

تحليل أداء المولد التحريضي مضاعف التغذية

أثناء هبوط التوتر في الشبكة

طالب الدراسات العليا: بتول الساطي

كلية: الهمك - جامعة: البعث

الدكتور المشرف: غسان ابراهيم + د. رامي موسى

1. الملخص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة أداء المولد التحريضي مضاعف التغذية عند حدوث هبوط في التوتر المطبق على ثابت المولد وتحديد تأثيرات هذه الحالة على قيم المولد كتيارات الثابت والوار والغوم، وذلك من أجل نوعين من هبوط التوتر المتناظر وغير المتناظر. ومن خلال إجراء محاكاة باستخدام برنامج Matlab R2018b لنظام مكون من توربين ريحي ومولد تحريضي مضاعف تغذية، قمنا في هذا البحث بإجراء دراسة تحليلية للحصول على خصائص عمل الآلة في الحالة العارة وتحديد القيم التي تتعرض لزيادة وتغوات نتيجة هبوط التوتر. ووجد أن هذه الحالة تؤدي إلى زيادة في تيار الوار وتوتر مكثف الربط بين المبدلة من جهة الوار والمبدلة من جهة الثابت ومن خلال الواسة التحليلية تمت المقارنة بين أداء المولد عند حدوث نوعين من الاضطراب في الشبكة مما يشكل قاعدة للعمل على التخلص من هذه الآثار لتحسين أداء المولد في أنظمة الطاقة الريحية .

كلمات مفتاحية: المولد التحريضي مضاعف التغذية ، هبوط التوتر على ثابت المولد ،

تيارات الدوار الزائدة ، توتر الزائد لمكثف الربط .

Performance Analysis of Doubly Fed Induction Generator under Voltage Dips

Abstract:

This Paper aims to investigate Doubly Fed Induction Generator Performance under voltage dip and determine its effects on the parameters of DFIG such as stator current, rotor current, DC-Link voltage and Torque for both symmetric and asymmetric voltage dips.

Analysis study for DFIG is achieved by Matlab/Simulink R2018 b to obtain transient operation characteristics and investigate the parameters which increase and change under voltage dips. It is found that rotor current and dc-link voltage values increase. Results for both cases are compared which is a base to remove these effects and improve wind turbine based DFIG performance.

Key words: Doubly fed Induction Generator, Voltage Dips, rotor overcurrent, DC-Link overvoltages.

2.المقدمة

تعد توربينات الرياح المشتركة مع المولدات التحريضية مضاعفة التغذية المصادر الأساسية لتوليد الطاقة المتجددة حول العالم. تعد هذه المولدات حساسة لاضطرابات الشبكة لذلك يجب تحسين قدرة المولدات على إدارة نفسها بحيث تبقى موصولة مع الشبكة أثناء الأعطال. قديماً كان مستوى انتشار محطات الرياح محدوداً وصغيراً مقارنة مع المحطات التقليدية ولذلك كان يسمح بفصل التوربينات عن الشبكة أثناء هبوط التوتر لمنع التيارات الزائدة. ولكن حالياً تزايد انتشار طاقة الرياح في أنظمة الطاقة الكهربائية ولذلك فإن فصل التوربين بشكل مفاجئ يؤدي إلى مشاكل في السيطرة على توتر وتردد النظام الكهربائي وبالتالي يجب إيجاد آلية تمكن بقاء التوربين موصول مع الشبكة أثناء الحالات العابرة.

3.أهمية وأهداف البحث

إن تناقص توتر الشبكة بوجود نظام ريحي يحتوي على مولد تحريضي مضاعف التغذية يؤدي إلى زيادة في قيمة تيار الدوار للمولد وكذلك زيادة في توتر مكثف الربط بين المبدلتين في دارة عمل المولد مما يؤثر على أداء المولد التحريضي مضاعف التغذية في المنظومة الريحية .

ويهدف البحث إلى إجراء دراسة لأهم الطرق وفق ما يلي:

- 1.3.دراسة تحليلية لأداء المولد التحريضي عند حدوث هبوط توتر متناظر.
- 2.3. دراسة تحليلية لأداء المولد التحريضي عند حدوث هبوط توتر غير متناظر.
- 3.3.أخذ قراءات لقيم تيار الدوار وتوتر DC-Link في حالتي الاضطراب.

3.4. المقارنة بين نتائج كل من الاضطرابين على أداء المولد وبارامتراته.

4. مواد وطرق البحث

إن هذا البحث يعتمد على المقارنة بين أداء المولد التحريضي مضاعف التغذية عند نوعين من الاضطرابات في الشبكة بالتالي سيتم أخذ النتائج ومقارنتها اعتماداً على برنامج Matlab R2018b.

5. هبوط التوتر في الشبكة بوجود نظام ريحي

هو عبارة عن انخفاض صغير في قيمة التوتر يستغرق بضع ميلي ثواني وهو أمر شائع الحدوث في الشبكات الكهربائية. عادة، تحدث تأرجحات في توتر الشبكة حول القيمة الاسمية ضمن مجال $\pm 10\%$ من تلك القيمة. وهبوط التوتر يحدث بشكل مفاجئ على طور واحد أو أكثر مع معاودة سريعة إلى قيمته الاسمية بعد فترة قصيرة من الزمن حوالي 10msec عند التردد 50 Hz [1].

