دراسة أداء مولدة تحريضية مع عنفة ريحية

الدكتور هاكوب بوغوص * **الدكتور علي الجازي**[**]

الملخص

دُرِسَ في هذا البحث وبالاعتماد على النظرية العامة للآلات الكهربائية أداء المولدات التحريضية في أثناء عملها مع العنفات الريحية لتوليد الطاقة الكهربائية وذلك عن طريق نمذجة جملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية باستخدام برنامج Matlab/Simulink ومن ثم تحديد نظام التشغيل المثالي لهذه الجملة وذلك عن طريق دراسة مشتركة للخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية وخصائص التشغيل للمولدة التحريضية.

وقد حُدِّدَت الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية التي تمثل العلاقة بين عزم العنفة الريحية وسرعة دوران محورها عند سرعات رياح مختلفة ومن أجل جميع زوايا ميل ريش العنفة عن مستوى دورانها وذلك باستخدام برنامج Matlab/Simulink كما اختيرت عنفة ريحية باستطاعة معينة تتوافق مع المولدة التحريضية المربوطة.

وقد ساعدت الدراسة والنتائج في تحديد نقطة العمل النظامية (الاسمية) لجملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية. هذا وقد تناول البحث طرائق إقلاع نظام جملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية وطرائق إقلاع العنفة الريحية باستخدام التحكم الفعال ومقارنتها بالتحكم غير الفعال وذلك للارتقاء إلى مستوى التوليد المثالي عند مختلف سرعات الرياح.

الكلمات المفتاحية: المولدات التحريضية، العنفات الريحية، التحكم الفعال، التحكم غير الفعال

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

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

1 - مقدمة

يلقى استخدام طاقة الرياح اهتماماً عالمياً كبيراً في الوقت الحاضر نتيجة تزايد الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية كما تلقى مسألة اختيار نوع المولدة الكهربائية ونظام التوليد أهمية كبيرة إذْ يتمتع كل نوع بخصائص تشغيل وآلية تحكم مختلفة.

تصنف العنفات الريحية طبقاً لتصميمها الهندسي إلى عنفات ذات محور دوران شاقولي Vertical Axis Wind Turbine حيث يكون فيها مستوى دوران الجزء الدوار موازياً لمستوى الأرض ومن ثمَّ لا تحتاج إلى نظام توجيه في اتجاه الرياح ومن أشهرها عنفة داريوس وإلى عنفات ذات محور دوران أفقي Horizontal Axis Wind Turbine حيث يكون فيها مستوى دوران الجزء الدوار عمودياً تقريباً على مستوى الأرض وهي الأكثر شيوعاً إذ تتفوق على العنفات ذات المحورالشاقولي من حيث عملها ضمن مجال واسع لسرعات الرياح و إمكانية التحكم بسرعتها [8,6].

ولأنظمة التوليد الريحية أنواع مختلفة، إذْ يتمتع كل نوع بخصائص تشغيل وآلية تحكم مختلفة فبالنسبة إلى ريش الدوار، نميز بين نوعين من العنفات [8]:

- عنفات ذات ريش ثابتة وتكون الريش غير قابلة للدوران حول محاورها. يستخدم في هذه الأنظمة ما يسمى بالتحكم غير الفعال Stall Control للتحكم باستطاعة خرج العنفة وتمتاز ببساطة تركيبها ورخص ثمنها.
- عنفات ذات ريش قابلة للدوران، حيث تكون الريش مزودة بأنظمة هيدروليكية تدور الريشة أو جزء منها حول محور العنفة وذلك للتحكم بالاستطاعة المستجرة من الرياح. تسمى هذه الطريقة بالتحكم الفعال Pitch Control وتتميز بإمكانية تحكم أوسع من النظام السابق، ولكنها تكون أكثر تعقيداً وكلفة.

مما سبق يمكن التمييز بين أربعة أنواع من أنظمة التوليد الريحية:

- أنظمة ذات سرعة دوران ثابتة وتحكم فعال.
- أنظمة ذات سرعة دوران ثابتة وتحكم غير فعال.
- أنظمة ذات سرعة دوران متغيرة وتحكم فعال.
- أنظمة ذات سرعة دوران متغيرة وتحكم غير فعال.

تستخدم في الأنظمة ذات سرعة الدوران الثابتة كل من المولدات التزامنية والتحريضية التي تربط مباشرة مع الشبكة. لهذا يجب المحافظة على سرعة دوران ثابتة للمولد التزامني وذلك للمحافظة على تردد ثابت لتوتر خرجه ولكي لا يخرج المولد عن التزامن مع الشبكة. أمَّا المولد التحريضي، فتجب المحافظة أيضاً على سرعته ثابتة لضمان عملية توليد الطاقة الكهربائية والحفاظ على سلامة الآلة. فزيادة سرعتها تؤدي إلى زيادة تحميلها، أمَّا انخفاضها عن السرعة الاسمية فتؤدي إلى تحول المولد إلى محرك يستهلك استطاعة من الشبكة.

تتميز هذه الأنظمة ببساطة تركيبها وقلة تكاليفها.

أما الأنظمة ذات السرعات المتغيرة ، فهي التي تربط مع الشبكة عن طريق مبدلات تردد الكترونية تربط أمَّا بين الجزء الثابت لكل من المولد التزامني أو التحريضي والشبكة أو بين الجزء الدائر والشبكة وذلك في حال المولدات التحريضية ذات الدائر الملفوف والتي تسمى بالمولدات ذات التغذية المضاعفة Doubly-Fed Induction Generators وتتميز هذه الأنظمة بإمكانية توليد الطاقة الكهربائية ضمن مجال واسع من سرعات الرياح المنخفضة والمرتفعة وإمكانية التحكم بعامل استطاعة الجملة.

سيتركز مجال دراسة هذا البحث على أداء المولدات التحريضية في أثناء عملها مع العنفات الريحية وذلك عن طريق دراسة مشتركة للخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية عند سرعات رياح مختلفة ومن أجل جميع زوايا ميلان ريش العنفة وخصائص التشغيل للمولدة الريحية، كما سيتطرق البحث إلى طرائق إقلاع جملة العنفة الريحية والمولدة التحريضية وإلى طرائق التحكم باستطاعة العنفة.

2 - دراسة نظام عمل المولدة التحريضية مع العنفة الريحية

لدراسة نظام عمل المولدة التحريضية مع العنفة الريحية ولتحديد نظام التشغيل المثالي لهذه الجملة، تم القيام بدراسة مشتركة للخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية وخصائص التشغيل للمولدة التحريضية.

تُحدَّدُ الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، التي تمثل العلاقة بين عزم العنفة الريحية وسرعة دوران محورها، باستخدام برنامج Matlab/Simulink [10] وذلك كما يأتي:

إن استطاعة الخرج للعنفة الريحية تعطى بالعلاقة الآتية:

$$P_T = \frac{1}{2} c_P(\lambda, \theta) \rho A V^3 \qquad (1)$$

إِذْ:

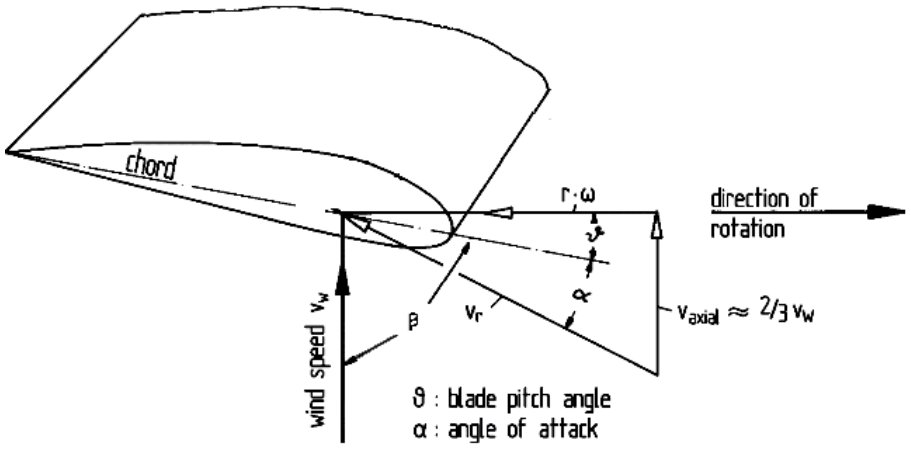
V: سرعة الرياح.

ρ: كثافة الهواء.

A: المساحة التي تمسحها الجزء الدوار في العنفة.

c_P - عامل أداء أو استخدام طاقة الرياح *PerformanceCoefficient* وهو يعبر عن مقدار الاستطاعة التي تمتصها العنفة من الاستطاعة الكلية للرياح. نظرياً يستحيل امتصاص أكثر من 59.3% من طاقة الرياح وتسمى هذه القيمة بعامل *Betz* . ولكن عملياً وبسبب التصميم الإيروديناميكي للريش وبعد الأخذ بالحسبان الضياعات الناتجة عن انتقال هذه الطاقة، تصل هذه النسبة إلى 45% . [8,6].

يتعلق عامل أداء العنفة بشروط جريان الهواء حول الريش، فهو يتناسب عكساً مع زاوية الهجوم α (*Attack Angle*) التي تمثل الزاوية بين وتر الريش وشعاع السرعة V_r كما في الشكل (1) إِذْ:



الشكل (1): زاوية الهجوم و زوايا الميلان

α: زاوية الهجوم. ϑ: زاوية ميلان الريشة عن مستوي الدوران.

β : زاوية ميل الريشة عن محور الدوران.

