجهد وانتفاخه.



الشكل4 نمذجة الـ DVR مع نظام تخزين الطاقة بالبطاريةBESS

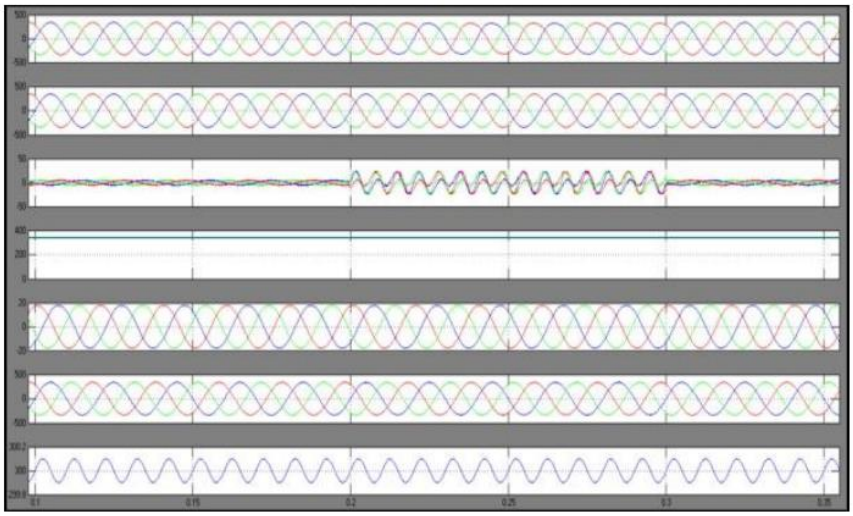
يوضح الشكل5 الأداء الديناميكي للنظام المدروس عند حدوث تدلي الجهد وانتفاخه على الحمل الحساس عند حدوث عطل متوازن. عند 0.2 ثانية ، يتم إنشاء تدلي في جهد التغذية لمدة خمس دورات ، وعند 0.4 ثانية ، يكون هناك انتفاخ في جهد التغذية تم إنشاؤها لمدة خمس دورات. ويلاحظ أن جهد الحمل يبقى بقيمة ثابتة عند حدوث كل من التدلي والانتفاخ مما يثبت فعالية أداء DVR المستخدم كما هو موضح وفق تسلسل الرسم البياني للنتائج(جهد التغذية عند حدوث التدلي والانتفاخ Vs– جهد التغذية قبل حدوث التدلي والانتفاخ Vs – جهد التعويض VDVR– جهد الحمل VL بعد التعويض المقدم من قبل DVR – تيارات مصدر التغذية Is– جهد الحمل المرجعي VLref – الجهد المستمر Vdcعبر وصلة DC–Link)



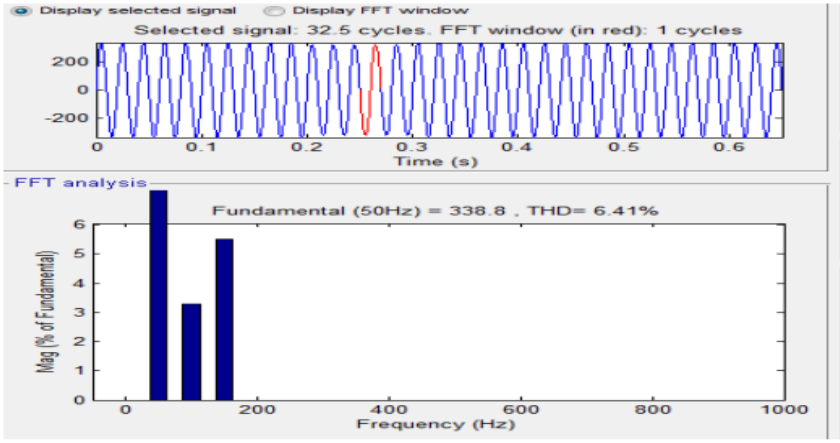
الشكل 5 الأداء الديناميكي لـ DVR عند التعويض في الطور عند حدوث تدلي وانتفاخ الجهد المطبق على الحمل الحساس.