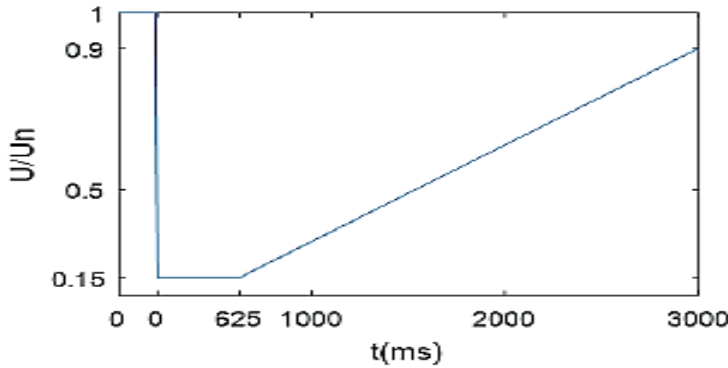
حديثاً تزايد الاهتمام بعملية إدارة توربينات الرياح والمولدات المرتبطة بها وذلك لضمان استمرارية الربط مع الشبكة وتجنب الانقطاعات المتكررة للتوربينات من خلال تصميم دارات تحكمية تعمل على خفض قيم التيارات والتوترات الزائدة الناتجة عن هبوطات التوتر وذلك بشكل يلئم الأكواد الخاصة بالشبكة التي تسمح ببقاء المولد موصول إلى الشبكة أثناء حدوث هبوط في قيمة التوتر بقيمة محددة ضمن هذا الكود.

قامت العديد من الدول بتحديث متطلبات كود الشبكة والتي تراعي إدارة أنظمة الرياح والمولدات فمثلاً الكود الالمانى حدد متطلباته وفقاً للتالي:

1. يجب ان تبقى توربينات الرياح موصولة لمدة 0.65 sec بعد حدوث العطل

2. توتر العطل المسموح 15% من التوتر الاسمي

3. يجب أن تتم استعادة التوتر بقيمة 90% من التوتر الاسمي في غضون 3sec بعد زوال العطل [2]



الشكل (1):متطلبات كود الشبكة الألماني

6.الموديل الرياضي والمعادلات الواصفة لنظام تحويل طاقة الرياح

1. توربين الرياح Wind Turbine :

(i) معادلة عزم الميكانيكي كتابع للهواء المتدفق عبر الشفرات:

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_t$$

(ii) المعادلة الواصفة لمعامل الاستطاعة :

$$2C_p = K_1 (K_2/\lambda i - K_3\beta - K_4\beta^{K_5} - K_6)e^{K_7/K_i}$$

$$= R*W_t/Vv\lambda i = \frac{1}{1+K_8} , \lambda$$

حيث λ : السرعة المحيطية ، W_t السرعة الزاوية للتوربين ،

Vv : سرعة الرياح m/s ، pC : معامل الاستطاعة

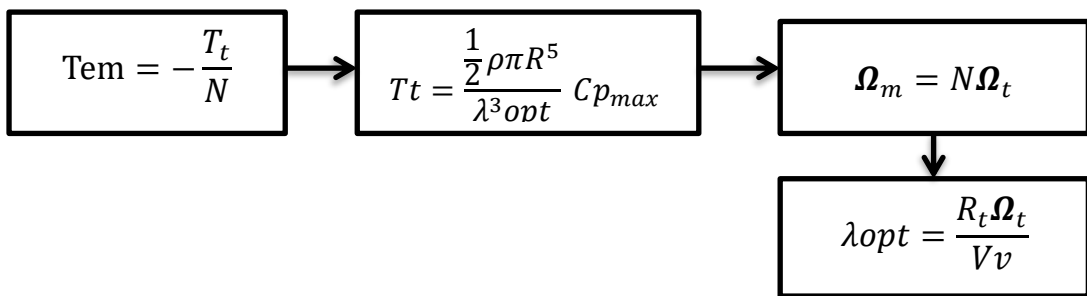
C_t : معامل العزم ، β : زاوية الريشة وتختلف قيمها باختلاف نوع التوربين

R : طول الشفرة (m) ، k_1, k_2, \dots, k_i : ثوابت تصميمية.

وتعمل على زيادة أو إضعاف القوة المطبقة على مساحة الريشة بواسطة الرياح وكلما زادت قيمتها ضعفت مردودية التوربين

ρ : كثافة الهواء Kg/m^3

اعتمدت استراتيجية التحكم بالتوربين المستخدمة في النموذج (التحكم غير المباشر بالسرعة) على تحديد النقطة التي من أجلها نحصل على الاستطاعة القصوى للتوربين MPPT انطلاقاً من تأثير العزم المطبق على التوربين على قيمة λ بشكل غير مباشر عن طريق تأثيره على السرعة Ω_{mec} تم إيجاد C_t -opt وفق المخطط الصندوقي التالي [1]:



2. المعادلات الخاصة بالمولد التحريضي مضاعف التغذية العلاقات التالية تمثل

معادلات الآلة التحريضية مضاعفة التغذية وفق الإحداثيات d, q . [1]

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_s \Psi_s \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_s}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \quad 3 \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_s}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \quad 4 \end{array} \right.$$

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j\omega_r \Psi_r \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_r}{dt} - \omega_r \Psi_{qr} \quad 5 \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_r}{dt} + \omega_r \Psi_{dr} \quad 6 \end{array} \right.$$

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad 7 \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad 8 \end{array} \right.$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad 9 \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad 10 \end{array} \right.$$

حيث: V_{qs}, V_{ds}, V_s : توتر الثابت، توتر الثابت وفق المحور d، توتر الثابت وفق المحور q على الترتيب.

V_{qr}, V_{dr}, V_r : توتر الدائر، توتر الدائر وفق المحور d، توتر الدائر وفق المحور q على الترتيب.

I_{qs}, I_{ds}, I_s : تيار الثابت، تيار الثابت وفق المحور d، تيار الثابت وفق المحور q على الترتيب.