كما يتعلق عامل أداء العنفة بالسرعة النسبية لطرف الريشة λ (Tip Speed Ratio) التي تمثل النسبة بين السرعة الخطية لطرف الريشة V_r و سرعة الرياح V_W

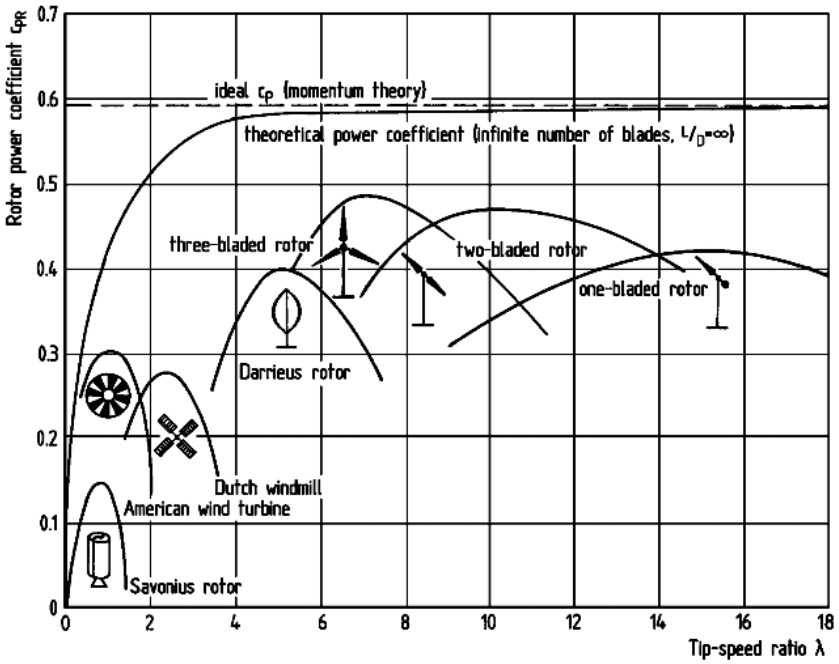
$$(\lambda = \frac{V_r}{V_W} = \frac{\omega_r . R}{V_W})$$

وهي من أهم محددات العنفة، إذ له تأثير مهم في العزم والاستطاعة، وتمثل المنحنيات (C_p-λ) أهم المنحنيات التي تصف أداء العنفات بمختلف أنواعها.

تحدد السرعة الخطية لطرف الريشة مقدار تحميل الريشة وتتراوح هذه السرعة عادة ضمن المجال (50÷150) m/s وهي ذات أهمية كبيرة في حساب أبعاد ريش العنفات.

ولمَّا كانت تساوي إلى جداء نصف قطر الدوار R بسرعته الزاوية ω_r، لذا فإن العنفات من رتبة الكيلووات تحقق سرع زاوية تصل حتى 180 r.p.m في حين العنفات من رتبة الميغاوات فتدور بسرعات صغيرة تصل إلى 20 r.p.m .

في العنفات الريحية السريعة التي لها ريش ذات تصميم ايروديناميكي (داريوس، ذات ثلاث ريش) وعند سرع نسبية (λ=(4÷7)، تصل عوامل الأداء c_p إلى (0.4÷0.7). أمَّا العنفات البطيئة والتي تملك ريشاً خشبيةً أو معدنية دون تصميم ايروديناميكي (أميركي، هولندي متعددة الريش) وعند سرع نسبية (λ=1÷2.5) تكون عوامل الأداء منخفضة(C_p=0.15÷0.3) وذلك كما في الشكل (2).



الشكل (2): منحنيات $(c_p - \lambda)$ لأنواع مختلفة من العنفات

يمكن وصف عامل أداء العنفة C_p بمجموعة من التوابع الرياضية الآتية التي تم الحصول عليها تجريبياً[8].

$$C_p = C_1(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\vartheta - C_4\vartheta^{\chi} - C_5)e^{-\frac{C6}{\lambda i}} \qquad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda i}=\frac{1}{\lambda+0.08\vartheta}-\frac{0.035}{\vartheta^3+1} \qquad (3)$$

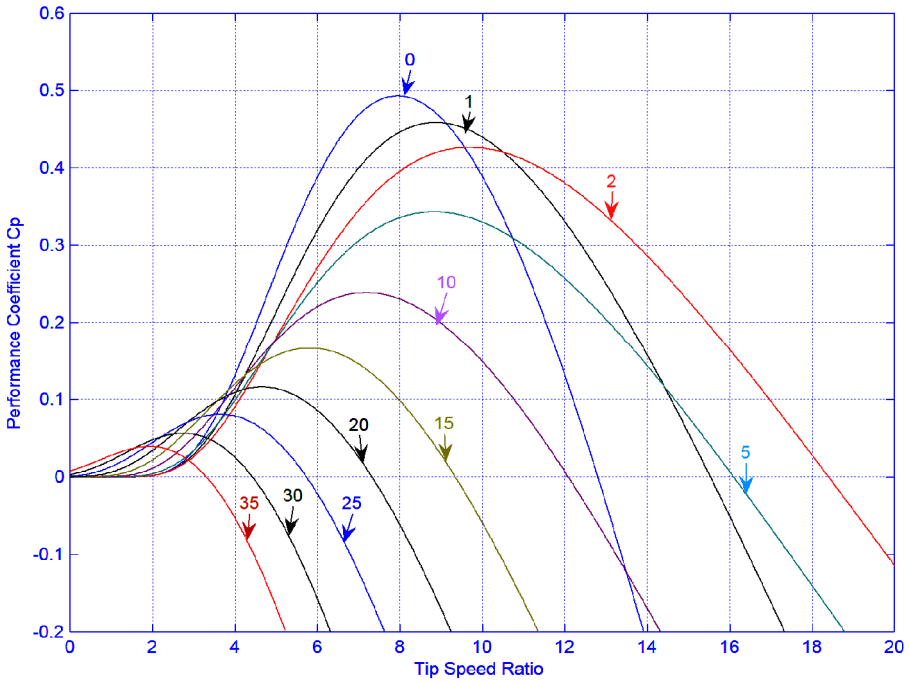
تصف العلاقات السابقة جميع أنواع العنفات الريحية بشكل عام، فهي تعطي قيمة عامل الأداء c_p عند جميع قيم λ ومن أجل جميع زوايا ميل الريش عن مستوي الدوران ϑ.

أمَّا قيم الثوابت (c_1-c_6) فهي خاصة لكل عنفة وتتعلق بالتصميم الإيروديناميكي لريش العنفة [6].

فلوصف عنفة محددة ، يجب إعطاء قيم لهذه الثوابت تخص عنفة معينة. وباختيار قيم هذه الثوابت على الشكل الآتي:

$$c_1=0.6 \quad c_2=116 \quad c_3=0.4$$
$$c_4=0 \quad c_5=5 \quad c_6=21$$

وبإجراء النمذجة باستخدام برنامج Matlab/Simulink نحصل على المنحنيات $(c_p-\lambda)$ من أجل زوايا ميلان ϑ مختلفة للريش كما في الشكل(3) إذْ يلاحظ تناقص عامل الأداء C_p مع تزايد سرعة الرياح V_w أو زاوية ميل الريش θ عن مستوي الدوران.



الشكل (3): منحنيات $c_p-\lambda$ حسب النموذج السابق

ويتم ربط العنفة الريحية مع المولدة التحريضية عن طريق علبة سرعة ومحاور نقل الحركة.

لاختيار العنفة الريحية باستطاعة معينة تتوافق مع المولدة التحريضية المربوطة معها، تُتَّبعُ الخطوات الآتية:

1 - اختيار سرعة الرياح الاسمية لعمل هذه العنفة، وهذا يتوقف على الموقع الذي سيتم فيه استثمار هذه الطاقة.

2 - اختيار نوع ريش الجزء الدوار وقراءة أعظم قيمة لـ c_p من المنحنيات الخاصة بالريشة المختارة.

بعد اختيار سرعة الرياح الاسمية، تُحسَبُ الاستطاعة المستجرة من الرياح عند تلك السرعة بالنسبة إلى واحدة سطح مقطع الجريان A_R و يتم تعويض قيمة c_p العظمى:

$$P = \frac{P_w}{A_R} = \frac{1}{2} c_p \rho v^3 \; ; [KW/m^2] \quad (4)$$

3 - حساب مساحة الجزء الدوار للعنفة:

$$A_R = \frac{P_T}{P\eta} \quad (5)$$

إذْ η يمثل المردود الكلي للنظام .

4 - حساب طول الريش المطلوبة:

$$l_b = R = \sqrt{\frac{A_R}{\pi}} \quad (6)$$

5 - تحديد عزم عطالة الجزء الدوار من النشرات الفنية أو حسابه باستخدام العلاقة:

$$J_T = \frac{N_b m_b l_b^2}{3} \quad (7)$$

إذْ:

N_b - عدد ريش الجزء الدوار.

m_b - كتلة الريشة الواحدة وتحدد من الجداول الخاصة بالعنفات الريحية.

6 - تحديد السرعة الزاوية الاسمية لدوران العنفة من خلال تحديد السرعة النسبية لطرف الريشة λ من المنحنيات الخاصة بالريشة.

