

## Comparing Wind Turbine Performance With Doubly-Fed Induction Generator In Two Cases: Matrix Converter And Traditional Converter

Dr . Tarek Kherbek\*  
Dr . Nesmat Abu Tabak\*\*  
Haitham Mohammed\*\*\*

(Received 20 / 6 / 2017. Accepted 17 / 8 / 2017)

### □ ABSTRACT □

Most of wind turbines are equipped with an Induction Generator (IG) combined with a traditional converter (AC-DC-AC).

The AC-DC-AC converter is installed between the stator (or rotor) of the generator and the electrical grid in order to control the wind turbine shaft speed and consequently extraction the maximum power from the wind.

These converters have an intermediate DC-link for energy storage, which increases the total weight and size of them, as well as the losses and the system costs.

In this research, I suggest substituting the Traditional Converter by Matrix Converter (MC), which does not require the DC-link and performs the direct AC-AC conversion. Using (MC) converter decrease losses and allows the maximum wind power extraction (MPPT).

The wind generation system is modeled using the (MATLAB R2012a Simulink) and the Simulink results are compared in two cases: Using traditional converter versus matrix converter. The results appears that using matrix converter realises less losses in electronic switches than using traditional converters, and the velocity of induction machine is exposed to less vibrations intransient state.

**Keywords:** Wind Turbine, Doubly-Fed Induction Generator, Matrix Converter, Traditional Converter, Maximum Power Point Tracking.

---

\* Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

\*\*Lecturer, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.

## مقارنة أداء العنفة الريحية ذات المولد التحريضي مضاعف التغذية في حالتين: مبدلة مصفوفية ومبدلة تقليدية

الدكتور طارق خيربك\*

الدكتور نسمة أبوطيق\*\*

هيثم محمد\*\*\*

(تاريخ الإيداع 20 / 6 / 2017. قُبل للنشر في 17 / 8 / 2017)

### □ ملخص □

إن أغلب توربينات الرياح مجهزة بمولد تحريضي (IG) Induction Generator مرتبط مع مبدلة ترددية تقليدية (Traditional Converter) (AC-DC-AC). تُركب المبدلة التقليدية (AC-DC-AC) بين ثابت (دائر) المولد والشبكة الكهربائية حتى يتمكن من التحكم بسرعة محور العنفة الريحية وبالتالي استخلاص الاستطاعة العظمى من الريح. تملك هذه المبدلات حلقة (DC) وسيطية لتخزين الطاقة، الأمر الذي يزيد من الوزن الكلي وحجم المبدلة، بالإضافة إلى الضياعات وكلفة النظام. نقترح في هذا البحث استبدال المبدلة التقليدية بمبدلة مصفوفية (MC) Matrix Converter والتي لا تتطلب حلقة وسيطية وقادرة على إنجاز تحويل (متناوب - متناوب) (AC-AC) بشكل مباشر. يؤدي هذا الأمر لإنقاص الضياعات وبالتالي الاستفادة من أكبر قدر ممكن من الطاقة بالإضافة إلى ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT) Maximum Power Point Tracking.

قمت بنمذجة نظام التوليد الريحي باستخدام برنامج (MATLAB R2012a Simulink) ومن ثم الحصول على نتائج المحاكاة ومقارنة النتائج في حالتين: المبدلة التقليدية والمبدلة المصفوفية. حيث أظهرت النتائج أهمية استخدام المبدلات المصفوفية كونها تؤمن ضياعات أقل بالمفاتيح الإلكترونية بحكم أن عدد هذه المفاتيح بالمبدلة المصفوفية أقل منها في المبدلة التقليدية، أيضاً باستخدامها تتعرض سرعة الآلة التحريضية لحالة عابرة أقل تذبذباً.

**الكلمات المفتاحية:** العنفة الريحية، المولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة، المبدلة المصفوفية، المبدلات التقليدية، تعقب نقطة الاستطاعة الأعظمية.

\*أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\*مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\*\*طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## مقدمة:

إن أهمية طاقة الرياح كمصدر من مصادر الطاقة المتجددة أدت إلى التطوير السريع لتقنية العنفات الريحية خصوصاً في السنوات الأخيرة. تستخدم المولدات الريحية في تطبيقات شحن المدخرات التي تعمل بشكل منفصل عن الشبكة كما تستخدم كنظام هجين مع المولدات التي تعمل بمشتقات النفط وكذلك في الأنظمة الموصولة مع الشبكة العامة.

لقد كان لعنفات الرياح الأولى استطاعة قدرها (50 KW) باستخدام آلة تحريضية بسيطة موصولة مباشرة إلى شبكة استطاعة ثلاثية الطور، لكن استخلاص الطاقة من مجال السرعة المحدودة يهدر الكثير من طاقة الرياح المتاحة. يوجد عنفات رياح مجهزة بآلة تزامنية كمولد مع أو بدون علبة سرعة، حيث يضبط الجهد والتردد إلى الشبكة وتتصل باستخدام مبدلة (AC-DC-AC) مجهزة بمولد ذو سرعة قابلة للتعديل (ASG) Adjustable Speed Generator. لكن مكونات تخزين حلقة (DC) الوسيطة (المكثفات) يزيد من حجم ووزن المبدلة الكلي بالإضافة لكلفة النظام والضياعات وبالتالي إنقاص العمر الفني. يسمح هذا النوع بنقل كامل استطاعة النظام وبالتالي تعتمد كفاءة النظام على أداء المبدلة وهذا يعني مشروع كبير الكلفة والتعقيد [1].

أما المبدلة المصنوفية فتحتوي على تسعة مفاتيح تؤمن الربط المباشر بين الدخل والخرج المتناوبين ثلاثي الطور من دون وصلة تيار مستمر. حيث تجعل هذه الميزة المبدلة المصنوفية (MC) أخف وزناً، أرخص ثمناً وأقل حجماً من المبدلات التقليدية (AC-DC-AC). أيضاً بإمكانها تقديم كفاءة أعلى بالاعتماد على تحكم أنصاف النواقل ويسبب انخفاض الضياعات [2].

## أهمية البحث وأهدافه:

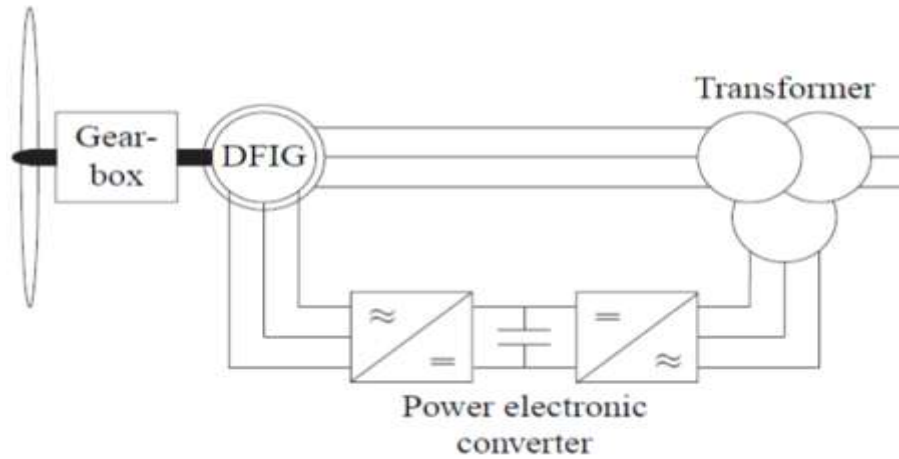
تظهر أهمية البحث من خلال التركيز على المقارنة بين أداء المبدلات التقليدية والمبدلات المصنوفية المستخدمة للتحكم بسرعة مولد تحريضي مضاعف التغذية في مجال العنفات الريحية. إن العمل على سرعة متغيرة في العنفات الريحية يساعد مساعدة فاعلة على استخلاص الاستطاعة الأعظمية من الطاقة الحركية للرياح. إن السبب في ذلك هو أن عدد المفاتيح الإلكترونية في المبدلات المصنوفية أقل ولا يوجد تحويل للجهد على مرحلتين. بالإضافة لذلك يمكن ضبط عامل الاستطاعة في جهة الشبكة الكهربائية المغذية. يمكن اعتبار هذه المقارنة المقترحة بين النوعين من المبدلات مساهمة جديدة في مجال العنفات الريحية بالإضافة إلى التعديل الذي أدخلناه على النموذج الجاهز في (MATLAB) للمبدلة المصنوفية حتى يتلاءم للعمل مع النموذج الرياضي الذي أنجزناه للعنفة الريحية مع مولد تحريضي ذو تغذية مضاعفة.

