

التوربينات الريحية ذات السرعة الثابتة والسرعة المتغيرة

هان سلووتويج وإيزي دي فريز *

ترجمة : م. عمر فوزي البدري **

تقديم :

أصبحت طاقة الرياح تساهم بمستويات عالية من التغلغل في منظومات توليد الطاقة الكهربائية ، خاصة في الحالات التي يكون فيها الطلب على الطاقة منخفضاً وسرعة الرياح عالية، ومع ذلك فإن التوربينات الريحية مختلفة بشكل أساسي عن التقنيات التقليدية المنتجة للطاقة الكهربائية والتي تعتمد عادة على المولدات التزامنية. إن التصميمات المتعددة للتوربينات الريحية هي أيضاً لها اختلافات فنية أساسية، وهذه الاختلافات تنعكس في أنظمة القدرة، وذلك كما هو موضح في هذه الورقة التي رأت لجنة التحرير نشر ترجمة لها- بعد أخذ موافقة الناشر الأصلي - وذلك في إطار جهودها الرامية لإثراء محتوياتها بالجديد والمفيد مما تقوم بنشره بعض الدوريات المتخصصة في مجال الطاقة.

مقدمة :

غرب أوروبا من المتوقع أن تؤدي إلى رفع مستوى النمو والدفع من جديد بهذا القطاع خلال 2005-2006 ف.

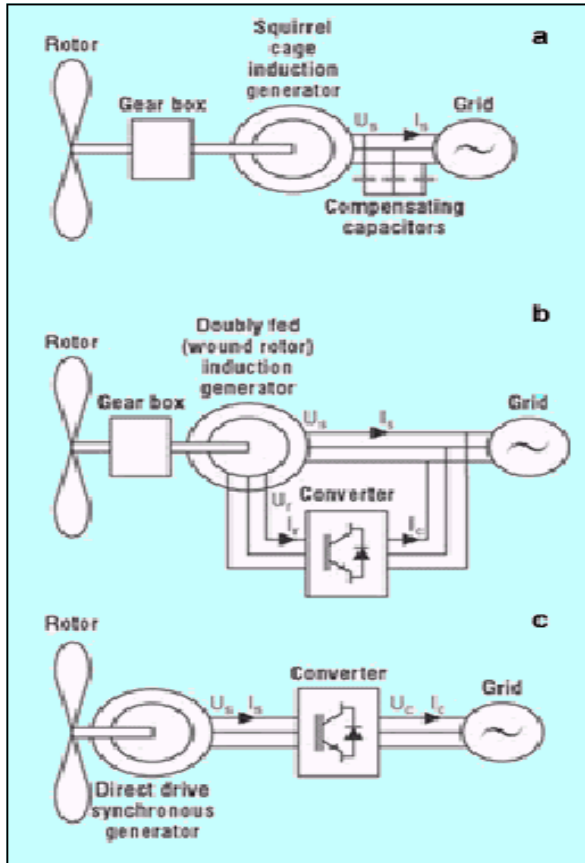
وتختلف طاقة الرياح اختلافاً كلياً عن الطاقة التقليدية لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة المولدات التزامنية. إضافة إلى ذلك، توجد اختلافات بين التصميمات المختلفة المتاحة في الأسواق للتوربينات الريحية، وتنعكس هذه الاختلافات في تفاعل التوربينات الريحية مع أنظمة القدرة الكهربائية. ويعتبر فهم هذا الأمر ضرورياً لأي شخص له علاقة بتوصيل منظومات الرياح مع أنظمة القدرة أو الشبكات الكهربائية.

التوربينات الريحية ذات السرعة الثابتة والسرعة المتغيرة :-

جميع التوربينات الريحية المركبة حالياً في العالم، يقع

لقد شهد السوق العالمي التوربينات الريحية في السنوات الخمس الأخيرة، نمواً ملحوظاً، بلغ أكثر من 30% في السنة. وتلعب طاقة الرياح دوراً متزايد الأهمية في توليد الكهرباء، خاصة في بعض الدول مثل ألمانيا وأسبانيا، حيث تؤيد التشريعات لكلا البلدين استمرار نمو القدرات المركبة من الرياح. أما هولندا، فقد شهدت توسعاً كبيراً في استخدام طاقة الرياح خلال السنة المنصرمة، قد تتجاوز السعة الكلية لمنظومات الرياح المركبة فيها مع نهاية سنة 2002 ف، (700) ميغاوات كحد أقصى. ومع أنه من المتوقع انخفاض معدل نمو طاقة الرياح في أوروبا خلال الفترة 2003-2004 ف، إلا أن الخطط العديدة التي وُضعت لبناء مزارع الرياح في شمال

تكون فيها مقاومة العضو الدوار للمولد ذو القفص السنجاي تتغير لحظياً عن طريق استخدام منظومات الكترونيات قوى عالية السرعة. وشركة Vestas هي الوحيدة التي نجحت في تسويق هذا النظام تحت اسم Optislip. ونجد أن عدداً من التوربينات ذات المدى من 600 كيلوات إلى 2.75 ميجاوات تُزود الآن بهذا النظام، حيث يسمح بزيادة سرعة الدوار مؤقتاً إلى أعلى من 10% من القيمة الاعترابية أو الاسمية Nominal value.