$$\omega_T = \frac{\lambda V_W}{R} \quad (8)$$

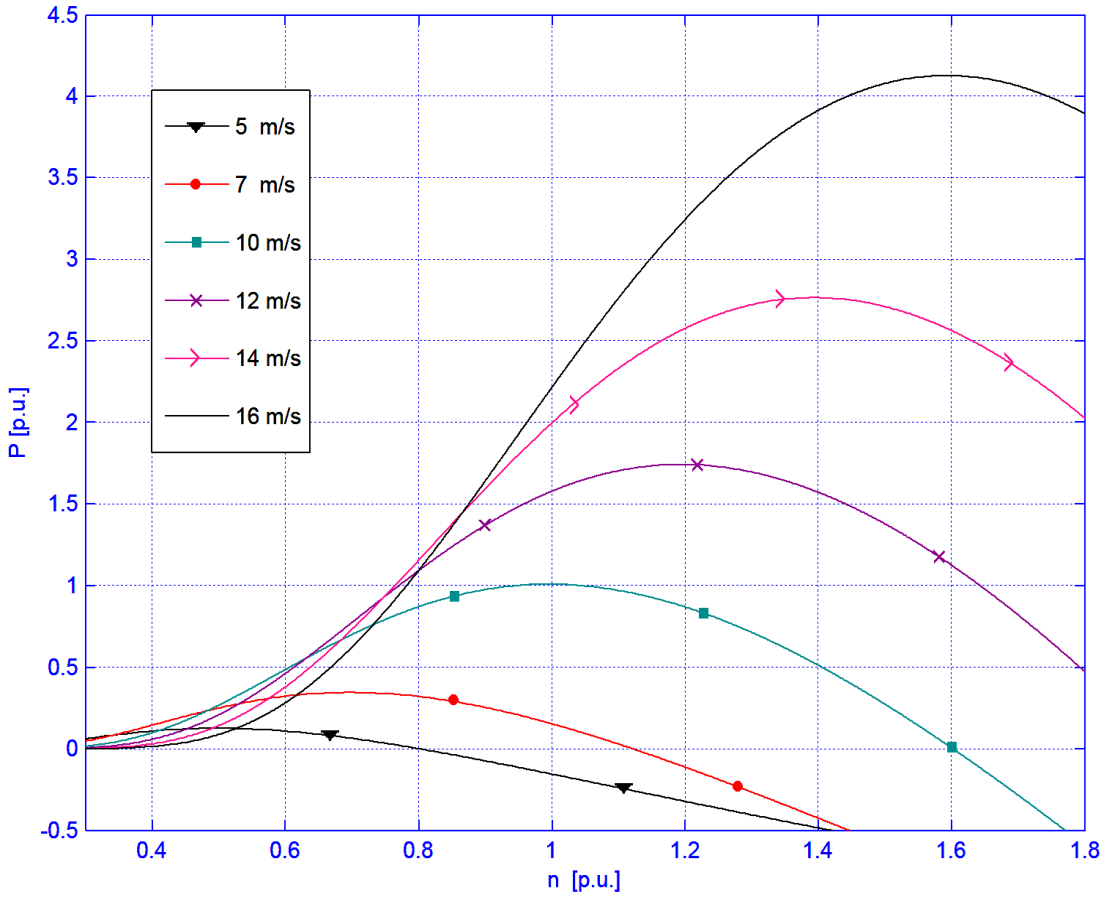
7 - تحديد نسبة تحويل علبة السرعة:

$$a = \frac{\omega_G}{\omega_T} \quad (9)$$

بناء على ما تقدم، اختيرت عنفة ريحية تلائم مولدة تحريضية استطاعتها $500KW$ ولها المواصفات الآتية:

$V_W \; [m/s]$	10
$P_n[Kw]$	513.5
$\rho_{air}[Kg/m^3]$	1.25
$c_{p\max}$	0.49
λ	8
η_{Total}	0.968
$A_R[m^2]$	1734
$l_b[m]$	23.5
$m_b[Kg/m^2]$	1.5
$m_b[Kg]$	2601
$J_T[Kgm^2]$	1 435 752
$\omega_T[rad/s]$	3.4
$n_T[rpm]$	32.5
$n_G[rpm]$	3073
a	94.5

وبعد النمذجة باستخدام البرنـــامج Matlab/Simulink تـــم الحصول على الخصائص الميكانيكية التي تصف العنفـــة المختارة ، أي التي تعطي استطاعة خرج العنفـــة P_T أو العزم الدوراني $M_T = \frac{P_T}{\omega_T}$ على محورها كتابع لسرعة دورانها ومن أجل سرعات رياح مختلفة وذلك كما هـــو مبيّن في الشكل(4) .

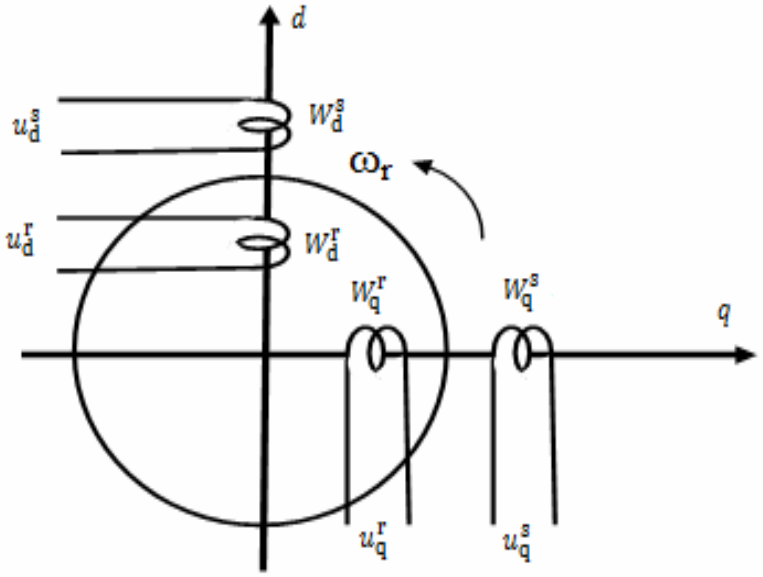


الشكل(4): المنحنيات الميكانيكية للعنفة المستخدمة

كما يبيّن الشكل (6) المخطط الصندوقي لنمـــوذج العنفـــة المستخدمة والتي تم تمثيلها(نمذجتها) باســـتخدام برنـــامج Matlab/Simulink.

3 - دراسة أداء المولدة التحريضية مع العنفة الريحيـــة

دُرسَتِ المولدة التحريضية بالاعتماد على النظرية العامـــة للآلات الكهربائية حيث تُمَثَّلُ الآلة التحريضية بآلة مثاليـــة ثنائية الأقطاب ثنائية الطور تتألف من ملفين متنـــاظرين موجودين على محورين متعامدين d و q في كـــل مـــن الثابت والدائر[9] كما هو مبيّن في الشكل(5) .



الشكل(5): آلة مثالية ثنائية الأقطاب ثنائية الطور

عندها تكتب المعادلات التفاضلية التي تصف عمل الآلة التحريضية الممثلة حسب المحاور d و q التي تدور بالسرعة التزامنية ω_s كالآتي:

معادلات التوتر:

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_s \psi_{qs} - \frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (10)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} - \frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (11)$$

$$u_{dr} = -R_r i_{dr} + s\omega_s \psi_{qr} - \frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (12)$$

$$u_{qr} = -R_r i_{qr} - s\omega_s \psi_{dr} - \frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (13)$$

إذْ:

$$\psi_{ds} = X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \quad (14)$$

$$\psi_{qs} = X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \quad (15)$$

$$\psi_{dr} = X_r i_{dr} + X_m i_{ds} \quad (16)$$

$$\psi_{qr} = X_r i_{qr} + X_m i_{qs} \quad (17)$$

ومعادلات العزم والحركة:

$$M_{em} = \psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr} \quad (18)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(M_{em} - M_c) \quad (19)$$

إذْ:

ψ_{ds} و ψ_{qs} يمثلان الفيض المغناطيسي المتشابك مع الجزء الثابت على المحورين d و q.

ψ_{dr} و ψ_{qr} يمثلان الفيض المغناطيسي المتشابك مع الجزء الدائر على المحورين d و q.

u_{ds} و u_{qs} توتر الجزء الثابت.

u_{dr} و u_{qr} توتر الجزء الدائر ويساوي الصفر في حال تشغيل الآلة كمحرك أو كمولد ذي دائر مقصور وتكون له قيمة في حال تشغيل الآلة التحريضية بتغذية مضاعفة،

أي حين ربط ملفات جزئها الدائر(في الآلة ذات الدائر الملفوف) مع الشبكة.

i_{ds} و i_{qs} : تيار الثابت على المحورين d و q

i_{dr} و i_{qr} : تيار الدائر على المحورين d و q

$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$: الانزلاق.

ω_s السرعة الزاوية التزامنية في الآلة.

ω_r السرعة الزاوية لدوران الجزء الدائر.

ω_b قيمة الأساس للسرعة الزاوية.

X_s و X_r و X_m : تمثل مفاعلة كل من الثابت والدائر والمفاعلة المتبادلة.

R_s و R_r : تمثلان المقاومة الأومية لملفات كل من الثابت والدائر.

H :ثابت العطالة

M_c :عزم الحمولة المطبق على محور الآلة

أمَّا معادلة الاستطاعة الفعلية التي تستجرها الآلة من الشبكة أو تقدمها إليها فتعطى بالعلاقات الآتية:

$$P_s = (3/2)*(u_{ds}i_{ds} + u_{qs}i_{qs}) \qquad (20)$$

وفي حال تغذية الدائر أيضاً:

$$P_r = (3/2)*(u_{dr}i_{dr} + u_{qr}i_{qr}) \qquad (21)$$

والاستطاعة الردية:

$$Q_s = (3/2)*u_{ds}i_{qs} - u_{qs}i_{ds} \qquad (22)$$

وفي حال تغذية الدائر أيضاً:

$$Q_r = (3/2)*(u_{dr}i_{qr} - u_{qr}i_{dr}) \qquad (23)$$

والمردود:

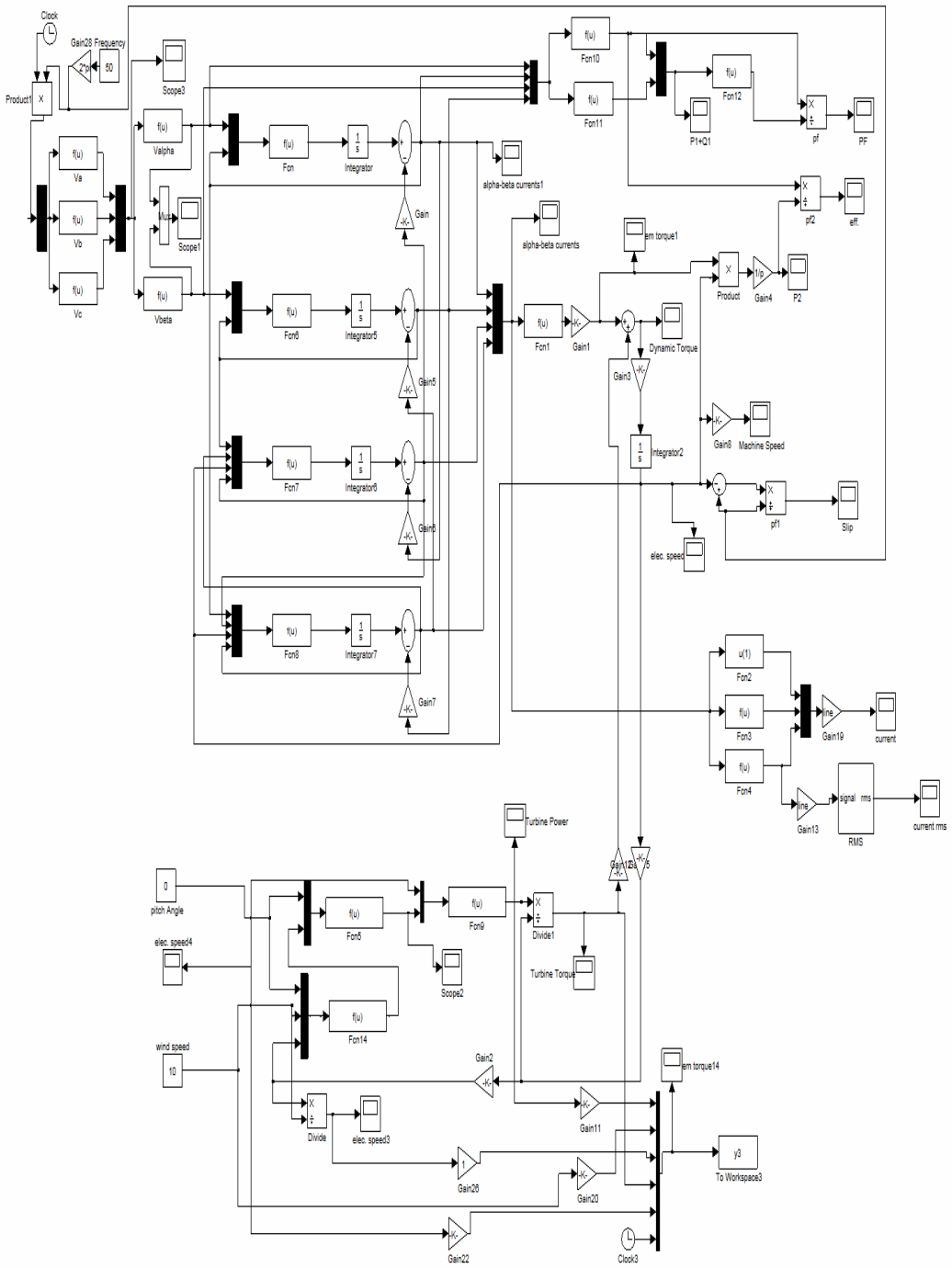
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \qquad (24)$$

إذْ P_2 الاستطاعة الميكانيكية على محور الآلة وتعطى بالعلاقة: $P_2 = M_{em}\omega_r$

أما زاوية عامل استطاعة الآلة $\cos\varphi_1$ ، فتساوي:

$$\varphi_1 = arctg\frac{Q_1}{P_1} \qquad (25)$$

والشكل (6) يبيّن المخطط الصندوقي لنموذج الآلة المستخدمة التي يتم تمثيلها (نمذجتها) باستخدام برنامج Matlab/Simulink [9,7,1,2].



الشكل(6): المخطط الصندوقي لجملة المولدة التحريضية المستخدمة مع العنفة الريحية والتي تمت نمذجتها باستخدام برنامج Matlab/Simulink.

وبعد التمثيل الرياضي والنمذجة لآلة تحريضية لها المعطيات الاسمية الآتية:

$P_n = 500KW$ $R_s = 0.0065\Omega$

$2P = 2$ $R_r = 0.0197\Omega$

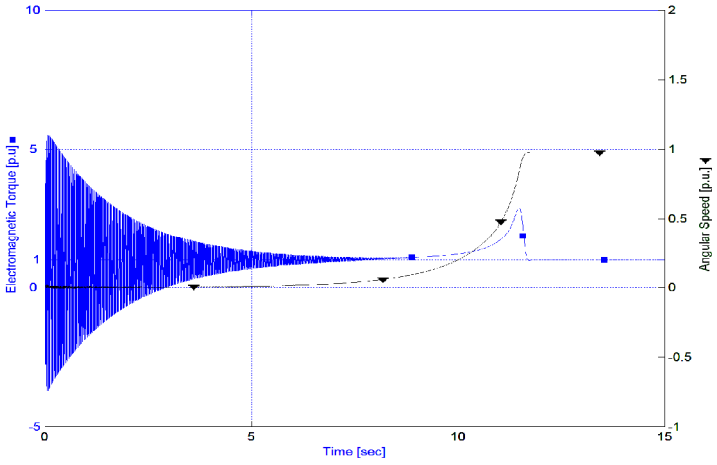
$U_n = 380V \quad \Delta$ $L_s = 0.01079H$

$n_n = 2925rpm$ $L_r = 0.01069H$

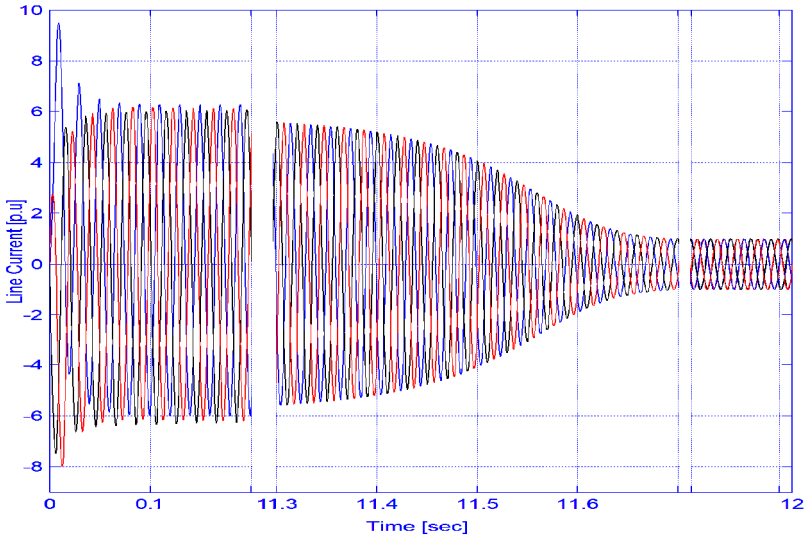
$I_n = 850A$ $M = 0.01054H$

$T_n = 1600Nm$ $J = 8Kgm^2$

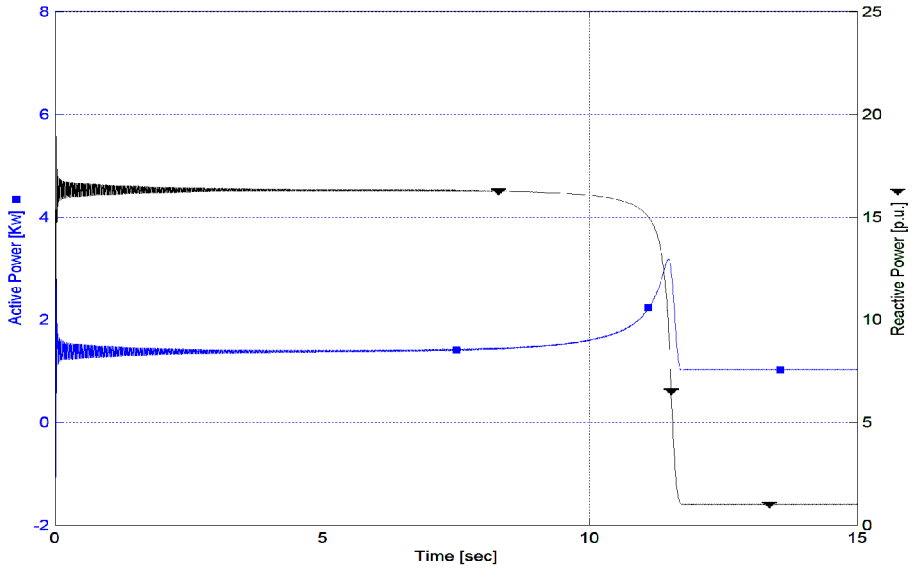
حصلنا على المنحنيات المبيّنة في الأشكال الآتية وذلك في حالتي عمل الآلة كمحرك وكمولد. حيث يبيّن الشكل (7) منحنيات العزم - السرعة للمحرك التحريضي في حالة التحميل والشكل (8) منحنيات التيارات.



الشكل(7): منحنيات العزم- السرعة للمحرك التحريضي في حالة التحميل



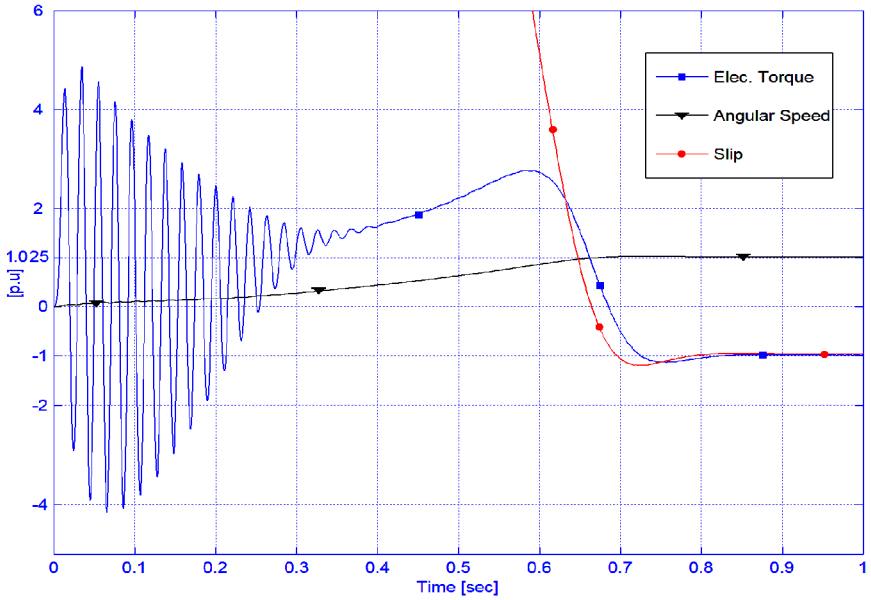
الشكل(8): منحنيات التيارات للمحرك التحريضي في حالة التحميل



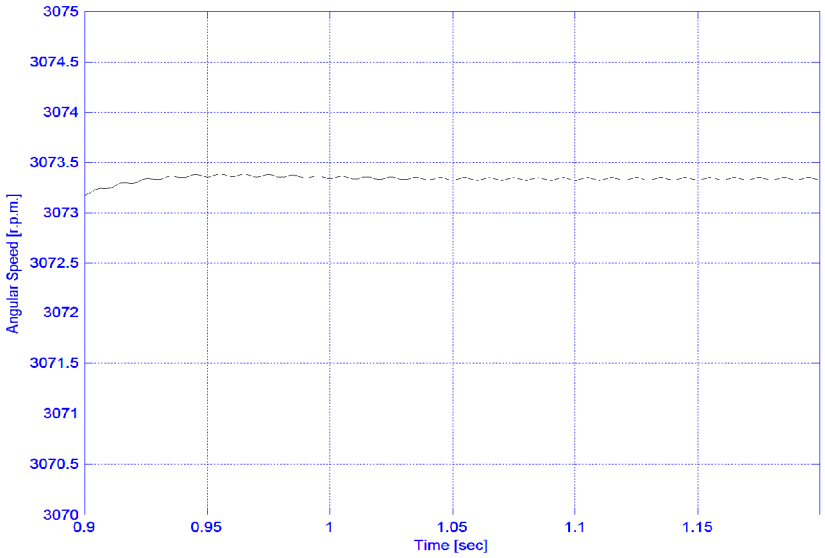
الشكل(9): منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية للمحرك التحريضي في حالة التحميل

والشكل (9) منحنيات الاستطاعة الفعلية والرديـــة التـــي يستجرها المحرك من الشبكة وذلك عند تحميل المحـــرك بحمولته الاسمية.