## طرائق البحث ومواده:

تمّ نمذجة ومحاكاة النظام المدروس باستخدام برنامج (MATLAB) على الحاسب الشخصي. بعد الحصول على النتائج قمنا بمقارنة نفس المقادير في حالتين هما: قيادة النظام باستخدام المبدلة التقليدية (AC-DC-AC) وحالة قيادة النظام باستخدام المبدلة المصنوفية.

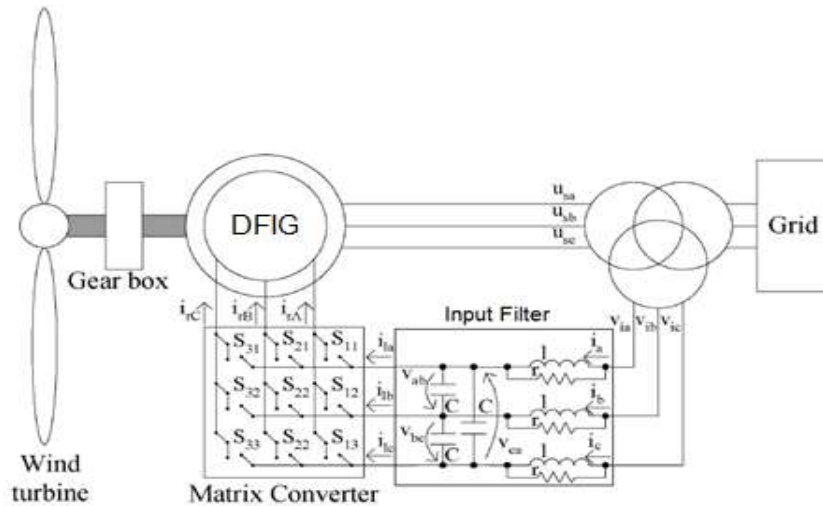
### الدراسة المرجعية:

يُظهر لنا المرجع [3] استخدام المبدلات الترددية التقليدية في أنواع محددة من المولدات المستخدمة في العنفات الريحية حيث يتبين لدينا أنّ استخدام هذا النوع يستلزم العمل على مرحلتين بالتالي ينقص من موثوقية النظام. تزيد مكونات تخزين حلقة (DC) الوسيطة من حجم ووزن المبدلة الكلي بالإضافة لكلفة النظام. انخفاض العمر الفني بسبب الضياعات الكبيرة نسبياً والتشوه الناتج عن التوافقيات. يتم نقل كامل الاستطاعة عبر المبدلة التقليدية وبالتالي ضياعات كبيرة نسبياً. يبين الشكل (1) بنية المبدلات التقليدية ذات حلقة الـ (DC) الوسيطة.



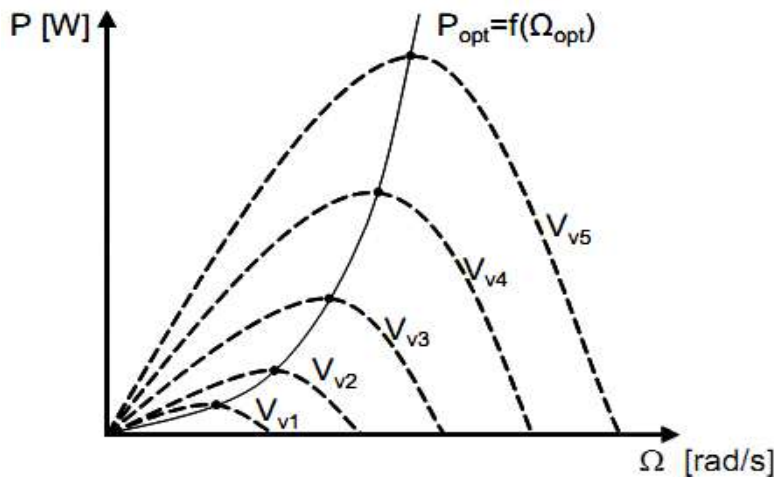
الشكل (1) وصل المبدلة التقليدية مع عنفة ريحية ذات تغذية مضاعفة

أمّا المرجع [4] فيشرح لنا بنية المبدلة المصفوفية وآلية عملها ومزايا استخدامها في تطبيقات طاقة الرياح. حيث ظهرت أول طبولوجيا لمصفوفة متناوب-متناوب (AC-AC) في عام (1976). بأية حال، بدأ التطور الحقيقي للمبدلات المصفوفية (MC) من خلال عمل قام به (Venturini) و (Alesina) والذي نشر في عام (1980)، حيث قاما بتقديم دارة استطاعة المبدلة كمصفوفة مفاتيح ثنائية الاتجاه وعرفوها باسم " المبدلة المصفوفية Matrix Converter (MC)". تتمتع بأهمية بالغة في العنفات الريحية كونها تؤمن ضياعات أقلّ باعتبارها تملك عدد مفاتيح أقلّ كما أنها أنقص حجماً وأرخص ثمناً. أهم ميزة فيها أنها مبدلة مباشرة (AC-AC) حيث تحوي على تسعة مفاتيح تؤمن الربط المباشر بين الدخل والخرج المتناوبين ثلاثي الطور من دون وصلة تيار مستمر. يظهر لنا الشكل (2) بنية المبدلة المصفوفية وآلية وصلها مع النظام الريحي.



الشكل (2) وصل المبدلة المصفوفية مع عنفة ربحية ذات تغذية مضاعفة

تم في المرجع [5] شرح مفهوم تعقب نقطة الاستطاعة الأعظمية وآلية هذا التعقب باستخدام المبدلات المصفوفية. يبين الشكل (3) أنه من أجل كل منحنى استطاعة موافق لكل سرعة رياح ثابتة يوجد نقطة واحدة حيث تكون الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الرياح أعظمية. لذا فإنه لاستخلاص الطاقة العظمى من الرياح، فإنه ينبغي على المتحكمات أن تضمن بأن تبقى العنفة على منحنى الاستطاعة الأعظمية بينما تتغير سرعة الرياح. ويتم عمل هذا بتغيير السرعة الدورانية للعنفة لتلائم سرعة الرياح.



الشكل (3) ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية عند سرعات رياح مختلفة

هناك عدة طرق للتحكم بالمبدلات التقليدية وتسمى باستراتيجيات التبديل، الهدف منها هو الحصول على جهد قريب من الجيبي عند خرج المبدلة. من طرق التعديل هذه نذكر ما يلي:  
 (1) طريقة الموجة الكاملة (2) التعديل الجيبي المثلي (3) التعديل بواسطة عروة البطء للتيار (4) التعديل الفراغي الشعاعي لعرض النبضة [6].

إنّ المبدلة المصفوفية ثلاثية الأطوار هي مبدلة استطاعة (AC-AC) تتألف من تسعة عناصر إلكترونيات قدرة ثنائية الاتجاه تعمل بالأرباع الأربعة منظمة كمصفوفة (3 × 3). توصل المبدلة المصفوفية (MC) ثلاثية الأطوار الجهود الثلاثية الأطوار المتناوبة على جانب الدخل إلى الجهود ثلاثية الطور على جانب الخرج عبر مصفوفة (3 × 3) باستخدام مفاتيح ثنائية الاتجاه. هذه الترتيبات (3 × 3) بإمكانها أن تشمل (512) حالة تشغيل من بينها فقط (27) حالة تشغيل تسمح بعمل هذه المبدلة.

على أية حال، تعمل (MC) كمنبع جهد وكممنع تيار لذلك من الضروري ضمان عدم وجود حالات دارات قصر لجهود الدخل (دائرة قصر) ولا انقطاع بتيار الخرج (دائرة فتح). بإمكان المبدلة المصفوفية إعادة الطاقة إلى المنبع (المصدر) كما ورد في المرجع [2,4].

يوضح الجدول (1) ميزات ومساوئ المبدلة المصفوفية (MC) عند مقارنتها مع المبدلة التقليدية (AC-DC-AC).

