استنباط وتحليل خوارزمية لقيادة المولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة

أحمد عمار نعساني*، عبد القادر جوخدار، عبد القادر غزال*****

*قسم هندسة القيادة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب

**قسم هندسة الميكاترونيكس، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب

***طالب دراسات عليا (ماجستير)

الملخص

كثر في الآونة الأخيرة استخدام المولد التحريضي ذو الدوار الملفوف DFIG (Doubly Fed Induction Generator) في نظم العنفات الريحية متغيرة السرعة بسبب المزايا العديدة التي يمتلكها هذا النوع مقارنةً مع الأنواع الأخرى من المولدات الكهربائية. في هذا النوع من أنظمة التوليد يربط الدوار مع الشبكة المراد دعمها عبر مبدلتين ترانزستوريتين (Back-Back Converter) موصولتين مع بعضهما بواسطة مكثف، بينما يربط الثابت مباشرةً مع الشبكة أو عبر محول رافع للجهد.

يهدف البحث إلى تصميم نظام تحكم بالمبدلتين الموصولتين مع دوار المولد، بحيث نتمكن من جهة من التحكم بالاستطاعتين الفعلية والردية بغية دعم شبكة تغذية لا نهائية الاستطاعة، ومن جهةٍ أخرى المحافظة على جهدٍ مستمر ثابت على طرفي المكثف المتوضع بين المبدلتين وتحسين عامل الاستطاعة للنظام.

وقد تم في هذا البحث استنباط خوارزمية تعتمد المنظمات البطانية Hysteresis Controller لقيادة كلا المبدلتين، ومن ثم تمت مقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع أداء خوارزمية تعتمد في عملها على المنظمات التناسبية- التكاملية التقليدية. وللتأكد من صحة التصميم ومنهجية الدراسة، تم بناء مكونات نظام التوليد باستخدام بيئة Matlab-Simulink، حيث بينت النتائج الأداء الجيد للخوارزمية المقترحة وإمكانية استخدامها في قيادة المبدلة ثنائية الاتجاه الموصولة مع DFIG.

كلمات مفتاحية: مولد تحريضي ذي دوار ملفوف، المنظمات البطانية، مبدلة ترانزستورية.

1- مقدمة

تحتل طاقة الرياح في يومنا هذا أهمية كبيرة كأحد مصادر الطاقة المتجددة، وتمتاز بأنها طاقة دائمة، نظيفة، صديقة للبيئة، متوفرة في أغلب المناطق، وفي جميع فصول السنة، وقد أصبحت أنظمة العنفات الريحية الشغل الشاغل للمصممين والباحثين، خاصةً تلك التي تعمل عند سرعات متغيرة بتردد ثابت VSCF (Variable Speed Constant Frequency)، وقد احتل المولد التحريضي ذو الدوار الملفوف اهتماماً واسعاً لما يمتاز به من مزايا عديدة، حيث أنه يعمل عند مجال سرعة واسع نسبياً، ويحتاج إلى مبدلة في دارة الدوار باستطاعة لا تتجاوز 25% من استطاعة المولد عند تغير في السرعة ضمن المجال من 75-125% من سرعة التواقت، في حين أن نظم التوليد الأخرى تتساوى فيها استطاعة المبدلة الإلكترونية مع كامل استطاعة المولد الكهربائية، حيث يترتب على ذلك تكاليف إضافية وضياعات استطاعة أكبر.

2- أهمية البحث

تظهر أهمية البحث في تسليطه الضوء على نظم توليد الطاقة الكهربائية باستخدام العنفات الريحية والتي تعتمد المولد التحريضي ذو الدوار الملفوف، والإمكانيات الكبيرة التي توفرها هذه النظم في التحكم المرن بكل من الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية، والممكن الحصول عليها باستخدام مبدلة ثنائية الاتجاه في دارة الدوار، كما تتجلى أهمية البحث في استنباط وتحليل خوارزمية تحكم لمولد تحريضي ذي دوار ملفوف من أجل التحكم المنفصل بكل من الاستطاعتين الفعلية والردية تعتمد المنظمات البطانية ذات الأداء العالي والبنية البسيطة مقارنةً مع المنظمات التناسبية – التكاملية – التفاضلية الكلاسيكية.

3- طريقة البحث وخطواته

في هذا البحث تم بناء النموذج الرياضي لكلٍ من المولد التحريضي ذي الدوار الملفوف والمبدلة الإلكترونية ثنائية الاتجاه في نظام محاور إحداثيات ثنائية

(α,β)، وتم اقتراح نظام تحكم بالمبدلة الإلكترونية الثنائية تعتمد المنظمات البطائية، ثم تمت مقارنة أداء النظام مع نظام تحكم يعتمد المنظمات التناسبية- التكاملية باستخدام البيئة البرمجية Matlab-Simulink.

3-1 المولدات الكهربائية المستخدمة في أنظمة التوليد الريحية

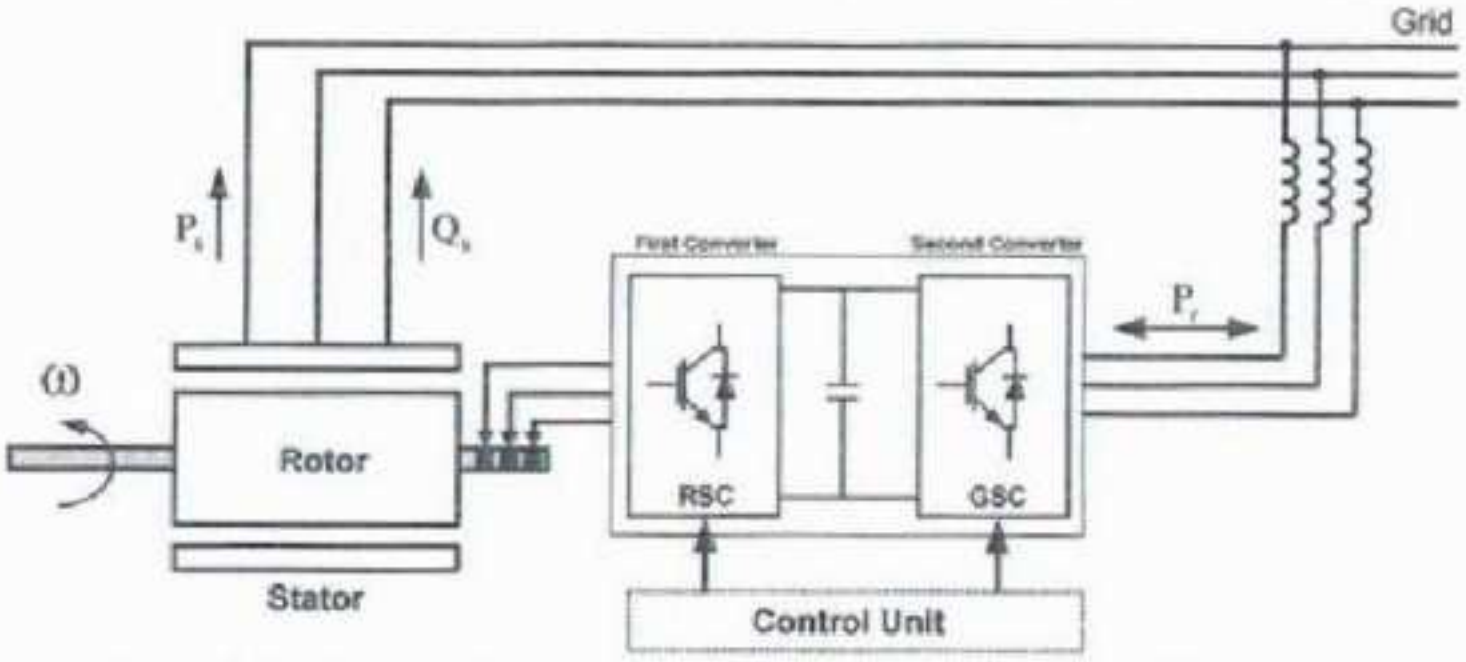
بشكلٍ عام، يمكن تصنيف المولدات الكهربائية ذات التيار المتناوب إلى نوعين أساسيين هما المولدات المتوافقة والمولدات التحريضية، حيث تعمل المولدات المتوافقة بالسرعة التوافقية ω_s فقط، وعليه في حال تركيب المولد المتوافق مع عنفة ريحية متغيرة السرعة تبعاً لحركة الرياح، فإننا أمام خيارين، الأول تجهيز العنفة بنظام ميكانيكي معقد نسبياً يسعى للحفاظ على سرعة دوران ثابتة (تردد خرج ثابت)، أو ربط المولد مع الشبكة عبر نظام مقوم- قالبة، في هذه الحالة تكون استطاعة المبدلة الإلكترونية مساويةً إلى استطاعة المولد، وهذا بدوره يزيد من كلفة النظام بشكلٍ كبير، كما وينخفض المردود نتيجة ضياعات التبديل.

بالمقابل، إن استخدام المولدات التحريضية يمنحنا مرونةً أكبر تجاه تغير سرعة الدوران، ويمتاز ببنية أبسط وأمتن ومتطلبات صيانة أقل. يمكن تصنيف المولدات التحريضية إلى نوعين رئيسيين هما المولد التحريضي ذو الدوار المقصور والمولد التحريضي ذو الدوار الملفوف، حيث يعمل النوع الأول في نظام التوليد عند دوران الدوار فوق السرعة التوافقية، لكنه يستهلك استطاعة ردية من الشبكة وبهذا ينخفض المردود، ويمكن حل هذه المشكلة بإضافة مكثفات تعويض لكنها تفرض تكاليف إضافية باهظة على النظام، أما النوع الثاني فكثر استخدامه في الآونة الأخيرة في نظم التوليد ذات السرعات المتغيرة (النظم الريحية- التيارات المائية في البحار- مصادر الماء غير المستقرة)، حيث تمتاز الآلة التحريضية ذات الدوار الملفوف بمزايا عديدة مثل العمل عند سرعات دوران مختلفة أدنى وأعلى من سرعة التوافق، وإمكانية التحكم التام بسريان الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية باستخدام قالبة ثنائية الاتجاه ذات استطاعة صغيرة نسبةً إلى استطاعة المولد. بناءً على ما سبق ذكره، وبالنظر إلى المزايا العديدة للمولد التحريضي ذي الدوار

الملفوف تم اعتماد هذا المولد في هذا البحث، حيث يوضح الشكل (1) البنية العامة للنظام المدروس.

3-2 التمثيل الرياضي للآلة التحريضية ذات الدوار الملفوف

من أجل دراسة الآلة التحريضية ذات الدوار الملفوف وتحليل جميع الظواهر ومعرفة سير عمليات تحويل الطاقة فيها، ومن أجل تمثيلها على الحاسب للتمكن من دراسة نظام التحكم المقترح لقيادة المولد التحريضي، كان لا بد من الحصول على النموذج الرياضي، حيث يمكننا هذا النموذج من معرفة المعادلات التي تصف عمل الآلة في الحالة العابرة والحالة المستقرة.



الشكل (1): الشكل العام لوصل المولد التحريضي ذي الدوار الملفوف مع الشبكة الكهربائية

تبين المعادلات التالية جهود الثابت والدوار في جملة محاور إحداثيات ثنائية (α, β) دوارة بالسرعة التزامنية ω_s (Jiang and Yu,2009).