تيار الدائر ، تيار الدائر وفق المحور d ، تيار الدائر وفق المحور q على الترتيب. I_{qr}, I_{dr}, I_r

مقاومة الدائر ومقاومة الثابت على الترتيب R_s, R_r

تحريضية ملف الدائر وتحريضية ملف الثابت، تحريضية المغناطيسية على الترتيب. L_m, L_s, L_r

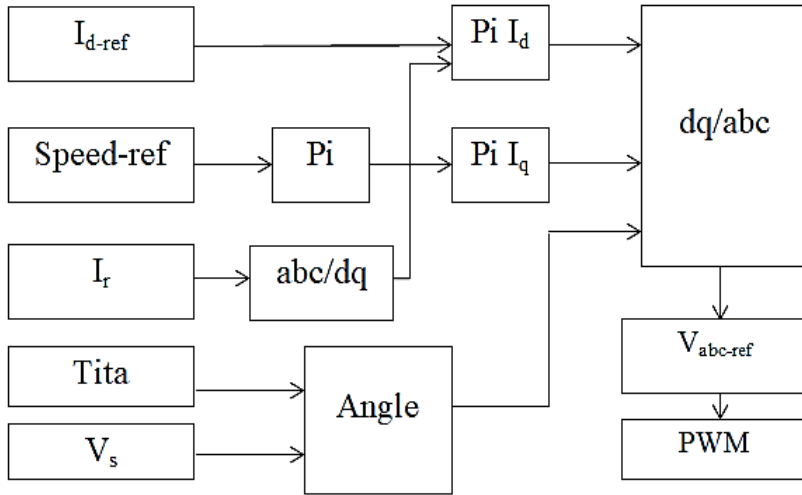
فيض الثابت، فيض الثابت وفق المحور d ، فيض الثابت وفق المحور q على الترتيب. $\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_s$

فيض الدائر، فيض الدائر وفق المحور d ، فيض الدائر وفق المحور q على الترتيب. فيض الثابت، فيض الثابت وفق المحور d ، فيض الثابت وفق المحور q على الترتيب. $\psi_{qr}, \psi_{dr}, \psi_r$

السرعة التزامنية وسرعة الدائر على الترتيب. ω_r, ω_s

3. مبدلة من جهة الدوار Rotor Side Converter

تم تصميم نظام تحكم بالمبدلة بحيث تؤخذ قيم مرجعية للمركبة المباشرة للتيار والسرعة لتشكيل حلقات تحكم بالتيار والسرعة ومن ثم إجراء تحويلات للإشارات الناتجة عن حلقات التحكم وفق الإحداثيات d, q ولنحصل أخيراً على إشارات توتر مرجعية abc تستخدم كنبضات لفتح القواطع الالكترونية للمبدلة من جهة الدوار [3] كما في المخطط الصندوقي في الشكل (2) حيث تمثل i_d و i_q المتحكمات التكاملية التناسبية المستخدمة لتنظيم تيارات العرضية والمباشرة للتيار، إضافة إلى متحكم بالسرعة



الشكل (2)-المخطط الصندوقي للتحكم بالمبدلة المربوطة مع الدوار

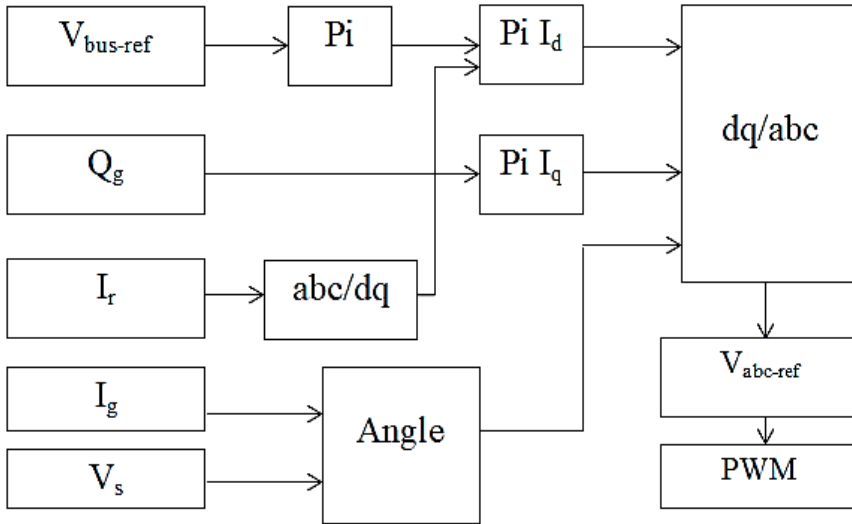
4. التحكم بالمبدلة من جهة الشبكة (Grid side converter)

للتحكم بالكميات المقاسة من الشبكة (تيار الشبكة ، توتر الشبكة ، مع توتر (Vbus) تم استخدام التحكم الشعاعي بطريقة شعاع التوتر الموجه

(Grid Voltage Orientation Vector Control) بحيث من خلال القيم

المرجعية V_{bus}, Q_g يتم إنشاء النبضات للتحكم بالقواطع الالكترونية .

عندئذ نقوم بإنشاء توترات abc مرجعية اعتماداً على الإحداثيات d,q ومن ثم تحول إلى الإحداثيات α, β لنحصل أخيراً على التوترات المرجعية وفق المخطط الصندوقي في الشكل(3) ،يحتوي نظام التحكم على متحكمات PI للمركبات العرضية والمباشرة الخاصة بالتيار المتبادل مع الشبكة I_g ولحماية المبدلة المربوطة مع الدوار من الخروج عن التحكم تم إضافة حماية بسيطة مع دارة المبدلة المربوطة مع الدوار بحيث تقوم باحتواء النبضة الدورة الأولى من موجة تيار الدوار ذات القمة العالية أثناء حدوث اضطراب التوتر تتكون هذه الحماية من مقاومة مع قاطع الكتروني [3].



الشكل (3): المخطط الصندوقي للتحكم بالمبدلة المربوطة مع الشبكة

7. المحاكاة والنتائج : تم إجراء المحاكاة خلال زمن 4.4 sec لهبوط التوتر المتناظر و زمن 4.3 sec لهبوط التوتر غير المتناظر وفق البارامترات التالية وبسرعة رياح 8.5 m/sec