الشكل (1) التصميمات الأساسية الثلاثة للتوربينات الريحية.

أ - ثابتة السرعة ذات التوصيل المباشر بالشبكة، ذو المولد الحثي ذو القفص السنجاي.

ب - متغيرة السرعة ذات المولد الحثي مزدوج التغذية.

ج - متغيرة السرعة مبنية على المولد التزامني ذي التوصيل المباشر.

تصميمها ضمن ثلاثة أنواع أساسية للتوربينات الريحية، وذلك كما هو موضح بالشكل (1).

- ثابتة السرعة ذات التوصيل المباشر بالشبكة، ذو المولد الحثي ذو القفص السنجاي.

- متغيرة السرعة ذات المولد الحثي مزدوج التغذية.

- متغيرة السرعة مبنية على المولد التزامني ذات التوصيل المباشر.

وبغض النظر عن الاتجاه السائد لهذه التصميمات الثلاثة،

فإن عدداً من المصنعين قد أنشأ تقنيات أخرى مع مرور الزمن، بعضها قدر لها النجاح، والآخر أصبح في طور النسيان (كما في الجدول (1)).

وتحتوي التوربينات الثابتة السرعة على الدوار والمولد

الحثي ذو القفص السنجاي Squirrel cage induction generator وتكون موصلة بالمولد عن طريق صندوق التروس (المسننات) gearbox ويكون ملف العضو الثابت للمولد موصل بالشبكة.

ويتغير مقدار الانزلاق مع القدرة المتولدة، لذلك لا تكون السرعة ثابتة في الحقيقة. وبما أن السرعة تتغير بمقدار صغير جداً (فقط 1-2%)، فهذا في العموم يشير إلى التوربينة ذات السرعة الثابتة.

ويعمل المولد ذو القفص السنجاي دائماً على سحب القدرة الردية reactive power الغير مرغوب فيها من الشبكة، خاصة في الشبكات الضعيفة، وتستهلك القدرة الردية للمولد ذو القفص السنجاي بواسطة المكثفات بحيث تعمل على توفير توازن معين وبشكل مستمر.

وتقوم شركتي Vestas و Nordc windpower بتصنيع عدة تصاميم، حيث أصبحت التوربينة شبه متغيرة السرعة،

جدول (1) مصنعي التوربينات الريحية ، التصميم الحالي ومدى القدرة

مدى القدرة	التصميم	المصنع
600 كيلوات: 1-3.2 ميجاوات	CT/CS : CT/AS	Bonus (الدانمرك)
كيلوات - 2 ميجاوات	VTDI	DeWind بريطانيا/ألمانيا
3 كيلوات - 4.5 ميجاوات	VTDD	Energier ألمانيا
كيلوات 9 كيلوات - 3 ميجاوات	CT/CS: VTDI	GE Wind Energy الولايات المتحدة/ألمانيا
25 كيلوات 75 كيلوات - 2 ميجاوات	VT/AGP:VTDD	Lagerwey هولندا
7 كيلوات - 5 ميجاوات	VTDD	Jemteindrie فرنسا
كيلوات - 3 ميجاوات 2 ميجاوات	CT/CS: VTSGP	MADE إسبانيا
كيلوات - 5 ميجاوات 2 ميجاوات 2.75 ميجاوات	CT/CS: CT/AS: VTDI	NEG Micon دانمرك
كيلوات - 3 ميجاوات 5 ميجاوات 2.5 ميجاوات	CT/CS: VTDI	Nrdex ألمانيا
75 كيلوات - 5 ميجاوات 2 ميجاوات	CT/CS:CT/AGP:VTDI	Repower System ألمانيا
كيلوات 2.75 ميجاوات 85 كيلوات - 3 ميجاوات	SVT/OSP:VTDI	Veata دانمرك

- (CT/CS) ، ثابتة السرعة، بنظام الأنهيار الكلاسيكي، وزاوية الريشة ثابتة.

- (CT/AS) ، ثابتة السرعة، بنظام الأنهيار الفعال، وزاوية الريشة تتغير في الاتجاه المعاكس بمقدار 3 إلى 5 درجات.

- (VTDI) ، متغيرة السرعة، بنظام الخطوة، ومولد حثي مزدوج التغذية.

- (VTDD) ، متغيرة السرعة، ذات مولد تزامني موصل مباشرة.

مصحوب بنظام الخطوة لكل من (Enercon + Lagerwey + 1.5 MW Jeumont)

مصحوب بنظام الأنهيار الكلاسيكي لشركة (Jeumont, J48 [750 kw])

- (VTSGP) متغيرة السرعة، مصحوبة بنظام الخطوة بمولد تزامني.