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + d\Phi_{s\alpha}/dt - \omega_s \Phi_{s\beta} \quad (1)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + d\Phi_{s\beta}/dt + \omega_s \Phi_{s\alpha} \quad (2)$$

$$V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + d\Phi_{r\alpha}/dt - \omega_r \Phi_{r\beta} \quad (3)$$

$$V_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + d\Phi_{r\beta}/dt + \omega_r \Phi_{r\alpha} \quad (4)$$

حيث يعبر $V_{s\alpha}$ و $V_{s\beta}$ عن جهود الثابت على المحورين α, β على التوالي، $V_{r\alpha}$ و $V_{r\beta}$ جهود الدوار، R_s و R_r مقاومة ملف الثابت والدوار، $\Phi_{s\alpha}$ و $\Phi_{s\beta}$ الفيوض المغناطيسية للثابت والدوار على التوالي، ω_s و ω_r السرعة الزاوية

الكهربائية للمقادير الكهربائية في الثابت والدوار على التوالي.

وترتبط الفيوض المغناطيسية بالتيارات وفق العلاقات التالية:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{s\alpha}\\ \Phi_{s\beta}\\ \Phi_{r\alpha}\\ \Phi_{r\beta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_s & 0 & L_m & 0\\ 0 & L_s & 0 & L_m\\ L_m & 0 & L_r & 0\\ 0 & L_m & 0 & L_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{s\alpha}\\ i_{s\beta}\\ i_{r\alpha}\\ i_{r\beta}\end{bmatrix} \quad (5)$$

3-3 استخدام تقنية التوجيه الشعاعي في قيادة المولد

تتميز تقنية التوجيه الشعاعي لشعاع جهد الثابت بإمكانية التحكم المستقل بكل من الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية في المولد DFIG (Jiuhe et al.,2006)، وبناءً على ذلك تم توجيه شعاع جهد الثابت لينطبق على المحور (α) في نظام محاور إحداثيات ثنائية تدور بالسرعة التواقتية ω_s، ومنه تصبح معادلات الاستطاعة الفعلية والردية في نظام محاور إحداثيات ثنائية محددة بالعلاقتين التاليتين:

$$P_s = V_{s\alpha}\, i_{s\alpha} \quad (6)$$

$$Q_s = -V_{s\alpha}\, i_{s\beta} \quad (7)$$

بأخذ العلاقة (5) بعين الاعتبار والتعويض في (6) و(7) يمكن ربط كلتا الاستطاعتين بتيارات الدوار كما يلي:

$$P_s = \frac{V_{s\alpha}\,\Phi_{s\alpha}}{L_s} - \frac{V_{s\alpha}\,L_m}{L_s} i_{r\alpha} \quad (8)$$

$$Q_s = \frac{-V_{s\alpha}\,\Phi_{s\beta}}{L_s} + \frac{V_{s\alpha}\,L_m}{L_s} i_{r\beta} \quad (9)$$

بناءً على المعادلتين (8) و(9) نجد أن التحكم بالاستطاعتين الفعلية والردية يتم عبر التحكم بتيارات الدوار $i_{r\beta}, i_{r\alpha}$ والتي تتم عبر التحكم بجهود الدوار $V_{r\beta}, V_{r\alpha}$.

3-4 المبدلة ثنائية الاتجاه (مقوم – قالبة)

كما هو موضح في الشكل (1)، يتم وصل أطراف ملفات الثابت مباشرةً إلى الشبكة الكهربائية، في حين يتم وصل الدوار إلى الشبكة الكهربائية عبر مبدلة إلكترونية ثنائية الاتجاه. سندعو المبدلة الموصولة مع ملفات الدوار بالمبدلة الأولى

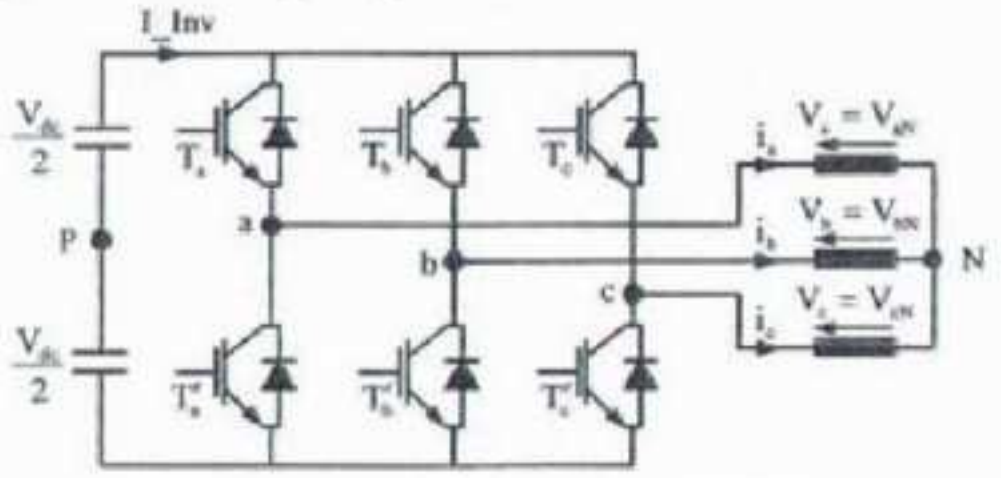
والمعروفة باسم (PWM-Inverter) أو (Rotor Side Converter (RSC))، في حين نسّمي المبدلة من جهة الشبكة بالمبدلة الثانية والمعروفة باسم (PWM-Rectifier) أو (Grid Side Converter (GSC)).

يعتمد نمط عمل كلا المبدلتين على سرعة دوران دوار المولد التحريضي، فعند العمل بسرعة التواقت أو دون سرعة التواقت ستمر الاستطاعة من الشبكة إلى الدوار، وبالتالي تعمل المبدلة الأولى كقالبة وتعمل المبدلة الثانية كمقوم، وتعمل المجموعة بشكل معاكس عند العمل بسرعة أكبر من السرعة التواقتية.

3-4-1 المبدلة الأولى (PWM Inverter)

تقوم هذه المبدلة بقيادة المولد التحريضي والتحكم بسريان الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية عبر تشكيل جهود الدوار بالمطال والتردد الذي يفرضه نظام قيادة المولد. يبين الشكل (2) بنية هذه المبدلة حيث يعبر V_{dc} عن الجهد على أطراف المكثف، والنقطة P هي نقطة حياد اصطناعية فرضت لتساعد على دراسة المبدلة، أما الإشارات ($T_a, T'_a, T_b, T'_b, T_c, T'_c$) فهي عبارة عن تابع رقمي ثنائي يمثل حالة المفاتيح في كل عمود ويجب على نظام القيادة قدح المفاتيح بحيث يكون T_a متمماً لـ T'_a مع وجود فترة زمن ميت Dead-Time تجنباً لحدوث حالة قصر. تعطى الجهود الطورية على خرج المبدلة بالعلاقة التالية:

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{bmatrix} \qquad (10)$$



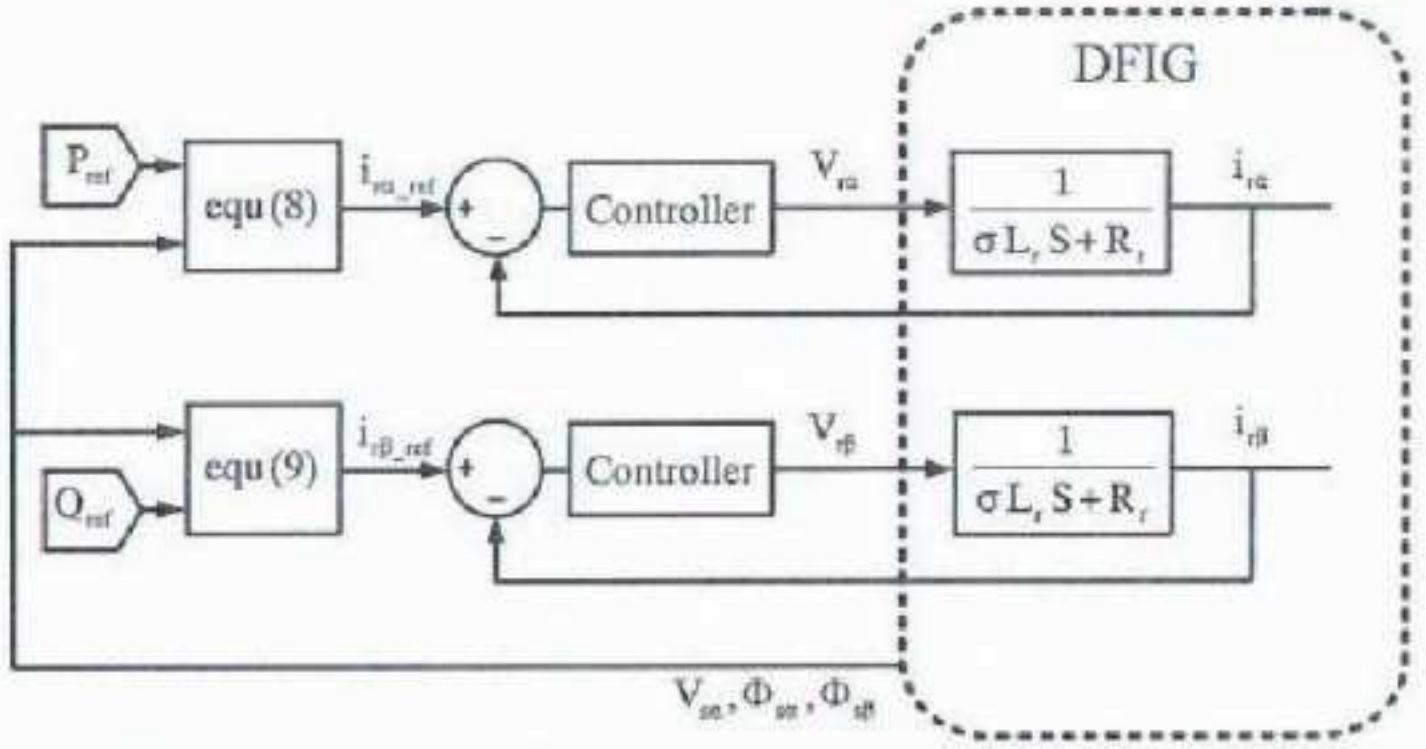
الشكل (2): بنية المبدلة الأولى PWM Inverter

وتحدد قيمة التيار التي تمررها هذه المبدلة إلى الحمل (ملفات دوار المولد) بالعلاقة التالية (Malinowski,2001):

$$I_Inv = T_a\, i_a + T_b\, i_b + T_c\, i_c \qquad (11)$$

3-4-2 تصميم نظام تحكم بالمبدلة الأولى

توضح العلاقة (8) إمكانية التحكم بقيمة الاستطاعة الكهربائية الفعلية المتبادلة مع الشبكة بشكلٍ غير مباشر عبر التيار $i_{r\alpha}$، في حين يسمح التيار $i_{r\beta}$ بالتحكم بقيمة الاستطاعة الردية وفق العلاقة (9)، لكن من الناحية العملية يفضل أن تكون إشارة الدخل هي قيمة الاستطاعة المطلوب حقنها في الشبكة بدلاً من قيمة التيار، وبالتالي اعتماداً على المعادلة (8) يمكن تصميم نموذج دخله يمثل قيمة الاستطاعة الفعلية المطلوبة وخرجه يمثل قيمة التيار المرجعية $i_{r\alpha\text{-}ref}$ لحلقة تنظيم التيار على المحور α. وبشكلٍ مشابه وبالاعتماد على المعادلة (9) يمكن تشكيل نموذج دخله قيمة الاستطاعة الردية المطلوبة وخرجه قيمة التيار المرجعية $i_{r\beta\text{-}ref}$ لحلقة تنظيم التيار على المحور β، ويبين الشكل (3) المخطط الصندوقي النهائي المقترح لتنظيم عمل المولد.