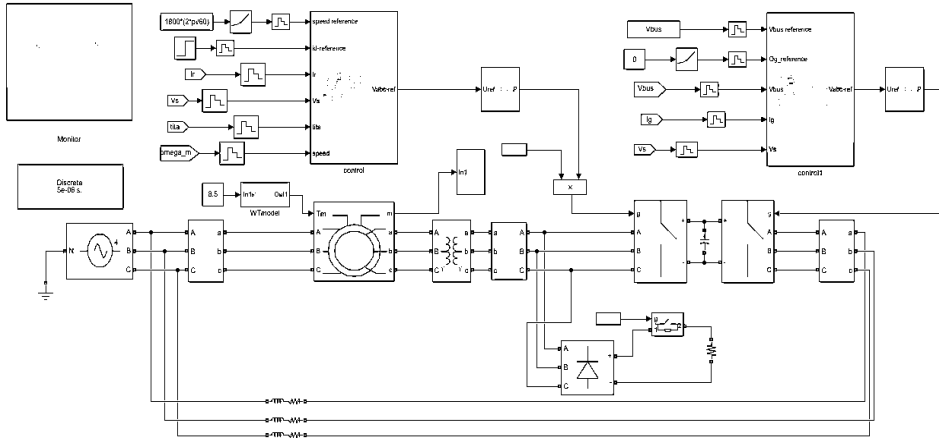
الواحدة	القيمة	البارامتر
m	42	قطر الشفرة
m/s	12.5	سرعة الرياح الاسمية
$r.p.m$	9 – 18	معدل تغير السرعة (min max turbine)
-----	7.2	Optimum tip speed ratio lopt
-----	0.44	معامل الاستطاعة الاعظمي $p-maxC$
Kg/m^3	1.1225	كثافة الهواء
-----	100	نسبة علبه السرعة

الجدول (1): بارامترات التوربين الريحي

الواحدة	القيمة	البارامتر
MW	2.0	الاستطاعة الاسمية للثابت Ps
N. M	12732	العزم الاسمي
V	690	توتر الثابت Vs
r. p. m	1500	السرعة الاسمية
-----	2	عدد الأقطاب
H	$2.5 * 10^{-3}$	التحريضية المغناطيسية
H	$87 * 10^{-6}$	التحريضية التسريية للدوار
H	$87 * 10^{-6}$	التحريضية التسريية للثابت
ohm	0.026	مقاومة الدوار
ohm	0.029	مقاومة الثابت

الجدول (2): بلامتات المولد التحريضي مضاعف التغذية

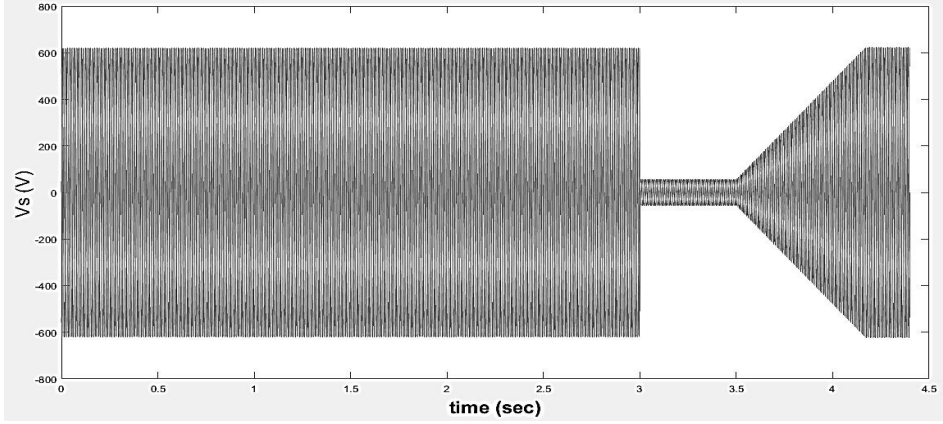
مخطط دائرة المحاكاة للنظام الريحي باستخدام برنامج Matlab



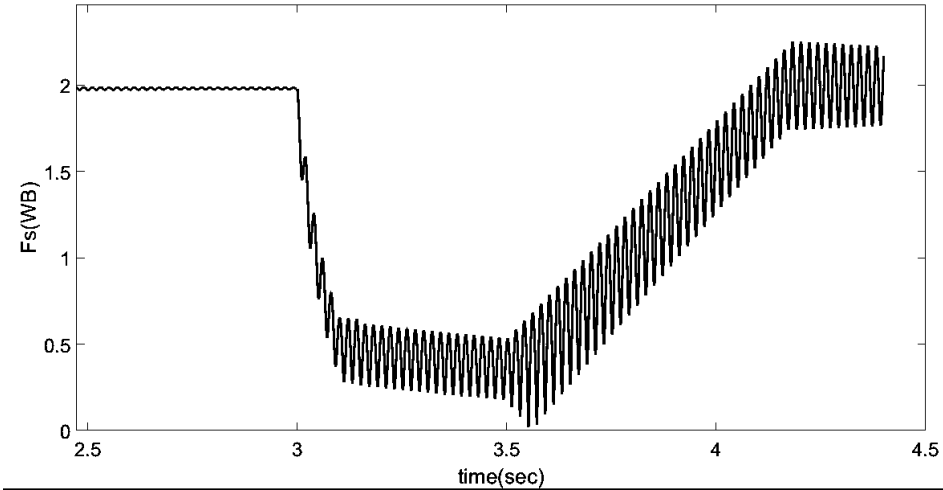
الشكل (4)- مخطط المحاكاة في برنامج Matlab

أ- محاكاة النظام بوجود هبوط توتر متناظر: عند حدوث هبوط في توتر الثابت عند اللحظة 3sec كما في الشكل (5-أ) يتناقص الفيض المغناطيسي ويستمر بالتناقص حتى بدء استعادة التوتر في اللحظة 3.5 sec كما في الشكل (5-ب) ليعود بالتدريج إلى حالة مستقرة جديدة. بالنسبة للعزم يتناقص عن الإشارة المرجعية المحددة بنظام MPPT لحظة بدء العطل إلى الصفر وتظهر تعرجات في إشارة العزم ونلاحظ بالمقابل تغير في إشارة السرعة مما يدل على فقدان التحكم بالسرعة أثناء حدوث الاضطراب، الشكل (5-ج). بالنسبة لتوتر المكثف نلاحظ ارتفاع في مطالبه لحظة بدء هبوط التوتر وتعاني الإشارة من تأرجحات أما تيار الدوار فعاني من قمة كبيرة لحظة بدء العطل تصل قيمته إلى 3000A تقريباً وتكون الإشارة مشوهة وتعاني من تعرجات الشكل (5-د). بالنسبة لتيار الثابت لحظة حدوث العطل يعاني من ارتفاع في القيمة بالإضافة إلى انقلاب تعاقب الأطوار مما يؤدي إلى انزياح بالطور بين موجة تيار وتوتر الثابت.

