

Modeling of Discrete Networked Control Systems in State Space for Electrical Power System with Time Delays

Mohamad Morhaf Bachar Alnifawi

Bassem Omran

Jomana Mahmoud Diab

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering || Al-Baath University || Syria

Abstract: Electrical power systems distributed over wide geographical areas are exposed to a set of factors that affect their stability. The most important factors are the time delays between their subsystems. In this paper, a flexible modeling method was concluded consisting of a set of generalized rules and conditions that apply to any network controlled system to ensure its stability with time delays between the elements of the controlled network. In addition, a linear quadratic regulator (LQR) controller was implemented. The aim of the LQR controller is to reduce the negative impact of the time delay on the stability of the electrical power system. The study was applied to a networked electrical power system consisting of three-generation stations distributed in three separate geographical areas. Computer simulations using MATLAB showed a remarkable improvement in the stability of the discrete networked system through the speed of damping the vibrations in the system, and the system ability to be stable at certain limits of the time delay.

Keywords: Discrete Networked Control Systems (DNCS), Time Delay (TDS), Electrical Power Systems, Linear Quadratic Regulator, State Space (SS), Supervisory Control (SC)

نمذجة نظم التحكم الشبكية المتقطعة في فضاء الحالة لنظام قدرة كهربائية مع وجود التأخيرات الزمنية

محمد مرهف بشار النيفاوي

بسيم عمران

جمانا محمود دياب

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية || جامعة البعث || سورية

المستخلص: تتعرض نظم القدرة الكهربائية الموزعة على مساحات جغرافية واسعة لمجموعة من العوامل تؤثر على استقرارها ومن أهمها التأخيرات الزمنية بين أنظمتها الفرعية. تم في هذا البحث استنتاج أسلوب نمذجة مرن مؤلف من مجموعة قواعد وشروط معممة تطبق على أي نظام تحكم شبكي لضمان استقراره مع وجود التأخيرات الزمنية بين عناصر الشبكة التحكمية، بالإضافة إلى تطبيق متحكم تربيعي خطي يهدف إلى الحد من تأثير التأخير الزمني السلبي على استقرار نظام القدرة الكهربائية. وطبقت الدراسة على نظام شبكي للقدرة الكهربائية مؤلف من ثلاث مجموعات توليد موزعة على ثلاث مناطق جغرافية منفصلة. بينت المحاكاة الحاسوبية باستخدام MATLAB تحسن ملحوظ في استقرار النظام الشبكي المتقطع من خلال سرعة إخماد الاهتزازات في النظام، وإمكانية استقرار النظام عند حدود معينة للتأخير الزمني.

الكلمات المفتاحية: نظم التحكم الشبكية المتقطعة، التأخير الزمني، نظم القدرة الكهربائية، المتحكم التريبيعي الخطي، فضاء الحالة، التحكم الاشرافي.

1- المقدمة.

إن إشارات التحكم في نظم التحكم الكلاسيكية تكون متصلة نقطة إلى نقطة، بينما في نظم التحكم الشبكية (Network Controlled Systems: NCS) يختلف الوضع اختلافاً كبيراً لأن الإشارات الناتجة عن عناصر التحكم مثل المشغل (Actuator) أو الحساس (Sensor) تنتقل عن طريق شبكة اتصالات، وبالتالي فإن أداء نظام التحكم يعتمد على خصائص الشبكة. وركز الباحثون في السنوات القليلة الماضية على دراسة العديد من القضايا ضمن هذا المحور وهي تحليل وتصميم نظم التحكم الشبكية، بنية الشبكة وأنواع البروتوكولات وطرق الجدولة المستخدمة فيها، الدراسات التجريبية والمحاكاة، نمذجة نظم التحكم الشبكية، تحليل استقرار نظم التحكم الشبكية مع الأخذ بالحسبان التأخير الزمني وضياح الرزم (Packet Dropouts) أو وصولها وفق ترتيب خاطئ (-Packets out-of-order) [1-3]. استخدمت شبكات الاتصالات في تطبيقات الزمن الحقيقي، والفرق الرئيسي بينها وبين أنظمة التحكم الشبكية هو أن شبكات الاتصالات مكرسة لهدف محدد، في حين أن نظم التحكم الشبكية مخصصة للأغراض العامة، وكامل المفاهيم الجديدة في الاتصالات والشبكات تم دمجها مع مفاهيم التحكم، وأصبحت نظام متكامل. سيتم التركيز ضمن هذه الورقة البحثية على نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع في فضاء الحالة لمنظومة قدرة كهربائية وتحليل استقرارها باستخدام المتحكم التريبيعي الخطي (Linear Quadratic Regulator: LQR) مع التركيز على تأثير التأخير الزمني (Time Delay: TD) بين عناصر الشبكة التحكمية دون مناقشة نوع الشبكة التحكمية وطرق الجدولة والبروتوكول المستخدم فيها.