الشكل (3): المخطط الصندوقي لنظام قيادة المولد على اعتبار قيم مرجعية للاستطاعتين الفعلية والردية

لتنظيم الاستطاعة الكهربائية المتبادلة بين المولد والشبكة باستخدام المنظمات التناسبية-التكاملية في قيادة المبدلة الأولى لا بد من إجراء عملية فك

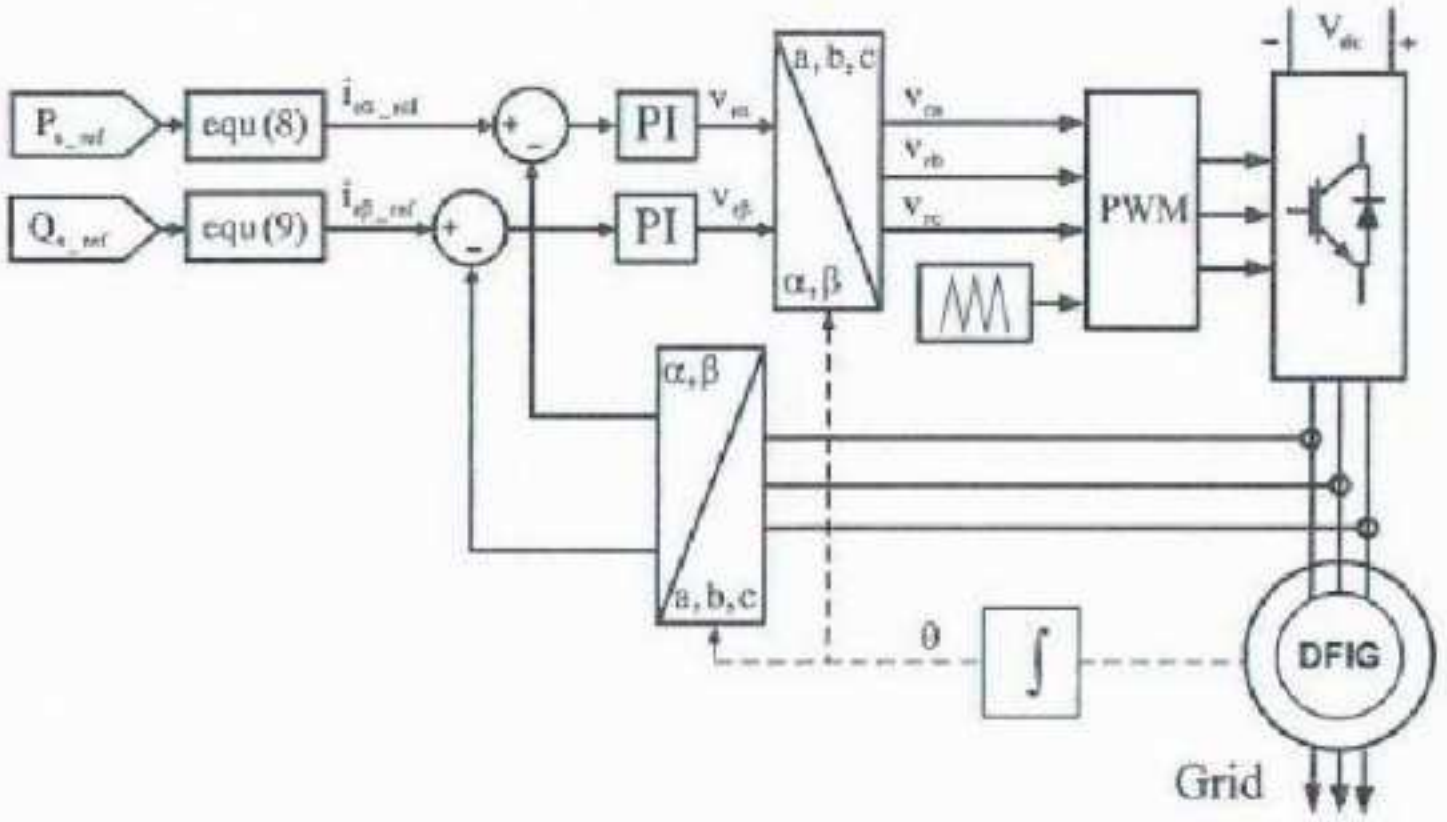
ارتباط بين مركبات المحورين، وتتم هذه العملية بتعويض عناصر الاضطراب الداخلي، حيث تضاف القيم التالية للمحورين α و β على التوالي في منظومة التحكم:

$$\alpha_decoupling = L_m(V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} + \omega_s \Phi_{s\beta})/L_s - \omega_r \Phi_{r\beta} \quad (12)$$

$$\beta_decoupling = L_m(-R_s i_{s\beta} + \omega_s \Phi_{s\alpha})/L_s + \omega_r \Phi_{r\alpha} \quad (13)$$

بالإضافة لعملية فك الارتباط بين المحورين، يجب أيضاً حساب ثوابت المنظمات، وتحسب عادةً بإجراء عملية حذف الصفر الناتج عن إضافة المنظم مع قطب الحلقة الكهربائية.

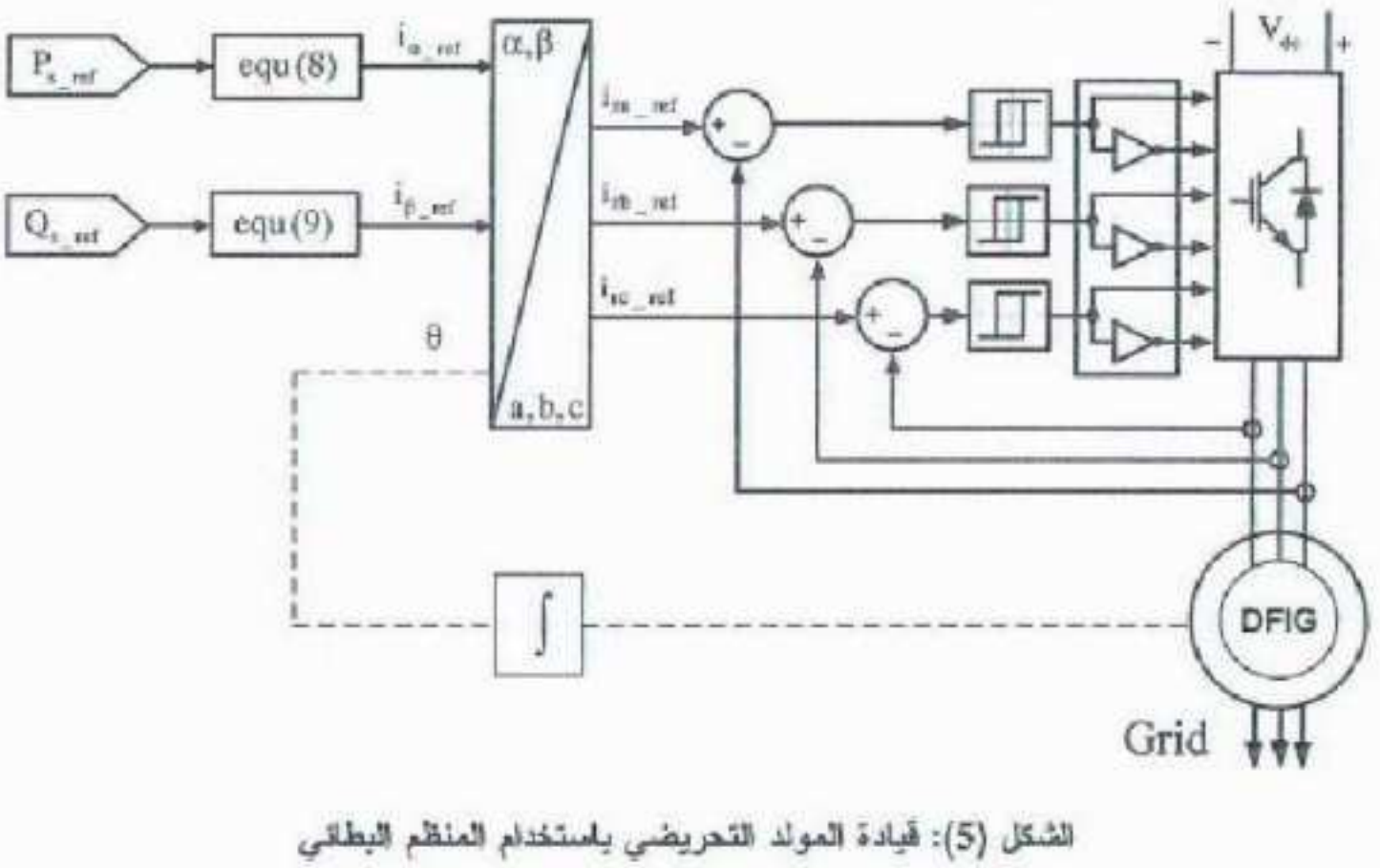
بعد ذلك يتم تحويل جهود خرج وحدة المنظمات $V_{r\alpha}$ و $V_{r\beta}$ إلى نظام المحاور الثلاثية باستخدام مصفوفة تحويل بارك العكسية، ثم يتم توليد نبضات قدح الترانزستورات عبر مقارنة إشارات الجهود الثلاث مع إشارة مثلثية ضمن وحدة تعديل عرض النبضة PWM ويصبح المخطط التمثيلي لخوارزمية المنظم التناسبي–التكاملي كما هو موضح في الشكل (4)(Yikang et al.,2005).



الشكل (4): قيادة المولد التحريضي باستخدام المنظم التناسبي– التكاملي

بالنسبة لخوارزمية التحكم المقترحة، والتي تعتمد المنظمات البطائية لقيادة المبدلة الأولى، فإنها لا تحتاج إلى عملية فك ارتباط أو إلى ضبط بارمترات،

وتمتاز بالبساطة، سرعة الاستجابة، ويتم توليد نبضات القدح مباشرةً دون الحاجة لمرحلة التعديل النبضي PWM. في هذه الخوارزمية يتم تحويل إشارات التيارات المرجعية من نظام محاور الإحداثيات الثنائية الدوارة بالسرعة التواقتية إلى نظام المحاور الثلاثية باستخدام مصفوفة تحويل بارك العكسية، ومن ثم تتم مقارنة هذه الإشارات مع تيارات الدوار، والمقاسة باستخدام حساسات تيار في أطوار الدوار الثلاثة، وإشارات الخطأ الناتجة تطبق على المنظمات البطائية والتي تولد بدورها نبضات القدح اللازمة لتشغيل المبدلة الأولى. يبين الشكل (5) المخطط التمثيلي للخوارزمية المقترحة.



