



كلية الهندسة - جامعة بغداد

Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية



اعضاء اتحاد الجامعات العربية

دراسة ومعالجة آثار التأخير الزمني الثابت على نظم التحكم الشبكية

محمد مرفه النيفاوي^{1*}، بسيم عمران²، جمانا دياب³

¹ قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سوريا، Morhaf_nef_89@hotmail.com

² كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سوريا، Bamran@albaath-univ.edu.sy

³ كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سوريا، jomanad162@gmail.com

* الباحث الممثل: محمد مرفه النيفاوي، الايميل: E-mail: Morhaf_nef_89@hotmail.com

نشر في: 31 آذار 2022

الخلاصة – يؤثر التأخير الزمني سلباً على أداء أنظمة التحكم الشبكية ويؤدي إلى الاهتزاز وعدم الاستقرار في الاستجابة التحكمية، وقد يكون التأخير الزمني ثابتاً ومتغيراً أو حتى عشوائياً. في هذا البحث تم دراسة تأثير التأخير الزمني الثابت على استقرار نظام التحكم الشبكي باستخدام المتحكم الأمثل، إذ تم دراسة استقرار نظام القدرة الكهربائية لثلاث مولدات متزامنة مع الأخذ بالحسبان التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية. وبينت المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج MATLAB تحسن في استقرار نظام القدرة الكهربائية وتناقص في اهتزاز متغيرات الحالة الإجمالية بشكل ملحوظ، حيث قورنت النتائج في الحلقة المفتوحة وفي الحلقة المغلقة بدون تأخير زمني باستخدام متحكم الأمثل ومع وجود التأخير الزمني، والتوصل إلى أن المتحكم الأمثل قادر على تحسين استقرار نظام التحكم الشبكي ضمن مجال محدد للتأخير الزمني.

الكلمات الرئيسية – "أنظمة التأخير الزمني"، "نظم التحكم الشبكية"، "المتحكم التريبيعي الخطي"، "استقرار نظم القدرة الكهربائية"

المتحكمات (Integral Proportional Controller: PID و Internal Model Controller: IMC) مع الأخذ بالحسبان التأخير الزمني وملاحظة أن استجابة المتحكم IMC أفضل من PID، بعد ذلك تم تصميم متحكم ضبابي مع وجود التأخير الزمني وفق مرحلتين هما Fuzzy With PID و Fuzzy With IMC وملاحظة أن المتحكم الضبابي مع IMC أفضل مقارنة بالمتحكمات السابقة من حيث البارامترات (Rise Time, Settling Time, Overshoot, Peak Time). بينما استخدم الباحث [13] Meghanasingh المتحكمات رقمية (PID, Fuzzy Logic, Smith Compensator للتغلب على مشكلة التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية لمحرك سيرفو ولاحظ أن معوض سميث يعطي نتائج أفضل من المتحكمات التقليدية في حال وجود تأخير زمني ضمن المنظومة التحكمية. في حين صمم مجموعة من الباحثين [2] متحكم (FUZZY Proportional Integral Controller متضمن Smith Predictor للتحكم بسرعة محرك DC من خلال شبكة اتصال، والهدف من تصميم المتحكم المقترح هو التغلب على التأخير الزمني الثابت والمتغير في NCS بالإضافة إلى معالجة ضياع الباكتات، وبالنتيجة أعطى المتحكم المقترح قدرة كبيرة في التغلب على التغيرات المفاجئة في NCS، وأظهرت المحاكاة الحاسوبية أداء عالي للمتحكم FPIC متضمن معوض سميث على مجال واسع من التأخير الزمني في NCS. وعمل مجموعة باحثين [7] على تحليل وتصميم متحكم FUZZY PID لنظام غير خطي يتضمن تأخير زمني وضياع للباكتات في نظم التحكم الشبكية، وقارن هذا البحث بين عدة طرق (المتحكم PID الضبابي بالاعتماد على خوارزمية Particle Swarm Optimization: PSO)، المتحكم PID الضبابي بالاعتماد على الخوارزمية الجينية (GENETIC ALGORITHM:GA)، المتحكم PID الضبابي، المتحكم PID التقليدي). وأشارت المحاكاة الحاسوبية إلى أن فعالية المتحكمات PID الضبابية المعتمدة على خوارزمية PSO و GA أفضل من المتحكمات الأخرى، بالإضافة إلى استنتاج أن المتحكم PID الضبابي مع خوارزمية PSO أفضل منه مع خوارزمية GA. بينما عمل الباحث [4] على تحليل وتصميم متحكم ضبابي مبني على نموذج ضبابي تكيفي لتخلص من تأثير التأخير الزمني الموجود في النظام وتأمين إشارة

1. المقدمة

إن تبادل المعلومات في نظم التحكم الشبكية (Networked Control Systems: NCS) بين عناصر الشبكة له تأخيرات زمنية مختلفة، تعرف على أنها التأخير الزمني الناجم عن الشبكة (Induced Delay Networked)، ويقسم إلى نوعين رئيسيين هما التأخير الزمني المستقل (Time Delay Independent) إذ أن استقرار المنظومة التحكمية لا يتأثر بالتأخير الزمني، بينما في التأخير الزمني غير المستقل (Delay dependent) فإن استقرار المنظومة التحكمية يتأثر وبشدة بقيمة التأخير الزمني. وتعاني بعض الأنظمة الصناعية [3] بالإضافة إلى أنظمة أخرى مثل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والاقتصادية ونظم التحكم الشبكية [12] [13] بأنواعها المختلفة السلوكية واللاسلكية [1] وغيرها من النظم التحكمية من تأخيرات زمنية في سلوكها الديناميكي، وقد يتواجد هذا التأخير في الجملة نفسها أو ينشأ من المتحكم [1]، ويؤدي بدوره إلى زيادة اضطراب حلقة التحكم، وبالتالي فإن أنظمة التحكم تميل إلى الاهتزاز ويحدث تشوه وعدم استقرار في الاستجابة التحكمية وضياع للباكتات أو وصولها وفق ترتيب خاطئ، وقد يكون هذا التأخير ثابتاً أو متغيراً أو حتى عشوائياً، مما يجعل نمذجة التأخير الزمني منطقة بحثية صعبة للغاية. وسيتم التركيز ضمن هذه الورقة البحثية على تأثير التأخير الزمني الثابت على استقرار نظم التحكم الشبكية دون التطرق إلى نوع الشبكة وطرق الجدولة والبروتوكول المستخدم فيها.

2. الدراسات السابقة

صمم كل من Anuradha Purty و Rajendra Murmu [3] متحكمين كل منهما يتحكم بمستوى سائل في خزان مياه، حيث أن النظام المدروس عبارة عن خزان مياه وهو غير خطي، ونظام التحكم المستخدم مؤلف من منخلين ومخرجين، وصف الباحثان المنظومة التحكمية بنموذج رياضي محدد يتضمن تأخير زمني معروف يتعلق بطول الأنبوب لخرج كل من خزاني المياه، بعد ذلك تم إجراء مقارنة لدراسة استجابة عدة أنواع من

7. التوسع إذ من السهل إضافة أو إزالة احدى عناصر التحكم مثل حساس أو محرك.
8. يمكن تعديلها بسهولة أو تحديث بياناتها.
9. قدرة على دمج المعلومات العامة لاتخاذ قرارات ذكية على مساحات جغرافية كبيرة.

4.3 العوامل التي تؤثر على أداء نظم التحكم الشبكية

1. قيود الاتصالات.
2. التحكم من مسافات بعيدة لكن مقابل تأخيرات زمنية قد تكون ثابتة، متغيرة أو حتى عشوائية.
3. فقدان بعض البيانات والتأخير في الوصول إلى بعضها الآخر بسبب طبيعة الشبكة يجعل النظام عشوائياً.
4. فترة تقطيع متغيرة مع الزمن.
5. حزم تراسل خاطئة بسبب عدم كفاءة الشبكة.
6. زيادة تحميل على الشبكة.

وبالتالي فإن وجود هذه الظواهر في الشبكة يمكن أن يقلل من أداء حلقة التحكم بشكل فعال ويؤدي بدوره إلى عدم استقرار الجملة التحكمية بالكامل.