الجدول (1) ميزات ومساوئ المبدلة المصفوفية:

المساوئ	الميزات
مطال جهد الخرج أصغر من الدخل $\left(\frac{V_o}{V_i}\right)_{max} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	لا يوجد مرحلة (DC) وسيطية
أنصاف النواقل أكثر تعرضاً للاضطرابات	تسمح بإعادة الاستطاعة (ثنائية الاتجاه)
نظام تحكم أكثر تعقيداً	أقرب لعامل الاستطاعة الواحد
تشوه توافقي بتيارات الدخل والخرج وفي جهد الخرج	موثوقية عالية كونها تعمل تحت شروط حرارة عالية
	كثافة استطاعة عالية

سنقوم باستعراض طرق التحكم بالمبدلة المصفوفية مع شرح كافي لمختلف آليات التحكم والتعديل هذه ونذكر

منها:

- تقنيات Scalar.
- تعديل عرض النبضة Carrier-Based Modulation Method PWM.
- التحكم المباشر بالعمز Direct Torque Control.
- التحكم التنبؤي Predictive Control.
- التعديل النبضي العرضاني بالنسبة المرحلية DDPWM Direct duty ratio pulse-width modulation.
- تصنف طريقة **Scalar** إلى نوعين وهما التحكم المباشر (Venturini) و (Roy). حيث في طريقة (Venturini) يتم استخدام جهود الدخل اللحظية لتكوين إشارة الخرج المتناوبة والتي تمثل مركبتها الأساسية جهد الخرج المرجعي المطلوب. أما الطريقة الثانية فقد تم اقتراحها من قبل (Roy و April) في عام (1989) حيث تقوم على استخدام نسبة الجهد اللحظي لجهود أطوار الدخل المحددة لتوليد الحالات الفعالة والصفوية لمفاتيح المبدلة.
- كلتا الطريقتين السابقتين ذات تعقيد منخفض وتتعاملان مع تردد تشغيل منخفض جداً وتظهران استجابة ديناميكية جيدة، لكن عند الترددات المنخفضة فإن طريقة (Venturini) أفضل من ناحية التأثير على جهد الخرج [7].
- تقسم طريقة تعديل عرض النبضة إلى قسمين أيضاً وهما التعديل المعتمد على الموجة الحاملة والتعديل الفراغي الشعاعي.

أولاً- **التعديل المعتمد على الموجة الحاملة Carrier-Based Modulation Method**: هي طريقة للتحكم بعامل استطاعة دخل المبدلة المصفوفية، حيث من الممكن تشكيل تيارات دخل جيبيية بعامل استطاعة الدخل المطلوب وجهود الخرج المطلوبة بتغيير ميل للإشارة الحاملة واستخدام الجهود المعدلة [8].

ثانياً- **طريقة التعديل الفراغي الشعاعي Space Vector Modulation SVM**: تعتمد هذه الطريقة على تمثيل الفراغ الشعاعي اللحظي لجهود وتيارات الدخل والخرج، حيث يعتمد مقدار هذه الأشعة على القيم اللحظية لجهود الدخل وتيارات خط الخرج على التوالي. تملك خوارزمية (SVM) قابلية إنجاز تحكم كامل لكل من شعاع جهد الخرج وزاوية إزاحة تيار الدخل اللحظي. من سلبيات هذه الطريقة أنها معقدة جداً بينما طريقة التعديل بالاعتماد على الموجة الحاملة بسيطة وغير معقدة. تظهر الطريقتان استجابة ديناميكية جيدة وتردد التشغيل منخفض فيهما [9].

أما **طريقة التحكم المباشر بالعزم (DTC)** عن طريق التحكم بالفيض المغناطيسي والعزم فتعتبر ذات فعالية جيدة للتحكم بسرعة آلات التيار المتناوب المغذاة بـالـقالبات جهد. تستند هذه الطريقة على حقيقة أنّ الجهد المقدم من قبل القالبية يؤثر بشكل مباشر على سلوك فيض ثابت الآلة. تظهر نتائج هذه الطريقة عموماً أداءً ديناميكياً جيداً للتحكم بآلة التيار المتناوب إلا أنّ مرشح دخل الـ (MC) يقدم رنين عالي وهي ذات تعقيد عالي [10].

تمّ التطرق إلى **طريقة التحكم التنبؤي** والتي تقسم لنوعين هما التحكم التنبؤي بالتيار PCC Predictive Current Control والتحكم التنبؤي بالعزم PTC Predictive Torque Control.

تظهر **طريقة التحكم التنبؤي بالتيار** أداءً أفضل عن التحكم بتابع نقل مباشر من ناحية معامل التشوه التوافقي الكلي لتيارات الدخل والخرج الطرفية، التحكم بعامل الاستطاعة وتأثر أقلّ بتلوث الشبكة المتناوبة. من سلبيات هذه الطريقة أنّ تيارات الخرج متأثرة، زيادة مطال التذبذب وهناك مستوى ملحوظ أعلى من توافقيات التردد المنخفض في تيارات الخرج، لكن تبدي استجابة ديناميكية سريعة [11].

أما في **التحكم التنبؤي بالعزم** فإنّ الخوارزمية التنبؤية تضمن التوجّج الأصغري بالعزم وهي تستخدم لاختيار شعاع الجهد المطلوب من المبدلة المصفوفية، حيث تمّ تطوير تقنية للتحكم بالعزم باستخدام المبدلة المصفوفية والتي تقدم مجموعة من ثلاثة أشعة عند كل فترة أخذ عينات مما يؤدي لتحقيق العزم والفيض المطلوبين. تحسب الخوارزمية التنبؤية خطأ العزم الذي سيطبق على كل شعاع وتختار الشعاع الذي سيقدم أصغر خطأ مما يقود لتحسين توجج العزم لأكثر من (41%) من قيمته الوسطية. في هذه الطريقة ينعكس العزم الكهرومغناطيسي بسرعة ويتأثر انزلاق العزم الكهرومغناطيسي بشكل كبير جداً بحالة (MC) المختارة. أيضاً تردد التشغيل عالي جداً لكنها تبدي استجابة ديناميكية سريعة [12].

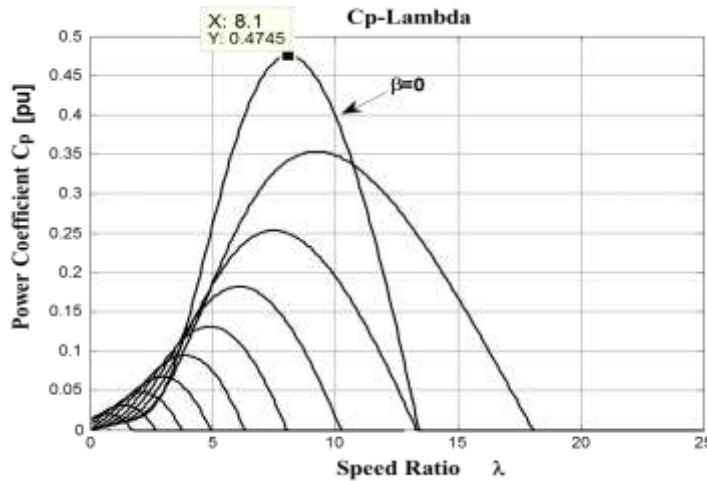
أخيراً في **طريقة التعديل النبضي العرضاني بالنسبة المرحلية DDPWM** والتي تمّ اقتراحها في العام (2010). تعتمد هذه الاستراتيجية على استخدام الموجة الحاملة المثلثية والجهود المرجعية في قالبية منبع الجهد حيث تقوم بشكل مباشر وفعال بتوليد جهود الدائر تبعاً للجهود المرجعية. باستخدام هذه التقنية فإنه بإمكان المبدلة المصفوفية اختيار جهود الدائر الفعالة بشكل فعال مباشرة تبعاً للجهود المرجعية ضمن حلقة التحكم المغلقة. من سلبيات هذه الطريقة أنه عند سرعة معينة (1200 rpm) لا يتم تسليم كامل الاستطاعة الفعالة إلى الشبكة مما يؤدي لبقاء قيمة صغيرة تسبب ضياعات بالمولد وبمفاتيح المبدلة. لكن عند سرعة (1400 rpm) يتم تقديم استطاعة فعالة إلى الشبكة من كل من الثابت والدائر [13].

## النتائج والمناقشة:

### النمذجة:

#### نموذج العنفة الريحية:

تقوم الشفرات باستقبال الطاقة الحركية للرياح وتحولها إلى طاقة ميكانيكية على محور العنفة. إلا أن الشفرات لا يمكن لها استقبال أكثر من  $C_{pmax} = 0.59$  من الطاقة الحركية للرياح وهو ما يعرف بقانون بيتز (BETZ)، يتم التعبير عن هذه النسبة بمعامل الاستطاعة  $C_p$ . يبين الشكل (4) العلاقة بين معامل الاستطاعة مع زاوية ميل الشفرات ونسبة السرعة الطرفية.



الشكل (4) علاقة معامل الاستطاعة مع  $\lambda, \beta$

ويعبر رياضياً عن العنفة الريحية بالعلاقات التالية حيث يعطى معامل الاستطاعة  $C_p$  بالعلاقة:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \quad (1)$$

$$\text{حيث: } \begin{matrix} c_1 = 0.5109 & c_2 = 116 & c_3 = 0.4 \\ c_4 = 5 & c_5 = 21 & c_6 = 0.0068 \end{matrix}$$

$\beta$  زاوية ميل الشفرات (deg).