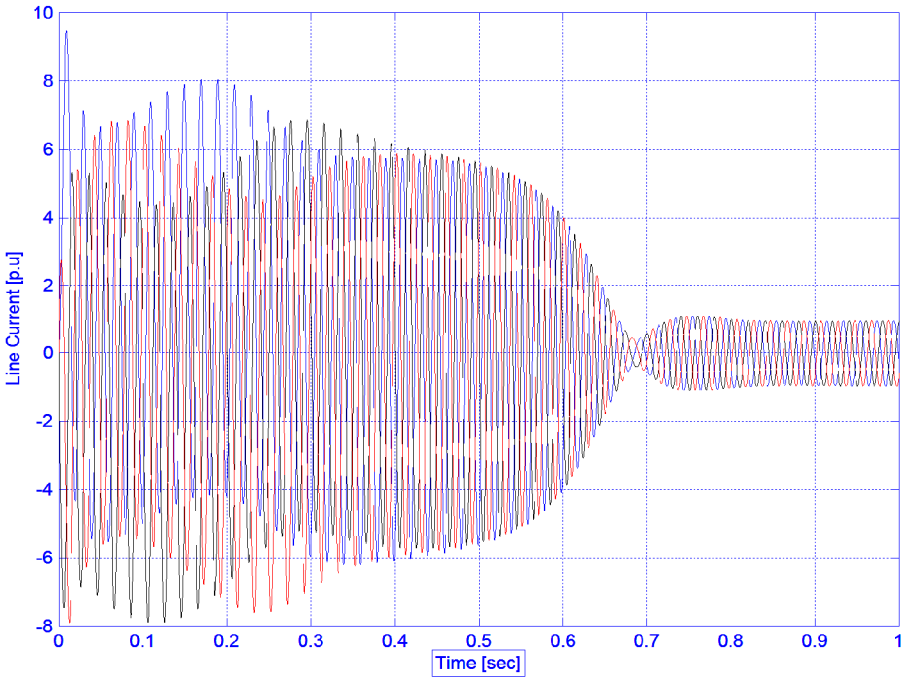
أمَّا الشكل (10) فيبيّن منحنيات العزم والسرعة عند تشغيل الآلة كمولـ دة يطبق على محورها عزم يساوي عزمه ا الاسمي. ويبيّن الشكل (11) سرعة المولدة بعد الاستقرار كما تبيّن الأشكال (12) و(13)و (14) منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية والتيارات وعامل الاستطاعة.



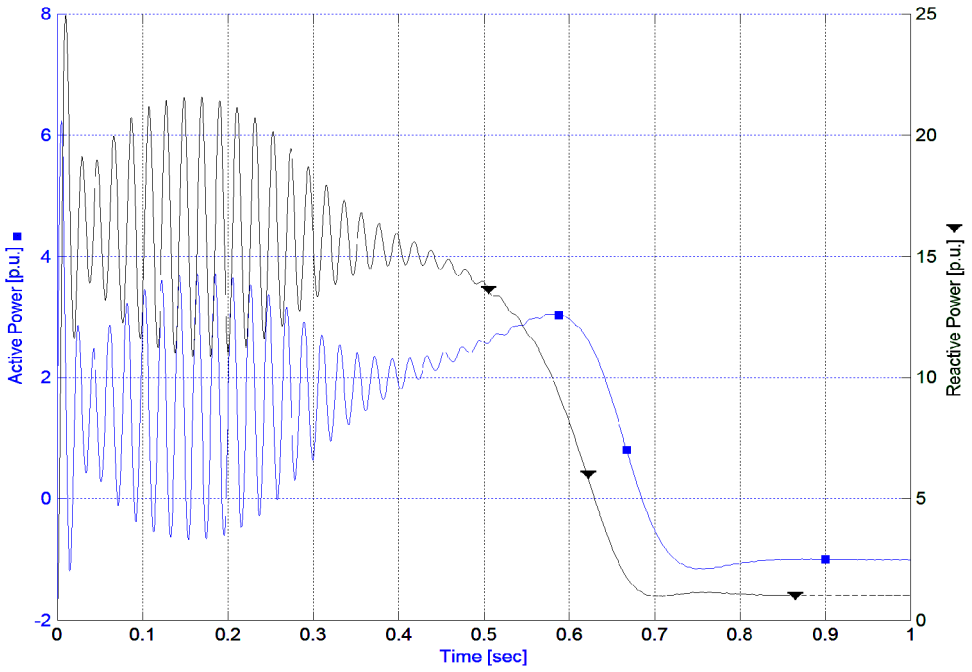
الشكل(10): منحنيات العزم والسرعة عند تشغيل الآلة كمولدة



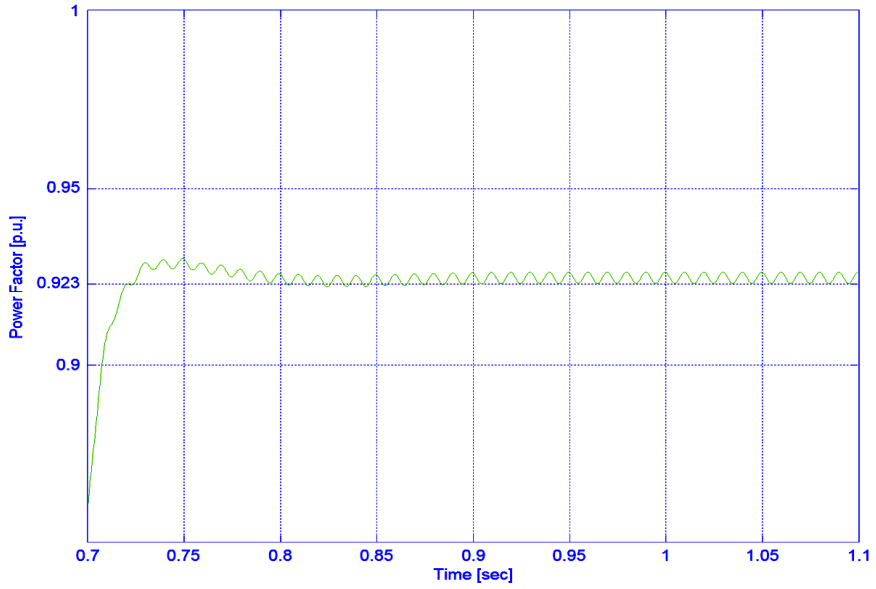
الشكل(11): سرعة المولدة بعد الاستقرار



الشكل(12): منحنيات التيارات عند تشغيل الآلة كمولدة



الشكل(13): منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية عند تشغيل الآلة كمولدة



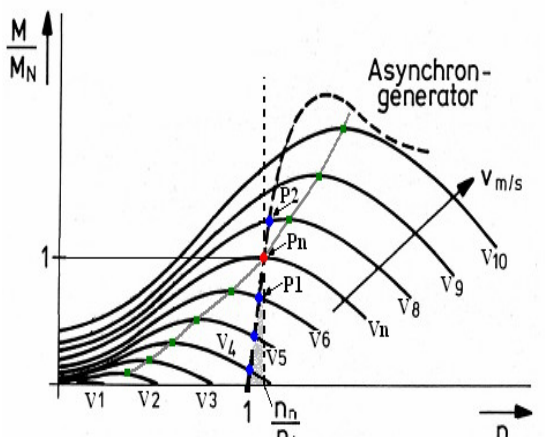
الشكل(14): منحنى عامل الاستطاعة عند تشغيل الآلة كمولدة

4 - تحديد نقطة عمل المولدة المربوطة مع العنفة الريحية

إن نقطة تقاطع المميزة الميكانيكية (سرعة - عزم) للمولدة مع المميزة الميكانيكية للعنفة تمثل نقطة عمل نظام التوليد إذْ تحدد هذه النقطة السرعة الزاوية و العزم أو الاستطاعة المولدة وذلك كما هو مبيّن في الشكل (15) إذْ تمثل النقطة P_n الناتجة عن تقاطع منحنى المولدة مع منحنى العنفة عند سرعة الرياح الاسمية v_n نقطة

العمل الاسمية. نلاحظ من هذا الشكل مجال العمل الضيق للمولدة (المنطقة المظللة بين السرعة الاسمية والسرعة التزامنية)، فلو زادت سرعة الرياح عن القيمة الاسمية لزاد معها العزم الميكانيكي للعنفة وتولد عزم ديناميكي مسرع على محور المولدة يؤدي إلى تسارع المولدة فتنتقل نقطة العمل صعوداً على منحنى المولدة حتى تصل إلى نقطة التقاطع مع منحنى العنفة الجديد أي النقطة P_2 . نلاحظ أن هذه النقطة ونقاط التقاطع التي بعدها تقع خارج مجال العمل المسموح [5,3].