4.4 النموذج الرياضي لوحدة NCS مستقلة

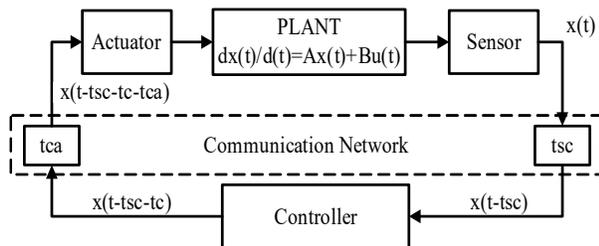
يوصف النموذج الرياضي لوحدة مفردة NCS باستخدام معادلات الحالة وفق العلاقة (1):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

يعبر $x(t) \in R^n$ عن شعاع متغيرات الحالة للنظام، و $u(t) \in R^m$ عن دخل النظام، $w(t) \in R^l$ إشارة الضجيج التي يمكن أن يتعرض لها النظام الشبكي، $y(t) \in R^p$ خرج النظام، بينما تكون أبعاد مصفوفات الحالة وفق الاتي $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $F \in R^{n \times l}$, $C \in R^{p \times n}$, $D \in R^{p \times m}$.

وبما أنه ضمن نظم التحكم الشبكية فإن المتحكم يتصل مع النظام الشبكي المراد التحكم به عبر شبكة تحكمية، لذا فإن التأخير الزمني الناتج عن الشبكة لابد أن يؤخذ بعين الاعتبار وفق الشكل (2)، وبالتالي تعطى إشارة التحكم بالعلاقة (2):

$$u(t) = -Kx(\tau) = -Kx(t - \tau_{SC} - \tau_C - \tau_{Ca}) \quad (2)$$



الشكل 2: وحدة تحكم شبكية مع أخذ التأخيرات الزمنية بالحسبان

حيث τ التأخير الزمني الإجمالي و K مصفوفة الريبج الخلفي، ومن الممكن للتأخير الزمني أن يكون ثابتاً، متغيراً أو حتى عشوائياً وعندها يكون الشكل العام لعلاقة التأخير الزمني وفق العلاقة (3):

$$\tau = \tau_{SC} + \tau_C + \tau_{Sa} + dh \quad (3)$$

التحكم المناسب للجملة. ودرس Escamilla, N. Mort استجابة كل من المتحكم العائم التقليدي FZ-PI والمتحكم العائم التكيفي PAFZ-PI. واستنتج أن البنية التكيفية أكثر ممانعة لتغيرات قيمة التأخير الزمني حيث لاحظ أن وجود التأخير الزمني أثر سلباً على استجابة النظام من حيث ظهور الاهتزاز حول نقطة الاستقرار (التجاوز) وازدياد التجاوز مع زيادة التأخير.

3. منهجية البحث

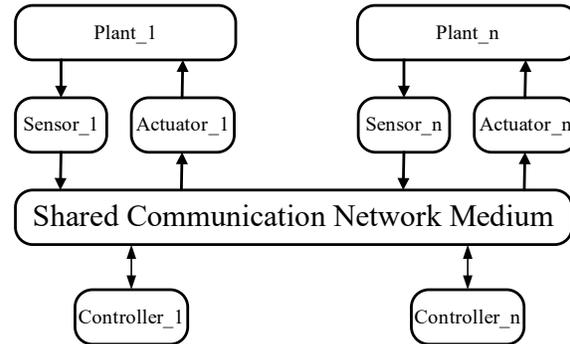
يتجلى هدف البحث من خلال النقاط الآتية:

1. استنتاج مجموعة من العلاقات الرياضية تمكن من نمذجة أي نظام تحكم شبكي، مع الأخذ بالحسبان التأخيرات الزمنية الثابتة بين الأنظمة الفرعية المشكلة للنظام الشبكي، بحيث تكون العلاقة بينها خطية.
2. نمذجة نظام تحكم شبكي مؤلف من ثلاث مولدات متزامنة في نظام قدرة كهربائية بوجود التأخيرات الزمنية الثابتة بينها.
3. تصميم متحكم أمثلي LQR لنظام التحكم الشبكي يهدف إلى الحد من تأثير التأخير الزمني على استقرار المنظومة التحكمية.

4. النتائج والمناقشة

4.1 نظم التحكم الشبكية

تعرف نظم التحكم الشبكية NCS أنها نظام تحكم موزع في الزمن الحقيقي (Distributed Real-Time Control Systems) لأنها تجمع بين أنظمة التحكم وشبكات الاتصالات ونظرية المعلومات وعلوم الحاسب، وهي عبارة عن منظومة تحكم واتصالات متكاملة (ICCSs: Systems Control and Integrated Communication) حيث تكون الجملة متحكماً بها بواسطة شبكة اتصالات، والخاصية المميزة لأنظمة التحكم الشبكية هي أن تبادل المعلومات (الدخل المرجعي، خرج الجملة، إشارة التحكم) بين عناصر نظام التحكم (حساسات، متحكمات، مشغلات) يتم باستخدام الشبكة كما في الشكل (1).



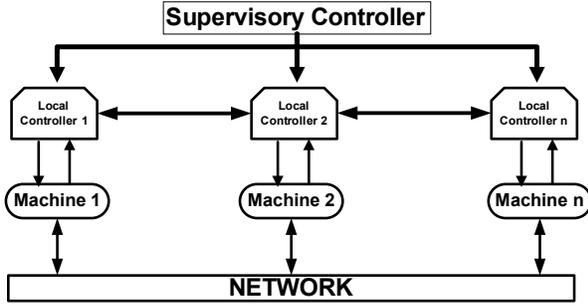
الشكل 1: الشكل العام لنظام التحكم الشبكي

4.2 مزايا نظم التحكم الشبكية

1. الجزئية.
2. انخفاض التكاليف.
3. انخفاض الوزن.
4. اللامركزية في التحكم.
5. التحليل والتشخيص المتكامل.
6. تركيب بسيط وسهولة في الصيانة.

وعند تطبيق نظام التحكم وفق البنية الهرمية المعدلة الموضحة في الشكل (5) وهي البنية المعتمدة في تشكيل نظام التحكم الشبكي المدروس، يصبح قانون التحكم مؤلف من المتحكم المحلي Local والإشرافي Supervisor وفق العلاقة (6):

$$u_{(i)} = u_i^{local} + u_i^{Supervisor} = - (K_{ii}x_{(i)} + \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij} x_{(j)}(t - \tau_{ji})) \quad (6)$$



الشكل 3: البنية الهرمية المعدلة ضمن نظم التحكم الشبكية.

بتعويض العلاقة (6) في العلاقة (4) نحصل على العلاقة (7)

$$\begin{aligned} x_{(1)}(t) &= A_{11}x_{(1)} - B_1K_{11}x_{(1)}(t) + \sum_{j=2}^n A_{1j}x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_1K_{1j}x_{(j)}(t - \tau_{j1}) \\ &\quad + F_1W_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) &= A_{22}x_{(2)} - B_2K_{22}x_{(2)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{2j}x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_2K_{2j}x_{(j)}(t - \tau_{j2}) \\ &\quad + F_2W_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) &= A_{33}x_{(3)} - B_3K_{33}x_{(3)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{3j}x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_3K_{3j}x_{(j)}(t - \tau_{j3}) \\ &\quad + F_3W_{(3)}(t) \\ x_{(n)}(t) &= A_{nn}x_{(n)} - B_nK_{nn}x_{(n)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{nj}x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_nK_{nj}x_{(j)}(t - \tau_{jn}) \\ &\quad + F_nW_{(n)}(t) \\ y_{(n)}(t) &= C_nx_{(n)}(t) + D_nu_{(n)}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

وعند تطبيق قانون تقريب الفرق المحدود لحساب التركيب الرياضي $x_{(j)}(t - \tau_{ji})$ الموجود في العلاقة (7) والذي يمكن برهانه كالاتي:

من أجل تابع $f(t)$ يكون الشكل العام لسلسلة تايلور هي:

حيث τ_{SC} التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم، τ_C التأخير الزمني في المتحكم، τ_{Sa} التأخير الزمني بين المتحكم والمشغل، يعبر dh عن ضياع الباكيتات وبالتالي فإن d هي عدد الباكيتات الضائعة خلال الشبكة و h فترة أخذ العينات.

4.5 النموذج الرياضي لنظام تحكم شبكي مؤلف من n نظام تحكمي فرعي

تنوزع نظم القدرة الكهربائية بأنواعها المختلفة الحرارية والمائية والريحية والنوية ونظم الطاقة المتجددة على مساحات جغرافية واسعة، ومن الممكن للمنطقة الواحدة أن تتألف من نوع أو أكثر من المولدات لتغذية الحمل المطلوب. لذلك تعتبر دراسة نظام التحكم الشبكي القادر على توصيل عدة مناطق جغرافية منطقة بحثية صعبة للغاية وتتعرض لمجموعة من العوامل التي تساهم في تغير الاستقرار للنظام ككل ومن أهمها التأخير الزمني بين النظم الفرعية وضياع الباكيتات ضمن الشبكة، حيث أنه عندما يتغير الحمل في منطقة محددة عندها فإن كل المناطق المتصلة ضمن نظام التحكم الشبكي ستتأثر بتغير الحمل في تلك المنطقة وبالتالي على المتحكمات المحلية المسؤولة عن كل منطقة أن تتبادل معلوماتها مع بعض البعض ضمن الشبكة بهدف إعادة الاستقرار للمنظومة الشبكية بأكملها. تتألف نظم التحكم الموزعة مثل نظم القدرة الكهربائية من مجموعة من النظم الفرعية المتصلة مع بعضها حيث لدينا n نظام فرعي لكل منه متحكم خاص به تتصل هذه النظم مع بعضها البعض وتتبادل المعلومات فيما بينها عبر شبكة اتصال وفق بروتوكول محدد.