تعطى نسبة السرعة الطرفية المحيطية للشفرات بالعلاقة:  $\lambda = \frac{R\Omega_t}{v}$  حيث:  $\Omega_t$  السرعة الميكانيكية لمحور

العنفة. اسرعة الريح  $R \cdot m/s$  نصف قطر العنفة بالمتر.  $C_t$  العزم الميكانيكي الناتج عن الريح والمطبق على محور

العنفة يجمع مع العزم الكهربيسي القادم من المولدة على محور المولدة ويعطى بالعلاقة:  $C_t = \frac{P_t}{\Omega_t}$ .

أما الاستطاعة الميكانيكية على محور العنفة فتعطى بالعلاقة:  $P_t = C_p \left( \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \right)$  حيث:  $\rho$  كثافة

الرياح قيمتها في الشروط النظامية  $(Kg/m^3)$  1.22 عند  $15^\circ C$ .



نمذجة المولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة:

نموذج الثابت:

التوترات في الثابت:

$$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s \cdot I_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \quad , \quad \frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s \cdot I_{sq} - \omega_s \cdot \phi_{sd} \quad (2)$$

الفيوض في الثابت:

$$\phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + L_m \cdot I_{rd} \quad , \quad \phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + L_m \cdot I_{rq} \quad (3)$$

حيث أن:  $\phi_{sd}, \phi_{sq}$  الفيض في الثابت على المحورين  $q$  و  $d$ ،  $V_{sd}, V_{sq}$  الجهد في الثابت على المحورين  $q$

و  $d$ .

$I_{sd}, I_{sq}$  التيار في الثابت على المحورين  $q$  و  $d$ .  $\omega_s$  السرعة الزاوية للثابت.  $R_s$  مقاومة الثابت.

$L_s$  محارضة الثابت.  $L_m$  المحارضة المتبادلة بين الثابت والدائر.

2.2.1.5 نموذج الدائر:

التوترات في الدائر:

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rq} - R_r \cdot I_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rq} \quad , \quad \frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rd} - R_r \cdot I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{rd} \quad (4)$$

$\omega_r) \cdot \phi_{rq}$

الفيوض في الدائر:

$$\phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + L_m \cdot I_{sd} \quad , \quad \phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + L_m \cdot I_{sq} \quad (5)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad , \quad L_r = L_{lr} + L_m \quad (6)$$

حيث:  $\phi_{rd}, \phi_{rq}$  الفيض في الدائر على المحورين  $q$  و  $d$ ،  $V_{rd}, V_{rq}$  الجهد في الدائر على المحورين  $q$  و  $d$ .

$I_{rd}, I_{rq}$  التيار في الدائر على المحورين  $q$  و  $d$ .  $\omega_r$  السرعة الزاوية للدائر.  $R_r$  مقاومة الدائر.

$L_s$  محارضة الدائر.  $L_m$  المحارضة المتبادلة بين الثابت والدائر.  $\omega_r = P \Omega_{mec}$  السرعة الميكانيكية

الكهربائية.  $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$  السرعة الزاوية في الدائر.

معادلات العزم الكهرطيسي:

$$C_{em} = P(\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad , \quad C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \quad (7)$$

محصلة العزم:

$$C_T = C_{mec} + C_{em} \quad (8)$$

معادلة الحركة:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - F \Omega_{mec} \quad (9)$$

إن عزم العطالة الكلي يمثل عطالة المولد بالإضافة إلى عطالة العنفة منسوبة إلى المولد عبر علية السرعة كما

يلي:

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{Generator} \quad (10)$$

حيث:  $J$  عزم العطالة.  $F$  الاحتكاك.  $C_{em}$  العزم الكهرطيسي.

الاستطاعة الفعلية:

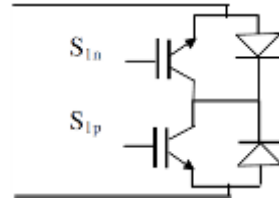
$$P_s = (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (11)$$

### الاستطاعة الرديّة:

$$Q_s = (V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq}) \quad (12)$$

### نمذجة المبدلة المصفوفية:

يتكون كل مفتاح ثنائي الاتجاه من مفتاحين أحاديي الاتجاه و ديودين كما في الشكل (5)، حيث يمثل (  $S_{1n}$  ) المفتاح الموصل خلال جريان تيار الحمل السلبى و (  $S_{1p}$  ) يمثل المفتاح الموصل خلال جريان تيار الحمل الإيجابى.



الشكل (5) المفتاح ثنائي الاتجاه

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ON} \\ 0 & \text{OFF} \end{cases} \quad i, j \in \{1,2,3\} \quad (13)$$

باعتبار (  $S_{ij}$  ) كمفاتيح ثنائية الاتجاه، حيث (  $i$  ) و (  $j$  ) رموز دلالية تمثل موقع مفاتيح المصفوفة (  $S$  )، من الممكن إثبات علاقة بسيطة بين جهود الدخل (خط - حيادي) (  $v_b, v_c, v_a$  ) و جهود الخرج (خط - حيادي) (  $v_A, v_B, v_C$  ).

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [S] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

يعطى جهد الدخل (خط - خط) كما يلي:

$$\begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix} = [S_{CS}] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

يمكننا منقول المصفوفة (  $S$  ) من تحديد العلاقة بين تيارات الدخل (  $i_b, i_c, i_a$  ) و تيارات خرج المبدلة (  $i_B, i_C, i_A$  )،

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [S]^T \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

تتعلق المصفوفة (  $S_{CS}$  ) بجهود خرج (خط - خط) (  $v_{BC}, v_{CA}, v_{AB}$  ) إلى جهود دخل (خط - حيادي) (  $v_b, v_c, v_a$  )، حيث يمكن التعبير عنها كما يلي:

$$[S_{CS}] = \begin{bmatrix} S_{11} - S_{21} & S_{12} - S_{22} & S_{13} - S_{23} \\ S_{21} - S_{31} & S_{22} - S_{32} & S_{23} - S_{33} \\ S_{31} - S_{11} & S_{32} - S_{12} & S_{33} - S_{13} \end{bmatrix} \quad (18)$$

بإمكان هذه الترتيبات (  $3 \times 3$  ) أن تشمل (  $2^9 = 512$  ) حالة تشغيل باعتبار أنه يوجد حالتى تشغيل لكل مفتاح ثنائي الاتجاه. على أية حال، تعمل (  $MC$  ) كمنبع جهد و كمنبع تيار لذلك من الضروري ضمان عدم وجود حالات دارات قصر لجهود الدخل (دائرة قصر) ولا انقطاع بتيار الخرج (دائرة فتح). نتيجة ذلك يوجد فقط (  $27 = 3^3$  ) حالة تشغيل تسمح بعمل هذه المبدلة [4].

### التحكم الشعاعي بتوجيه فيض الثابت للآلة التحريضية:

إنّ الفكرة الأساسية للتحكم الشعاعي هي الحصول على عزم للمحرك متناسب مع الفيض والتيار في الآلة التحريضية كما في الآلة ذات التيار المستمر.

إنّ الإحداثيات  $d, q$  التي نسقط عليها فيض الثابت والتيار الدائر تدور بسرعة الحقل الدوار  $\theta_s = \omega_s \cdot t$ . من علاقة العزم  $C_{em} = P(\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd})$  يتم توجيه المحاور  $d, q$  حيث  $\phi_{sd} = \phi_s$  و  $\phi_{sq} = 0$  من المعادلة  $\phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} = 0$  نحصل على  $I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq}$  فتصبح معادلة العزم

$$C_{em} = -P\phi_{sd} \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \text{ . عندها يتعلق العزم بـ } I_{rq} \text{ عندما يثبت } \phi_{sd} \text{ .}$$

$$\left[ V_{sd} = 0, \quad I_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s}, \quad \phi_{sq} = 0 \right] \text{ من العلاقة: } \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s I_{sd} + \phi_{sq} \omega_s \text{ باعتبار أن}$$

يرتبط الفيض مع التيار بالعلاقة:

$$\left( \frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} + 1 \right) \phi_{sd} = L_m I_{rd} \quad (19)$$

$V_{sd} = 0$  لأن جهود الشبكة جيبية متوازنة.