صمم مجموعة من الباحثين [4] متحكم FUZZY Proportional Integral Controller: FPIC 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 ضياح الرزم، وبالنتيجة أعطى المتحكم المقترح قدرة كبيرة في التغلب على التغيرات المفاجئة في NCS، وأظهرت المحاكاة الحاسوبية أداء عالي للمتحكم FPIC متضمن متنبئ سميث على مجال واسع من التأخير الزمني المتغير في NCS أكثر من المتحكم الضبابي والمتحكم التقليدي. وعمل مجموعة باحثين [5] على تحليل وتصميم متحكم FUZZY PID لنظام غير خطي يتضمن تأخير زمني متغير (تأخير في النقل) وضياح للرزم في نظم التحكم الشبكية، وقارن هذا البحث بين عدة طرق (المتحكم PID الضبابي بالاعتماد على خوارزمية Particle Swarm Optimization: PSO)، 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. ودرس عدد من الباحثين [6] كيفية التخفيف من مشكلة التأخير الزمني المتغير وضياح الرزم في نظم التحكم الشبكية باستخدام المتحكم الانزلاقي الضبابي (Fuzzy Sliding Mode Controller). وتم التأكد من فعالية المتحكم المقترح على الرغم من الاضطرابات والتأخير الزمني المتغير الناجم عن الشبكة. وأضاف Dang وزملاؤه [7] متنبئ سميث إلى شبكة عصبونية لتحقيق استجابة قابلة للتكيف ومستقرة وسريعة بنفس الوقت. إذ أنه استخدم الشبكة العصبونية لتخمين التأخير الزمني المتغير بطريقة تحديد الأوزان أنياً، بينما استخدم متنبئ سميث لإزالة حد التأخير الزمني من المعادلة المميزة لنظام الحلقة المغلقة.

وحددت ضمن دراسة حديثة لهذا العام النسب المثوية لمواضيع البحث في نظم التحكم الشبكية وفقاً للأوراق البحثية المنشورة خلال ثلاث فترات زمنية. فقد لوحظ خلال الفترة الأولى (من الأعوام السابقة حتى 2000) بأن مواضيع البحث ضمن نظم التحكم الشبكية اقتصرت على ثلاثة مواضيع فقط، وكانت النسبة الأكبر (48%) لموضوع البحث Decentralized/Robust Control Network. أما خلال الفترة الزمنية الثانية (2000-2011) فقد توسعت محاور البحث ضمن نظم التحكم الشبكية لتشمل سبع مواضيع بحثية، حيث كانت الحصة الأكبر لموضوع البحث Delay/ Fault Detection/ Packet loss بنسبة مقدارها (37%)، كما حصل موضوع البحث Stability analysis and Approach على نسبة مقدارها (25%). بينما حافظ موضوع البحث Delay/ Fault Detection/ Packet loss على أعلى نسبة (37%) خلال الفترة الزمنية الثالثة (2011 حتى الآن) مع ظهور المحور Model/ Sampling Based Networks بنسبة مقدارها (16%) [8].

2- مشكلة الدراسة:

يمكن تلخيص مشكلة الدراسة في النقاط التالية:

- 1- يعاني العديد من الباحثين ضمن نظم التحكم وبالأخص الشبكية منها من دراسة تأثير بعض المشاكل التي تعاني منها نظم التحكم في الزمن الحقيقي وعلى رأسها التأخير الزمني. وبالأخص إدخال تأثير التأخير الزمني على المعادلات التفاضلية التي تصف نظام التحكم الشبكي في فضاء الحالة، وعرضها بأسلوب مرن يمكن الباحث من تغير قيمة التأخير الزمني الثابت أو وضع مجال متغير للتأخير الزمني المتغير أو تطبيق توابع تعطي قيم عشوائية للتأخير الزمني العشوائي.
- 2- تعقيد أساليب النمذجة الرياضية لتوصيف نظام التحكم الشبكي العام مع إدخال تأثير التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية بحيث يصبح من الصعب تمثيله بأحد برامج المحاكاة الحاسوبية. وخاصة عندما يكون النظام الشبكي متعدد المداخل والمخارج وأبعاد مصفوفات الحالة الممثلة له ذات مراتب عالية.
- 3- صعوبة التحكم بالأنظمة التي تعاني من تأخير زمني وخاصة ذات التغذية العكسية وذلك لصعوبة استنتاج تابع النقل (Transfer Function) لنظام التحكم الشبكي مع التأخير الزمني. إذ أن كل بحث معني بنوع المتحكم المستخدم للتخلص من تأثير التأخير الزمني دون وجود علاقات تفاضلية عامة في فضاء الحالة تصف النظام الشبكي مع المتحكم بغض النظر عن نوع المتحكم المستخدم، وذلك لإمكانية إجراء مقارنة بين سلوك عدد من المتحكمات على استقرار نظام التحكم المدروس.
- 4- عدم وجود مجموعة من القواعد والشروط التي من الممكن أن تعمم باستخدام أحد المتحكمات الحديثة تمكن الباحثين من دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي مع تأثير التأخير الزمني بين الأنظمة الفرعية.