الشكل (5-e). العزم الكهرومغناطيسي يعاني من لحظة بدء هبوط التوتر
نتيجة القيمة الزائدة لتيار الدوار في تلك اللحظة الشكل (5-f)

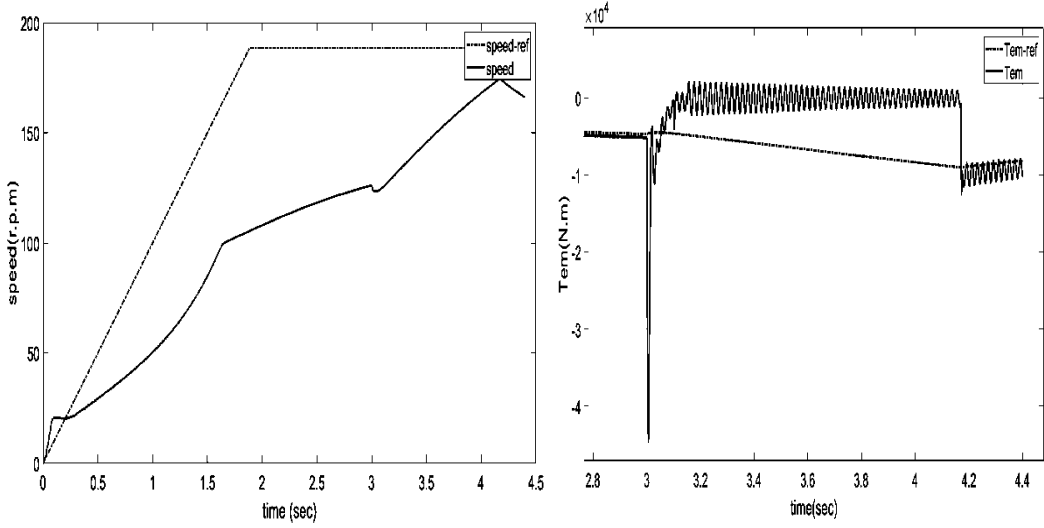


الشكل (5-a) منحنى توتر الثابت مع الزمن

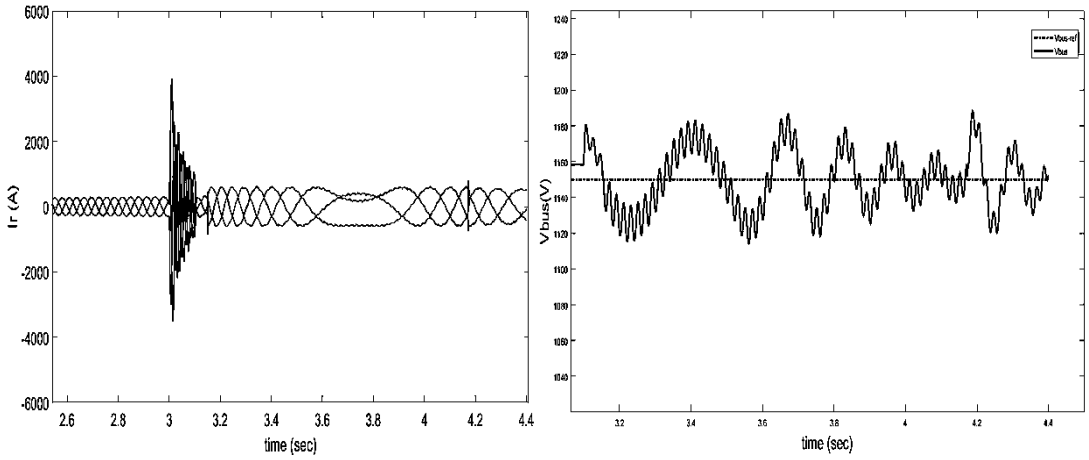


الشكل (5-b): منحنى الفيض المغناطيسي مع الزمن

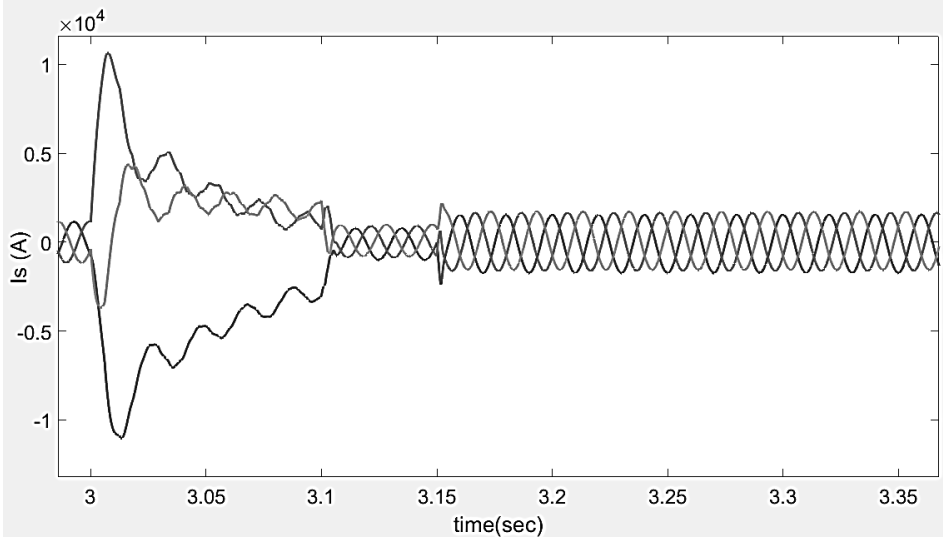
تحليل أداء المولد التحريضي مضاعف التغذية أثناء هبوط التوتر في الشبكة