وبالتالي يكون النموذج الرياضي لنظام تحكم فرعي متصل مع بعضه البعض عبر شبكة تحكمية وفق العلاقة (4):

$$\begin{aligned} x_{(1)}(t) &= A_{11}x_{(1)}(t) + B_1u_{(1)}(t) + \sum_{j=2}^n A_{1j}x_{(j)}(t) \\ &\quad + F_1W_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) &= A_{22}x_{(2)}(t) + B_2u_{(2)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{2j}x_{(j)}(t) \\ &\quad + F_2W_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) &= A_{33}x_{(3)}(t) + B_3u_{(3)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{3j}x_{(j)}(t) \\ &\quad + F_3W_{(3)}(t) \\ x_{(n)}(t) &= A_{nn}x_{(n)}(t) + B_nu_{(n)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} A_{nj}x_{(j)}(t) \\ &\quad + F_nW_{(n)}(t) \\ y_{(n)}(t) &= C_nx_{(n)}(t) + D_nu_{(n)}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

حيث $x_{(1)}(t), x_{(2)}(t), \dots, x_{(n)}(t)$ تعبر عن مشتق أشعة متغيرات الحالة و $u_{(1)}, u_{(2)}, \dots, u_{(n)}$ تعبر عن أشعة الدخل، بينما أشعة الضجيج هي $W_{(1)}, W_{(2)}, \dots, W_{(n)}$ ، و n هي عدد الأنظمة الفرعية المتصلة ضمن نظام التحكمي الشبكي، و A_{ij} مصفوفة تعبر عن تأثير النظام الفرعي i بالنظام الفرعي j ، و y تعبر عن خرج النظام.

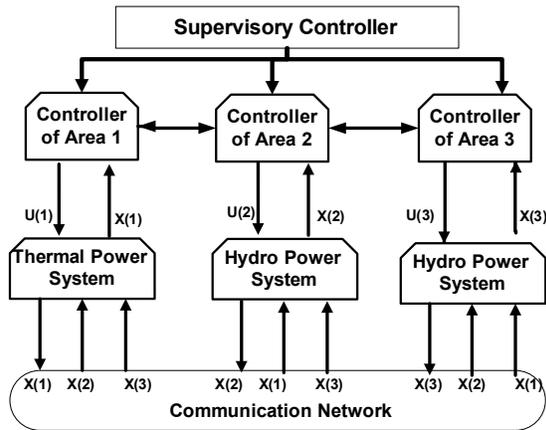
يمكن إعادة كتابة العلاقة (4) بشكل عام وفق العلاقة (5):

$$\begin{aligned} x_{(i)}(t) &= A_{ii}x_{(i)}(t) + B_iu_{(i)}(t) \\ &\quad + F_{(i)}W_{(i)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{ij}x_{(j)}(t), \\ &\quad i = 1, 2, \dots, n \\ y_{(i)}(t) &= C_ix_{(i)}(t) + D_iu_{(i)}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

فيما بينها عبر شبكة اتصال تحكمية وبالتالي تحسين أداء النظام التحكمي الكلي. وبما أن نظام القدرة الكهربائية هو عبارة عن نظام ضخم وموزع على مساحة جغرافية واسعة ويعتمد على الاتصال الشبكي للتحكم فيه فيمكن اعتباره نظام تحكم شبكي NCS كبير.

تعتبر المولدات الحرارية والمائية من أكثر المولدات انتشاراً حول العالم، لذلك تم في هذا البحث دراسة نظام قدرة كهربائية [5,8,6] موضح في الشكل (4) وهو عبارة عن ثلاث مناطق جغرافية تتألف كل منطقة من مولد للطاقة الكهربائية، تتصل هذه المناطق فيما بينها عبر شبكة تحكمية.

تتألف المنطقة الأولى من محطة واحدة للطاقة الحرارية (360MVA)، والمنطقة الثانية من محطة واحدة للطاقة الكهرومائية (503MVA) بينما الثالثة من محطة واحدة للطاقة الكهرومائية (1673MVA) [5,8,6] وتهدف هذه الدراسة إلى تطبيق العلاقة (11) على نظام التحكم الشبكي المدروس.



الشكل 4: ثلاث مولدات متزامنة يتم التحكم بها عن طريق شبكة تحكمية

يتألف النموذج الرياضي للمولد المتزامن من أربع متغيرات حالة وهي:

$$X^T = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd}]$$

حيث $\Delta\delta$ تعبر عن تغير زاوية القدرة لدوار المولد، $\Delta\omega$ تغير السرعة الزاوية لدوار المولد $\Delta E'_q$ تغير القوة المحركة الكهربائية العابرة، ΔE_{fd} تغير جهد حقل التهييج.

ويتم توصيف النموذج الرياضي لكل مولد من المولدات الثلاثة انطلاقاً من معادلات الحالة التي تصفها وهي [5,8,6]

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\delta}(t) &= \omega_0 \Delta\omega(t) \\ \Delta\dot{\omega}(t) &= -\frac{K_1}{M} \Delta\delta(t) - \frac{D}{M} \Delta\omega(t) - \frac{K_2}{M} \Delta e_q(t) \\ \Delta^* E'_q(t) &= \frac{-K_4}{T'_{d0}} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{1}{K_3 \cdot T'_{d0}} \cdot \Delta E'_q(t) + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E_{fd}(t) \\ \Delta^* E_{fd}(t) &= \frac{-K_A \cdot K_5}{T_A} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{K_A \cdot K_6}{T_A} \Delta E'_q(t) \\ &\quad - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd}(t) + \frac{K_A}{T_A} U(t) \end{aligned}$$

يعبر الجدول (1) عن البارامترات التي تدخل في حساب النموذج الرياضي للمولد [5,8,6]:

$$R_n(f(t), \tau) = \sum_n \frac{f^{(n)}(\varepsilon)}{n!} \tau^{(n)} \quad (8)$$

وبالتالي فإن التركيب الرياضي $x(t - \tau)$ يمكن الحصول عليه بعد تطبيق سلسلة تايلور وفق الآتي:

$$\begin{aligned} x(t - \tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{(n)}(t)}{n!} \tau^n \\ x(t - \tau) &= x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) \\ &\quad + \left(-\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + R_4(x, \tau) \\ x(t - \tau) &\approx x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) + \left(-\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) \\ x(t - \tau) &= x(t) - \tau x'(t) + R_2(x, \tau) \quad (9) \end{aligned}$$

من العلاقة (9) نجد أن التركيب الرياضي $R_2(x, \tau)$ يعتمد على التأخير الزمني ومشتقات المراتب العليا للتابع $x(t)$. إذا كان التأخير الزمني صغير بما فيه الكفاية فإن البارامترات المكونة للتابع الرياضي $R_2(x, \tau)$ يمكن تجاهلها لتصبح العلاقة (9) بشكلها العام وفق العلاقة (10):

$$x(t - \tau) = x(t) - \tau x'(t) \quad (10)$$

وعند تعويض العلاقة (10) في (7) نحصل على العلاقة النهائية (11):

$$\begin{aligned} x_{(1)}(t) &= (A_{11} - B_1 K_{11}) x_{(1)}(t) + \sum_{j=2, j \neq i}^n (A_{1j} - B_1 K_{1j}) x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=2, j \neq i}^n \tau_{j1} B_1 K_{1j} x_{(j)}(t) + F_1 w_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) &= (A_{22} - B_2 K_{22}) x_{(2)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{2j} - B_2 K_{2j}) x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n \tau_{j2} B_2 K_{2j} x_{(j)}(t) + F_2 w_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) &= (A_{33} - B_3 K_{33}) x_{(3)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{3j} - B_3 K_{3j}) x_{(j)}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1, j \neq i}^n \tau_{j3} B_3 K_{3j} x_{(j)}(t) + F_3 w_{(3)}(t) \\ x_{(n)}(t) &= (A_{nn} - B_n K_{nn}) x_{(n)}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{nj} \\ &\quad - B_n K_{nj}) x_{(j)}(t) - \sum_{j=1, j \neq i}^n \tau_{jn} B_n K_{nj} x_{(j)}(t) \\ &\quad + F_n w_{(n)}(t) \\ y_{(n)}(t) &= C_n x_{(n)}(t) + D_n u_{(n)}(t) \quad (11) \end{aligned}$$