(، متغيرة السرعة، مصحوبة بنظام الخطوة، ومولد تزامني (تيار 100 % بواسطة المحول).

(، في عصرنا هذا غير اعتيادي توحيد السرعة الثابتة/ بنظام الخطوة مع التوصيل المباشر للمولد التزامني، هذا استخدم

في النظام الأساسي، يشمل 225 و 500 كيلوات.

(، شبه متغيرة السرعة، بنظام الخطوة مصحوبة مع Opilip (+ 10 % أقصى تغيير في السرعة الاسمية).

وشهدت التوربينات الريحية

المتغيرة السرعة تقدا مشيرا في السنوات المنصرمة، ونستطيع الحصول على عملية تغيير السرعة فقط بواسطة فصل تردد الشبكة الكهربي والتردد الميكانيكي للدوار، وفي هذه الحالة، تستخدم محولات إلكترونية خاصة بالقدرة، مثل محول AC-DC-AC، ويكون مرفق أو مدعم بأنظمة تحكم متطورة.

وفي التوربينات المتغيرة السرعة المحتوية على المولد الحثي مزدوج التغذية، يقوم المحول بتغذية لفائف العضو الثابت للمولد، عندما تكون لفائف العضو الثابت موصلة مباشرة بالشبكة، ويمكن تغيير تردد الدوار الكهربي بواسطة هذا المحول، وهذا يجعل فصل التردد الكهربي والميكانيكي، وأيضا عملية تغيير السرعة ممكنا.

وفي التوربينات الريحية المتغيرة السرعة والمحتوية على المولد التزامني وذات التوصيل المباشر، يكون المولد والشبكة منفصلين تماما بواسطة محولات الكترونيات القوى، وهي أيضا تسمح بعملية تغيير السرعة.

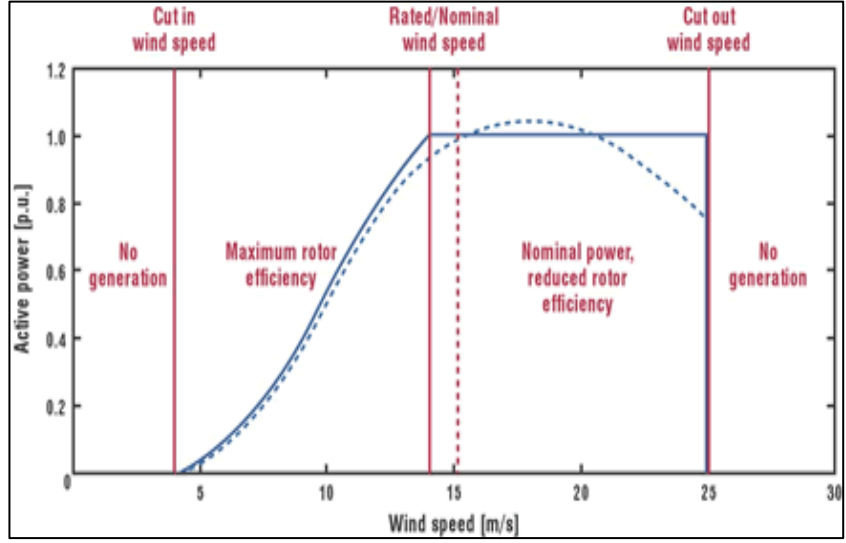
الفوائد والعيوب

لكل توربينة ضمن التصميمات الثلاث، لها فوائد

وعيوب خاصة بها. حيث تمتاز التوربينات ثابتة السرعة بأنها بسيطة نسبيا، مما يجعل سعرها منخفضا نسبيا، وهذه التوربينات تمتلك قوى ميكانيكية أكثر من أي تصميم آخر، وذلك لتضمنها حمل إنشائي عالي، حيث أن سرعة الدوار لا

تقنيات الطاقة

إلكترونيات القوى التي تحويلها، فهي حساسة لتكرار انخفاض وارتفاع الفولتية الناتجة من الأعطال، وكذلك من عملية وصل أو قطع الدوائر الكهربائية switching مما يجعلها باهظة الثمن [5,4] . من ناحية أخرى، فإن استخدام أنظمة السرعة المتغيرة تمكننا من توفير كبير في جوانب أخرى، مثل بناء قواعده خفيفة لمزارع الرياح في عرض البحر



شكل (2) - منحنى القدرة المثالي ومجال العمل لكل من نظام الانهيار للحد من القدرة (الخط المنقط) ونظام الخطوة (الخط المتواصل) . أو في التطبيقات البعيدة عن الساحل.