من معادلات الجهود والتيارات في الدائر يلاحظ لا خطية في علاقة التيارات. حيث يرتبط تيار الدائر مع بعضيهما. لذلك من أجل التحكم بكل تيار على حدا (  $I_{rq}$  للتحكم بالعزم و  $I_{rd}$  لتثبيت الفيض) عن طريق الجهود نلجأ لفصلهما رياضياً حسب التحليل التالي:

معادلة جهود الدائر بدلالة التيارات:

$$V_{rd} = (L_r \sigma) s I_{rd} + \left( R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) I_{rd} - \omega_{sl} \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} - \frac{R_s}{L_s} \cdot L_m^2 \cdot I_{ms} \quad (20)$$

$$V_{rq} = (L_r \sigma) s I_{rq} + \left( R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) I_{rq} - \omega_{sl} \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + \omega_{sl} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot L_m^2 \cdot I_{ms} + \frac{R_s}{L_s} \cdot L_m^2 \cdot I_{rq} \quad (21)$$

$$\text{حيث: } I_{ms} = \frac{1}{T_s s + 1}, T_s = \frac{L_s}{R_s}, \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

نعرف متحولات جديدة حسب العلاقات التالية المستنتجة من نموذج الآلة:

$$\begin{aligned} F_{emd} &= \omega_{sl} \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} + \frac{R_s}{L_s} \cdot L_m^2 \cdot I_{ms} \\ F_{emq} &= \omega_{sl} \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - \omega_{sl} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot L_m^2 \cdot I_{ms} - \frac{R_s}{L_s^2} \cdot L_m^2 \cdot I_{rq} \end{aligned} \quad (22)$$

التوترات في الدائر:

$$V_{rd} = V_{rd1} - F_{emd}, \quad V_{rq} = V_{rq1} - F_{emq} \quad (23)$$

التيارات في الدائر بدلالة  $(V_{rq1}; V_{rd1})$ :

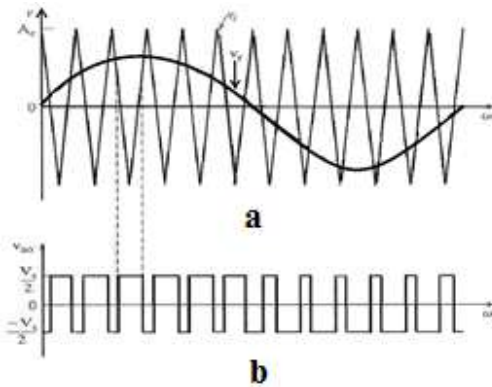
$$I_{rd} = \frac{\left( \frac{1}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)}{\left( \frac{L_r \sigma}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)^{s+1}} V_{rd1} = G(s) V_{rd1}; \quad I_{rq} = \frac{\left( \frac{1}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)}{\left( \frac{L_r \sigma}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)^{s+1}} V_{rq1} = G(s) V_{rq1} \quad (24)$$

يمثل تابعا النقل السابقان تابعين من الدرجة الأولى بالتالي يمكن التحكم بكل من التيارين  $(I_{rq}; I_{rd})$  بشكل منفصل أحدهما عن الآخر.

**التحكم بالمبدلة التقليدية:**

يتم التحكم بها هنا بطريقة التعديل الجيبي المثلي، حيث تتم مقارنة إشارة مرجعية ذات تردد منخفض نسبياً (مرجع الجهد) مع إشارة حاملة مثلثية الشكل (سن منشار) ذات تردد أعلى. تتحدد لحظات التبديل بنقاط التقاطع بين الإشارة المرجعية والإشارة المثلية أي أن تردد عمل المفاتيح يتعلق بالإشارة المثلية الحاملة. تجدر الإشارة أنه يوجد في النظام الثلاثي الطور 3 إشارات مرجعية جيبية من نفس التردد مزاحة عن بعضها البعض بـ  $(2\pi/3 \text{ rad})$  أو  $(120^\circ)$  كهربائية [6].

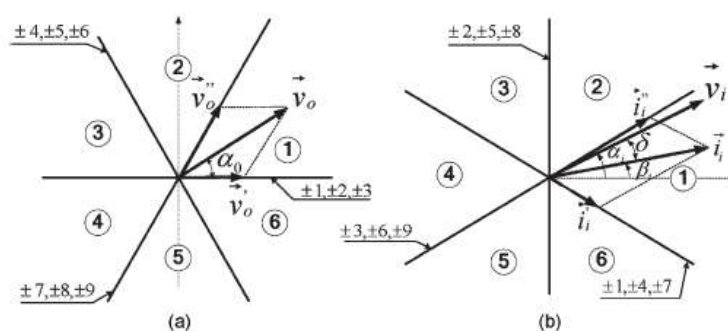
حيث يبين لنا الشكل (6) مبدأ هذا التعديل.



الشكل (6) التعديل الجيبي المثلي  
(a) الموجة المرجعية والموجة الحاملة  
(b) جهد الخرج

**التحكم بالمبدلة المصفوفية:**

تعتمد طريقة التعديل الفراغي الشعاعي على تمثيل الفراغ الشعاعي اللحظي لجهود وتيارات الدخل والخرج. هناك (27) حالة تشغيل ممكنة في المبدلة المصفوفية ثلاثية الطور، فقط (21) منها مفيدة في خوارزمية (SVM). ترتيبات التشغيل الـ (18) الأولى تحدد شعاع جهد الخرج وشعاع تيار الدخل بعد تثبيت الاتجاهات، كما هو مبين بالشكل (7).



الشكل (7) أشعة DMC المتناحاة بطريقة SVM

(a) أشعة الجهد

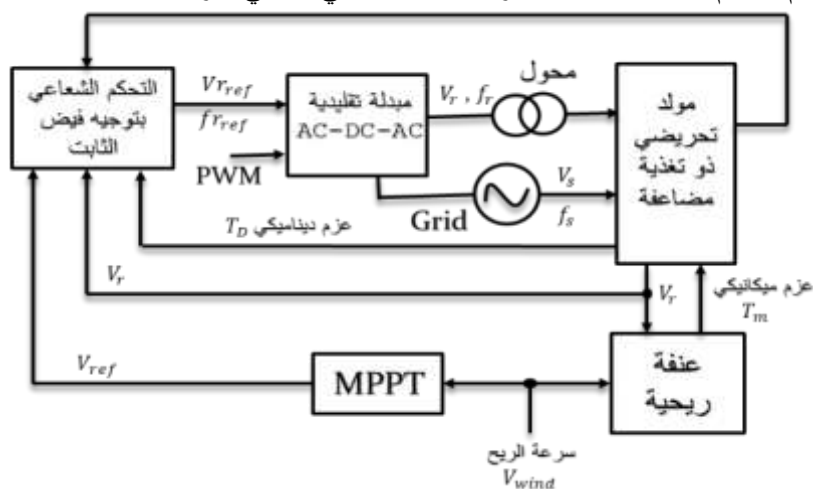
(b) أشعة التيار

يعتمد مقدار هذه الأشعة على القيم اللحظية لجهود الدخل وتيارات خط الخرج على التوالي. تحدد حالات التشغيل الثلاث الأخيرة الأشعة الصفرية لتيار الدخل وجهد الخرج. تملك خوارزمية (SVM) قابلية إنجاز تحكم كامل لكل من شعاع جهد الخرج وزاوية إزاحة تيار الدخل اللحظي. عند أي خطوة تقطيع معطاة يوجد قيمة مرجعية لشعاع جهد الخرج ولزاوية إزاحة تيار الدخل. شعاع جهد الدخل (خط-حيادي) يُفرض بواسطة جهود المنبع، عند ذلك يمكن إنجاز التحكم بجانب الدخل أي التحكم بزاوية طور شعاع تيار الدخل. يتم تركيب كل من أشعة تيار الدخل وجهد الخرج بالأخذ بعين الاعتبار دورات التشغيل.

### المحاكاة:

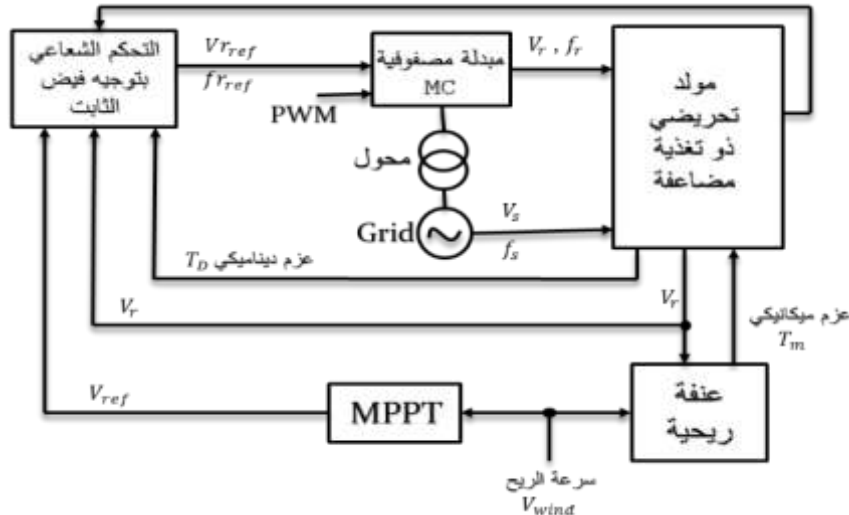
سيتم في هذه الفقرة مقارنة أداء العنفة الريحية في حالتين: العمل مع مبدلة تقليدية من جهة والعمل مع مبدلة مصفوفية من جهة أخرى. سيتم مقارنة التيارات والجهود بشكل أساسي والتركيز على معامل التشوه التوافقي في حالة استخدام المبدلة المصفوفية. من أجل القيام بهذه المهام قمنا في برنامج MATLAB/Simulink بإنجاز مخططي محاكاة كما توضح الأشكال التالية.