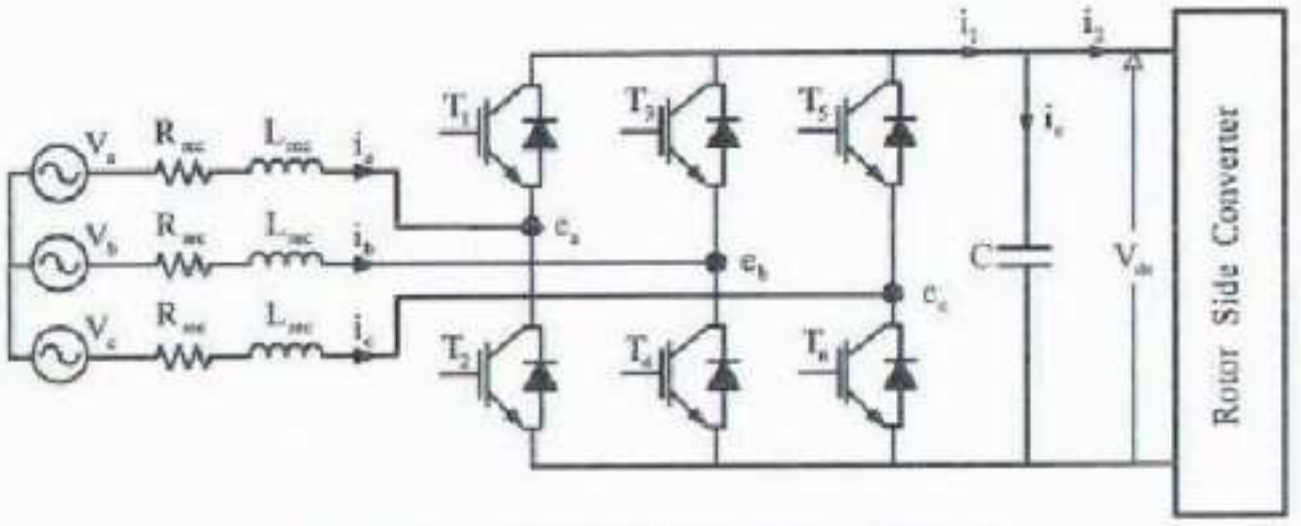
الشكل (5): قيادة المولد التحريضي باستخدام المنظم البطائي

في كلا الشكلين (4) و(5)، تم الاعتماد على المعادلات (8)، (9) في إيجاد القيم المرجعية للتيارات $i_{rα\text{-}ref}$، $i_{rβ\text{-}ref}$.

3-4-3 المبدلة الثانية (PWM-Rectifier)

يبين الشكل (6) بنية هذه المبدلة والجهود على النقاط المختلفة، حيث يتم وصل الطرف الأول مع الشبكة العامة عبر محارضة (R_{rec} ,L_{rec})، في حين أن الطرف الآخر يؤمن الجهد المستمر لعمل المبدلة الأولى (PWM inverter). تمتاز هذه المبدلة بعدة مزايا جعلتها الخيار الأفضل في نظم القيادة الكهربائية، حيث

تمتاز بأنها مبدلة ثنائية الاتجاه، تيار دخل جيبي، عامل استطاعة عالٍ (قريب من الواحد)، عامل تشويه منخفض (THD أقل من 5% للأحمال التحريضية)، إمكانية التحكم بجهد الخرج V_{dc}، تحتاج مكثف ذو سعة أقل مقارنةً بالمقوم الديودي، إذاً تقوم المبدلة بالحفاظ على جهد المكثف ثابتاً بغض النظر عن اتجاه سريان الاستطاعة بين الشبكة والدوار.



الشكل (6): بنية المبدلة الثانية PWM Rectifier

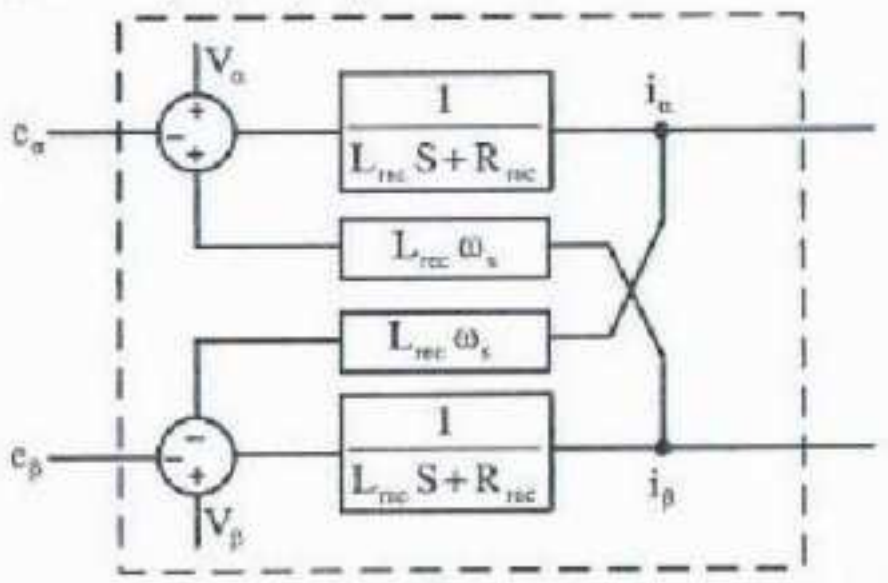
3-4-4 التمثيل الرياضي للمبدلة الثانية

باستخدام مصفوفة تحويل بارك المباشرة يمكن الحصول على معادلات توازن الجهود للمبدلة الثانية في نظام محاور الإحداثيات الثنائية α,β كما يلي (Jiuhe et al.,2006):

$$V_\alpha = e_\alpha + L_{rec}\, di_\alpha/dt + R_{rec}\, i_\alpha - \omega_s L_{rec}\, i_\beta \quad (14)$$

$$V_\beta = e_\beta + L_{rec}\, di_\beta/dt + R_{rec}\, i_\beta + \omega_s L_{rec}\, i_\alpha \quad (15)$$

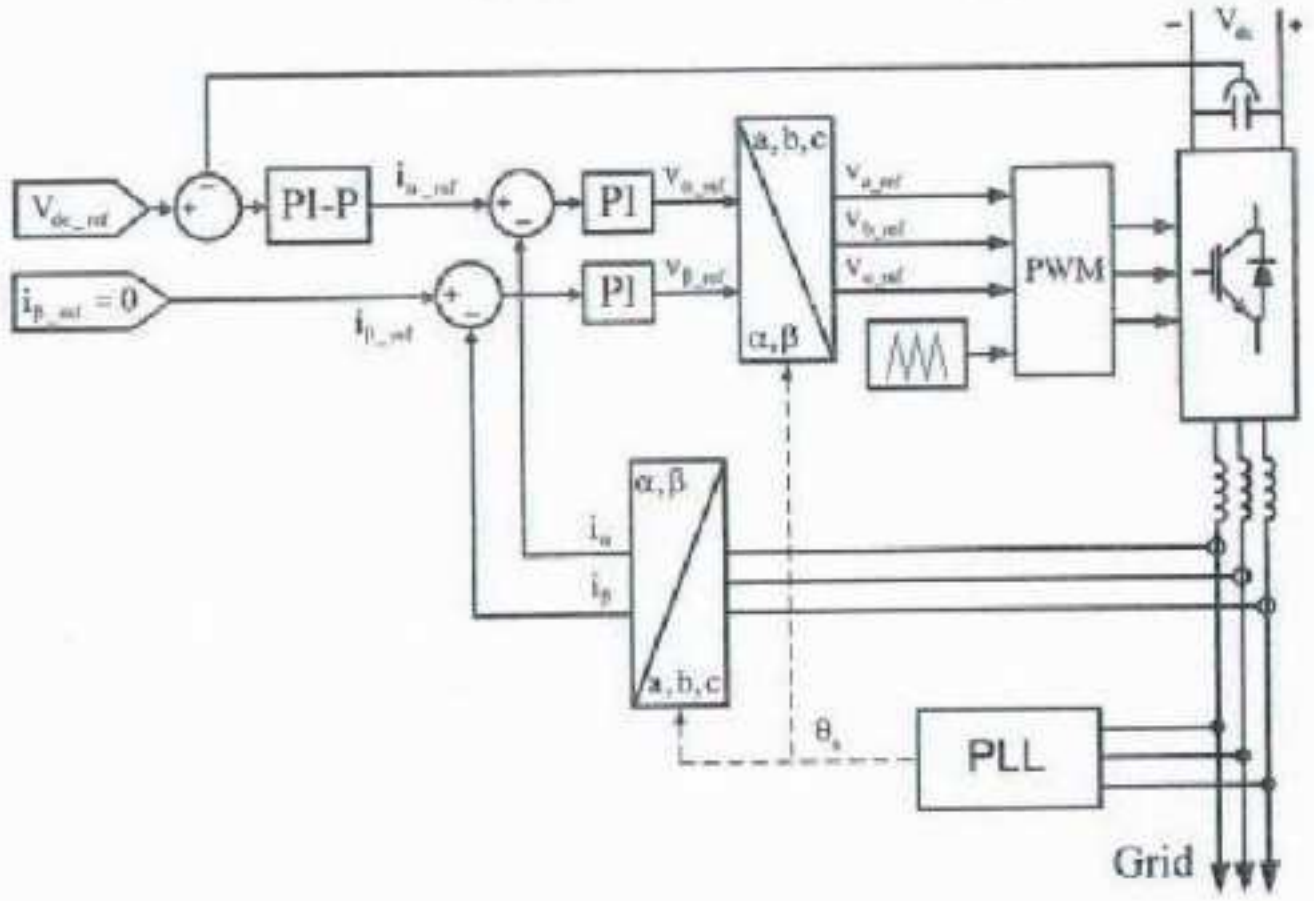
ويمكن تمثيل المبدلة بالاعتماد على المعادلتين (14) و(15) كما يبين الشكل (7).



الشكل (7): المخطط الصندوقي للمبدلة الثانية (طرف الشبكة) PWM Rectifier

3-4-5 تصميم نظام تحكم بالمبدلة الثانية

يهدف التحكم بالمبدلة الثانية إلى تنظيم قيمة الجهد المستمر على أطراف المكثف والحصول على عامل استطاعة يساوي الواحد مهما كان اتجاه سريان الاستطاعة بين المبدلة الأولى والشبكة الكهربائية، وتسمح تقنية التوجيه الشعاعي بفصل عملية تنظيم الجهد المستمر عن عملية تنظيم عامل الاستطاعة، ويتم ذلك بتوجيه شعاع جهد المنبع لينطبق على المحور α في نظام محاور إحداثيات ثنائية دوارة بسرعة التواقت، حيث يتم التحكم بقيمة الجهد V_{dc} بشكل غير مباشر عبر تنظيم قيمة التيار i_α، في حين يتم التحكم بقيمة عامل الاستطاعة عبر تنظيم الاستطاعة الردية بشكل غير مباشر بواسطة التيار i_β (Juinne and Sheng,2000).