أمَّا إذا تناقصت سرعة الرياح عن القيمة الاسمية فإنَّ عزم العنفة سيتناقص وسيتولد عزم ديناميكي مبطئ على محور المولدة يؤدي إلى تباطؤ المولدة فتنتقل نقطة العمل هبوطاً على منحنى المولدة حتى نقطة التقاطع مع منحنى العنفة الجديد أي النقطة P_1 . نلاحظ أن نقطة العمل الجديدة لا توافق نقطة الاستطاعة العظمى على منحنى العنفة كما أن التوليد يستحيل عند سرعات رياح أقل من v_4 .



الشكل (15): نقطة عمل المولدة المربوطة مع عنفة ريحية

5 - إقلاع جملة المولدة مع العنفة الريحية

هناك طريقتان لإقلاع هذا النظام:

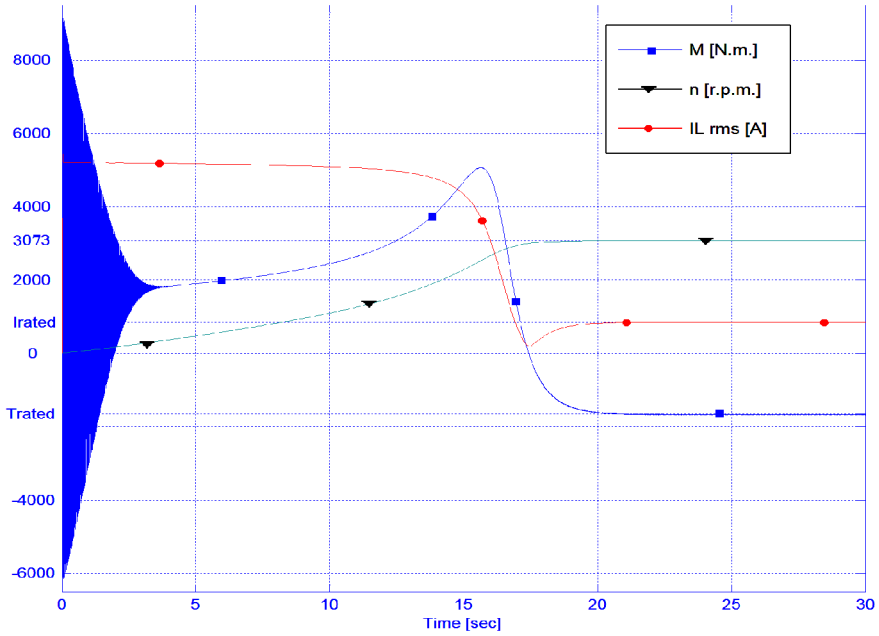
a - الإقلاع بمساعدة الآلة التحريضية

إذْ تعمل الآلة في مرحلة الإقلاع كمحرك يساعد الرياح على تدوير العنفة ذات الكتلة الهائلة إلى أن تتجاوز سرعتها السرعة التزامنية فتنقلب عندها الآلة إلى مولدة غير أن هذا يؤدي إلى

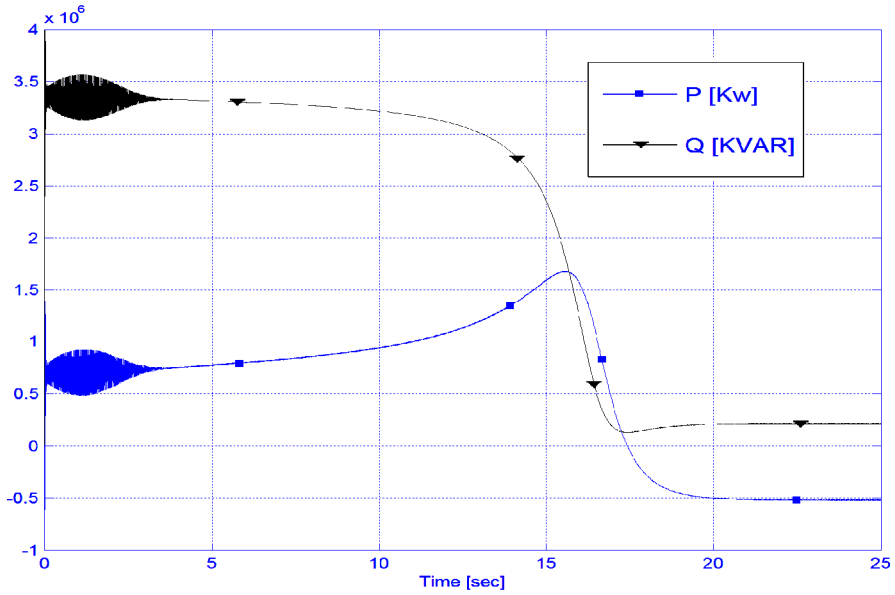
استجرار تيارات كبيرة جداً في أثناء الإقلاع كما أن الثابت الزمني الكهرميكانيكي للجملة يكون كبيراً بسبب العطالة الكبيرة جداً للعنفة مما يتطلب اتباع طرائق تحكم خاصة للحد من تيارات الإقلاع وتبيّن الأشكال(16) و (17) و(18) نتائج إقلاع العنفة بمساعدة المولدة حيث تتضح القيم الكبيرة لتيارات الإقلاع والتي تتجاوز(7÷6) أضعاف التيار الاسمي[4].

b - الإقلاع دون مساعدة الآلة التحريضية

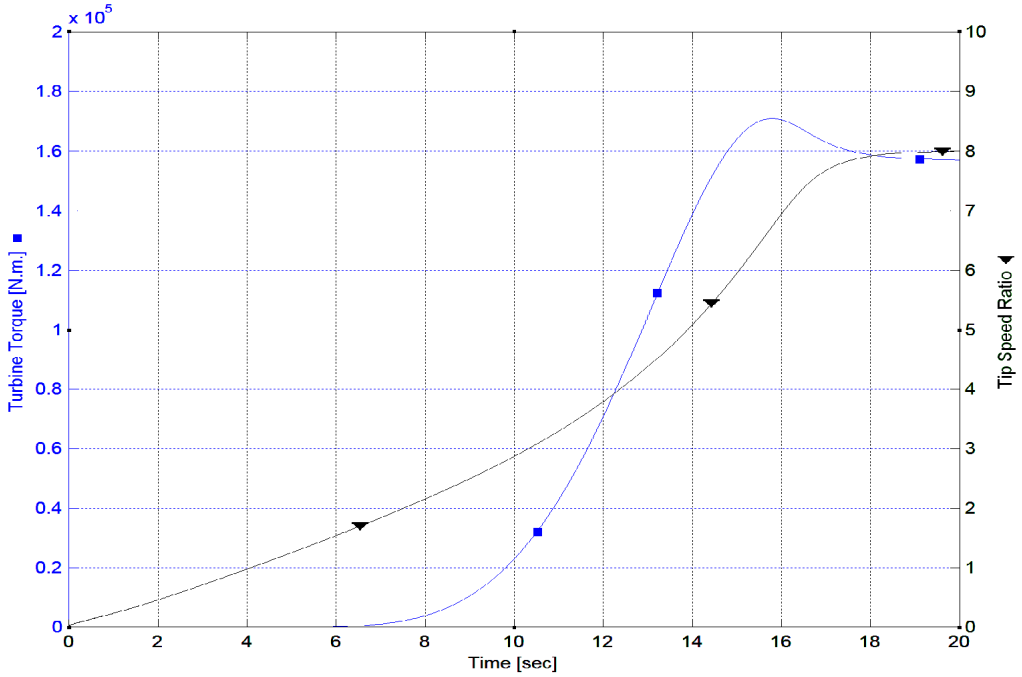
إذْ تكون الآلة مفصولة عن المنبع الكهربائي ويتم إقلاع العنفة بمساعدة الرياح حتى تصل سرعتها إلى السرعة التزامنية للآلة فيتم ربطها إلى الشبكة و تبدأ بالتوليد. تمتاز هذه الطريقة بأنها لا تستهلك استطاعة كبيرة من الشبكة في أثناء الإقلاع؛ كما أن زمن الحالة العابرة للمولدة يكون قصيراً جداً لا يتعدى بضع ثوانٍ لأنه يقتصر على الحالة العابرة الكهرمغناطيسية فقط.