4.6 دراسة تأثير التأخير الزمني على نظام تحكم شبكي مؤلف من ثلاثة مولدات متزامنة

يوجد نوعين من المتحكمات في نظم القدرة الكهربائية، النوع الأول هو المتحكم المحلي المسؤول عن أمثلة أداء النظام الفرعي المراد التحكم به دون الأخذ بالحسبان المعلومات المرسله عبر الشبكة، بينما النوع الآخر هو المتحكم العام الذي يستخدم لتنسيق المعلومات بين النظم الفرعية المتصلة

$$y(t) = C_1x_{(1)}(t) + C_2x_{(2)}(t) + C_3x_{(3)}(t)$$

ويمكن كتابة معادلات الحالة للنظام الشبكي بالشكل المصفوفي التالي:

$$\begin{bmatrix} x_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3] \begin{bmatrix} x_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) \end{bmatrix}$$

4.7 تصميم متحكم LQR:

إن الغرض من التحكم بالنظم هو جعل النظام يعمل بمواصفات محددة، ويحقق إنجازاً بمعايير محددة، ويتم ذلك عادة بتصميم متحكم يؤمن إشارة (إشارات) العمل اللازمة لقيادة النظام، ويجبره على تحقيق المواصفات المطلوبة سواء كانت مواصفات استجابة محددة مثل زمن الوصول إلى وضع الاستقرار أو خطأ الحالة الدائمة أو متطلبات استقرار محددة، أو متطلبات اقتصادية أو دقة ووثوقية.

التحكم الأمثل بمفهوم لياياف هو تصميم المتحكم في فضاء الحالة (أو الحصول على بارامتر ما) يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم لياياف.

تتم عمليات الأمثلة رياضياً بالحصول على القيمة العظمى maximization، أو الصغرى minimization، لتابع يسمى تابع الكلفة أو دالة الإنجاز التي تمثل المواصفة التي نريدها كأفضل ما يمكن. مثلاً قد تكون دالة الإنجاز مردود الإنتاج لالة محددة، عملية الأمثلة في هذه الحالة هي الحصول على القيمة العظمى لدالة الإنجاز. وقد تكون دالة الإنتاج مقدار الخطأ المرتكب في إنجاز عمل ما هنا نريد الحصول على القيمة الصغرى لدالة الإنجاز [9,14].

يوصف النظام الخطي غير المتجانس بالعلاقة (12):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (12)$$

حيث U إشارة الدخل للنظام أو إشارة التحكم وهي بطول r. ان دالة الإنجاز التربيعية لهذا النظام كما في العلاقة (13):

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (13)$$

حيث إن Q و R مصفوفات مربعة متناظرة موجبة التحديد (Positive Semidefinition) أو شبه موجبة التحديد (Positive Semidefinition: Pd)، المصفوفة R أبعادها r×r، حيث r طول شعاع الدخل.

نريد أن نوجد إشارة التحكم التي تجعل النظام مستقرًا بالشكل الأمثل أو أن نوجد المتحكم (مصفوفة التغذية الخلفية K) الذي يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم لياياف، ويتم التحكم بهذا النوع من النظم حسب قانون التحكم الخطي المعطى بالعلاقة (14):

$$U = -kx = -R^{-1}B^T P X \quad (14)$$

حيث K تمثل مصفوفة الربح الخلفي، و P هي حل معادلة Ricati المصفوفية الخطية ونحصل على قيمتها من حل المعادلة (15) [10]:

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (15)$$

الجدول 1: بارامترات النموذج الرياضي للمولد الكهربائي

$K_2 K_1$	ثوابت مشتقة من العزم الكهربائي
$K_4 K_3$	ثوابت مشتقة من جهد الحقل
$K_6 K_5$	ثوابت مشتقة من الجهد الطرفي
T_A	الثابت الزمني لمنظم الجهد
K_A	ربح منظم الجهد
T'_{d0}	الثابت الزمني العابر للدائرة المفتوحة على المحور المباشر
M	معامل القصور الذاتي
u_E	دخل إشارة تحكم التهيج

وبالتالي يمكن كتابة معادلات الحالة بالشكل المصفوفي التالي للحصول على مصفوفات الحالة التي تمثل النموذج الرياضي للمولد:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & -\frac{1}{T'_{d0} K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} u_E(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix}$$

تم تصميم المولدات كثلاث أنظمة فيها وحدات تحكم محلية تتبادل المعلومات المعبرة عن حالاتها عبر الشبكة، ويتم اختيار متغيرات الحالة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي (12) متغير حالة لكل مولد أربع متغيرات) وفق الآتي:

$$\begin{aligned} \text{GENERATOR1, } X_{(1)}^T &= [\Delta\delta_1 \quad \Delta\omega_1 \quad \Delta E'_{q1} \quad \Delta E_{fd1}] \\ \text{GENERATOR2, } X_{(2)}^T &= [\Delta\delta_2 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta E'_{q2} \quad \Delta E_{fd2}] \\ \text{GENERATOR3, } X_{(3)}^T &= [\Delta\delta_3 \quad \Delta\omega_3 \quad \Delta E'_{q3} \quad \Delta E_{fd3}] \end{aligned}$$

ويتم توصيف نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مولدات مترامنة باستخدام مصفوفات الحالة، حيث أن $A_{ij} \in R^{4 \times 4}$, $B_i \in R^{4 \times 1}$, $F_i \in R^{4 \times 1}$, $A \in R^{12 \times 12}$, $B \in R^{12 \times 3}$, $F \in R^{12 \times 3}$. [5,8,6].

وبالتالي تكون معادلات الحالة وفق العلاقة (4) التي تصف نظام التحكم الشبكي الإجمالي المؤلف من ثلاث أنظمة فرعية وفق الآتي:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(1)}(t) &= A_{11}x_{(1)}(t) + A_{12}x_{(2)}(t) \\ &\quad + A_{13}x_{(3)}(t) + B_1u_{(1)}(t) + F_1w_{(1)}(t) \\ \dot{x}_{(2)}(t) &= A_{21}x_{(1)}(t) + A_{22}x_{(2)}(t) \\ &\quad + A_{23}x_{(3)}(t) + B_2u_{(2)}(t) + F_2w_{(2)}(t) \\ \dot{x}_{(3)}(t) &= A_{31}x_{(1)}(t) + A_{32}x_{(2)}(t) \\ &\quad + A_{33}x_{(3)}(t) + B_3u_{(3)}(t) + F_3w_{(3)}(t) \end{aligned}$$

ومن ثم يصبح النظام مع المتحكم الأمثل حسب العلاقة (16):

$$\dot{x}(t) = (A - BR^{-1}B^T P)x(t) + Bu(t) \quad (16)$$

عند تطبيق التحكم الأمثل على نظام التحكم الشبكي المدروس نختار قيمة Q و R وفق القيم التالية:

$$Q = [1.0 \ 1.0 \ 1.0 \ 0.001 \ 4.0 \ 10.0 \ 10.0 \ 0.001 \ 10.0 \ 10.0 \ 10.0 \ 0.001]$$

$$R = [1000 \ 1000 \ 1000]$$

وبالتالي تكون أرباح المتحكم وفق الشكل الاتي:

$$K_{11} = [0.016816 \ -1.248700 \ -0.112220 \ -0.005098]$$

$$K_{12} = [-0.107890 \ 4.871900 \ -0.000435 \ 0.000079]$$

$$K_{13} = [-0.042185 \ 11.53600 \ -0.014631 \ -0.000649]$$

$$K_{21} = [0.006097 \ 0.000017 \ 0.004761 \ 0.000089]$$

$$K_{22} = [-0.036174 \ -0.756290 \ -0.074018 \ -0.003454]$$

$$K_{23} = [-0.023896 \ -0.11324 \ 0.003539 \ 0.0001204]$$

$$K_{31} = [0.0035432 \ -0.48189 \ 0.020087 \ -0.000811]$$

$$K_{32} = [0.0063483 \ 1.5655 \ 0.0023165 \ 0.00013378]$$

$$K_{33} = [-0.064655 \ -7.2562 \ 0.069285 \ -0.0032193]$$

حيث أن أبعاد المصفوفات:

$$Q \in R^{1 \times 12}, R \in R^{1 \times 3}, K_{ij} \in R^{1 \times 4}, K \in R^{3 \times 12}$$

وبالتعويض في العلاقة النهائية (11) نحصل على معادلات الحالة لنظام التحكم الشبكي بوجود المتحكم.