وعند مقارنة تصميمي السرعة

المتغيرة، فإن أول ميزة يمكن مشاهدتها

في التصميمات التي أسست على المولدات الحثية مزدوجة التغذية، هي أنها نوعاً ما ذات مولد نموذجي صغير، بالتالي يمكن استخدام محولات إلكترونيات قوى رخيصة أو منخفضة التكلفة. إن أسعار العناصر الشبه موصلة المستخدمة في محولات AC-DC-Ac شهدت هبوطاً مشهوداً في الخمس إلى السبع سنوات الأخيرة. وقد قلل هذا من الميزة الأخيرة. إن عيوب التصميمات الحثية على المولد الحثي، عند مقارنتها مع التوربينات المتغيرة السرعة ذات التوصيل المباشر، نجد أنها لا تزال في الواقع تحتاج إلى صيانة مركزة، وكذلك تحتوي على صندوق التروس في سلسلة الإدارة.

وعيوب تصميم التوصيل المباشر، تكمن في أنها ضخمة وتقلية الوزن نسبياً، وذات مولد حلقي معقد، ومحولات إلكترونية كبيرة تسمح بنفوذ أو مرور 100% من القدرة، أي كامل القدرة المولدة مقارنة بجوالي ثلث القدرة في حالة التوربينات الريحية ذات المولد مزدوج التغذية.

وتغير، والتغير في سرعة الرياح يتحول مباشرة إلى تغير في عزم دوران لسلسلة الإدارة. ويعتمد التذبذب في القدرة المنتجة من التوربينات الريحية على قوة الشبكة، حيث يمكن أن يؤدي تغير القدرة المنتجة من التوربينات الريحية إلى تغيرات وتذبذب في جهد الشبكة، قد يؤدي إلى تذبذب غير مرغوب فيه في إضاءة المصابيح " أو ما يطلق عليه الوميض".

وتمتاز التوربينات المتغيرة السرعة، بأنها أكثر توليد للطاقة، وذلك لنفس نمط الرياح، ويمكن التحكم في القدرة الفعالة والرديئة المنتجة بسهولة [2, 3] ، وهي كذلك أقل إجهاد أو شد ميكانيكي وقليلة التغير في القدرة، وذلك لأن الدوار يعمل كعجلة حدافة (حيث يخزن الطاقة مؤقتاً كمصد أو مخفف الصدمة Buffer) في العموم فإن مشكلة الوميض لا تحدث في التوربينات متغيرة السرعة. التوربينات المتغيرة السرعة تسمح بالتحكم في فولتية الشبكة، حيث تستطيع تغيير القدرة الرديئة المتولدة.

وعيوب التوربينات المتغيرة السرعة، تكمن في

سرعة الرياح

يتغير خرج التوربينات الريحية مع سرعة الرياح، ولكنه ليس متناسبا معها، فالطاقة التي تحتويها الرياح تزداد مع مكعب سرعة الرياح، وعند سرعات الرياح الضئيلة (1-3 متر/ الثانية) تكون التوربينات الريحية في حالة توقف shut down حيث تولد جزء ضئيل من القدرة أو لا تولد قدرة نهائيا (الشكل 2).

وتتحرك التوربينات الريحية فقط عندما تكون سرعة الرياح ما بين (2.5 و 5 متر/ الثانية)، وتعرف بسرعة رياح بدء الحركة Cut-in wind speed . أما السرعة الاسمية فهي السرعة التي نتحصل فيها على الخرج الاسمي Nominal output وعادة ما تكون بين (12 و 15 متر / الثانية). وتعتمد قيمة الأسعار على نسبة سعة التوليد لمساحة سطح الدوار، وكذلك على نوع التصميم.

وتحت سرعة الرياح الاسمية، يكون الهدف الحصول على أقصى كفاءة للدوار (الشكل 2)، وتعتمد كفاءة الدوار على النسبة بين السرعة الطرفية لريشة الدوار وعلى سرعة الرياح، وتعرف باسم (نسبة السرعة الطرفية) Tip speed ratio ونسبة السرعة الطرفية للتوربينات الريحية ثابتة السرعة لا يمكن السيطرة عليها أو التحكم بها، حيث أن سرعة الدوار، (وبالتالي السرعة الطرفية لريشة المروحة) تكون ثابتة. ومع أن نسبة السرعة الطرفية تتغير مع سرعة الرياح، إلا أنه يمكن الحصول على القيمة المثلى عند سرعة سرعتي رياح إذا كانت التوربينات الريحية تعمل عند سرعتين مختلفتين للدوار، لكن ثابتة).

تتغير نسبة السرعة الطرفية في التوربينات الريحية متغيرة السرعة، والتغير فيها يعتمد على سرعة الرياح وعلى سرعة

الدوار. وللحصول على الكفاءة القصوى للدوار، يجب أن نحافظ على نسبة السرعة الطرفية عند القيمة التي توافقت الكفاءة القصوى للدوار (اعتياديا ما تكون 6 - 8) عند كل الأوقات، وهذا يمكن الحصول عليه بواسطة التحكم في سرعة الدوار. بالتالي الكفاءة الديناميكية الهوائية العالية المتحصل عليها توضح لماذا التوربينات المتغيرة السرعة تنتج طاقة أكبر لنفس نمط سرعة الرياح.