3- النقاط المنجزة ضمن البحث:

تم ضمن الدراسة انجاز النقاط التالية:

- 1- التوصل إلى معادلات تفاضلية عامة في فضاء الحالة تصف نظام التحكم الشبكي المتقطع والمؤلف من n نظام فرعي، إذ تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية.
- 2- يمكن تطبيق هذه المعادلات التفاضلية على أي نظام شبكي متقطع متعدد المداخل والمخارج بغض النظر عن أبعاد مصفوفات الحالة التي تصفه، بالإضافة إلى الضجيج الذي يمكن أن يطبق عليه.

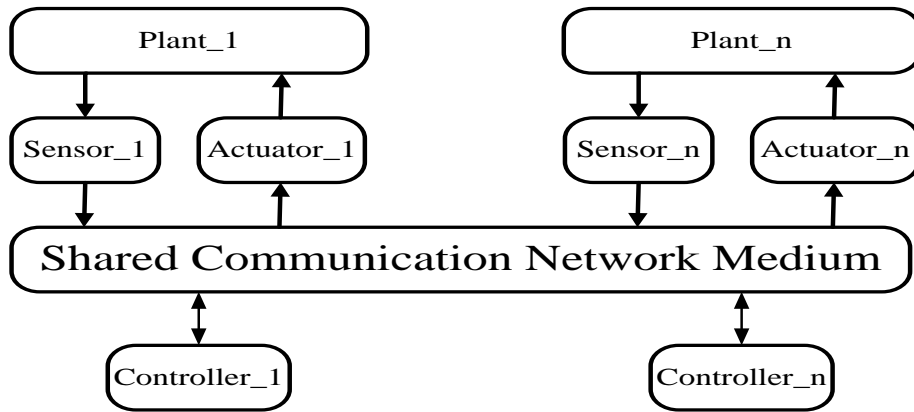
3- سهولة التغير في قيمة التأخير الزمني (الثابت، المتغير، العشوائي) ضمن برامج المحاكاة الحاسوبية لأي نظام تحكم شبكي يعاني من تأخير زمني بين أنظمتها الفرعية من خلال أسلوب النمذجة المرنة والمستنتج ضمن البحث.

4- تصميم متحكم LQR لنظام التحكم الشبكي المتقطع، يهدف إلى الحد من تأثير التأخير الزمني على استقرار نظام القدرة الكهربائية.

4- مواد البحث وطرائقه.

1-4 نظم التحكم الشبكية Network Controlled Systems:

إن نظم التحكم الشبكية ليست فقط المكون الأساسي لشتى مجالات العلوم من شبكات الكمبيوتر وأنظمة الاتصالات ونظم معالجة الإشارة والروبوتات بأنواعها المختلفة ونظم تكنولوجيا المعلومات ونظرية التحكم الحديثة وإنما من الممكن أيضاً أن تجمع كل هذه العلوم أو بعضها معاً بشكل منسق لتحقيق نظام شبكي متكامل موحد يمكنه العمل بكفاءة عالية عبر الشبكة ويستفيد من كامل خصائصها وميزاتها [9]، وانطلاقاً من هذا الارتباط مع العلوم الأخرى فإن نظم التحكم الشبكية هي نظام تحكم موزع في الزمن الحقيقي [10] (Distributed Real-Time Control Systems)، بالإضافة إلى كونها منظومة تحكم واتصالات متكاملة [11] (Integrated Systems: ICCSs) (Communication and Control) حيث يتم التحكم بالجملة بواسطة شبكة اتصالات. يعبر الشكل (1) عن الشكل العام لنظام التحكم الشبكي إذ أن تبادل المعلومات بين عناصر نظام التحكم (Sensors, Controllers, Actuators) يتم عبر الشبكة التحكمية وهي طريقة جلبت العديد من الفوائد [12] مقارنة مع أنظمة التحكم التقليدية والتي يتم تبادل المعلومات بين عناصرها سلكياً (نقطة لنقطة). ومن أهمها التكلفة المنخفضة والوزن الأخف وسهولة التركيب والصيانة، بالإضافة إلى التحكم من مسافة بعيدة لكن مقابل تأخيرات زمنية كبيرة. وهكذا فإن نظم التحكم الشبكية تلقت اهتماماً متزايداً في الآونة الأخيرة، وأصبحت متداولة بكثرة ضمن العديد من التطبيقات العملية.



الشكل (1) الشكل العام لمنظومة تحكم شبكية مؤلفة من n نظام فرعي و n متحكم.

2-4 استقرار نظم القدرة الكهربائية:

اتجه الباحثون [13] إلى دراسة توزيع نظم القدرة الكهربائية على مناطق جغرافية واسعة النطاق بأنواعها المختلفة الحرارية والمائية. إذ تتعرض هذه النظم لمجموعة من العوامل تساهم في تغير استقرار النظام ككل ومن أهمها التأخير الزمني الثابت أو المتغير بين النظم الفرعية وضياع للزرز ضمن الشبكة أو وصولها وفق ترتيب خاطئ، حيث أنه عندما يتغير الحمل في منطقة محددة عندها فإن المناطق المتصلة ضمن نظام التحكم الشبكي ستتأثر بتغير

الحمل في إحداها وبالتالي على المتحكمات المحلية المسؤولة عن كل منطقة أن تتبادل معلوماتها مع بعضها البعض ضمن الشبكة بهدف إعادة الاستقرار للمنظومة الشبكية بأكملها [14].