$$\dot{x}_{(1)}(t) = (A_{11} - B_1 K_{11})x_{(1)}(t) + (A_{12} - B_1 K_{12})x_{(2)}(t) + (A_{13} - B_1 K_{13})x_{(3)}(t) - \tau_{21} B_1 K_{12} x_{(2)}(t) - \tau_{31} B_1 K_{13} x_{(3)}(t) + F_1 w_{(1)}(t)$$

$$\dot{x}_{(2)}(t) = (A_{21} - B_2 K_{21})x_{(1)}(t) + (A_{22} - B_2 K_{22})x_{(2)}(t) + (A_{23} - B_2 K_{23})x_{(3)}(t) - \tau_{12} B_2 K_{21} x_{(1)}(t) - \tau_{32} B_2 K_{23} x_{(3)}(t) + F_2 w_{(2)}(t)$$

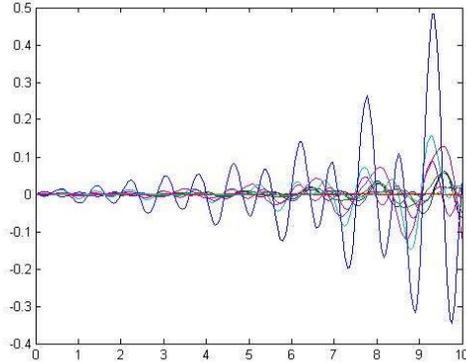
$$\dot{x}_{(3)}(t) = (A_{31} - B_3 K_{31})x_{(1)}(t) + (A_{32} - B_3 K_{32})x_{(2)}(t) + (A_{33} - B_3 K_{33})x_{(3)}(t) - \tau_{13} B_3 K_{31} x_{(1)}(t) - \tau_{23} B_3 K_{32} x_{(2)}(t) + F_3 w_{(3)}(t)$$

يظهر الشكل (5) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية للنظام في الحلقة المفتوحة بدون وجود المتحكم LQR وعندما يكون التأخير الزمني معوم ($\tau = 0s$)، ونلاحظ عدم استقرار أي متغير من متغيرات الحالة الإجمالية لنظام القدرة الكهربائية.

بينما يظهر الشكل (6) الاستجابة الزمنية للنظام مع المتحكم LQR وعندما يكون التأخير الزمني معوم ($\tau = 0s$)، ونستنتج أن متغيرات الحالة تستقر، ويتناقص تخادم الاهتزاز بشكل ملحوظ.

بينما يعبر الشكل (7) عن الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة مع المتحكم LQR وعندما يأخذ التأخير الزمني الثابت مجموعة من القيم، ويمكن ملاحظة أنه كلما ازداد التأخير الزمني الإجمالي ($\tau = \tau_{SC} + \tau_C +$)

والشكل (8) يوضح خرج المولدات الثلاثة (السرعة الزاوية لكل مولد) عند تطبيق تأخيرات زمنية بقيم مختلفة باستخدام المتحكم LQR وبدون إضافة ضجيج. بينما يعبر الشكل (9) عن السرعة الزاوية للمولد الأول عند أخذ الضجيج $w_{(1)}(t)$ الموضح في العلاقة (11) بعين الاعتبار بقيم مختلفة مع وجود التأخيرات الزمنية باستخدام المتحكم LQR، ونستنتج أن السرعة الزاوية للمولد الأول تبقى في حالة استقرار على الرغم من تأثير الضجيج المطبق عليه.



الشكل 5: الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المفتوحة ($\tau = 0s$)

5. الاستنتاجات

1. يعتبر التأخير الزمني مسؤولاً بشكل رئيس عن زيادة اضطراب حلقة التحكم في نظم التحكم الشبكية. وفقاً لهذا التأخير فإن أنظمة التحكم تميل إلى الاهتزاز، ويحدث تشوه وعدم استقرار في الاستجابة التحكمية.
2. تم استنتاج مجموعة من العلاقات الرياضية تمكن الباحث من نمذجة أي نظام تحكم شبكي مؤلف من n نظام فرعي ضمن الشبكة التحكمية تربط فيما بينها علاقة خطية، مع أخذ الضجيج الممكن أن يطبق على مجموعات التوليد بعين الاعتبار.
3. تحسن استقرار منظومة القدرة الكهربائية قيد الدراسة المعبرة عن نظام التحكم الشبكي عند استخدام متحكم أمثلي LQR، بحيث تم الحصول على إخماد جيد للاهتزاز، ومقارنة الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية (عددها 12 متغير لكل نظام فرعي 4 متغيرات) في الحلقة المفتوحة، وعندما يكون التأخير الزمني معوماً باستخدام المتحكم LQR، ومن ثم دراسة تغير قيمة التأخير الزمني الإجمالي الثابت ضمن مجال محدد باستخدام المتحكم LQR، وملاحظة أن المتحكم LQR قادر على تحسين استجابة نظام التحكم الشبكي ضمن مجال محدد للتأخير الزمني.
4. استقرار خرج مجموعات التوليد الثلاث على الرغم من تطبيق ضجيج بقيم مختلفة على مجموعة التوليد الأولى أو الثانية أو الثالثة، مع وجود التأخيرات الزمنية الثابتة بين عناصر النظام الشبكي، باستخدام المتحكم LQR.

6. التوصيات

1. تخمين الحد الأعظمي للتأخير الزمني (Maximum Allowable Delay Bound: MADB) الذي يمكن الباحث

5. تصميم متحكم متين Robust Controller ومقارنته مع المتحكم LQR بوجود التأخير الزمني.

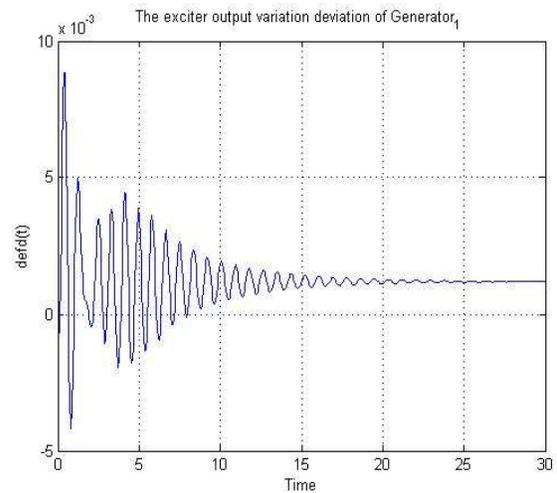
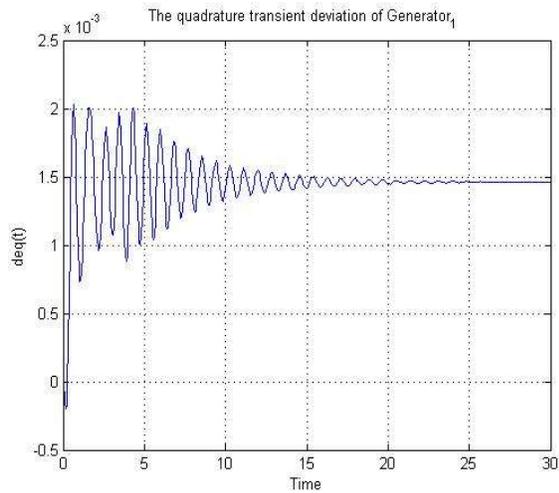
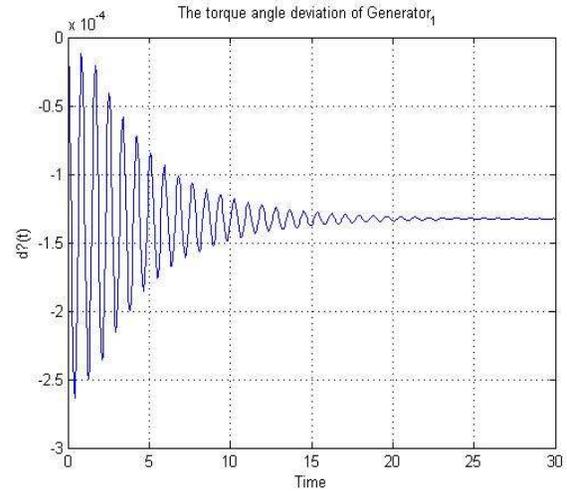
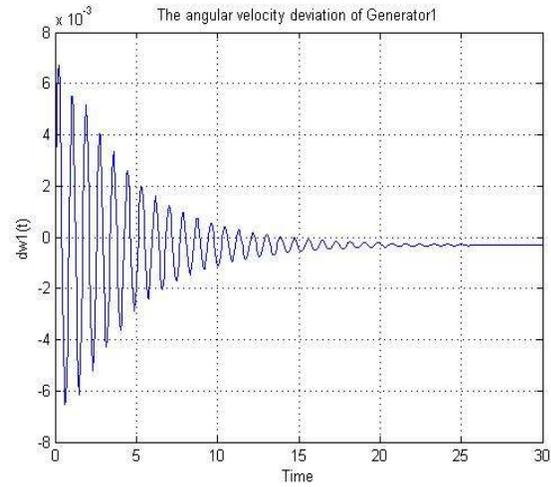
6. تصميم متحكم متين Robust Controller ومقارنته مع المتحكم LQR مع الأخذ بالحسبان ضياع الباكيتات أو وصولها بترتيب خاطئ.