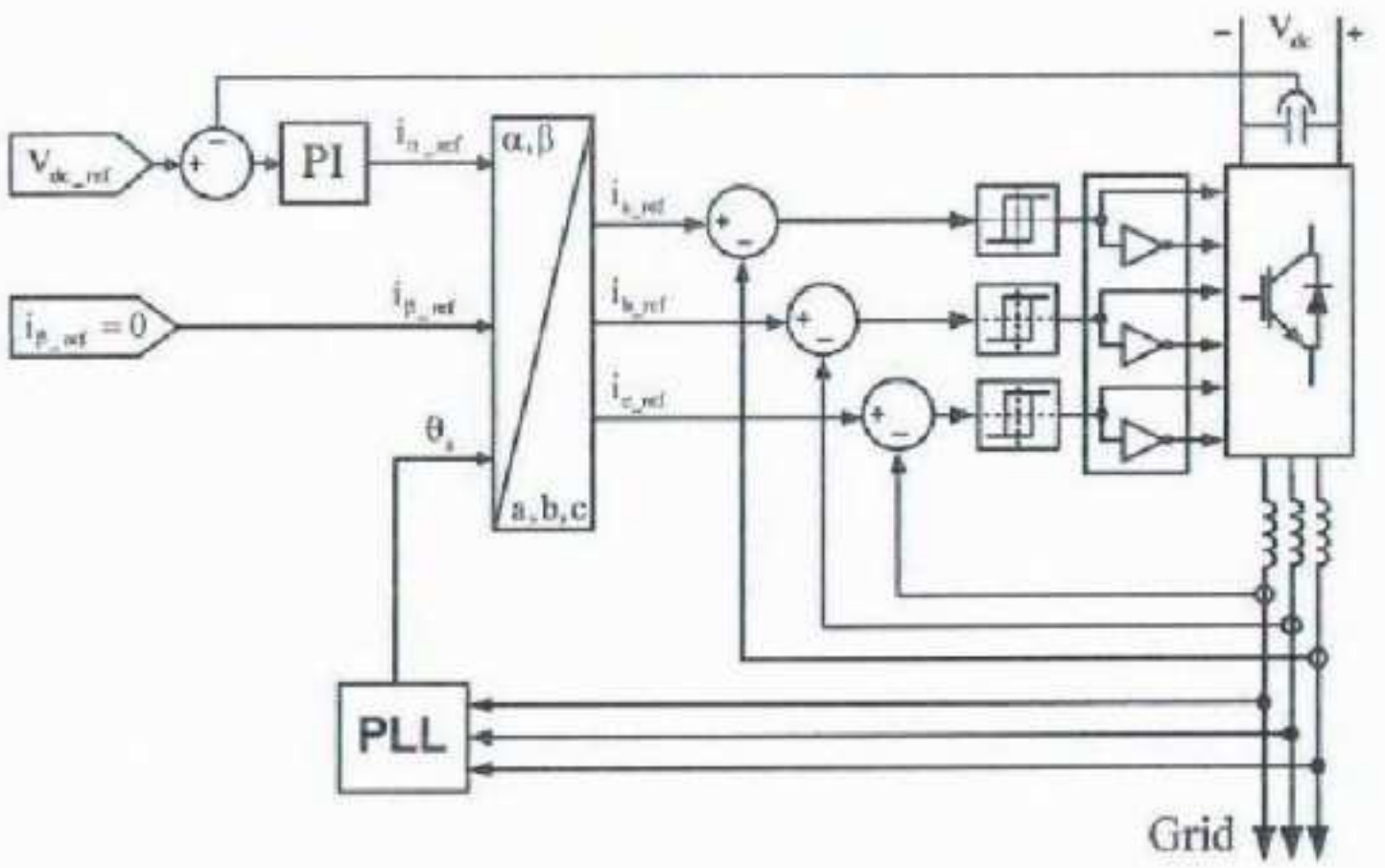
الشكل (8): المخطط الرمزي لقيادة المبدلة الثانية باستخدام المنظمات التناسبية – التكاملية

يوضح الشكل (8) بنية الخوارزمية التي تعتمد منظمات PI، حيث تم استخدام PI وحيد لتنظيم التيار i_β، وفرضت القيمة المرجعية i_{β_ref} مساوية للصفر للحصول على عامل استطاعة يساوي الواحد. أما على المحور α فقد تم استخدام منظم PI لتنظيم الجهد V_{dc}، يليه منظم تناسبي، كان الهدف من استخدامه تحييز

القطب الناتج عن وجود المكثف في المنظومة، وتم اعتبار خرج المنظمين PI-P هو التيار المرجعي i_{α_ref} لحلقة تنظيم التيار الداخلية والتي تضم منظم PI وحيد.

ويُستخدم حلقة قفل طوري PLL (Phase Locked Loop) لملاحقة زاوية شعاع جهد الشبكة θ_s، والتي تعتبر ضرورية لمزامنة جهود التحكم المرجعية v_{a_ref}، v_{b_ref} و v_{c_ref} مع توارد أطوار الشبكة v_a، v_b و v_c.

في الخوارزمية المقترحة لقيادة المبدلة الثانية تم استخدام ثلاثة منظمات بطائية لتنظيم تيار المبدلة بالإضافة إلى منظم PI وحيد لتنظيم الجهد المستمر، ويوضح الشكل (9) الشكل العام لهذه الخوارزمية، حيث يتم تحويل التيارات المرجعية i_α و i_β إلى تيارات مرجعية في نظام المحاور الثلاثية باستخدام تحويل بارك العكسي، ومن ثم تتم مقارنتها مع التيارات الحقيقية التي تتبادلها المبدلة مع الشبكة، وتبعاً لنتيجة المقارنة تقوم المنظمات البطائية بقدح المفاتيح الإلكترونية في المبدلة.



الشكل (9): المخطط الرمزي لقيادة المبدلة الثانية باستخدام المنظمات البطائية

يصبح الجهد المستمر على أطراف المكثف ثابتاً عند تساوي تيار خرج المبدلة i_1 مع تيار الحمولة i_2 (التيار الذي تستجره المبدلة الأولى والمحدد بالعلاقة

(11)). من الشكل (6) يمكن كتابة المعادلة التالية:

$$V_{dc} = \frac{1}{C}\int(i_1 - i_2)\,dt = \frac{1}{C}\int i_c\,dt \qquad (16)$$

حيث يعبر i_c عن تيار المكثف.

3-5 نتائج اختبار الخوارزمية

بعد بناء وتشكيل نماذج كل من المولد التحريضي، المبدلة الأولى والمبدلة الثانية، تم جمع هذه العناصر مع بعضها البعض ضمن البيئة البرمجية Matlab-Simulink لتشكّل نظام التوليد، وتم إجراء محاكاة لعمل المجموعة واختبار الخوارزمية المقترحة ومقارنة أدائها مع نظام يعتمد منظمات PI. وتم اختبار النظام بناءً على بارامترات تم قياسها لآلة تحريضية ذات دوار ملفوف مخبرية موجودة في مخبر القيادة الكهربائية مواصفاتها هي:

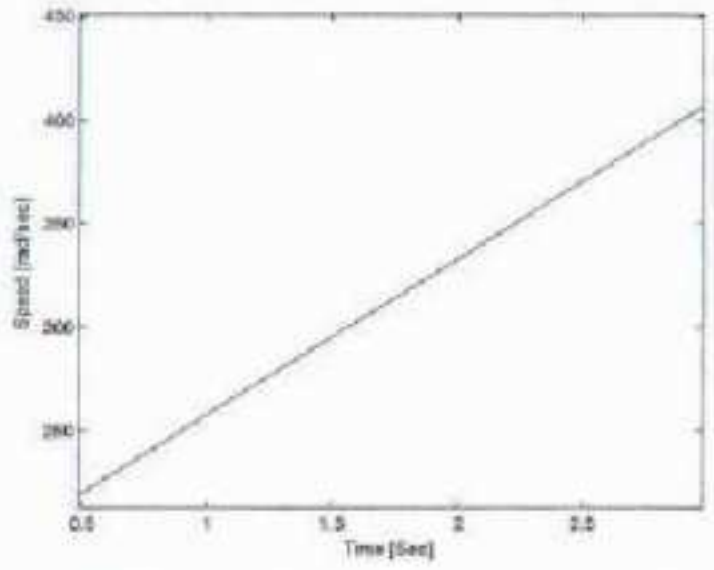
$P_N = 1000W,\ L_s = 0.28H,\ R_s = 7.2\Omega,$

$R_r = 1.35\Omega,\ L_m = 0.118H,\ L_r = 0.075H,$

ومبدلة (PWM-Rectifier) صناعة شركة SEMIKRON لها المواصفات التالية:

$L = 0.05\,mH,\ R = 0.5\Omega,\ C = 2200\mu F$

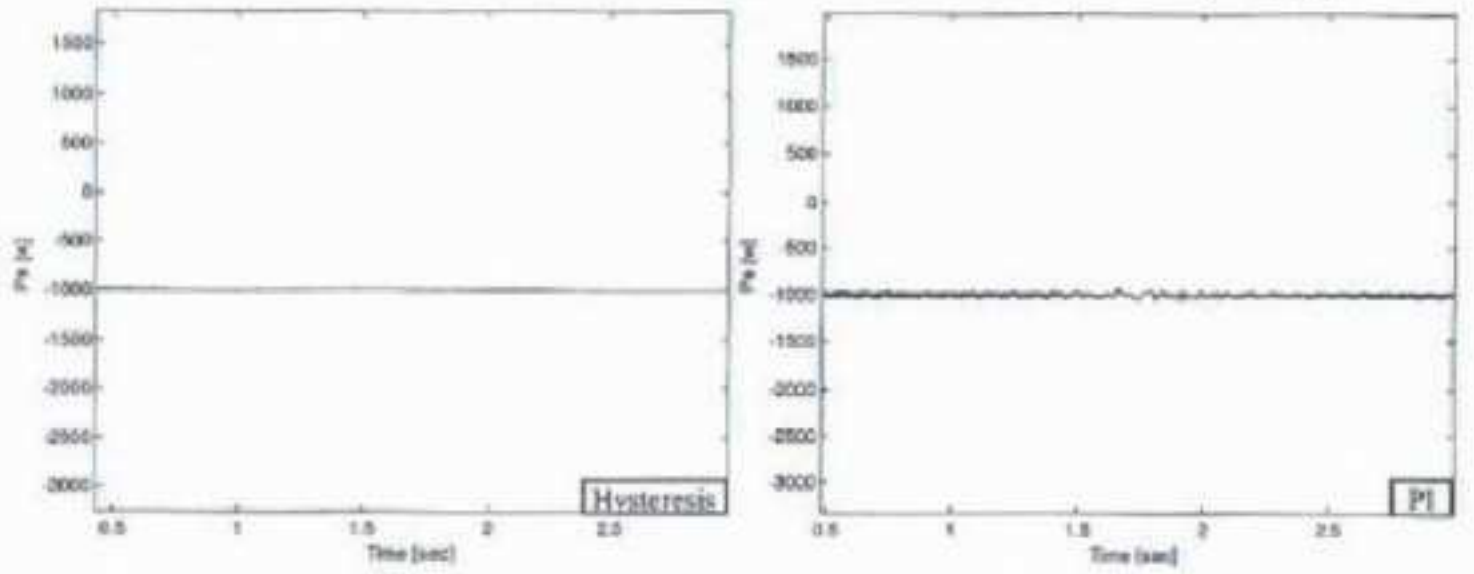
خلال الاختبار تم تشغيل النظام عند قيم مرجعية ثابتة للاستطاعة الفعلية $P_{ref} = -1000W$ والاستطاعة الردية $Q_{ref} = 0VA$ وسرعة دوران متغيرة ضمن المجال (219.9-408.4rad/sec) كما هو موضح في الشكل (10).