3-4 مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة:

ان النظام في فضاء الحالة هو مجموعة من الحالات المتغيرة زمنياً التي نطلق عليها متغيرات الحالة للنظام والتي تشكل شعاع الحالة للنظام. يمثل شعاع الحالة عند زمن محدد نقطة في فضاء الحالة احداثياتها قيم مركبات شعاع الحالة عند هذا الزمن.

عندما يعمل النظام بتغير متغيرات الحالة مع الزمن فينتقل النظام من نقطة إلى أخرى مشكلاً مساراً في فضاء الحالة. يبدأ المسار من نقطة يحددها شعاع الحالة الابتدائي (الوضع الابتدائي)، ويسير بعدها على المسار مع تغير الزمن.

يعتمد مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة على المسار في الوضع الدائم، أي بعد تشغيل النظام بفترة من الزمن (لانهاية نظرياً). حتى يكون النظام مستقراً بشكل عام في فضاء الحالة ينبغي أن يكون هذا المسار محدوداً ضمن منطقة من فضاء الحالة، أما إذا انتهى المسار إلى اللانهاية (قيم كبيرة نسبياً) مع الزمن فسيكون النظام غير مستقر [15].

4-4 المتحكم التريبيعي الخطي LQR:

التحكم الأمثل هو تصميم المتحكم الذي يحقق مواصفة محددة للنظام كأفضل ما يمكن وفق معيار محدد. مثل تصميم المتحكم الذي يحقق أقل خطأ استقرار، أو الذي يجعل استجابة النظام أسرع ما يمكن. ويمكن أن يكون الهدف من التحكم الحصول على بارامتر ما في النظام في الحلقة المغلقة يحقق مواصفة محددة للنظام كأفضل ما يمكن، مثل الحصول على قيمة تردد الاهتزاز الطبيعي غير المتخامد w_n الذي يحقق أقل خطأ استقرار أو الحصول على قيمة معامل التخامد ε الذي يجعل استجابة النظام أسرع ما يمكن. إن التحكم الأمثل بمفهوم ليبانوف هو تصميم المتحكم في فضاء الحالة (أو الحصول على بارامتر ما) يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف. يوصف النظام المتقطع الخطي غير المتجانس بالعلاقة (1) [15] حيث U إشارة الدخل للنظام أو إشارة التحكم:

$$X(k+1) = GX(K) + HU(K) \quad (1)$$

نريد أن نحدد قيمة المصفوفة K التي تحقق قانون التحكم الخطي بحيث يتم انقاص دالة الإنجاز الموصوفة بالعلاقة (2) [16]:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{K=0}^{\infty} [X^*(k)QX(k) + U^*(k)RU(k)] \quad (2)$$

حيث إن Q مصفوفة مربعة متناظرة موجبة التحديد (Positive definition: Pd) أو شبه موجبة التحديد (Positive Semi definition: PSd)، والمصفوفة R موجبة التحديد.

نريد أن نوجد إشارة التحكم التي تجعل النظام مستقراً بالشكل الأمثل أو أن نوجد المتحكم (مصفوفة التغذية الخلفية K) الذي يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف، ويتم التحكم بهذا النوع من النظم حسب قانون التحكم المتقطع الخطي المعطى بالعلاقة (3) [16]:

$$K = (R + H^*PH)^{-1} H^*PG \quad (3)$$

يمكننا باستخدام بعض العمليات الحسابية، والاستفادة من العمليات على المصفوفات أن نتوصل إلى العلاقة التي نحسب منها P المثلثي التي لا تتبع K كما في العلاقة (4) [16]:

$$P = Q + G^*P(I + HR^{-1}H^*P)^{-1}G \quad (4)$$

5- النتائج والمناقشة.

1-5 نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع والمؤلف من n نظام فرعي مع إدخال تأثير التأخير الزمني بين انظمتها الفرعية:

يوصف النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المستمر المستقل باستخدام فضاء الحالة وفق العلاقة (5) [15]:

$$\begin{aligned} X^*(t) &= AX(t) + BU(t) + FW(t) \\ Y(t) &= CX(t) + DU(t) \end{aligned} \quad (5)$$

يعبر $X(t) \in R^n$ عن شعاع متغيرات الحالة للنظام، و $X^*(t) \in R^n$ عن مشتق شعاع الحالة و $U(t) \in R^m$ عن دخل النظام، $W(t) \in R^l$ إشارة الضجيج الخارجية التي يمكن أن يتعرض لها النظام، $Y(t) \in R^p$ خرج النظام. بينما تكون مصفوفات الحالة [15] التي تصف نظام التحكم الشبكي الموضح في العلاقة (5) وفق الأبعاد التالية:

$$A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, F \in R^{n \times l}, C \in R^{p \times n}, D \in R^{p \times m}$$

من جهة أخرى بوصف النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المتقطع المستقل [17] وفق العلاقة (6)، إذ يتم تقطيع النظام المستمر الموصوف بالعلاقة (5) وفق طريقة (ZOH: Zero-Order-Hold).

$$\begin{aligned} X((k+1)T) &= G(K)X(KT) + H(K)U(KT) + F(K)W(KT) \\ Y(KT) &= C(K)X(KT) + D(K)U(KT) \end{aligned} \quad (6)$$

يعبر $X(k)$ عن شعاع الحالة عند العينة k وهو شعاع بطول n ، و $U(k)$ عن شعاع التحكم عند العينة k وهو شعاع بطول r ، G مصفوفة $n \times n$ و H مصفوفة $n \times r$ ، و T زمن أخذ العينات.