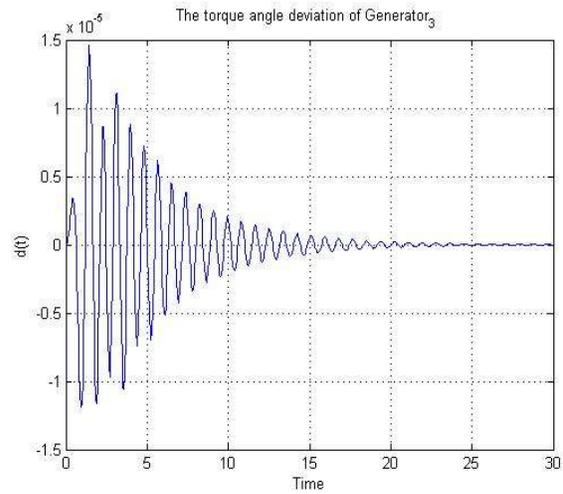
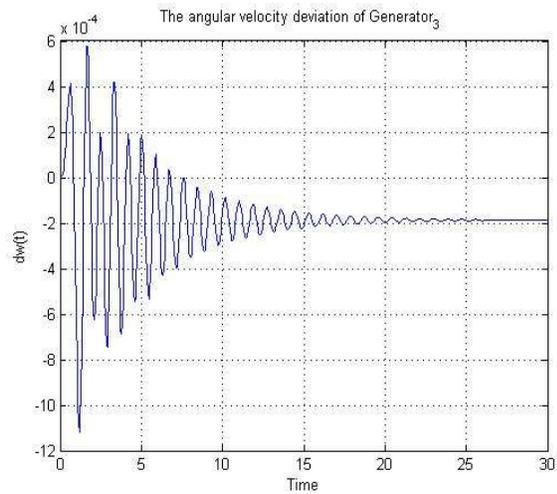
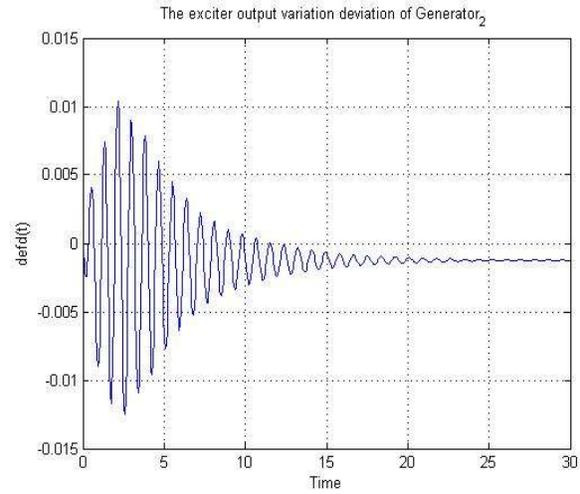
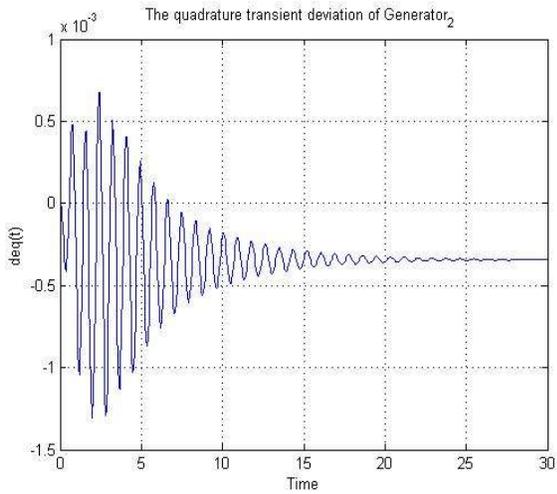
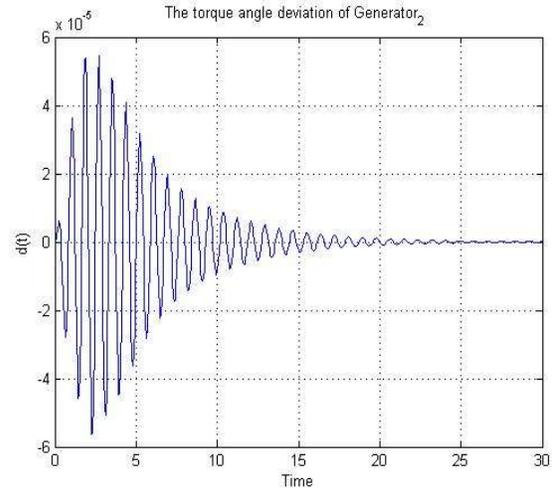
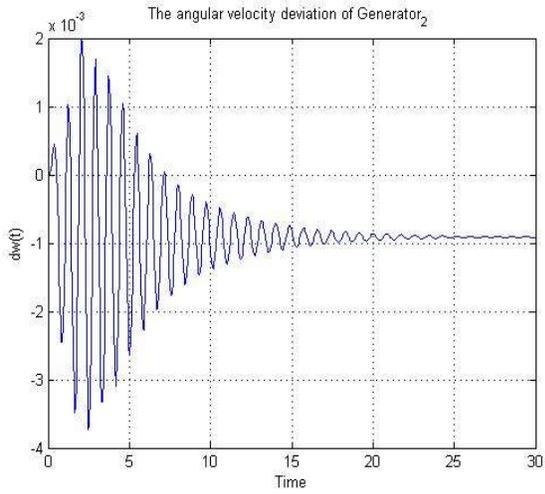
من معرفة القيمة المناسبة للتأخير الزمني الثابت التي يستقر عندها النظام الشبكي.

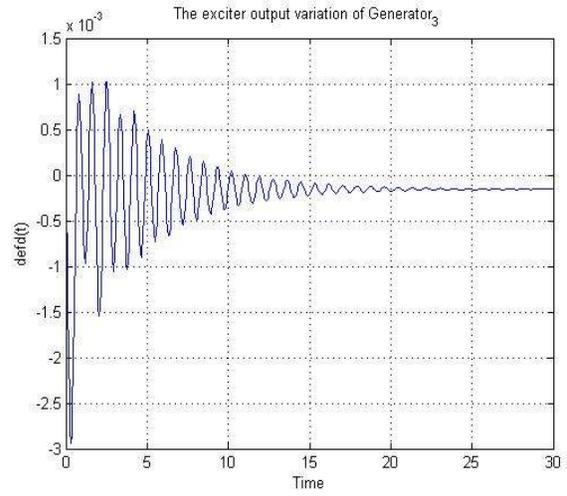
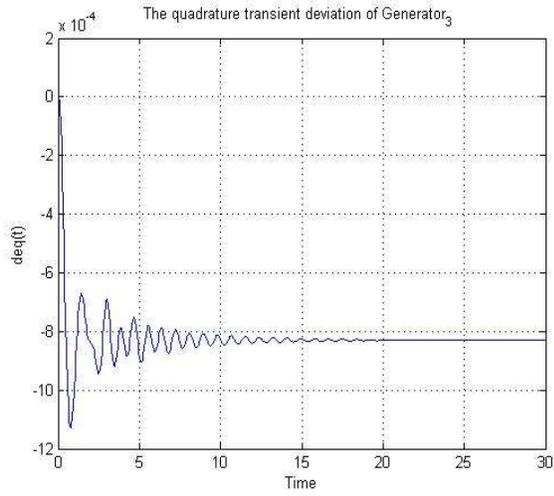
2. دراسة تأثير التأخير الزمني المتغير على استقرار نظام التحكم الشبكي وتحديد MADB باستخدام المتحكم LQR.

3. دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظام التحكم الشبكي وتحديد MADB باستخدام المتحكم LQR.