نظريا يمكن قياس سرعة الرياح وجعل التوربينات تصل عند كفاءتها المثلى، ولكن في الواقع يستحيل ذلك لسببين:-

الأول، وهو أن سرعة الرياح تقاس بواسطة جهاز واحد لقياس سرعة الرياح anemometer يوضع على التوربينات، وهو لا يعطي معيار جيد لسرعة الرياح المؤثرة على دوار التوربينات، بسبب اكتساحه لمساحة كبيرة.

ثانيا، جهاز قياس سرعة الرياح يثبت خلف الدوار على غرفة المعدات Nacelle وهذا يشوه قراءات سرعة الرياح بشكل كبير، أي أن القياسات الدقيقة لسرعة الرياح في واقع الحال هي وهم. والقدرة المولدة يتم التحكم فيها باستخدام قياسات سرعة الدوار (شكل 3)، وخصائص التحكم المنظمة للعلاقة بين سرعة الدوار المقاسة والقدرة المولدة تكون أفضل ما يمكن، وبالتالي الحصول على أقصى طاقة منتجة (أنظر الشكل 4) [6-7] .

تقليل الكفاءة (الفعالية).

عند سرعات الرياح التي تكون أقل من السرعة الاسمية، يكون الهدف هو استخلاص الطاقة من الرياح بأقصى كفاءة قدر الامكان، ومع ذلك، فهذه الحالة لا يمكن تطبيقها عند سرعات الرياح التي تفوق سرعة الرياح الاسمية، حيث أن هذا سوف يتسبب في فرط حمل المولد و/ أو منظومة التحويل. وعند سرعات الرياح التي تفوق سرعة الرياح

تقنيات الطاقة

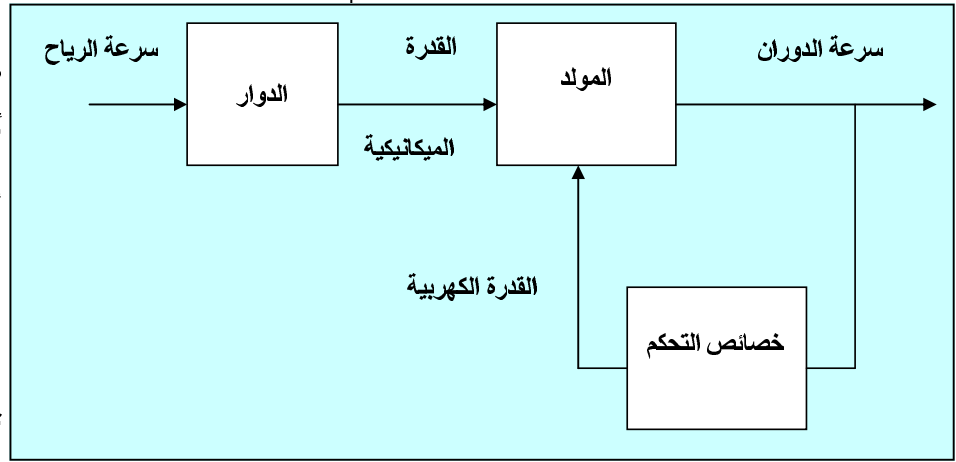
الريشة، فهذا السلوك ضمني، ولا يحتاج إلى أنظمة تحكم فعالة للوصول إلى تخفيض الكفاءة الديناميكية الهوائية.

ومع التحكم في الخطوة، تتحول الريشة تدريجياً عن اتجاه الرياح، وكذلك تتغير زاوية ارتطام الرياح وتقل الكفاءة

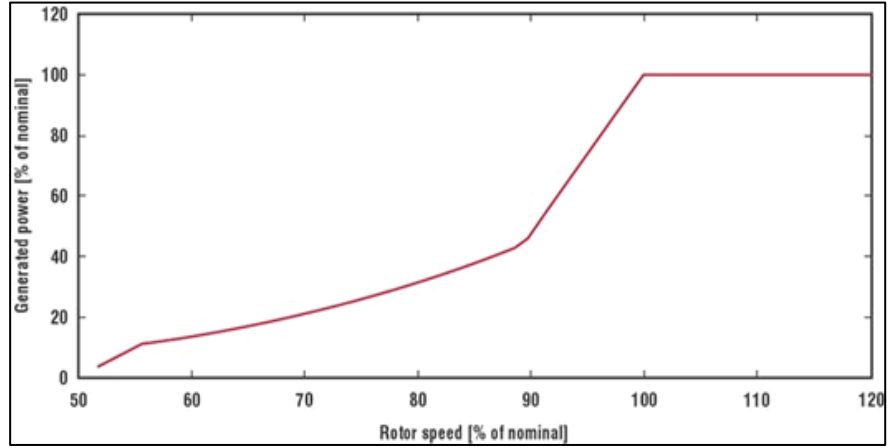
الديناميكية الهوائية. في هذه الحالة، يستخدم نظام تحكم فعال بواسطة وسائل هيدروليكية أو نظام إدارة كهربائي. والمدخل المتغير للتحكم في الخطوة هو سرعة الدوار. وكلما زادت سرعة الدوار كلما زاد تحول الريش بعيداً عن الرياح. عندما تنخفض سرعة الدوار تعود

الريش في اتجاه الرياح (الشكل 5). وفي العموم، يستخدم نظام تحكم الازميار في التوربينات الثابتة السرعة، لأسباب تقنية، بينما التوربينات المتغيرة السرعة، عادة تجهز بنظام التحكم في الخطوة.