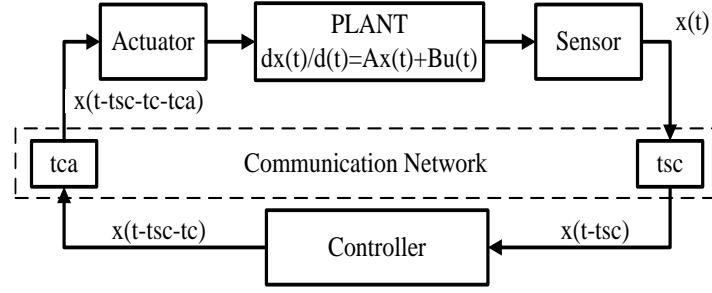
وتحسب المصفوفات $G(K)$ ، $H(K)$ ، $F(K)$ الموصوفة في العلاقة (6) وفق العلاقة (7) [17]:

$$G(K) = e^{AT}, H(K) = \int_0^T e^{At} B dt, F(K) = \int_0^T e^{At} F dt \quad (7)$$

يوضح الشكل (2) [18] عناصر نظام التحكم الشبكي المستقل وهو عبارة عن نظام تحكم واحد وبالتالي لا يوجد أي تبادل للمعلومات مع الأنظمة الفرعية الأخرى، وإنما يرسل بياناته من النظام (Plant) إلى المتحكم (Controller) مروراً بالحساس ومن المتحكم إلى النظام مروراً بالمشغل عبر الشبكة مع وجود التأخير الزمني الناتج عن الشبكة. إذ تعطى إشارة التحكم بالعلاقة (8) حيث تعبر k عن مصفوفة الريح الخلفي لمتحكم LQR و τ هي التأخير الزمني الإجمالي والمعطى في العلاقة (9) [18]. إذ أن τ_{SC} التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم، و τ_C التأخير الزمني ضمن المتحكم، بينما τ_{Ca} التأخير الزمني بين المتحكم والمشغل، ويعبر dT عن ضياع الرزم وبالتالي فإن d هي عدد الرزم الضائعة ضمن الشبكة.

$$U(k) = -KX(kT) = -KX(kT - \tau) \quad (8)$$

$$\tau = \tau_{SC} + \tau_C + \tau_{Ca} + dT \quad (9)$$



الشكل (2) وحدة تحكم شبكية مستقلة مع أخذ التأخيرات الزمنية بالحسبان [18].

عندها يمكن استنتاج النموذج الرياضي لـ n نظام تحكم فرعي متقطع متصل مع بعضه البعض وفق علاقة خطية عبر شبكة اتصالات تحكمية وفق العلاقة (10):

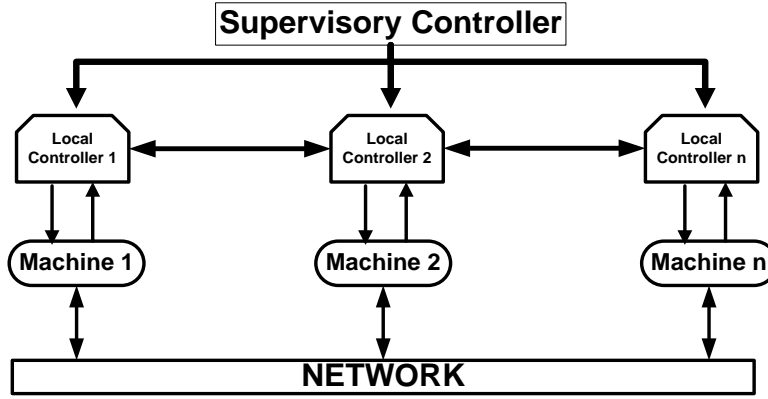
$$\begin{aligned} X_{(1)}(k+1) &= G_{11}X_{(1)}(k) + H_1U_{(1)}(k) + \sum_{j=2}^n G_{1j}X_{(j)}(k) + F_1W_{(1)}(k) \\ X_{(2)}(k+1) &= G_{22}X_{(2)}(k) + H_2U_{(2)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n G_{2j}X_{(j)}(k) + F_2W_{(2)}(k) \\ X_{(n)}(k+1) &= G_{nn}X_{(n)}(k) + H_nU_{(n)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} G_{nj}X_{(j)}(k) + F_nW_{(n)}(k) \\ y_{(n)}(k) &= C_nX_{(n)}(k) + D_nU_{(n)}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

حيث n هي عدد الأنظمة الفرعية المتصلة ضمن نظام التحكمي الشبكي المتقطع، و G_{ij} مصفوفة تعبر عن تأثير النظام الفرعي i بالنظام الفرعي j .