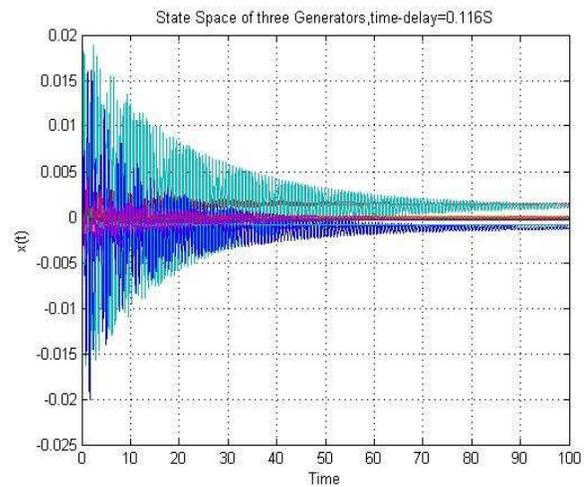
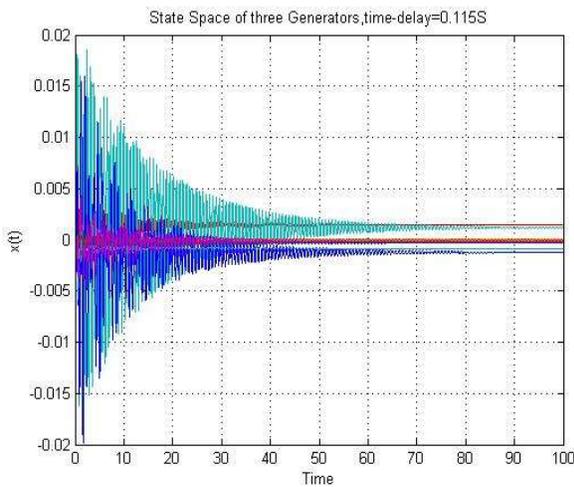
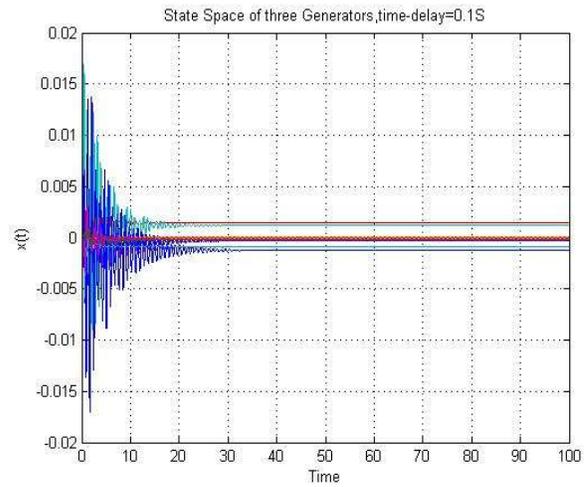
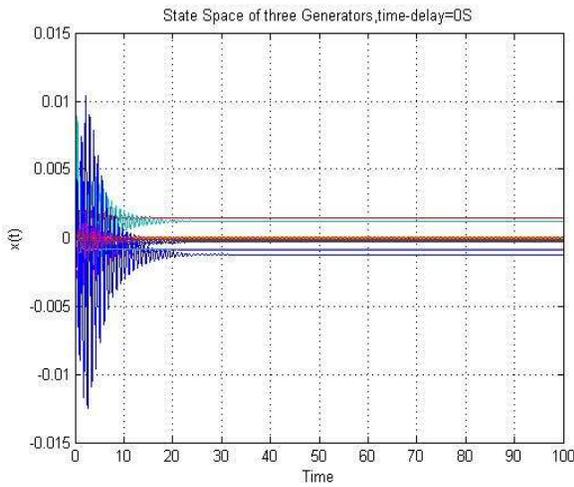
4. دراسة تأثير ضياع الباكيتات أو وصولها بترتيب خاطئ على استقرار نظام التحكم الشبكي باستخدام المتحكم LQR.

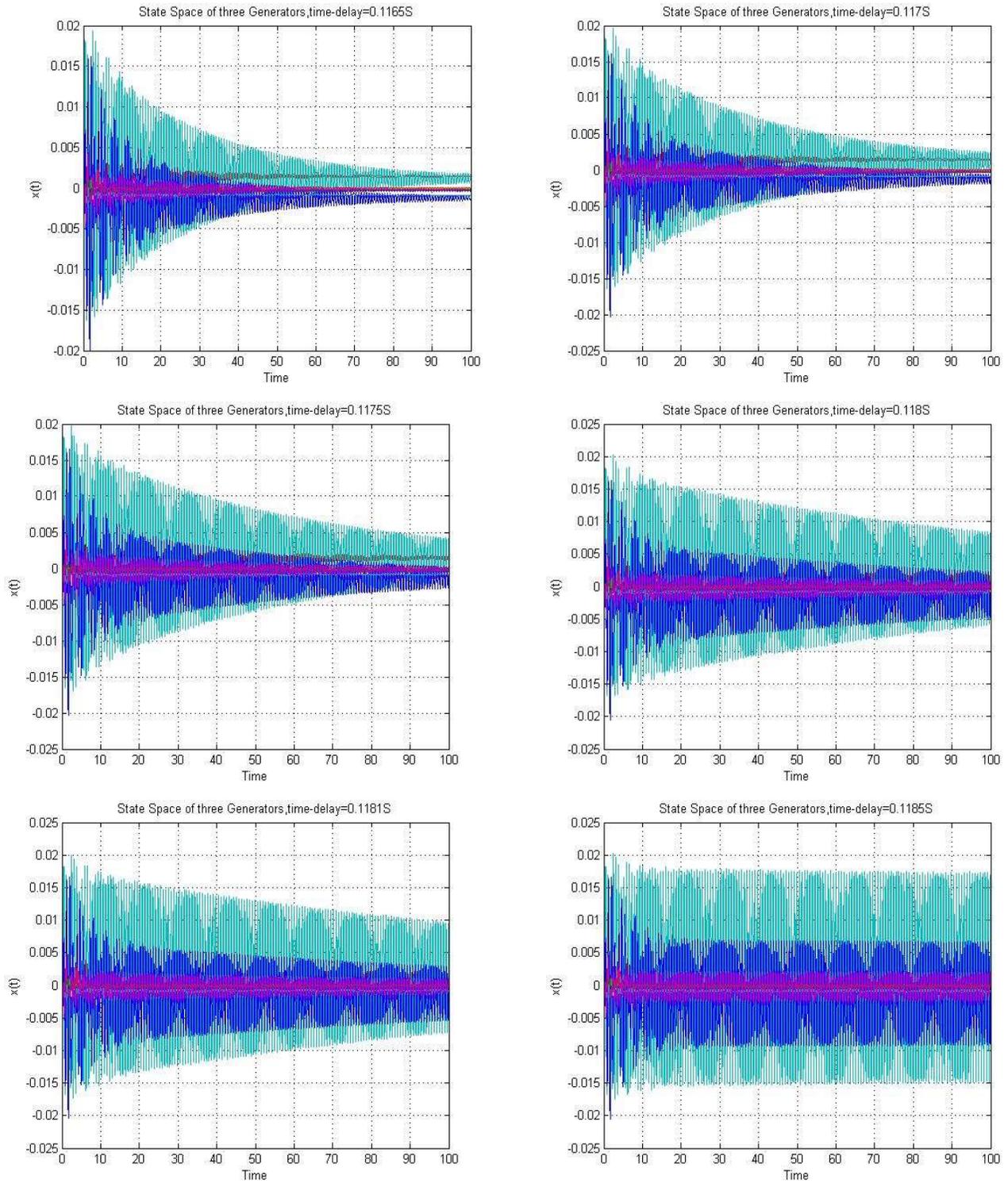




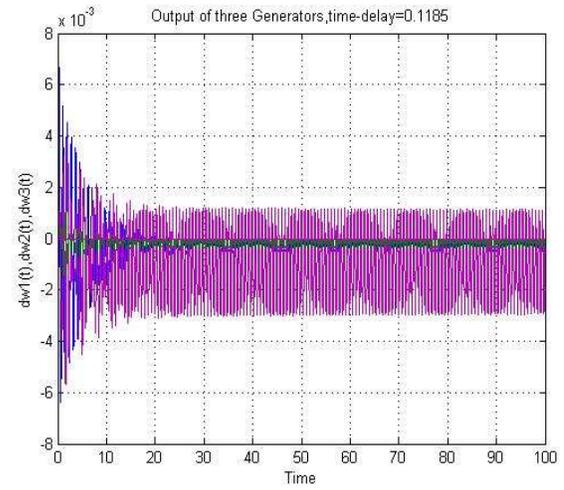
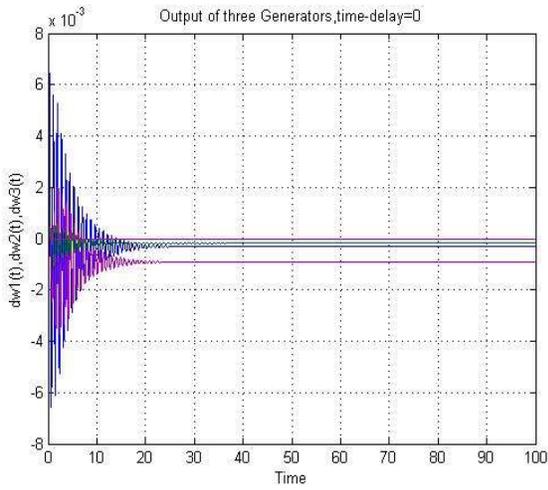