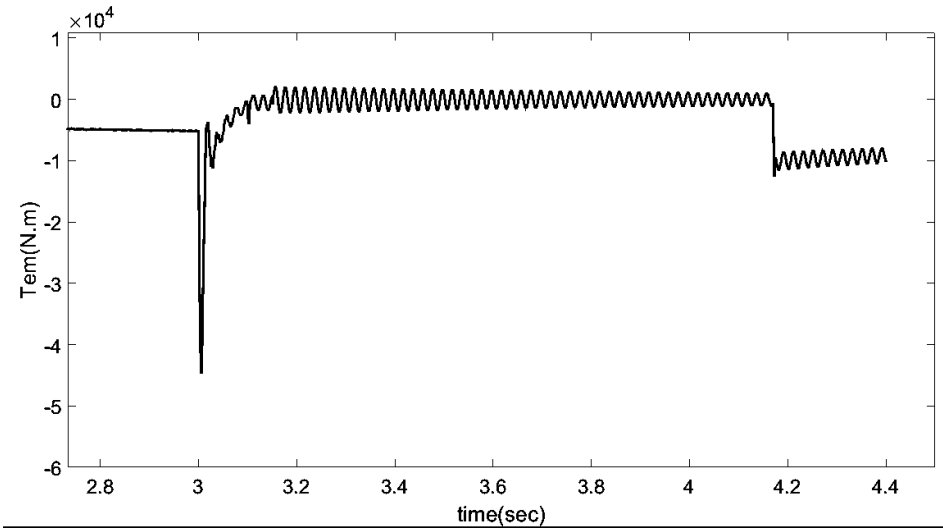
الشكل (5-3): منحنيات العزم والسرعة بالنسبة للزمن



الشكل (5-4): منحنى توتر DC-Link وتيار الدائر مع الزمن



الشكل (5-e): منحنى تيار الثابت مع الزمن

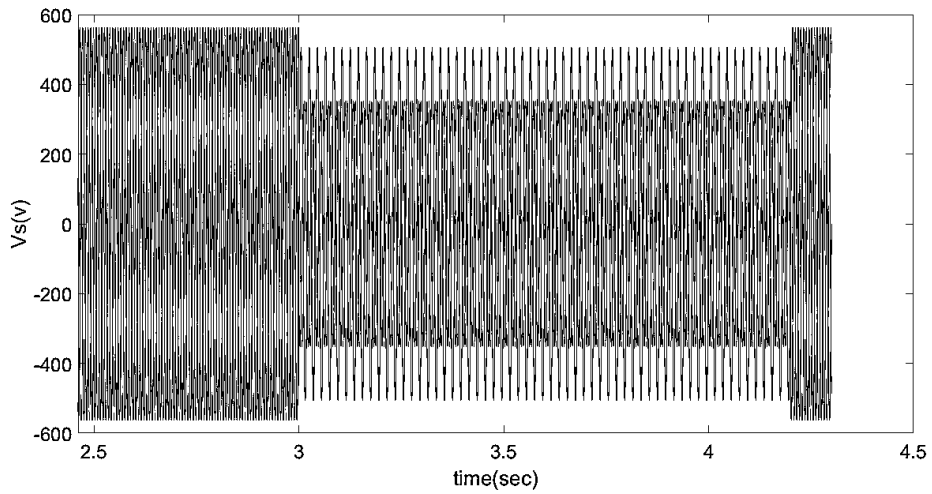


الشكل (5-f): منحنى العزم الكهرومغناطيسي مع الزمن

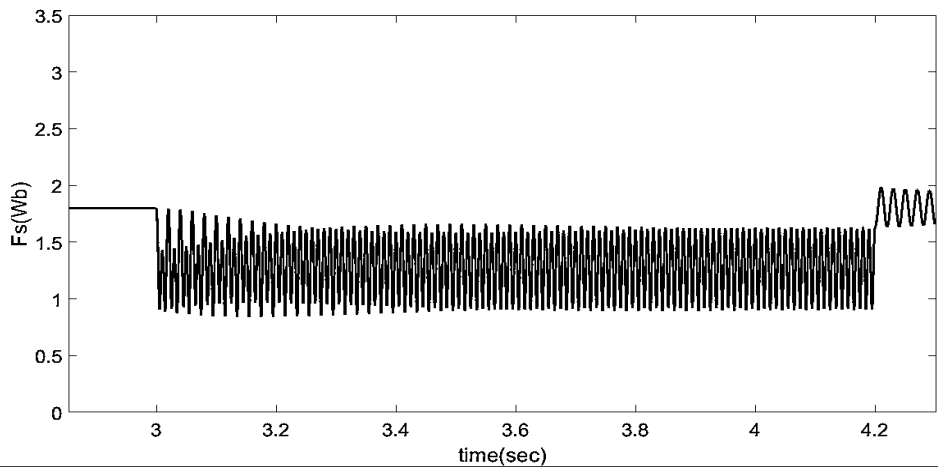
ب- محاكاة النظام بوجود هبوط توتر غير متناظر

يؤدي هبوط التوتر بشكل غير متناظر الشكل (a-6) إلى تناقص في الفيض المغناطيسي طيلة وجود العطل بعدها يبدأ بالتزايد مع بدء استعادة توتر الثابت الشكل (b-6) موجة تيار الثابت تكون غير متناظرة مما يؤدي إلى أن العزم يكون أقل من القيمة المطلوبة من MPPT. تيار الدوار يعاني من زيادة في مطاله أقل منها في حالة العطل المتناظر ونلاحظ أن موجة التيار تحتوي على تذبذبات ونلاحظ أن موجة تيار الدوار تكون متناظرة على عكس موجة تيار الثابت التي تكون غير متناظرة الشكل (b-6)، بالنسبة لتوتر المكثف نلاحظ ارتفاع مفاجئ في قيمته لحظة هبوط التوتر عن القيمة الاسمية تتجاوز 1180V في أول دورة ثم تكون على قيمة 1160 V وهي أيضاً أعلى من القيمة الاسمية كما أن الموجة تعاني من تذبذبات، الشكل (c-6). أما العزم يعاني من تذبذبات يتم فقدان التحكم به في هذه الحالة بسبب تناقص الفيض المغناطيسي مما يؤدي إلى ظهور تغيرات في إشارة السرعة الشكل (d-6)