تعتمد كل عقدة تحكم ضمن الطوبولوجيا اللامركزية لنظم التحكم الشبكية فقط على المعلومات المحلية التي تمتلكها وحدة التحكم لاتخاذ قرارها المحلي، ولا تشارك عقد التحكم معلوماتها مع العقد المجاورة المقابلة. من جهة أخرى تسمح الطوبولوجيا الموزعة لنظم التحكم الشبكية لكل وحدة تحكم بمشاركة معلوماتها المحلية مع وحدات التحكم المجاورة المقابلة كما يوضح الشكل (3). وبالتالي، فإن وحدات التحكم الموزعة قادرة على تنسيق سلوكها عن طريق إرسال / استقبال المعلومات من / إلى وحدات التحكم الأخرى. إذاً فإن وحدات التحكم هنا هي وحدات تحكم موزعة. ومن أهم مزايا هذا النوع من الطوبولوجيا هي النمطية (Modularity)، وقابلية التوسع، والمتانة [8].

ونظراً لأهمية المعلومات المتبادلة بين المتحكمات الفرعية (Local Controller) في نمذجة نظام التحكم الشبكي العام والمزايا التي تمتلكها البنية الموزعة وشموليتها عن البنية اللامركزية، وترابط الأنظمة الفرعية (Machine) ومتحكماتها الممثلة لنظام التحكم الشبكي مع المتحكم الاشرافي (Supervisory Controller: SP). عندها يصبح قانون التحكم مؤلف من المتحكم المحلي Local والإشرافي Supervisor وفق العلاقة (11):

$$u_{(i)} = u_i^{local} + u_i^{Supervisor} = -(K_{ii}X_{(i)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{ij}X_{(j)}(kT - \tau_{ji})) \quad (11)$$



الشكل (3) البنية الموزعة ضمن نظم التحكم الشبكية المتقطعة بشكلها العام.

يوضح الشكل (3) البنية الموزعة بشكلها العام لأي نظام تحكم شبكي مؤلف من n نظام فرعي. إذ أن المتحكم الاشرافي يعطي الأوامر للمتحكمات المحلية والتي بدورها تعطي إشارة التحكم (Control Signal) للنظام (machine) المراد التحكم به وتستقبل منه متغير الحالة المعبر عن حالته. كما أن النظام يرسل متغير الحالة الخاص به إلى الأنظمة الفرعية الأخرى ويستقبل منها متغيرات الحالة الخاصة بها عبر الشبكة. توضح العلاقة (11) بأن التأخير الزمني τ_{ji} يظهر عند تبادل المعلومات بين نظامين فرعيين عبر الشبكة، بينما لا يؤخذ بعين الاعتبار عند ارسال الأوامر من المتحكم الاشرافي إلى المتحكمات المحلية لأن الاتصال نقطة لنقطة.

بتعويض العلاقة (11) في العلاقة (10) نحصل على العلاقة (12):

$$\begin{aligned} X_{(1)}(k+1) &= G_{11}X_{(1)}(k) - H_1K_{11}X_{(1)}(k) + \sum_{j=2}^n G_{1j}X_{(j)}(k) - \sum_{j=1, j \neq i}^n H_1K_{1j}X_{(j)}(kT - \tau_{j1}) + F_1W_{(1)}(k) \\ X_{(2)}(k+1) &= G_{22}X_{(2)}(k) - H_2K_{22}X_{(2)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n G_{2j}X_{(j)}(k) - \sum_{j=1, j \neq i}^n H_2K_{2j}X_{(j)}(kT - \tau_{j2}) + F_2W_{(2)}(k) \\ X_{(n)}(k+1) &= G_{nn}X_{(n)}(k) - H_nK_{nn}X_{(n)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n G_{nj}X_{(j)}(k) - \sum_{j=1, j \neq i}^n H_nK_{nj}X_{(j)}(kT - \tau_{jn}) + F_nW_{(n)}(k) \\ y_{(n)}(k) &= C_nX_{(n)}(k) + D_nU_{(n)}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

بالنظر إلى العلاقة (12) نلاحظ وجود التأخير الزمني ضمن التركيب الرياضي $X_{(j)}(kT - \tau_{ji})$ وبالتالي لا نستطيع تضمينه ضمن العلاقات الرياضية أو تعويض قيمته سواء كان ثابتاً أو متغيراً. وبالنتيجة لا يمكن تمثيله ضمن المحاكاة الحاسوبية لدراسة تأثير ذلك التأخير الزمني على استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع حتى يتم عزله من التركيب الرياضي، لذلك طبقنا قانون تقريب الفرق المحدود لحساب التركيب $X_{(j)}(kT - \tau_{ji})$ والذي يمكن برهانه كالآتي:

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

$$R_n(f(t), \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(\varepsilon)}{n!} \tau^{(n)} \quad (13)$$