الشكل 6: الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية للنظام الشبكي عند تأخير زمني معدوم ($\tau = 0s$)

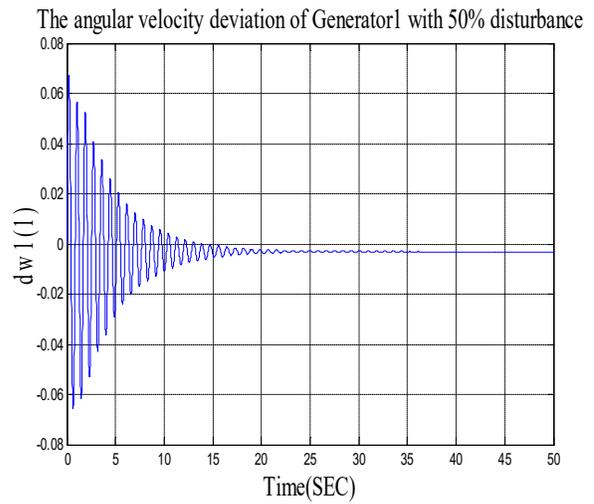
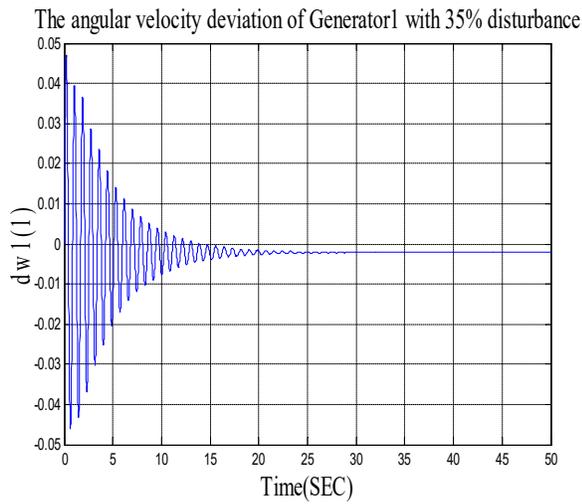
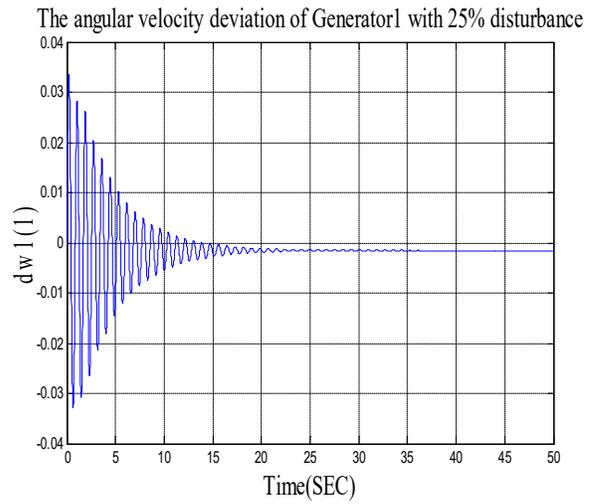
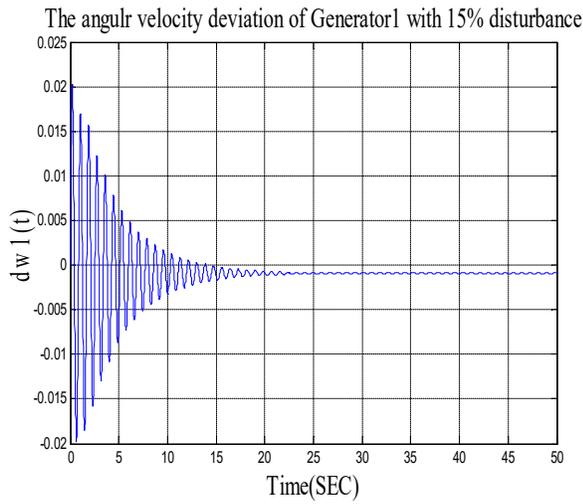




الشكل 7: الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة عند تطبيق تأخيرات زمنية بقيم مختلفة



الشكل 8: خرج المولدات الثلاثة عند تطبيق تأخيرات زمنية بقيم مختلفة



الشكل 9: السرعة الزاوية للمولد الأول عند تطبيق الضجيج $w_{(1)}(t)$ بقيم مختلفة مع وجود التأخيرات الزمنية.

Journal of Grid and Distributed Computing, Vol. 9, PP.117-124,NOV 2016.

المصادر

- [8] Fleming, R.J., Mohan, M.A., & Parvatisam, K, Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, PAS-100, (5) 2329-2333, 1981.
- [9] G . P. Chen. , O. P. Malik, Y . H . Qin and G. Y. Xu. , Optimization technique for the design of a linear optimal power system stabilizer, IEEE Trans. on energy conversion, vol. 7, No. 3, pp 453 -459, september 1992.
- [10] Jeffery B. Burl, Linear Optimal Control, Addison- Wesley, Inc 1999.
- [11] J.E.Normey-Rico, E.F.Camacho, Dead-time Compensators, A survey Control Engineering Practice, Vol. 16 .407-428, 2008.
- [12] Mohammed Kamal Ahmed, Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor, International Journal of Engineering Science and Computing, Vol. 7. 14069-104074, July 2017.
- [13] Meghanasingh, Effects of Time Delay on different types of controller for networked control system, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) ,Vol. 4. 993-999, April 2017.
- [14] Yuan-chyuan Lee, Chi-Jui Wu, Damping of Power System Oscillations with output feedback and Strip Eigenvalues Assignment, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [1] Abdelelah Khider Mahmood and Huthaifa Salman Khairy, Time delay compensation for wireless networked control systems based on modified smith predictor, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 11. 14-23, March 2017.
- [2] Ahmad Sakr, Ahmad M. El-Nagar, Mohammad El-Bardini, Mohammed Sharaf, Fuzzy Smith Predictor for Networked Control Systems, IEEE, PP.437-443, 2016.
- [3] Anuradha Purty, Rajendra Murmu, Comparative Study of Decoupler with Different Controller for Two Inputs and Two Output System, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 6. 1011-1020, January 2017
- [4] Chien-Liang Lai and Pau-Lo Hsu, Design the Remote Control System With the Time-Delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, Vol. 6, PP.73-80, FEB 2010.
- [5] Chen, C.L. & Hsu, Y.Y, Coordinated Synthesis of Multimachine Power System Stabilizer Using an Efficient Decentralized Modal Control (DMC) Algorithm, IEEE Transactions on Power Systems, 2, (3) 543-550, 1987.
- [6] Chan, W.-C. & Hsu, Y.-Y. 1983. An Optimal Variable Structure Stabilizer for Power System Stabilization. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (6) 1738-1746, 1983.
- [7] Fang Liu, Fenglin Li and Dandan Xiao , The Design of Fuzzy PID Controller for Networked Systems with Random Time Delay , International

Study and Manipulate the Effects of Constant Time Delay in Networked Control Systems

Mohamad Morhaf Bachar Alnifawi^{1,*}, Bassem Omran², and Jomana Diab³

¹ Mech. And Elec. Engineering Collage Al-Baath University, Homs, Syria, E-mail: Morhaf_nef_89@hotmail.com

² Mech. And Elec. Engineering Collage Al-Baath University, Homs, Syria, E-mail: Bamran@albaath-univ.edu.sy

³ Mech. And Elec. Engineering Collage Al-Baath University, Homs, Syria, E-mail: jomanad162@gmail.com

*Corresponding author: Mohamad Morhaf Bachar Alnifawi and email :Morhaf_nef_89@hotmail.com

Published online: 31 March 2022

Abstract— Time delay negatively affects the performance of the Networked Control Systems and leads to vibration and instability in the control response, and time delay may be Constant, Variable, or even randomly. In this research, the effect of Constant time delay on the stability of the Networked Control Systems using the optimized controller has been studied. That, the stability of the electrical power system for three synchronous generators taking account the Constant Time Delay has been studied between its subsystems. Computer simulations using the MATLAB program showed improvements in the stability of the electrical power system and a decrease significantly in the vibration of the overall state variables. The results were compared in the open loop and in the closed loop without time delay using the optimized controller and with the presence of time delay, and it was found that the optimized controller is able to improve the stability of Networked Control System within a specific range of constant time delay.

Keywords— Time Delay System (TDS), Networked Control Systems (NCS), Linear Quadratic Regulator (LQR), Stability of the Electrical Power System.