إن الابتكار الحديث نسبياً، هو مفهوم نظام تحكم الازميار الفعال active stall concept فهو مماثل لنظام تحكم الازميار العادي للحد من القدرة، إلا أن كامل الريشة يمكن أن تدور إلى الوراء (في الاتجاه المعاكس، كما في الحالة مع التحكم في الخطوة) بوضع درجات (3-5 درجات)، عند نطاق السرعة الاسمية، من أجل الحصول على أفضل تحكم للدوار.



شكل (3) أساسيات التحكم في سرعة الدوار عند سرعات الرياح أقل من السرعة الاسمية

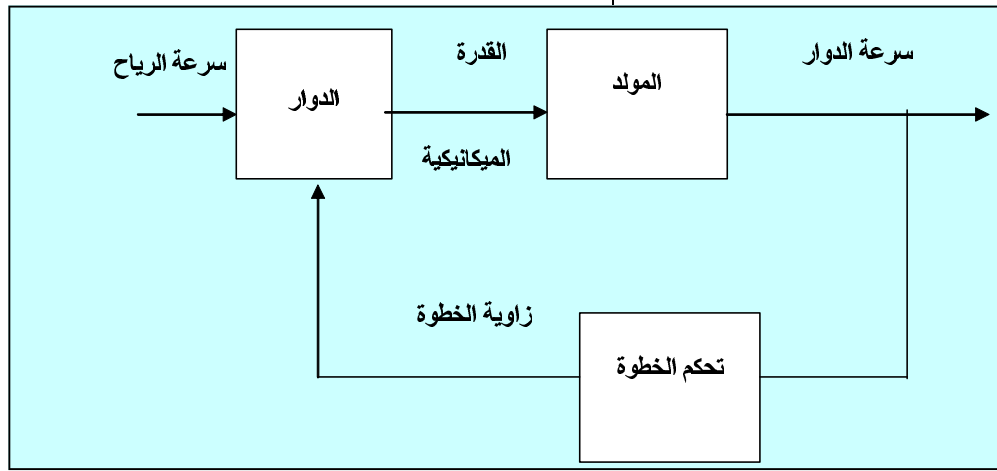


شكل (4) خصائص التحكم في سرعة الدوار: القدرة المتولدة تتجه ناحية قيمة معينة لسرعة الدوار

الاسمية، تكون القدرة الميكانيكية المستخلصة من الرياح ثابتة، وللوصول إلى هذا، فإن الكفاءة الديناميكية الهوائية للدوار يجب أن تنخفض عندما تزداد سرعة الرياح. أنظر الشكل 2.

ويمكن تطبيق نظامين لتقليل الكفاءة:-

نظام تحكم الازميار للحد من القدرة Stall power limitation ونظام التحكم في الخطوة Pitch control فسي نظام تحكم الازميار، تُصمم الريش بحيث تهب (أو تقل) كفاءة الدوار عند سرعات الرياح العالية. ونظراً لتصميم



والنتيجة تعرف بتأثير " الأهميار العميق " deep stall effect والذي يجعل منحني القدرة ينحني بحدّة إلى خط الخرج الأفقي عند القدرة الاسمية، ويحافظ

شكل (5) أساسيات التحكم في سرعة الدوار عند سرعات الرياح أعلى من السرعة الاسمية

عليها كقيمة ثابتة لكل سرعات

الرياح. ما بين السرعة الاسمية وسرعة التوقف.

الثالثة ، حسب تصنيف IEC والتي تولد أقصى طاقة عند سرعات رياح أقل، فسرعة التوقف تتراوح بين 17 - 20 متر / الثانية. وتتوقف التوربينات الريحية عن العمل إذا تجاوز متوسط سرعة الرياح لمدة عشر دقائق قيمة سرعة الرياح التصميمية السابقة.

القياسات.

ما هي التبعات التي تنتج عن الاختلافات بين أنواع التوربينات الريحية على نمط الطاقة المنتجة؟

لدراسة هذا السؤال، زود عدد من أصحاب المصانع في هولندا جامعة Delft بقياسات متحصل عليها من أنواع التوربينات الريحية الموجودة (أنظر شكل 6).