يبين الشكل (8) مخطط المحاكاة لنظام عنفة ريفية بمولد تحريضي ذو تغذية مضاعفة مع تحكم شعاعي بالسرعة عن طريق توجيه فيض الثابت بواسطة مبدلة تقليدية. يتم ملاحقة مرجع سرعة محسوب من خوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية. يتم التحكم بالمبدلة التقليدية بطريقة التعديل الجيبي المثلاثي بعرض النبضة.



الشكل (8) مخطط وصل المبدلات التقليدية مع النظام الريحي

أما مخطط المحاكاة كما في الشكل (9) لنظام عنفة ريفية بمولد تحريضي ذو تغذية مضاعفة مع تحكم شعاعي بالسرعة عن طريق توجيه فيض الثابت بواسطة مبدلة مصفوفية يتم ملاحقة مرجع سرعة محسوب من خوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية. يتم التحكم بالمبدلة المصفوفية بطريقة التعديل الفراغي الشعاعي لعرض النبضة.



الشكل (9) مخطط توصيل المبدلات المصفوفية مع النظام الريحي

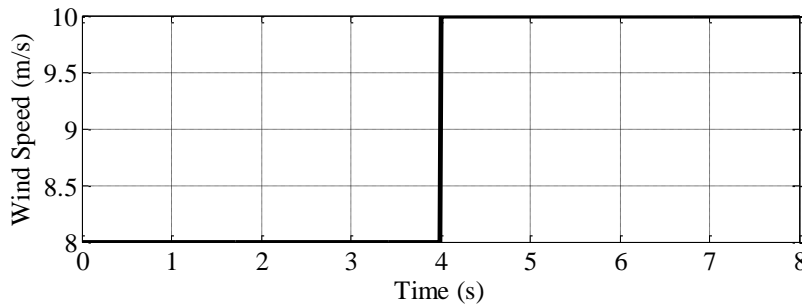
نورد فيما يلي بعض معطيات العنفة الريحية والمولد:

$L_f = L_s - L_r$ ;  $L_s = 0.0118(H)$ ;  $L_r = 0.0116(H)$ ;  $L_m = 0.0116(H)$   
 $N_r = 1515(rpm)$ ;  $f_n = 50(Hz)$ ;  $P_e = 300(kW)$ ;  $R_r = 0.0048(\Omega)$ ;  $R_s = 0.0063(\Omega)$ ;  $2P = 4 Poles$   
 حيث: R المقاومة، L المحارضة، s الثابت، r الدائر، R=14 (m) نصف قطر دوار العنفة، G= 23 نسبة علبة السرعة.

سيتم فيما يلي مقارنة الحالة المثالية مع حالة استخدام مبدلة جهد ترددية ثلاثية الطور ومع حالة استخدام مبدلة مصفوفية. ستظهر نتائج المحاكاة أداء جيد للمبدلة المصفوفية من حيث التحكم بالسرعة ولكن تشوه توافقي ملحوظ في التيار والجهد.

### تغير سرعة الرياح:

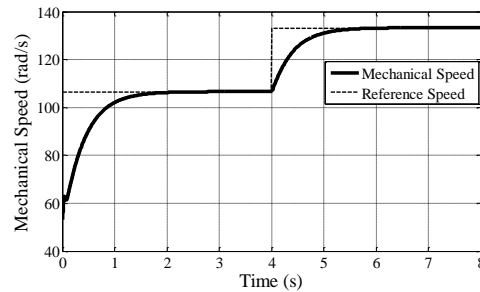
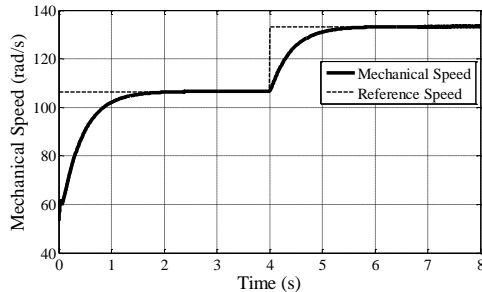
يبين الشكل (10) تغير سرعة الرياح وهذا التغير اختياري وليس لمحاكاة الواقع.



الشكل (10) تغير سرعة الرياح مع الزمن

### مقارنة تغير سرعة الدوران بين المبدلتين التقليدية والمصفوفية:

سنلاحظ في الشكلين (11) و (12) كيفية تتبع سرعة الخرج للمرجع في الحالتين: مبدلة تقليدية ومبدلة مصفوفية على التوالي.



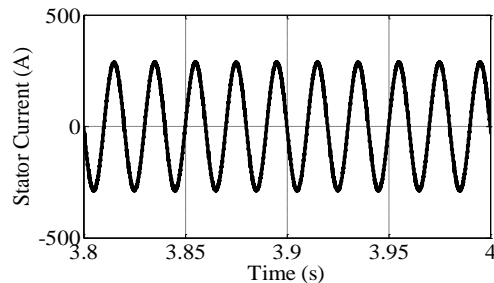
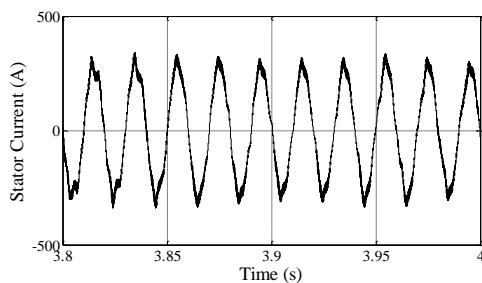
الشكل (11) تغير السرعة الميكانيكية (مبدلة تقليدية) الشكل (12) تغير السرعة الميكانيكية (مبدلة مصفوفية)

تبدأ السرعة من قيمة معينة توافق سرعة البدء وتستمر بالارتفاع بشكل قريب من الأسى لتصل لجوار المرجع في الحالة المستقرة. بالنتيجة هناك تتبع جيد للمرجع من قبل السرعة والأداء متشابه في الحالتين مع قابلية تقليدية ومبدلة مصفوفية.

### تغير تيار الثابت:

#### ❖ في الفترة المستقرة:

سنلاحظ في الشكلين (13) و(14) كيفية تغير تيار الثابت للطور a في الحالتين: مبدلة تقليدية ومبدلة مصفوفية على التوالي في الحالة المستقرة (الدائمة) حيث نلاحظ الفرق بوضوح بين الحالتين. يلاحظ أن التيار في حالة المبدلة التقليدية أقل تلوثاً توافقياً.

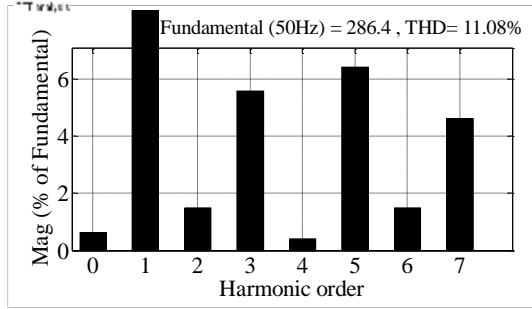


الشكل (13) تغير تيار الثابت للطور a (مبدلة تقليدية)

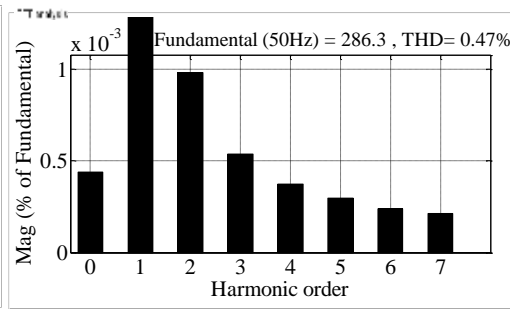
الشكل (14) تغير تيار الثابت للطور a (مبدلة مصفوفية)

#### ❖ التحليل التوافقي لتيار الثابت:

يظهر التحليل التوافقي لتيار ثابت المبدلة التقليدية أن عامل التشوه التوافقي الكلي صغير حيث يبلغ  $THD = 0.47\%$  في حين أن عامل التشوه التوافقي الكلي في المبدلة المصفوفية يبلغ  $THD = 11.08\%$ . تيار الثابت ملوث بالتوافقيات الثانية والثالثة والرابعة بشكل أكبر من بقية التوافقيات بالمقابل في المبدلة المصفوفية الثالثة والخامسة والسابعة بمطالات أكبر من المبدلة التقليدية. مطال التوافقية المستمرة (الصفيرية) ملحوظ أي أن موجة تيار الثابت غير متناظرة لحد معين أعلى وأسفل محور الزمن. كما هو مبين في الشكلين (15) و(16).