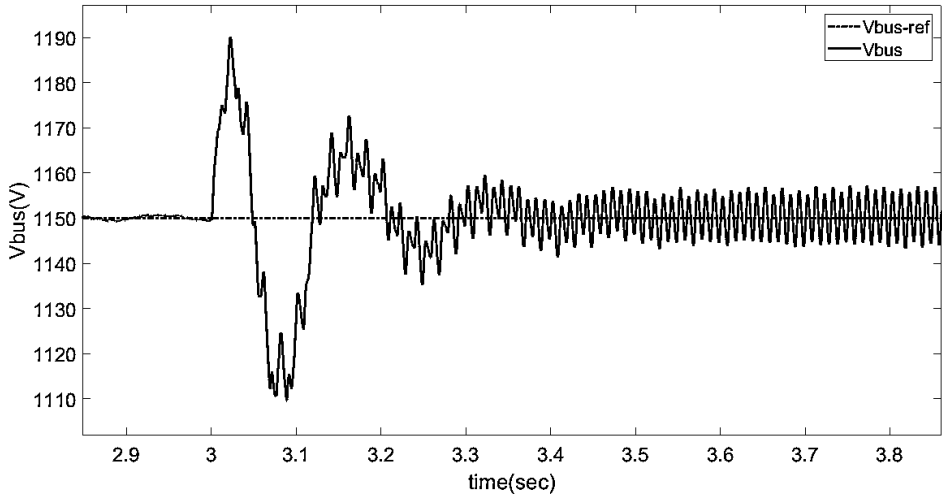
بالنسبة لتيار الدائر نلاحظ أن الموجة تحتوي على تذبذبات وتعاني من ارتفاع في المطال لحظة حدوث العطل 3sec ولكنها أقل قيمة بالمقارنة مع المطال في حالة العطل المتناظر الشكل (e-6). أما تيار الثابت فيكون ذو إشارة غير متوازنة بسبب عدم توازن إشارة التوتر الشكل (f-6).