وتشير القراءات إلى أن خرج الطاقة من التوربينات الريحية متغيرة السرعة، أقل تذبذب منه في التوربينات الريحية ثابتة السرعة. والتفسير الأساسي لهذه الاختلافات التي شوهدت، هو أن التذبذب في سرعة الرياح في التوربينات الثابتة السرعة، يتحول مباشرة إلى تذبذب في القدرة. أما في التوربينات متغيرة السرعة، نجد أن سرعة الدوار يجب أن تتغير قبل أن يقوم نظام تحكم الحول بتعديل خرج القدرة

إن تطبيق هذا المفهوم يقتصر على التوربينات الثابتة السرعة، والأهميار الفعال النموذجي مستخدم من قبل مصانع بونس Bouns الدانمركية (1 ميجاوات فما فوق)، و شركة NEG Micon (1.5 و 2 ميجاوات) . ويكون الاختلاف عن التحكم في الخطوة الفعال، ليس فقط في مدى تغير زاوية الريشة القليل أو الضئيل، ولكن أيضا في اتجاه التغير، فهو معاكس. أيضا، تتغير زاوية الريشة فقط في مرحلة بدء التشغيل وفي مدى السرعة الاسمية، بينما التحكم في الخطوة الفعال، و تُستخدم أحيانا قيمة السرعة البدائية كوسيلة سيطرة ثانية لتحسين الكفاءة الديناميكية الهوائية للدوار.

أخيرا، كل توربينة ريحية لها سرعة توقف، وهي سرعة الرياح التي تكون فيها التوربينة في حالة توقف , shut down , لتجنب أي حمل إنشائي زائد (الشكل 2). وهذه القيمة تكون حوالي 25 متر / الثانية للتوربينات التي تعمل في خشونة سطح من الرتبة الأولى والثانية حسب تصنيف IEC . أما بالنسبة للتوربينات التي تعمل في مواقع من الرتبة

تقنيات الطاقة

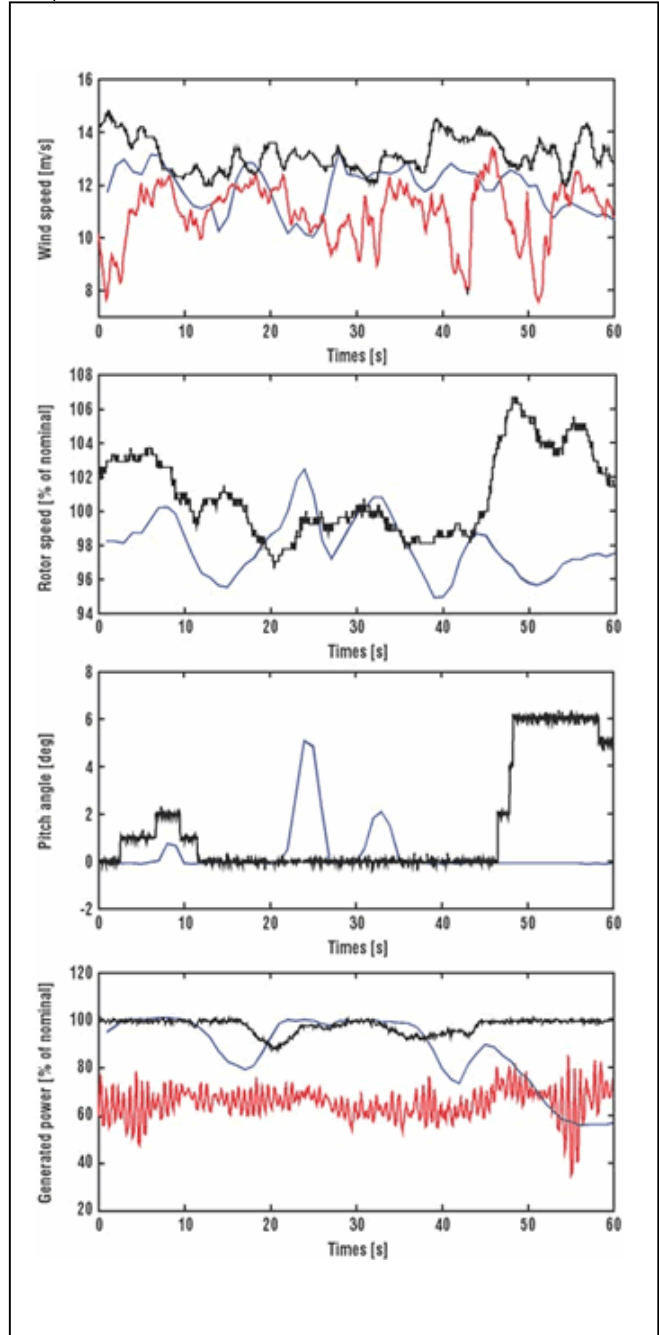
(شكل 4 و 3). وبواسطة القصور الذاتي للدوار، نجد أن التغيرات الثانوية العابرة في سرعة الرياح تكون قليلة أو عديمة التأثير على كمية الطاقة المولدة. بكلمات أخرى، ذلك لأن سرعة الدوار لا تتغير أساساً، ولا كمية الطاقة المولدة. من القراءات نستطيع أيضاً أن نستنتج انه إذا تزايدت سرعة الدوار إلى القيمة التي تناظر توليد التوربينة للقدر الاسمي، سوف يتدخل نظام التحكم في الخطوة مباشرة للتحكم في سرعة الدوار (شكل 5)، وعند سرعات الرياح التي تكون أقل من سرعة الرياح الاسمية، تقترب زاوية الخطوة من درجة الصفر.