الشكل (16): العزم والسرعة والتيار في أثناء إقلاع العنفة بمساعدة المولدة

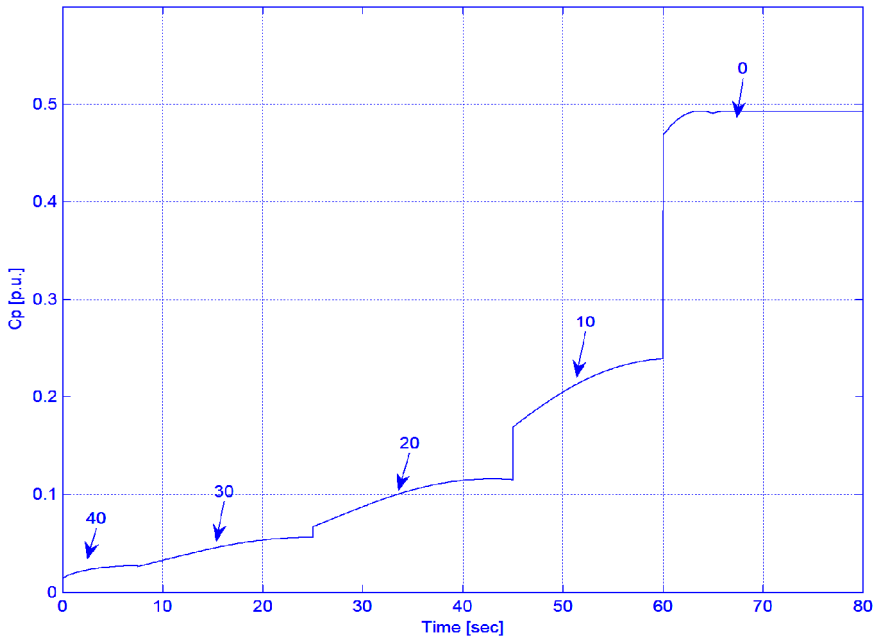


الشكل (17): الاستطاعة الفعلية والردية أثناء إقلاع العنفة بمساعدة المولدة

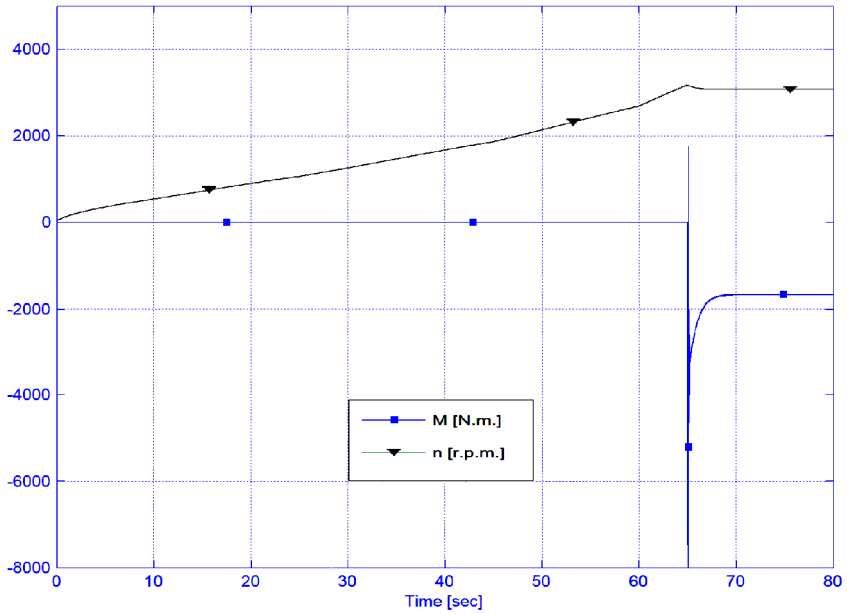


الشكل (18): عزم العنفة الريحية أثناء الإقلاع بمساعدة المولدة

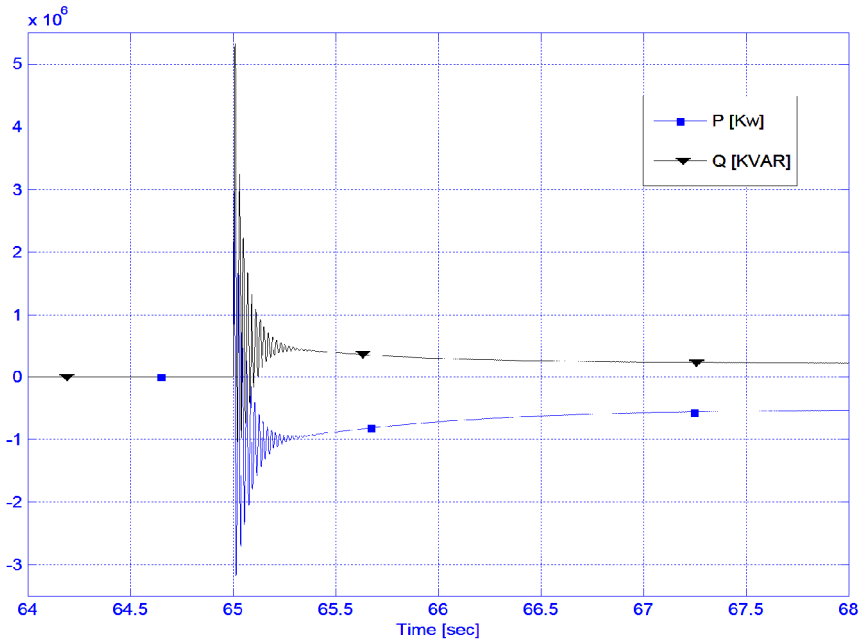
يتم إقلاع العنفة بهذه الطريقة بتكبير زاوية ميل الريش في بداية مرحلة الإقلاع لتوليد أكبر عزم ممكن على العنفة حيث تبدأ عندها بالتسارع و يبدأ عامل الأداء بالتزايد. وبعد مدة معينة يستقر عامل الأداء عند قيمة معينة ، عندها يتم تصغير زاوية الميل بعدة درجات، فيبدأ عامل الأداء بالتزايد مجدداً إلى أن يستقر عند قيمة جديدة حيث يتم تصغير زاوية الميل مجدداً وهكذا إلى أن تنعدم و تصل السرعة إلى السرعة التزامنية. تبيّن الأشكال(19) و (20) و(21) نتائج النمذجة للعنفة $T500$ إذْ يبدأ الإقلاع بزاوية 40° ، وبإنقاص الزاوية 10° درجات في كل مرحلة يتم التوصل إلى السرعة التزامنية وعند اللحظة 65sec تُربَطُ المولدة مع الشبكة.



الشكل (19): مراحل إقلاع العنفة بطريقة تغيير زاوية ميل الريش



الشكل (20): العزم والسرعة في أثناء إقلاع العنفة بطريقة تغيير زاوية ميل الريش



الشكل (21): الاستطاعة الفعلية والردية في أثناء إقلاع العنفة بطريقة تغيير زاوية ميل الريش

6 - التحكم باستطاعة العنفة

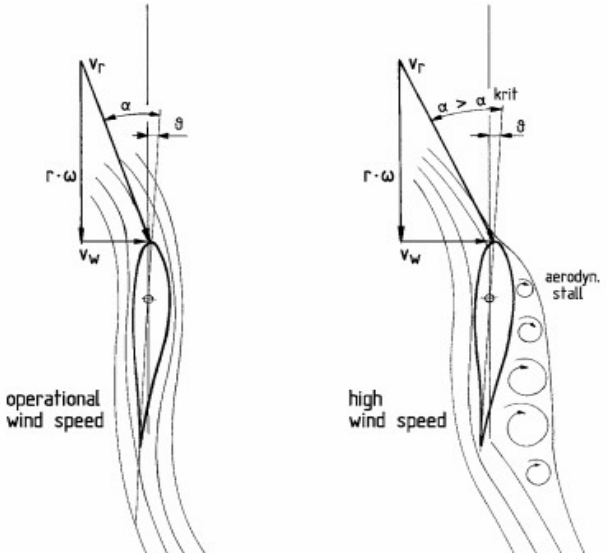
نلاحظ من الشكل (15) أن زيادة سرعة الرياح عن القيمة الاسمية تؤدي إلى زيادة الاستطاعة المستجرة من الرياح حتى قيم أكبر بكثير من استطاعة المولدة ، أمَّا عند سرعات رياح منخفضة جداً وأقل من الاسمية فتنقلب المولدة إلى محرك، لذلك لا بدَّ من التحكم بعمل العنفة للارتقاء إلى مستوى التوليد المثالي عند مختلف سرع الرياح. يتم ذلك وكما تم ذكره بطرقتين [8,4]:

a - **التحكم غير الفعال:** Stall Control

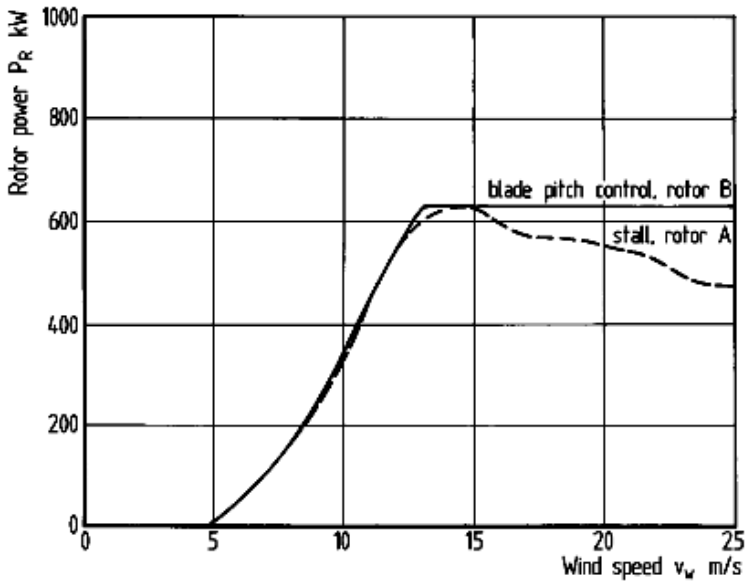
تقوم هذه الطريقة على تحديد الاستطاعة المستجرة من الرياح إذا تجاوزت سرعة الرياح سرعتها الاسمية، حيث تنخفض قيمة C_p بشكل مفاجئ وسريع مع زيادة سرعة الرياح ويتم ذلك بالاستفادة من ظاهرة الانهيار التي تتطلب تحقيقها شروط معينة كاستخدام ريش ذات تصميم ايروديناميكي خاص تسرع الانهيار وتحافظ على سرعة دوران ثابتة للعنفة و يتم ذلك باستخدام مولدات تحريضية ذات انزلاق صغير جداً.

تنشأ ظاهرة الانهيار عندما تكبر زاوية الهجوم α بسبب زيادة سرعة الرياح مع بقاء السرعة الخطية لطرف الريشة ωr ثابتة (انخفاض λ). عندها تبدأ طبقات الجريان الهوائية الملاصقة للسطح العلوي للريشة بالانفصال و تتولد دوامات هوائية خلف الريشة تؤدي إلى تناقص عامل الأداء تناقصاً كبيراً وتناقص العزم الدوراني المتولد والاستطاعة المستجرة على الرغم من زيادة سرعة الرياح. والشكل (22) يوضح ظاهرة الانهيار والشكل(23) يبيّن تحديد الاستطاعة بالتحكم غير الفعال.

من مساوئ هذه الطريقة أنه لا يمكن الحفاظ على قيمة ثابتة للاستطاعة مع زيادة سرعة الرياح.