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

$$x(t - \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{(n)}(t)}{n!} \tau^n$$

$$x(t - \tau) = x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) + \left(-\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) + \left(-\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) + R_7(x, \tau)x(t - \tau) \\ = x(t) - \tau x'(t) + R_2(x, \tau) \quad (14)$$

من العلاقة (14) نجد أن التركيب الرياضي $R_2(x, \tau)$ يعتمد على التأخير الزمني ومشتقات المراتب العليا للتابع $x(t)$. إذا كان التأخير الزمني صغيراً بما فيه الكفاية فإن البارامترات المكونة للتابع الرياضي $R_2(x, \tau)$ يمكن تجاهلها لتصبح العلاقة (14) بشكلها العام وفق العلاقة (15):

$$x(t - \tau) = x(t) - \tau x'(t) \quad (15)$$

نلاحظ من العلاقة (15) بأنه تم عزل التأخير الزمني τ عن التركيب الرياضي $x(j)(t - \tau_{ji})$ وبشكل مشابه نحصل على العلاقة (16) لنظام التحكم المتقطع:

$$X(kT - \tau) = X(kT) - \tau X(k + 1) \quad (16)$$

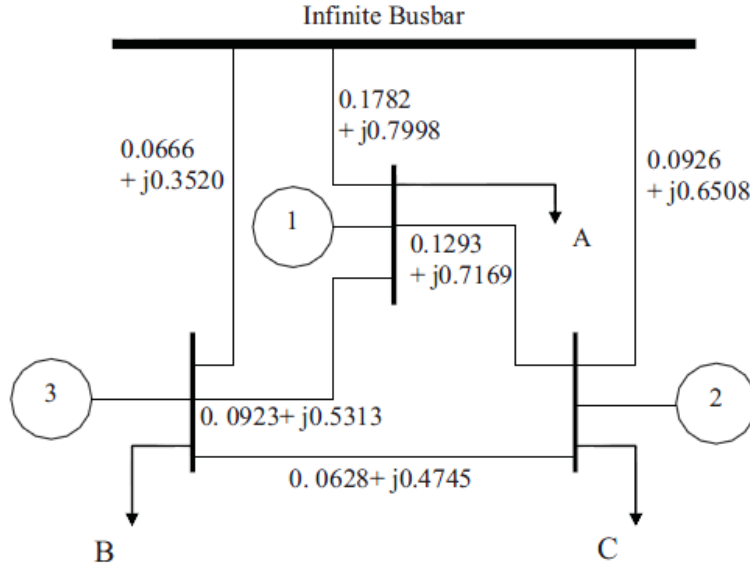
وعند تطبيق العلاقة (16) في العلاقة (12) نحصل على العلاقة النهائية (17) التي تمثل النموذج الرياضي العام لأي نظام تحكم شبكي متقطع مؤلف من مجموعة من الأنظمة الفرعية تربط فيما بينها علاقة خطية مع أخذ التأخيرات الزمنية بالحسبان بين عناصر الشبكة.

$$X_{(1)}(k + 1) = (G_{11} - H_1 K_{11})X_{(1)}(k) + \sum_{j=2, j \neq i}^n (G_{1j} - H_1 K_{1j})X_{(j)}(k) - \sum_{j=2, j \neq i}^n \tau_{j1} H_1 K_{1j} X_{(j)}(k + 1) + F_1 W_{(1)}(k) \\ X_{(2)}(k + 1) = (G_{22} - H_2 K_{22})X_{(2)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (G_{2j} - H_2 K_{2j})X_{(j)}(k) - \sum_{j=1, j \neq i}^n \tau_{j2} H_2 K_{2j} X_{(j)}(k + 1) + F_2 W_{(2)}(k) \\ X_{(n)}(k + 1) = (G_{nn} - H_n K_{nn})X_{(n)}(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (G_{nj} - H_n K_{nj})X_{(j)}(k) - \sum_{j=1, j \neq i}^n \tau_{jn} H_n K_{nj} X_{(j)}(k + 1) + F_n W_{(n)}(k) \\ y_{(n)}(k) = C_n X_{(n)}(k) + D_n U_{(n)}(k) \quad (17)$$

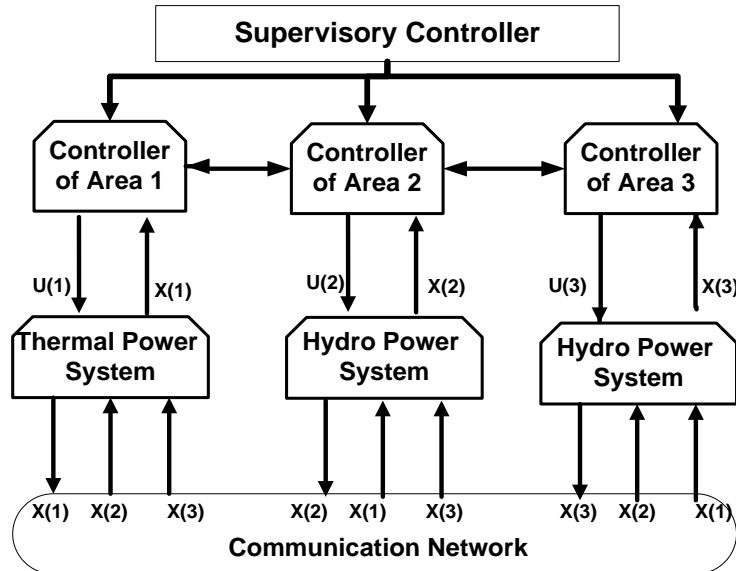
2-5 دراسة تأثير التأخير الزمني على نظام القدرة الكهربائية والمؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