الشكل (16) التحليل التوافقي لتيار ثابت المبدلة المصفوفية



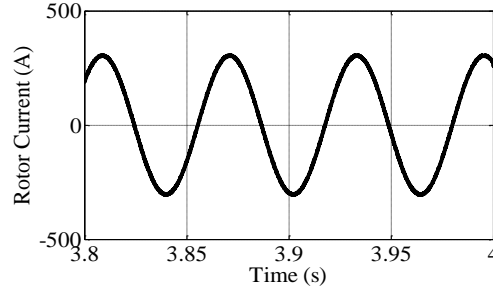
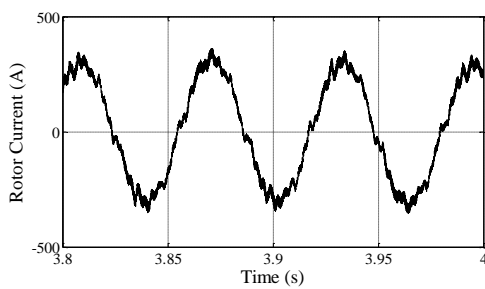
الشكل (15) التحليل التوافقي لتيار ثابت المبدلة التقليدية

### تغير تيار الدائر:

سنلاحظ في الشكلين (17) و(18) كيفية تغير تيار الدائر للطور a في الحالتين: مبدلة تقليدية ومبدلة مصفوفية على التوالي.

### • في الفترة المستقرة:

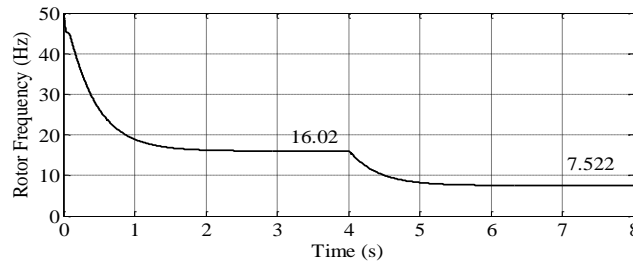
يظهر بشكل أوضح من الثابت الموجة الجيبية في حالة المبدلة التقليدية ومقدار التشوه التوافقي في الموجة في حالة المبدلة المصفوفية. للتخلص من هذا التشوه لا بدّ من استخدام أحد أنواع المرشحات.



الشكل (17) تغير تيار الدائر للطور a (مبدلة تقليدية) الشكل (18) تغير تيار الدائر للطور a (مبدلة مصفوفية)

### • التحليل التوافقي لتيار الدائر:

قبل عرض التحليل التوافقي يجب معرفة تردد المركبة الأساسية في الدائر والذي يتغير بتغير مرجع السرعة كما في الشكل (19) التالي. نلاحظ أنّ تردد الدائر ينقص كلما ازدادت سرعة الدوران الميكانيكية وهذا يوافق لنظرية الآلات. تم إيجاد التردد في الحالة المثالية باعتبار الجهود المغذية جيبية مثالية.

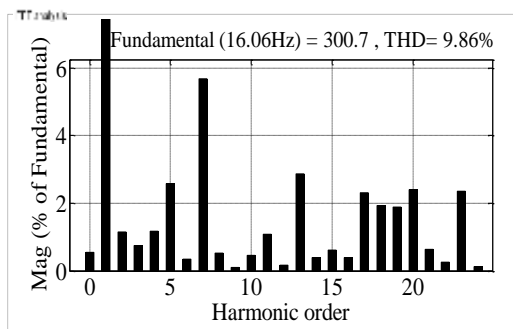


الشكل (19) تردد المركبة الأساسية في الدائر (حالة مثالية)

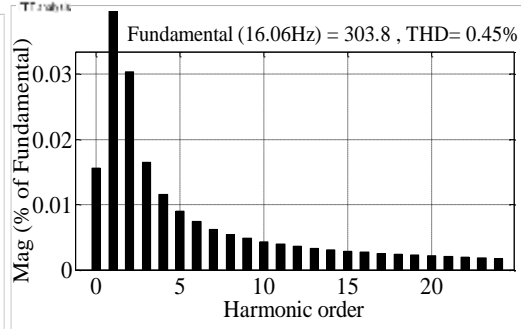
يلاحظ في الشكل (21) أنّ عامل التشوه التوافقي الكلي للمبدلة المصفوفية  $THD = 9.86\%$  وهو أقلّ من عامل التشوه التوافقي لتيار الثابت. نلاحظ أنّ مطال التوافقية الأساسية قريب من القيمة المثالية أكثر من حالة تيار



الثابت لأنّ مطال التوافقية الثالثة هنا أقلّ بحوالي  $20[A]$  من التوافقية الثالثة في تيار الثابت. أيضاً مطال التوافقية المستمرة أقلّ مما يعني تناظراً أكبر لموجة التيار المتناوبة أعلى وأسفل محور الزمن.



الشكل (21) التحليل التوافقي لتيار دوائر المبدلة المصفوفية

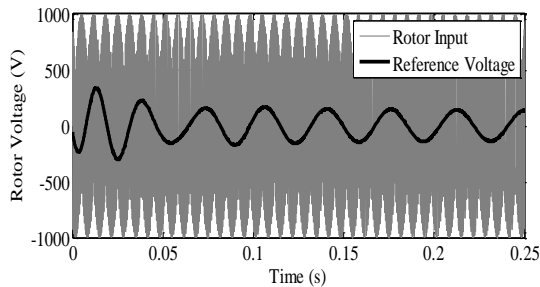


الشكل (20) التحليل التوافقي لتيار دوائر المبدلة التقليدية

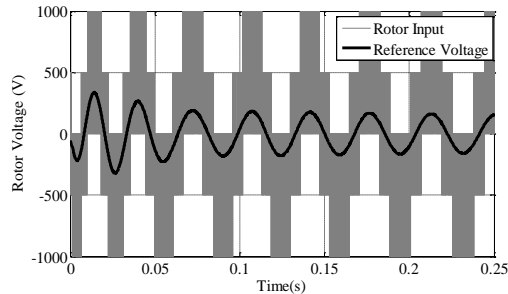
يمكن أن نستنتج من مقارنة الشكلين (16) و(21) وعاملي التشوه التوافقي الكلي أنّ التشوه في تيار الدائر أقلّ نسبياً والتلوث أكبر بالتوافقيتين الخامسة والسابعة. أمّا في تيار الثابت فظهرت التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة. إنّ السبب الرئيسي لتلوث تيار الثابت والدائر بالتوافقيات هو التغذية غير الجيبية بجهد الدائر عن طريق المبدلة التقليدية أو المبدلة المصفوفية. سنلاحظ فيما يلي كيف يتغير جهد الدخل لدائر المولدة التحريضية.

#### تغير جهد الدخل لمفات الدائر والجهد المرجعي لها:

يوضح الشكلان (22) و(23) تغير جهد الدائر للطور a (مبدلة تقليدية ومبدلة مصفوفية) مقارنة بين القيمة المرجعية وخرج المبدلة التقليدية والمبدلة على مجال زمني محدود وذلك لمزيد من الإيضاح.