التصميمات المتقدمة.

التوجه حالياً هو نحو التصميمات المتقدمة، خاصة للتوربينات الريحية من أحجام الميجاوات. وهناك حالياً توجهين للتصميمات التكنولوجية للأحجام الكبيرة (أكبر من 1.5 ميجاوات)، وهما: التوربينات المتغيرة الخطوة مع المولدات الحثية مزدوجة التغذية، وأنظمة التوصيل المباشر.

الجزء الأول، غالباً يتضمن أسماء للشركات القيادية التي تهدف إلى استخدام التوربينات ذات صندوق المسننات (علبية تروس السرعة)، أما الجزء الثاني، فهو غالباً يشمل شركة (300) Enercon كيلووات - 4.5 ميجاوات . وهناك توجه من العديد من الشركات الأخرى للإقبال على نظام التوصيل المباشر، وفيما عدا شركة Enercon فان شركة Windmaster الموجودة في هولندا، نجحت في وضع توربينة بحجم 750 كيلووات ذات نظام التوصيل المباشر ضمن إنتاجها التسلسلي الفعلي.

وقد كان ولا يزال نظام تحكم الاقمبار الكلاسيكي،



شكل (6) يوضح القياسات لكل نوع من التصميمات الأساسية للتوربينات الهوائية. من الأعلى إلى الأسفل: سرعة الرياح، سرعة الدوار، زاوية الخطوة، وأخيراً القدرة المتولدة.

ملاحظة: - الخط الأحمر يمثل توربينة ذات سرعة ثابتة.

الخط الأزرق يمثل توربينة ذات سرعة متغيرة، ومزودة بمولد حتى مزدوج التغذية.

الخط الأسود يمثل توربينة ذات سرعة متغيرة، وذات توصيل مباشر للمولد.



رائج الاستخدام في منظومات الرياح إلى أحجام حوالي 900 كيلووات، وفي بعض الحالات لأحجام 1.3 و 1.5 ميجاوات.

ومن المتوقع، في المدى الطويل، أن تستخدم أنظمة السرعة المتغيرة وتحكم الخطوة الأكثر تقدم، مع/ أو بدون صندوق المسننات، مع النوع الأول أو الأحجام التي تقل عن الميجاوات. والمثال الواضح هو التغير الذي قامت به شركة NEG Micon التي أعلنت حديثاً عن تحويل منظومة بسعة 1.5 ميجاوات، ثابتة السرعة وذات تحكم الأتيمار الفعال، إلى منظومة معدلة، يستخدم فيها التحكم في الخطوة وسرعة متغيرة، وتعرف بتوربيننة NM72C/1500 وسواء أن كان الاتجاه ناحية الأنظمة المتغيرة السرعة، سوف يعني في آخر الأمر، لدور أكبر للمولدات المتزامنة مع صندوق المسننات، وكذلك

التوصيل بالشبكة عن طريق محولات التردد Frequency converters، فإنه يصعب التنبؤ بذلك حتى الآن. هذا سوف يعتمد على أمور عدة، منها مشاكل الاستقرار، التي تحدث عندما تظهر أعطال دائرة القصر في الشبكات الختوية على أعداد كبيرة من التوربينات الريحية المؤسسة على المولدات الخشبية مزدوجة التغذية. ويتضح أنه من الممكن حل هذه المشاكل في المستقبل القريب. [5]

المراجع

3. Hoffmann, R. and Mutschler, P. 'The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines'. 2000 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Rome, 8-12 October, 2000.
4. Slootweg, J. G. and Kling, W. L. 'Modelling and Analysing Impacts of Wind Power on Transient Stability of Power Systems', *Wind Engineering*. Vol. 26, no. 1, 2002, pp. 3-20.
5. Slootweg, J. G. and de Vries, E. Fault response of wind turbines, *Energietechnik*, Vol. 80, no.7/8, July/August 2002, pp 32-36 (in Dutch).
6. Slootweg, J. G., Polinder, H., and Kling, W. L. 'Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Direct Drive Synchronous Generator and Back to back Voltage Source Converter and its Controls'. 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition. Copenhagen, Denmark. 2-6 July 2001.
7. Slootweg, J. G., Polinder, H., and Kling, W. L. 'Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator'. 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 15-19 July 2001.

1. Slootweg, J. G., de Haan, S. W. H., Polinder, H., and Kling, W. L. 'Voltage Control Methods with Grid Connected Wind Turbines: a tutorial review'. *Wind Engineering*. Vol. 25, no. 6. 2001, pp. 353-365.
2. Zinger, D. S. and Muljadi, E. 'Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds'. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 33, no. 6. November-December 1997, pp. 1444-1447.