في الشكل6 يتم توضيح الأداء الديناميكي لـDVR أثناء حدوث التوافقيات في جهد التغذية، عند 0.2 ثانية ، يكون جهد التغذية مشوهاً ويستمر لمدة خمس دورات. جهد الحمل حافظ على الشكل الجيبي عن طريق الحقن المناسب للجهد بواسطة DVR.
كما هو موضح وفق تسلسل الرسم البياني للنتائج(جهد التغذية المشوه بالتوافقيات Vs– جهد الحمل المشوه بالتوافقيات VL – جهد الحقن VDVR لمنع التوافقيات– جهد الحمل VL بعد القضاء على التوافقيات من قبل DVR – تيارات مصدر التغذية Is بعد القضاء على التوافقيات – جهد الحمل المرجعي VLref – الجهد المستمر Vdcعبر وصلة

(DC–Link) ويلاحظ أنه يتم تقليل التشوه التوافقي الكليTHD لجهد الحمل من 6.34٪ إلى مستوى 0.66٪ من قيمة التشوه الكلي الموجود مسبقاً في جهد التغذية.



الشكل 6 الأداء الديناميكي للـ DVR أثناء التوافقيات في جهد التغذية المطبق على الحمل الحساس



الشكل7 الطيف التوافقي أثناء الاضطراب

5- الاستنتاجات والتوصيات

- تم توضيح تشغيل DVR باستخدام تقنية تحكم جديدة تم اختبارها على طرق مختلفة لمخطط حقن الجهد مبينة في الجدول -1.
- تُظهر مقارنة أداء DVR بالمخططات الموجودة في الجدول -1 أن مخطط حقن الجهد الأول V_{inj1} هو الأفضل في تحقيق الكفاءة والأداء الأفضل مقارنة ببقية المخططات
- تم استخدام نظرية SRF لتحديد قيمة جهد DVR المرجعي والتي أثبتت فعاليتها في سرعة الحساب والدقة المضافة الى دارة التحكم
- يعد نموذج DVR المطور فائدة هندسية مفيدة للتحليل المستقبلي وتطوير أنظمة وتطبيقات تحسين جودة الطاقة الأحدث.
- أخيراً، نوصي باستخدام DVR ذي تصميم مناسب في نظم القدرة الكهربائية لحماية الاحمال الحساسة وخاصة الصناعية منها من الوصول الى الانقطاع الدائم بسبب تدلي الجهد وانتفاخه وتحسين جودة نظام القدرة الكهربائي.

6- المراجع

[1] C.-C.Fung,W.Thanadechteemapat and D.Harries,2019-Acquiring knowledge and information on alternative energy from the world wide web,in Power & Energy Society General Meeting.

[2] C.Benachaiba and B.Ferdi,2018-Voltage Quality Improvement Using DVR.Electrical Power Quality and Utilisation,vol. 14, no.1, pp.39-45.

[3] G.C.Lazaroiu,2013-Power Quality Assessment in Small Scale Renewable Energy Sources Supplying Distribution Systems, Energies, vol.6,no.1,pp. 634-645.

[4] A.Sadigh and K.Smedley,2012- Review of Voltage Compensation in Dynamic Voltage Restorer (DVR),IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego.

[5] S. Pal and S. Nath, 2010- An Intelligent onLine Voltage Regulation in Power Distribution System, in Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), International Conference on, Allahabad.

[6] Zhan,C, Ramachandaramurthy, V. K,Arulampalam, A, Fitzer,C, Kromlidis, S, Bames, M, and Jenkins, 2011- Dynamic voltage restorer based on voltage space-vector PWM control. IEEE transactions on Industry applications, 37(6), 1855–1863.

[7] Ghosh, A, Jindal, A.K, and Joshi, 2014- Design of a capacitor supported dynamic voltage restorer (DVR) for

unbalanced and distorted loads. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(1), 405–413.

[8] A. Ghosh and G. Ledwich, 2011- Structures and Control of a Dynamic Voltage Regulator, in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, Ohio.

[9] Nazarpour,D.Farzinnia, and Nouhi, H, 2017-Transformer-less dynamic voltage restorer based on buck-boost converter.IET Power Electronics,10(13),1767–1777.