الشكل (22): ظاهرة الانهيار

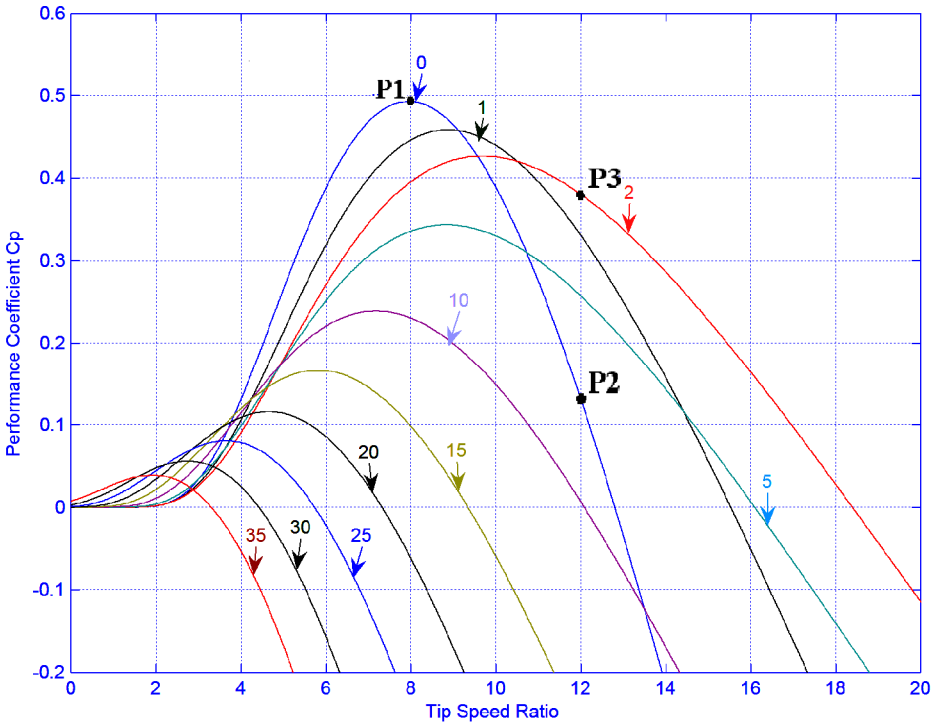


الشكل (23): تحديد الاستطاعة بالتحكم غير الفعال

b - **التحكم الفعال :** Pitch Control

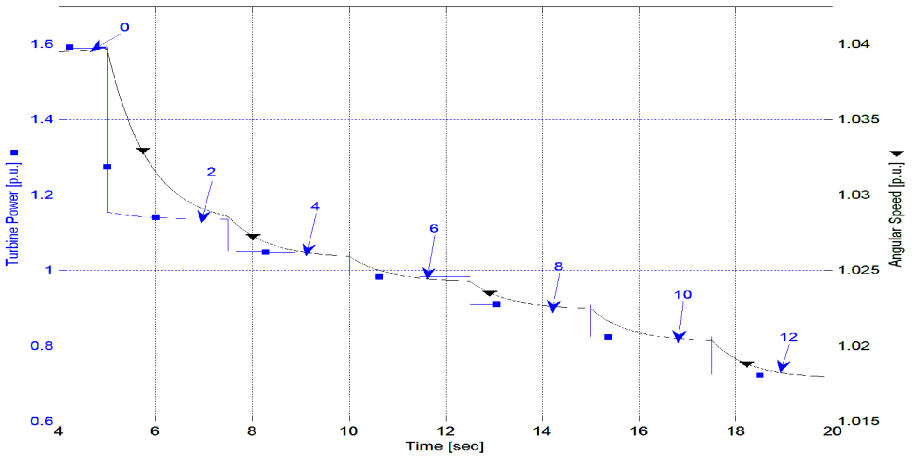
يتم التحكم في هذه الطريقة بعامل الأداء عن طريق زاوية الهجوم α بتدوير الريش حول محاورها الطولية والشكل (24) يبيّن كيفية انخفاض عامل الأداء مع ازدياد زاوية ميلان الريش عن مستوي الدوران ϑ. من ميزات هذه الطريقة الحفاظ على الاستطاعة المستجرة عند قيمتها الاسمية مهما زادت سرعة الرياح، ولكن ذلك يتطلب استخدام دارات تحكم تراقب الاستطاعة وسرعة الرياح وتقوم بتغيير الزاوية بحيث تحافظ على الاستطاعة الاسمية في خرج النظام. أمَّا في السرعات المنخفضة

فيعمل على ملاحقة القيمة العظمى للاستطاعة المولدة. ففي حالة العمل عند السرعة النسبية الاسمية λ_n تكون c_p أعظمية و نقطة العمل هي P_1 ، ولكن مع تناقص سرعة الرياح وبقاء سرعة العنفة ثابتة تزداد λ وتتناقص c_p ومن أجل $\lambda=12$ تصبح نقطة العمل P_2 إذْ $C_p=0.12$. بجعل زاوية ميل الريش 2° تنتقل نقطة العمل إلى P_3 إذْ $C_p=0.38$ وذلك كما هو موضح في الشكل(24) .



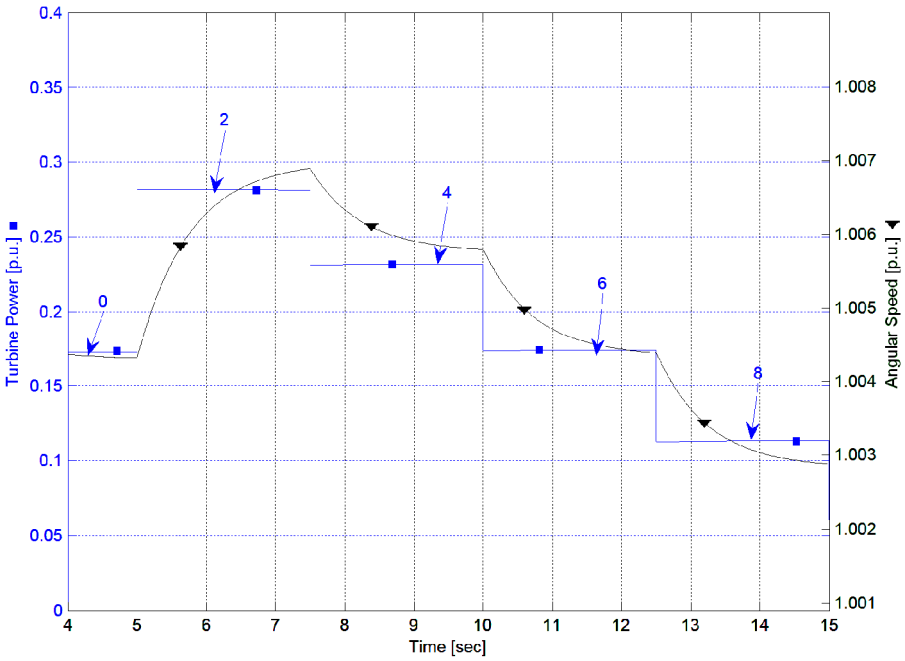
الشكل (24): التحكم الفعال بالاستطاعة

ويبيّن الشكلان (25) و(26) نتائج كيفية تغير استطاعة العنفة وسرعتها عن طريق التحكم بزاوية ميل الريش عند سرعات رياح $12m/s$ و $7m/s$ ، إذْ يلاحظ تغير استطاعة العنفة من 1.6 p.u إلى 0.7 p.u خلال مدة زمنية مقدارها 20 sec عند تغير زاوية ميل الريشة من 0 إلى 12 درجة وذلك عند سرعة رياح 12m/sec .



الشكل (25): تغير استطاعة وسرعة العنفة بتغيير زاوية ميل الريش عند سرعة رياح

$12m/s$



الشكل(26): تغير استطاعة وسرعة العنفة بتغيير زاوية ميل الريش عند سرعة رياح $7m/s$

7 - الاستنتاجات

- تم التعرض لمختلف أنظمة التولد الريحية (أنظمة ذات سرعة دوران ثابتة ومتغيرة وبتحكم فعال وغير فعال).

- تم الحصول على المنحنيات التي تمثل العلاقة بين عامل أداء أو استخدام طاقة الرياح C_p والسرعة النسبية لطرف الريشة λ من أجل زوايا ميلان θ مختلفة للريش وذلك باستخدام برنامج Matlab/Simulink .

- تُحدَّدُ الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية والتي تمثل العلاقة بين عزم العنفة الريحية وسرعة دورانها من أجل سرعات رياح مختلفة، وذلك باستخدام Matlab/Simulink.

- وضع نموذج رياضي للمولدة التحريضية بالاعتماد على النظرية العامة للآلات الكهربائية وذلك لنمذجتها والحصول على مميزاتها المختلفة في الحالات العابرة والمستقرة.

- بعد نمذجة جملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية تم الحصول على منحنيات العزم والسرعة والاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.

- حُدِّدَتْ نقطة العمل النظامية (الاسمية) لجملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية.

- تناول البحث طرائق إقلاع نظام جملة المولدة التحريضية والعنفة الريحية.

- تم التعرض لطرائق التحكم باستطاعة العنفة للارتقاء إلى مستوى التوليد المثالي عند مختلف سرعات الرياح.

المراجع

References

[1] Lorand SZABO, Agoston BIRO, Cosmina NICULA, Florin JURCA "Useful Simulation Tool for Induction Generator Used in Wind Power Plants", IEEE, 2007, PP.574-579.

[2] Kishore, A., Prasad, R.C. and Karan, B. M., " Matlab Simulink Based DQ Modeling and Dynamic Characteristics of Three Phase Self Excited Induction Generators", Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge (USA), 2006, PP.312-316.

[3] Sun, T., Chen Z., and Blaabjerg, F., "Flicker Study on Variable Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators ", IEEE, Transaction on Energy Conversion, Vol.20,No. 4, December 2005, PP.896-905.

[4] Mehdi Karrari W. Rosehart, "Comprehensive Control Strategy for a Variable Speed Cage Machine Wind Generation Unit", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No.2, June 2005.

[5] L.Holdsworth, X,G.Wu,J.B.Ekanayake and N. Jenkins,"Comparison of fixed Speed and Doubly Fed Induction Wind Turbines During Power System Disturbances" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.150, No.3, May, 2003.

[6] T.Burton, D.Sharpe, N.Jenkins and E.Bossanyi, "Wind Energy Handbook", John Wiley, Chi Chester, 2001.

[7] Chee-Mum Ong., "Dynamic Simulation of Electric Machines", using Matlab/Simulink. Book, 1998.

[8] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons Baffins Lane, Chichester, 1998, p.385.

[9] Kopilov I.P. "Mathematical Simulation of electrical Machines", Vishaya Shkola, Moscow 1987, P. 248.

[10] Matlab Language of technical Computing.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/5/17.