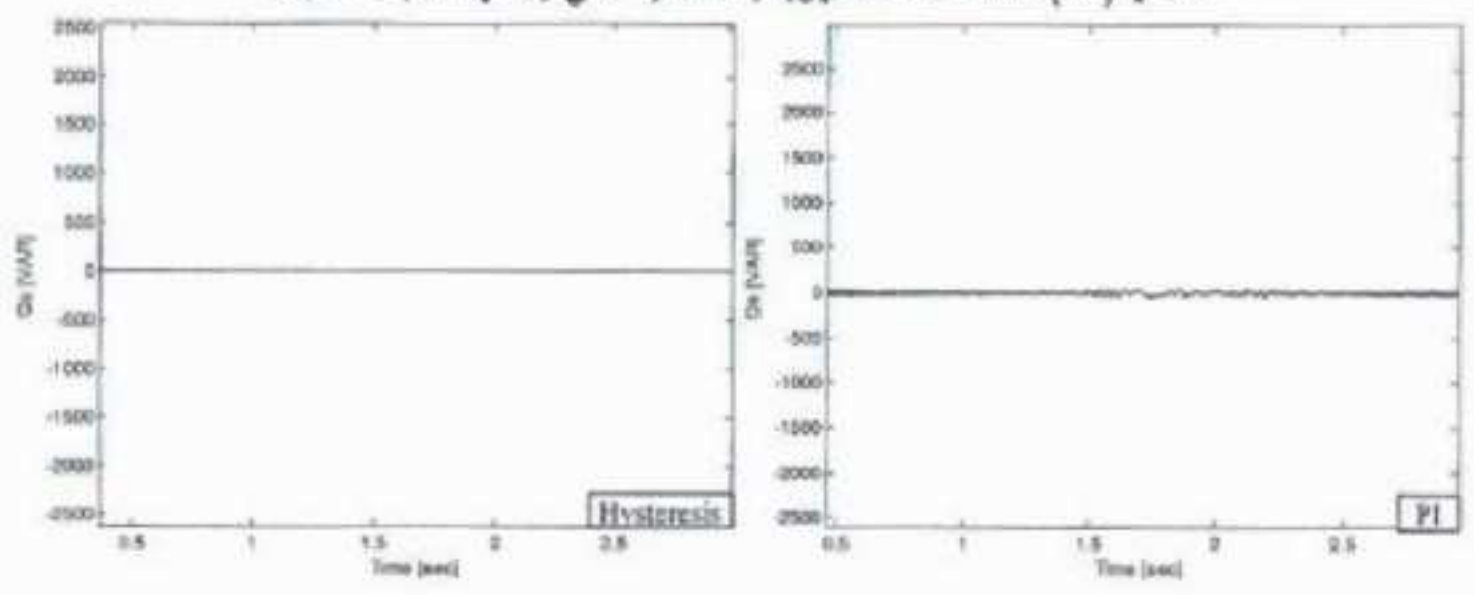
الشكل (10): السرعة الزاوية الكهربائية للدوار

توضح الأشكال (11) و(12) ملاحقة كلا النظامين للاستطاعة الكهربائية

الفعلية والردية المرجعية رغم تغير السرعة بشكلٍ دائم، إلا أن المنظمات البطانيـــة (الشكل اليساري) تبدي أداءً أفضل وتذبذباً أقل في قيمـــة الاســـتطاعة الكهربائيـــة المقدمة إلى الشبكة.



الشكل (11): الاستطاعة الكهربائية الفعلية التي يقدمها الثابت للشبكة



الشكل (12): الاستطاعة الكهربائية الردية المتبادلة بين الثابت والشبكة الكهربائية

تحدد قيمة الاستطاعة الكهربائية المتبادلة بين الدوار والشبكة عبر المبدلـــة ثنائية الاتجاه بالعلاقة التالية (Gagnon et al.,2005).

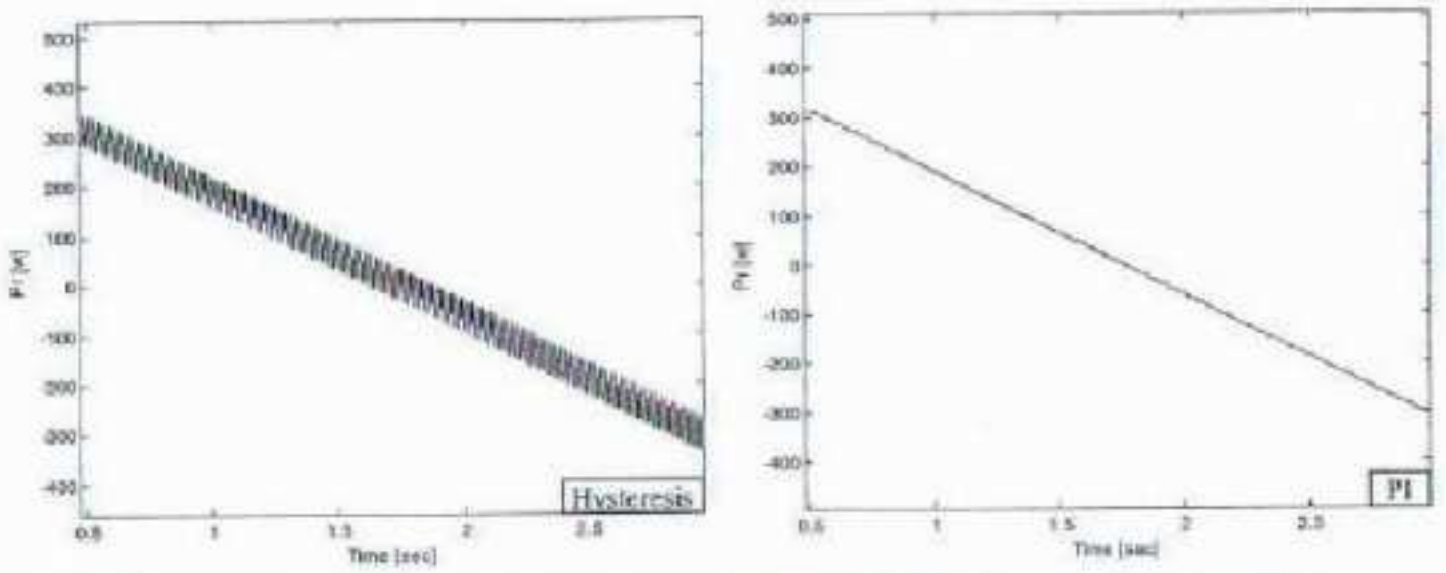
$$P_r = g P_s \qquad (17)$$

حيث يعبر g عن الانزلاق والذي يحدد بالعلاقة:

$$g = (\omega_s - \omega)/\omega_s \qquad (18)$$

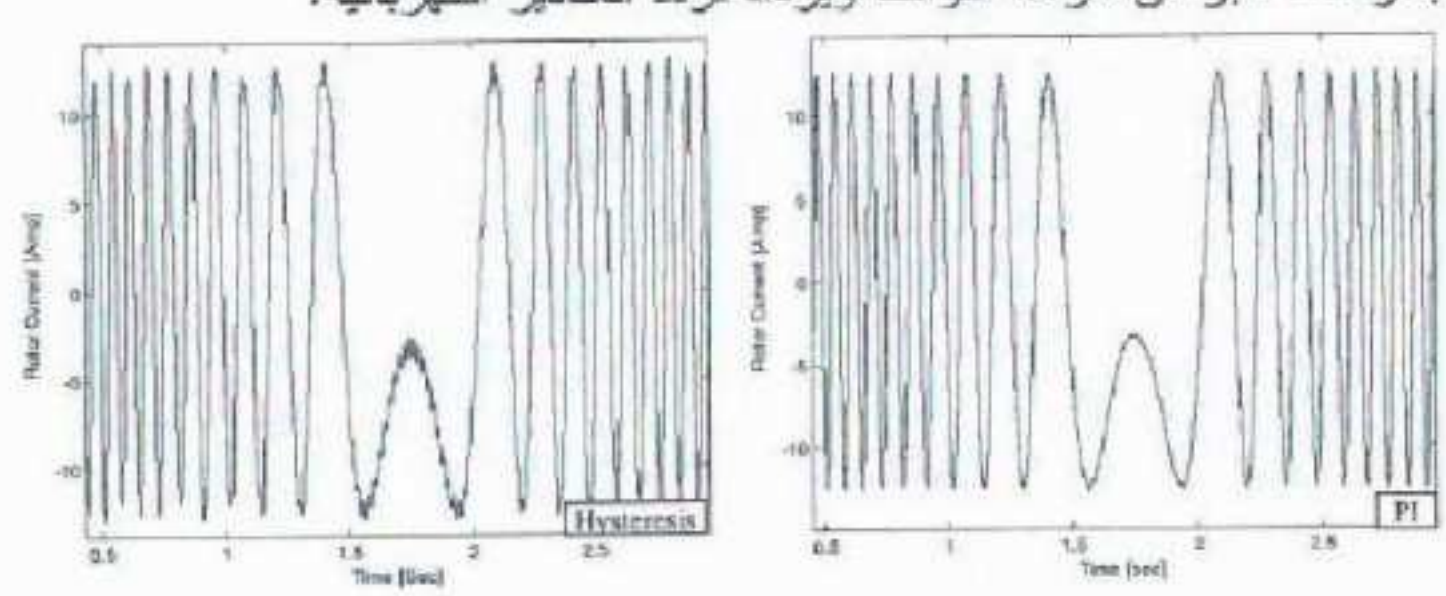
يبين الشكل (13) تغير قيمة P_r مع تغير سرعة الدوران، وتصـــبح هـــذه القيمة مساوية للصفر عند دوران المولد بسرعة التواقت وذلك بعـــد اهمـــال قيمـــة الضياعات في مقاومة ملفات الثابت والدوار، حيث نجد أن عمل المنظمات البطانية

يسبب تذبذب في استطاعة الدوار أكبر بالمقارنة مع منظمات PI وهذا نـــاتج عـــن تطبيق القيم الآنية لأشعة الجهد المتوفرة على خرج القالبة، بينما في حالة منظمـــات PI يتم تطبيق القيمة الوسطية لشعاع الجهد المطلوب من نظام القيادة الناتجـــة عـــن التعديل العرضي المطالي PWM.