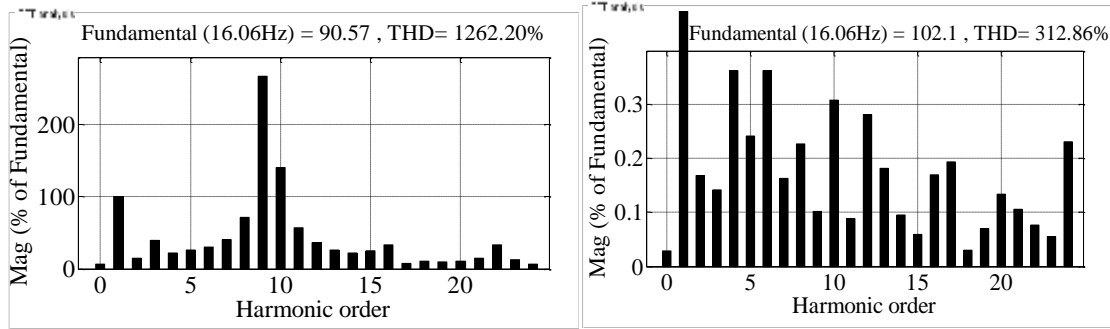
الشكل (23) تغير جهد الدائر للطور a (مبدلة مصفوفية) مقارنة بين القيمة المرجعية وخرج المبدلة



الشكل (22) تغير جهد الدائر للطور a (مبدلة تقليدية) مقارنة بين القيمة المرجعية وخرج المبدلة

#### التحليل التوافقي لجهد الدائر:

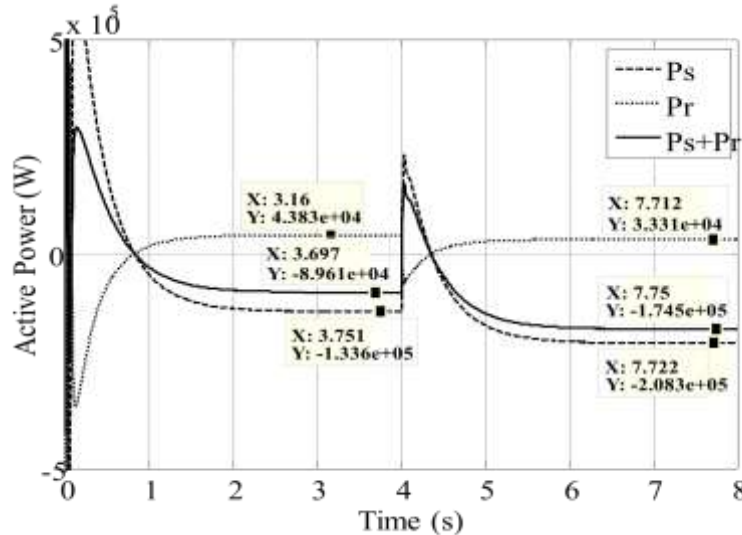
يتضح سلفاً من الشكلين (22) و(23) أنّ التشوه التوافقي أكبر في الجهد عند استخدام مبدلة مصفوفية وهذا مثبت في الشكلين (24) و(25).



الشكل (24) التحليل التوافقي لجهد الدائر في حالة مبدلة تقليدية الشكل (25) التحليل التوافقي لجهد الدائر في حالة مبدلة مصفوفية

### محصلة الاستطاعة:

يبين الشكل (26) المجاور الاستطاعة المارة في الثابت والدائر والاستطاعة المرسله للشبكة  $(P_s + P_r)$ . الإشارة السالبة تعني الاستطاعة مولدة، الاستطاعة في الدائر موجبة لأنها مسحوبة من الشبكة لأن سرعة الدوران أقل من السرعة التزامنية وهذا يتوافق مع طريقة كرامر في التحكم بسرعة دوران آلة تحريضية عن طريق طاقة الانزلاق.



الشكل (26) استطاعات الثابت والدائر والكلية في المبدلة

### مناقشة النتائج:

تمّ فيما سبق إجراء محاكاة ملاحقة النقطة الأعظمية للريح باستخدام نوعين من المبدلات الإلكترونية: مبدلة جهد ثلاثية الطور ومبدلة مصفوفية. يمكن تلخيص النتائج بما يلي:

1. تمّ التحكم بسرعة المولدة التحريضية باستخدام المبدلة المصفوفية والحصول على تتبع جيد لمرجع السرعة بشكل مماثل للقالبة التقليدية بخطأ حالة مستقرة وزمن حالة عابرة.
2. تمّ ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية باستخدام المبدلة المصفوفية بنفس جودة الأداء للمبدلة التقليدية.
3. الزمن الذي تستغرقه المحاكاة أقل في حالة المبدلة المصفوفية لأجل نفس خطوة التقطيع بسبب أن العمليات الرياضية فيها أقل لأن عدد المفاتيح فيها أقل.
4. خُفّ استخدام المبدلة المصفوفية تلوّثاً توافقياً في تيار الثابت  $THD = 11.08\%$  و في تيار الدائر  $9.8\%$   $THD = 0.47\%$  ينخفض معامل التشوه التوافقي

في المبدلة المصفوفية والتقليدية بنقصان خطوة التقطيع الزمني. أما في جهد الدائر فالتلوث موجود في كلتا الحالتين بشكل واضح جداً.

### الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نستنتج ما يلي:

على الرغم من الحسنات التي تبديها المبدلة المصفوفية من ناحية التوفير في عدد المفاتيح الإلكترونية وفي وصلة التيار المستمر. أضف لذلك إمكانية التحكم بعامل الاستطاعة لجهة الشبكة. إلا أنّ لها سلبية هامة وهي زيادة كبيرة بالتوافقيات المولدة في تيار وجهد المولدة وفي تيار الشبكة. هذا ما يؤثر على نوعية الطاقة المولدة وبالتالي الاستطاعة الكهربائية المسلمة للشبكة وهو أمر غير مرغوب به في الشبكات محدودة الاستطاعة. في حين أنّ استخدام المبدلة التقليدية يكون التشوه أقلّ والاستطاعة قليلة التذبذب. وهنا يكون السؤال هل من المجدي فعلياً استخدام المبدلة المصفوفية وهل ما نكسبه في استخدامها نصره في تحسين جودة الاستطاعة الناتجة ؟

إنّ أحد الأعمال المستقبلية كنتمة لهذا البحث يمكن أن يكون:

- استخدام المرشحات بأنواعها الفعالة أو غير الفعالة لتفقية موجتي الجهد والتيار من التوافقيات. نفترض أنّ ذلك سيؤدي حتماً إلى تحسين جودة الاستطاعة الكهربائية والتخفيف لحد كبير من التذبذب فيها.
- دراسة جدوى اقتصادية وفنية لاستخدام المبدلة المصفوفية بالمقارنة مع المبدلة التقليدية غير المباشرة.
- التطبيق العملي لنموذج تجريبي لمبدلة مصفوفية تقود آلة تحريضية.

### المراجع:

- [1] WORLD Wind Energy Association WWEA 2010, Istanbul, Turkey, March 2010.
- [2] BERNET, S.; MATSUO, T. LIPO, T.A.; *A Matrix Converter Using Reverse Blocking NPT-IGBTs and Optimized Pulse Patterns*, 27th Annual IEEE on Power Electronics Specialists Conference, vol.1, pp.107-113 vol.1, June 1996.
- [3] ENERCONGMBH; *Enercon Wind Energy Converters*, Product Overview, Germany, July 2010.
- [4] PINTO, S.F.; APARICIO, L.; ESTEVES, P.; *Direct Controlled Matrix Converters in Variable Speed Wind Energy Generation Systems*, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives – POWERENG'07, Setúbal, Portugal, April 2007.
- [5] BARAKATIS, M.; *Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter*, Doctoral Dissertation, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [6] KAZMIERKOWSKI, M. KRISHNAN, R. and BLAABJERG, F.; *Control in Power Electronics*. New York: Academic, 2002.
- [7] PINTO, S.F. SILVA, J.F.; GAMBOA, P.; *Current Control of a Venturini Based Matrix Converter*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol.4, pp.3214-3219, July 2006.
- [8] YOON, Y, D.SUL, S, K.; *Carrier-based modulation method for matrix converter with input power factor control and under unbalanced input voltage conditions*, in Proc. 22nd Annu. IEEE APEC, pp. 310–314, Mar 2007.

[9] RODRIGUEZ, J. RIVERA, M. KOLAR, J. W. WHEELER, P. W.; *A Review of Control And Modulation Methods for Matrix Converters*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 59, NO. 1, JANUARY 2012.

[10] ORTEGA, C. ARIAS, A. CARUANA, C. BALCELLS, J. ASHER, G.; *Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives*, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 6, pp. 2101–2110, Jun. 2010.

[11] VARGAS, R. RODRIGUEZ, J. ROJAS, C. WHEELER, P.; *Predictive current control applied to a matrix converter: An assessment with the direct transfer function approach*, in Proc. IEEE ICIT, pp. 1832–1838, Mar. 2010.

[12] RODRIGUEZ, J. KOLAR, J. ESPINOZA, J. RIVERA, M. ROJAS, C.; *Predictive torque and flux control of an induction machine fed by an indirect matrix converter*, in Proc. IEEE ICIT, pp. 1857–1863, Mar. 2010.

[13] JI-HEON, L. JONG, K. J. HAN, B. M. NAM-SUP C. HAN-JU, C.; *DFIG Wind Power System with a DDPWM Controlled Matrix Converter*, Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 2, pp. 299~306, 2010.