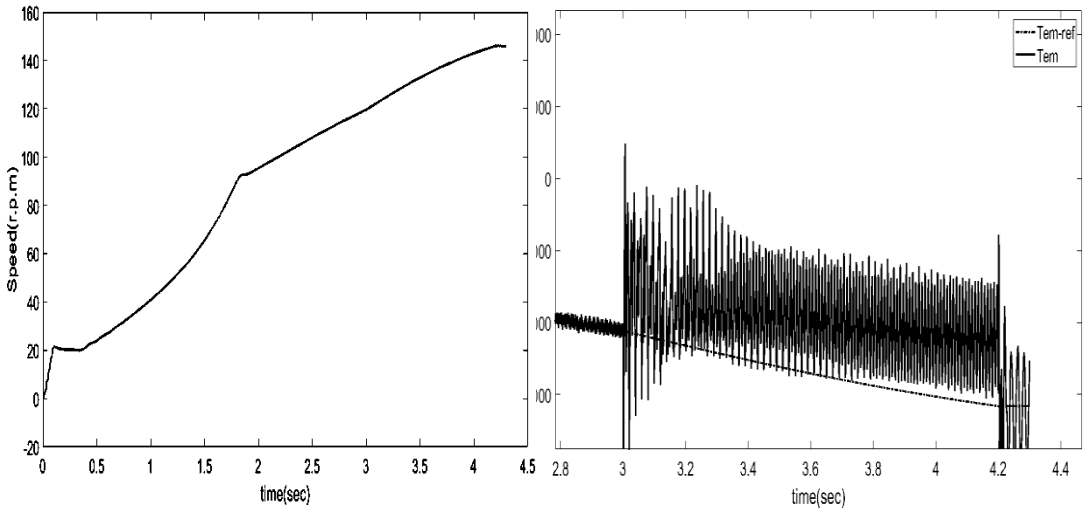
الشكل (6-a): منحنى توتر الثابت مع الزمن



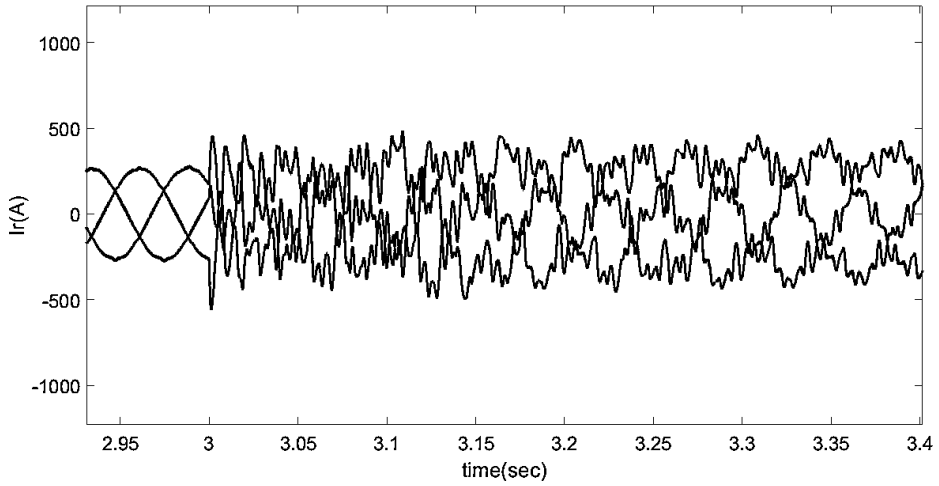
الشكل (6-b): منحنى فيض الثابت مع الزمن



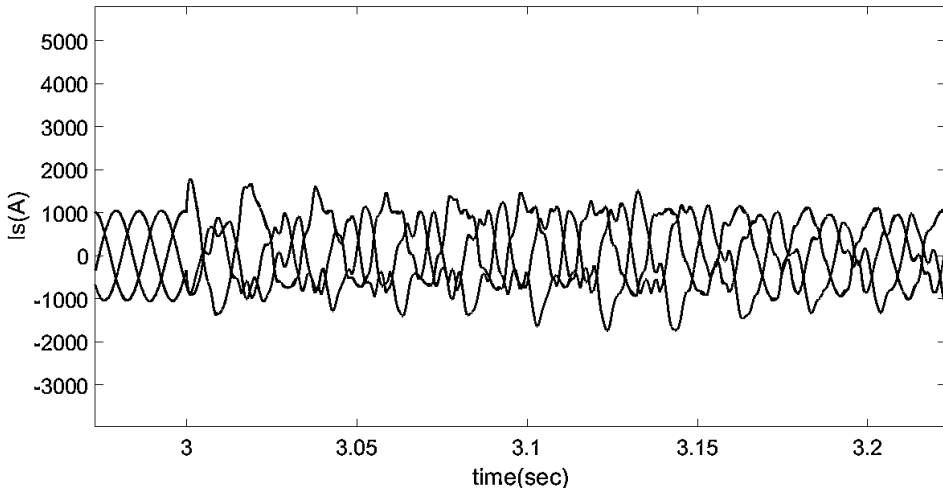
الشكل (6-c): منحنى توتر DC-Link مع الزمن



الشكل (6-d): منحنى العزم والسرعة مع الزمن



الشكل (6-e): منحنى تيار الدائر مع الزمن



الشكل (6-f): منحنى تيار الثابت مع الزمن

8. مناقشة النتائج

من خلال دراسة أداء المولد DFIG أثناء حدوث نوعين من هبوط التوتر على ثابت المولد تبين أن بارامترات الآلة (تيار الثابت والدائر وفيض الثابت والعزم وكذلك السرعة) تتأثر بنقصان التوتر بنوعيه على الثابت، نلاحظ أن كلا الحالتين تؤدي إلى نقصان العزم وظهور تذبذبات في إشارته بالإضافة إلى فقدان التحكم في السرعة، لوحظ أن العطل المتناظر يؤدي إلى مطالات أكبر في تيار الدائر لحظة حدوث العطل أكثر من العطل غير المتناظر، بالنسبة تيار الثابت ثلاثي الطور فيكون غير متوازن عند حدوث عطل غير متناظر أما في العطل المتناظر يعاني من انزياح في الطور مع موجة توتر الثابت لحظة انخفاض التوتر. بالإضافة إلى زيادة قيمة توتر DC-Link في حالتي العطل. نستنتج مما سبق ضرورة التخلص من المساوي السابقة للوصول إلى الأداء الموصى به حسب أكواد الشبكات الكهربائية والتي تضمن الموثوقية في العمل.

الجدول التالي يبين قيم مطال التيارات والتوترات الزائدة في كلا الحالتين :

الحالة المستقرة	هبوط توتر غير المتناظر	هبوط توتر المتناظر	البارامتر
400	500	1920	تيار الدوار (A)
1150	1185	1180	توتر المكثف

الجدول (3): نتائج محاكاة المولد

9. التوصيات والمقترحات

1. دراسة تحليلية للمولد أثناء هبوط التوتر في حالة العمل بسرعات فوق سرعة التوافق (Hypersynchronous) ومقارنته مع حالة العمل بسرعات تحت سرعة التوافق (Subsynchronous)
2. تحسين أداء المولد من خلال تقليل القيم الزائدة للتيارات والتوترات في المولد في هذه الحالات.

المراجع:

- [1] Abad G, Lo'pez J, Miguel A. 'guez R, Marroyo L , Iwanski G,2011. **Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation**, IEEE Press,Wiley.
- [2]. Boyu Qin, Hengyi Li , Xingyue Zhou, Jing Li and Wansong Liu 2020. **Low-Voltage Ride-Through Techniques in DFIG-Based Wind Turbines: A Review**. www.mdpi.com/journal/applsci.
- p 1-25.
- [3] 2. Abu-Rub H, Malinowski M, Al-Haddad K,2014. **Power Electronics For Renewable Energy Systems ,Transportation And Industrial Applications ,IEEE ,Press,Wiley.**
- [4] Naderi S, Negnevitsky M,2019. **A Modified DC Chopper for Limiting the Fault Current and Controlling the DC-Link Voltage to Enhance Fault Ride-Through Capability of Doubly-Fed Induction-Generator-Based Wind Turbine**,IEEE.2019.
- [5] Jerin , Kaliannan P, Subramaniam U ,2017.**Improved fault ride through capability of DFIG based wind turbines using synchronous reference frame control based dynamic voltage restorer**. www.elsevier.com. 2017.

- [6] Silveira, Sidelmo M,2017 .**Fault ride-through enhancement in DFIG with control of stator flux using minimised series voltage compensator.** The Institution of Engineering and Technology.
- [7] Kanasottu Anil Naika, Chandra Prakash Guptab ,2019.**Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller type 2 FLC PI.** www.elsevier.com.
- [8] Silveira S, Sidelmo M. Silva, 2017. **Fault ride-through enhancement in DFIG with control of stator flux using minimised series voltage compensator.** The Institution of Engineering and Technology.
- [9] Kanasottu Anil Naika, Chandra Prakash Guptab ,2019.**Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller type 2 FLC PI.** , www.elsevier.com.
- [10] G. Abad, Member, IEEE, M. A. Rodr´ıguez, Member,2017. **Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion System,** IEEE .2017
- [11] Naji W, Gomm B, Alharbi ,2017 .**Genetic Algorithm Optimisation of PID Controllers for a Multivariable Process,** iJES.

[12] Aguilar D, Luna A, Rolan A, Vazquez G,2010. **Modeling and Simulation of Synchronous Machine and its behaviour against Voltage Sags**.IEEE.

[13] Pingle T, Patil S,Student Member, Chopde S,2015.**Modelling and Vector Control of DFIG Using Multilevel Inverter**, IEEE International Conference on Technological Advancements in Power & Energy.

[14] Abad G, Lo'pez J, Miguel A. 'guez R, Marroyo L , Iwanski G,2011. **Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation**, IEEE Press,Wiley.