شكل (13): الاستطاعة الكهربائية الفعلية المتبادلة بين الدوار والشبكة الكهربائية عبر المبدلة ثنائية الاتجاه بعد عبورها مرشح تمرير منخفض ذو ثابت زمني $\tau=10\,\mathrm{msec}$

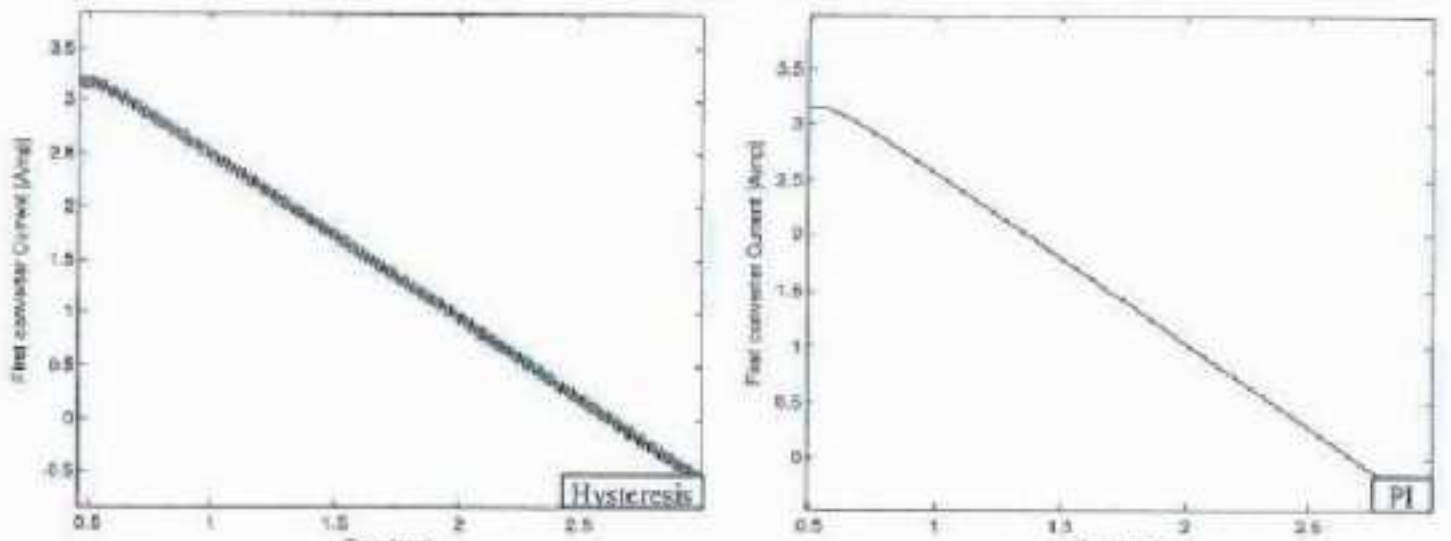
وفقاً لسرعة الدوران يقوم نظام التحكم بتحديد تردد المقادير الكهربائية فـــي الدوار، وهذا يبدو واضحاً في الشكل (14)، حيث ينخفض التردد حتى تصبح إشارة التيار ثابتة خلال المرور بسرعة التواقت، ثم يتغير توارد الأطوار عند عمل المولد بسرعات أكبر من سرعة التواقت ويزداد تردد المقادير الكهربائية.



الشكل (14): التيار i_{sa} في دوار المولد

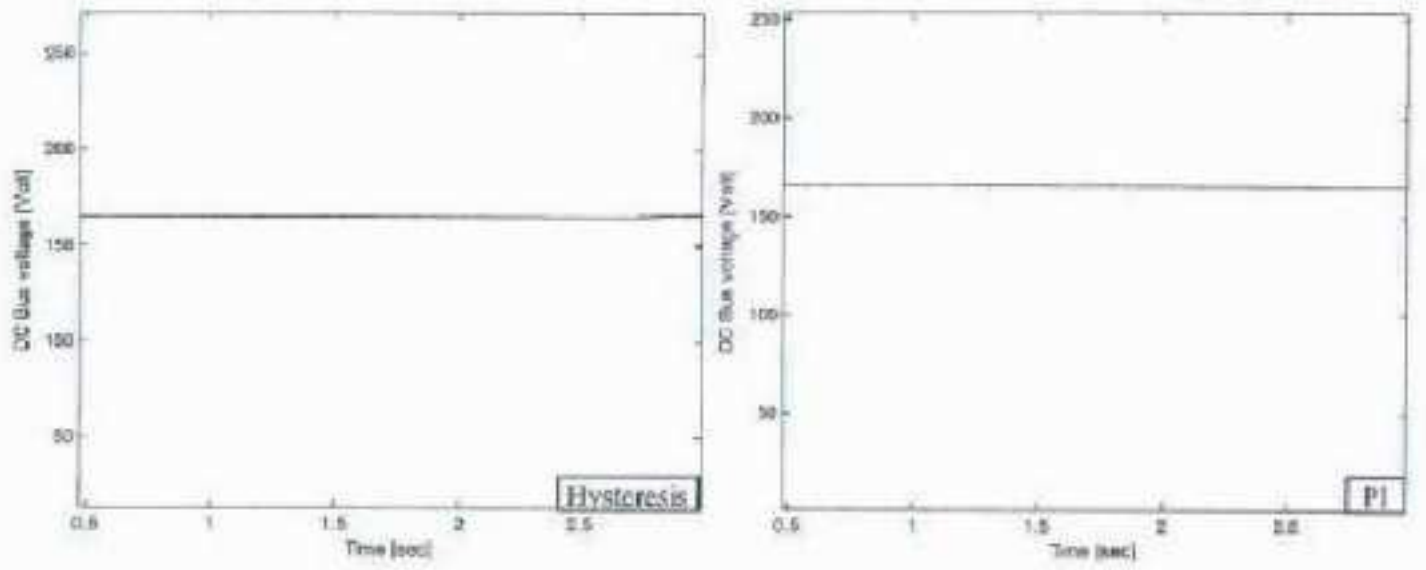
نجد في الشكل (15) تغيراً لقطبية التيار الذي تستجره المبدلة الأولى، وهذا ناتج عن انتقال المولد من مرحلة استجرار الاستطاعة الكهربائية الفعلية إلى مرحلة

تقديمها نتيجة تغير سرعة دوران المولد إلى ما فوق السرعة التزامنية.



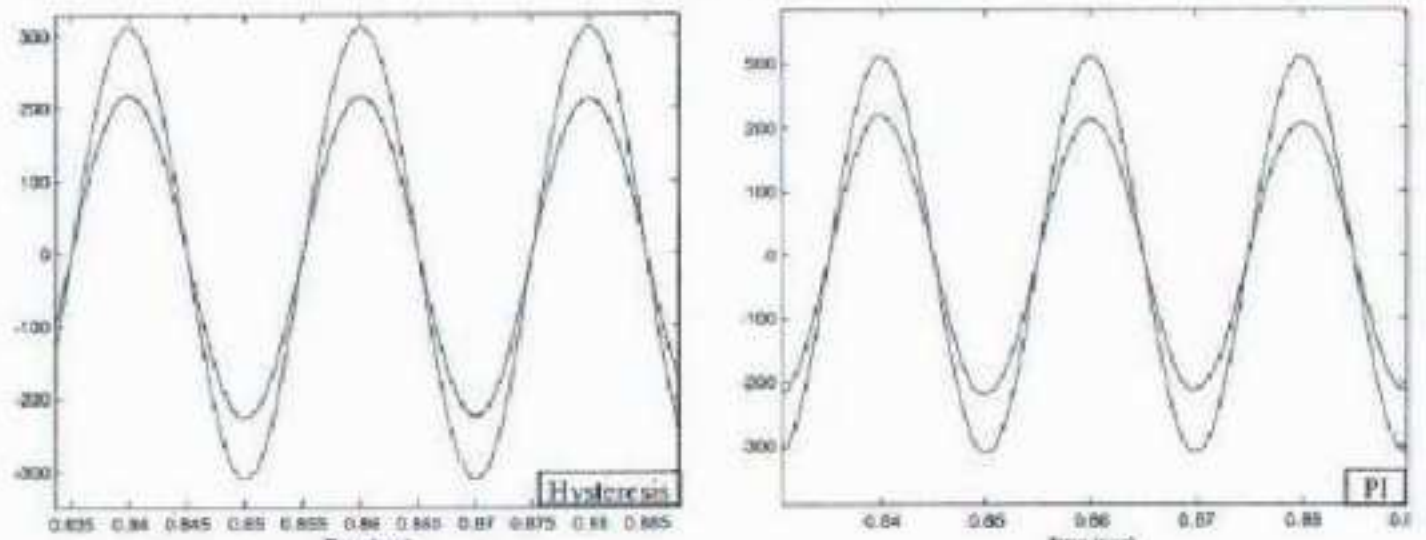
الشكل (15): تيار المبدلة الأولى (PWM Inverter) بعد عبوره مرشح تمرير منخفض

بعد إجراء عدة اختبارات وجد أن قيمة الجهد المستمر V_{dc} الواجب تطبيقه على أطراف المبدلة الأولى هي 165V، وهذه القيمة كافية لتوليد الجهود الثلاثية الواجب تطبيقها على أطراف الدوار لعمل المولد ضمن كامل مجال تغير السرعة، ويبين الشكل (16) ملاحقة نظام قيادة المبدلة الثانية للجهد المرجعي المطلوب V_{dc-ref} .

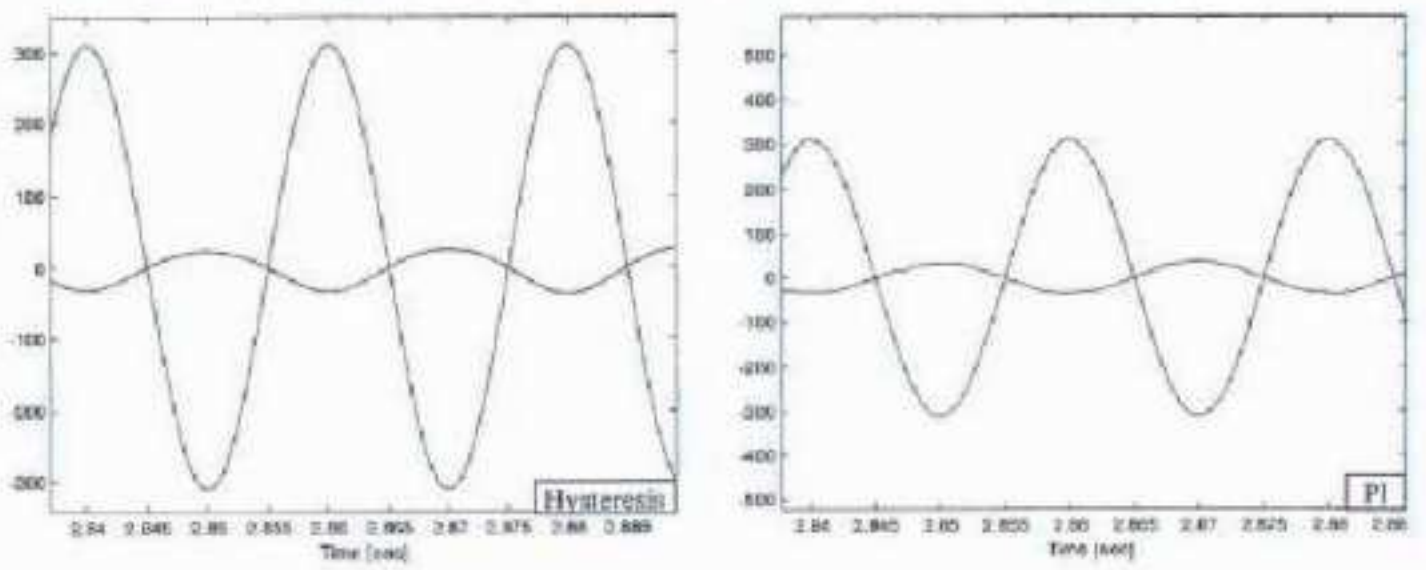


الشكل (16): جهد المستمر في خرج المبدلة الثانية V_{dc}

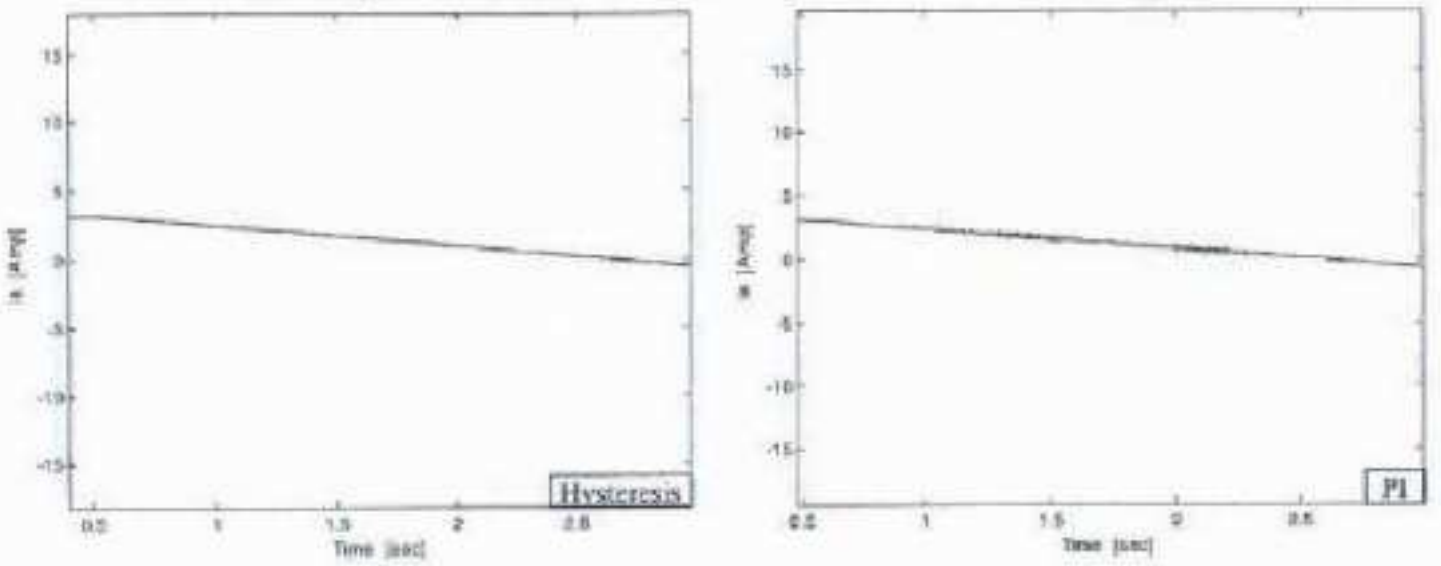
في الشكلين (17) و(18) نجد جهد الدخل للمبدلة الثانية V_g وتيار الدخل i_g بعد تضخيمه مئة مرة. وتوضح هذه الأشكال الأداء الجيد للمبدلة الثانية، حيث تم الحصول على عامل استطاعة واحدي وذلك خلال كامل مرحلة الاختبار.



الشكل (17): تيار وجهد الدخل للمبدلة الثانية عند العمل بسرعة أدنى من سرعة التوافق



الشكل (18): تيار وجهد الدخل للمبدلة الثانية عند العمل بسرعة أعلى من سرعة التوافق

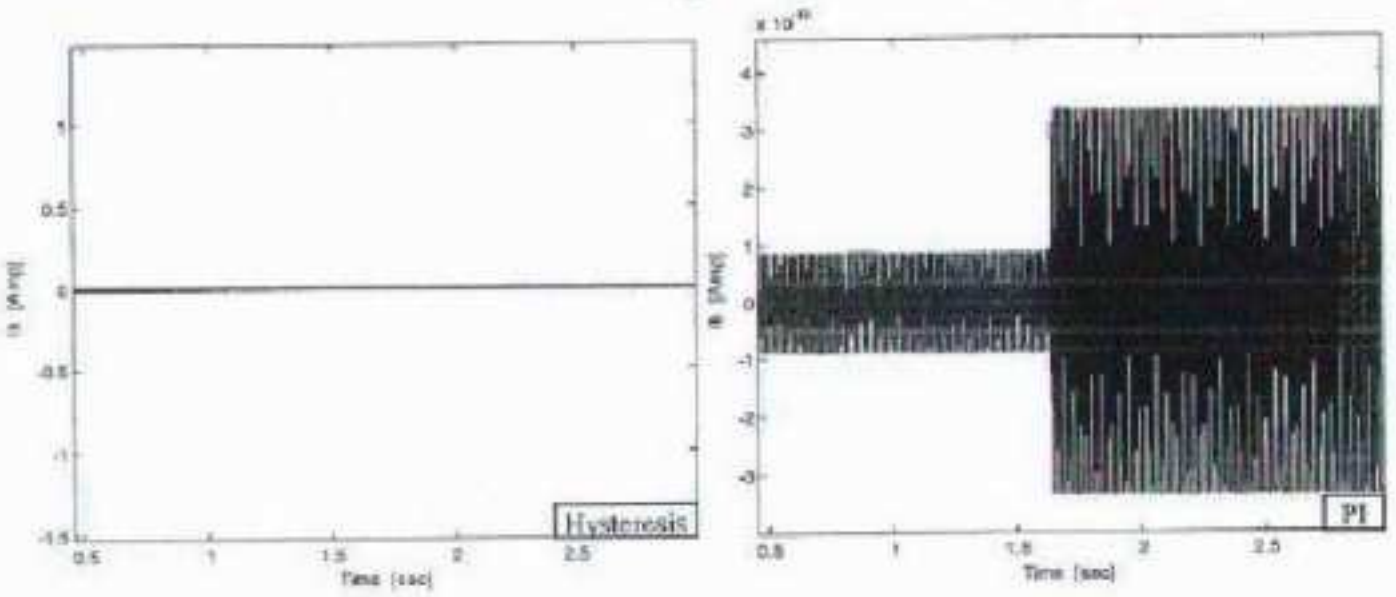


الشكل (19): التيار i_α في المبدلة الثانية

في الشكل (19) نجد أن قيمة التيار i_α في المبدلة الثانية، المعبر عنه في نظام محاور إحداثيات مرتبطة بالحقل الدوار، ينخفض تدريجياً مع ازدياد سرعة دوران الآلة حتى يغير اتجاهه، وهذا ناتج عن الارتباط غير المباشر بين هذا التيار والاستطاعة الفعلية المقدمة إلى دارة الدوار، حيث نجد في الشكل (13) أن

الاستطاعة الكهربائية الفعلية في الدوار انخفضت ومن ثم انعكس اتجاه مرورها.

يبين الشكل (20) التيار i_β في المبدلة الثانية، المعبر عنه في نظام محـــاور إحداثيات مرتبطة بالحقل الدوار، حيث يساوي الصفر خلال كامل عمـــل النظـــام، محافظاً بذلك على عامل استطاعة واحدي.



الشكل (20): التيار i_β في المبدلة الثانية

الخاتمة

تم في هذا البحث بناء نموذج للمولد التحريضي والمبدلة الثنائية بعد إيجـــاد الموديل الرياضي لكل منها في بيئة Matlab-Simulink، ثم صمم نظام تحكم لقيادة المولد التحريضي ذي الدوار الملفوف DFIG يعتمد المنظمات البطائية Hysteresis Controller للتحكم بسريان الاستطاعة الكهربائية بين المولد التحريضـــي وشـــبكة كهربائية ذات استطاعة لا نهائية، بالإضافة إلى تصميم نظام تحكم لقيـــادة المبدلـــة الثانية PWM Rectifier يهدف إلى تنظيم الجهد في خرج المبدلة والحفـــاظ علـــى عامل استطاعة واحدي.

بعد ذلك تمت مقارنة أداء هذه الخوارزمية مع أداء خوارزمية تحكم أخرى تعتمد في عملها على المنظمات التناسبية-التكاملية، حيث تم اختبار الخـــوارزميتين على كامل مجال تغير السرعة (70%-130% من السرعة التزامنية)، وبالاعتمـــاد على الشكلين (11) و(12) يمكن القول بأن المنظمـــات البطائيـــة ذات أداء عـــالٍ واستجابة سريعة، ولا تحتاج إلى عمليات معايرة وضبط للبارمترات كما الحال فـــي منظمات PI، ولا تحتاج أيضاً إلى عملية فك ارتباط بين مركبات المحورين α وβ،

كما أنها لا تحتاج إلى مرحلة التعديل النبضي PWM لتوليد نبضات القدح. وبمقارنة الشكلين (4) و(8) مع الشكلين (5) و(9) يمكن القول بأن خوارزمية التحكم المقترحة تمتلك بنية أبسط، وبالتالي يمكن بناؤها في بطاقات التحكم الرقمية بسهولةٍ أكبر، كما أن زمن تنفيذها سيكون أصغر، وهذا كله سينعكس ايجاباً على أداء نظام التوليد.

References

GAGNON R.; SYBILLE G.; BERNARD S.; PARE D.; CASORIA S.; LAROSE C.,2005- **Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly –Fed Induction Generator Driven by a wind Turbine**. *IPTS'05*, 19-23 June, Montreal, Canada, 162.

JIANG Z.; YU X., 2009- **Modeling and Control of an Integrated Wind Power Generation and Energy Storage System.** *IEEE PES '09*, Calgary, Alberta, Canada, 1 – 8.

JIUHE W.; HONGREN.; JINLONG Z.; HUADE L., 2006- **Study on Power Decoupling Control of Three Phase Voltage Source PWM Rectifiers.** *CISP '08*, Sanya, China, 194 – 198.

JUINNE-CHING L.; SHENG-NIAN Y., 2000- **A Novel Instantaneous Power Control Strategy and Analytic Model for Integrated Rectifier/Inverter System**. *IEEE Trans*, 15(6), 996-1006.

MALINOWSKI M., 2001- **Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers.** *Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology*, 127.

YIKANG H.; JIABING H.; RENDE Z., 2005- **Modeling and Control of Wind-Turbine Used DFIG under Network Fault Conditions.** *ICEMS 2005*, Zhejiang University, Nanjing, 2, 986 – 991.

Algorithm Synthesis and Analysis for Doubly Fed Induction Generator Control

A. A. Naassani *, A. Joukhadar **, A. K. Ghazal***
*Dept. of Electrical Drives, Faculty of Electrical & Electronic Engineering
University of Aleppo
**Dept. of Mechtronics, Faculty of Electrical & Electronic Engineering
University of Aleppo
***Postgraduate Student (MSc Candidate)

Abstract

Great attention, recently, has been paid to Doubly Fed Induction Generator (DFIG) in Variable Speed Fixed Frequency Systems (VSFS) due to its advantages. The investigated DFIG control system has a back-back converters fed rotor side while stator terminals are connected directly to grid utility.

This paper aims to derive new drive algorithm to control a bidirectional converter, in order to manage the active and reactive electrical power exchange with an infinite grid utility and to achieve a unity power factor operation.

The developed algorithm is based on hysteresis controller to control the converters. A comparison study is provided between the dynamic performance of hysteresis type controller and PI controller.

The entire DFIG control system has been completely built in MATLAB/SIMULINK environment independently from any other already built in models and blocks. Simulation results have shown that the hysteresis type controller response is superior to its counterpart PI controller response. Intensive simulation result and discussion validate the proposed drive algorithm.

Key Words: DFIG, PWM Rectifier, Hysteresis Controller

Received / /2010
Accepted / /2010