تعتبر المولدات الحرارية والمائية من أكثر المولدات انتشاراً حول العالم، لذلك تم دراسة نظام القدرة الكهربائية [19] كما هو موضح في الشكل (4) وهو عبارة عن نظام قدرة مؤلف من ثلاث مجموعات توليد توزع على ثلاث مناطق جغرافية منفصلة. إذ تتكون المنطقة الأولى من مجموعة توليد للطاقة الحرارية باستطاعة كهربائية 360MVA، وكل من المنطقة الثانية والثالثة من مجموعة توليد للطاقة الكهرومائية باستطاعة كهربائية مقدراتها 503MVA وللثانية و1673MVA للثالثة. حيث تتصل مجموعات التوليد مع بعضها البعض عبر شبكة تحكمية كما هو موضح في الشكل (5)، تساهم في تبادل المعلومات (متغيرات الحالة لكل نظام فرعي) بين الأنظمة الفرعية.

وبين الشكل (5) بأن متحكم المنطقة الأولى (Controller of Area1) وبناء على التوجيهات والأوامر الواردة من المتحكم الاشرافي (SP) يعطي إشارة التحكم U1 إلى نظام الطاقة الكهربائي الفرعي الأول (Thermal Power System)، وبدوره يرسل متغير الحالة X1 المعبر عن حالته عبر شبكة الاتصال (Communication Network) التي من الممكن أن تعاني من تأخيرات زمنية ثابتة أو متغيرة إلى مجموعات التوليد الفرعية الأخرى (مجموعات التوليد الكهرومائية في المنطقة الثانية والثالثة)، وبنفس الوقت يستقبل النظام الأول قيم متغيرات الحالة X2 و X3 من الأنظمة الفرعية الأخرى أيضاً عبر شبكة الاتصال، وتحدث ذات العملية عند مجموعة التوليد الكهرومائية في المنطقة الثانية والثالثة. وتهدف الدراسة إلى تطبيق أسلوب النمذجة المستنتج وفق العلاقة (17) على نظام التحكم الشبكي المتقطع وتطبيق تأثير التأخير الزمني بين مجموعات التوليد الثلاث وكيفية الحد من تأثيره باستخدام (LQR).



الشكل (4) مجموعات التوليد الثلاث المتزامنة المشكلة لنظام الطاقة الكهربائية [19].



الشكل (5) ثلاث مجموعات توليد متزامنة يتم التحكم بها عن طريق شبكة تحكمية.

يتألف النموذج الرياضي لكل مجموعة توليد من أربع متغيرات حالة [20] وهي:

$$X^T = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta e_q \quad \Delta e_{FD}]$$

حيث تعبر $\Delta\delta$ عن تغير زاوية القدرة لدوار المولد، $\Delta\omega$ تغير السرعة الزاوية لدوار المولد، Δe_q تغير القوة

المحركة الكهربائية العابرة، Δe_{FD} تغير جهد حقل التهييج.

ويتم توصيف النموذج الرياضي المستمر لكل مولد من المولدات الثلاثة انطلاقاً من معادلات الحالة التي

تصفها وفق العلاقة (18) [20]:

$$\begin{aligned} \Delta\delta^*(t) &= \omega_0 \Delta\omega(t) = 2\pi f \Delta\omega(t) \\ \Delta\omega^*(t) &= -\frac{K_1}{M} \Delta\delta(t) - \frac{D}{M} \Delta\omega(t) - \frac{K_2}{M} \Delta e_q(t) \\ \Delta e_q^*(t) &= -\frac{K_4}{T_{d0}} \Delta\delta(t) - \frac{1}{T_{d0} K_3} \Delta e_q(t) + \frac{1}{T_{d0}} \Delta e_{FD}(t) \\ \Delta e_{FD}^*(t) &= -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta\delta(t) - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta e_q(t) - \frac{1}{T_A} \Delta e_{FD}(t) + \frac{K_A}{T_A} u_E(t) \end{aligned} \quad (18)$$

حيث K_1, K_2 ثوابت مشتقة من العزم الكهربائي، و K_3, K_4 ثوابت مشتقة من جهد الحقل، و K_5, K_6 ثوابت مشتقة من الجهد الطرقي، و T_A الثابت الزمني لمنظم الجهد، و K_A ربح منظم الجهد، و T_{d0} الثابت الزمني العابر للدائرة المفتوحة على المحور المباشر، و M معامل القصور الذاتي، و U_E دخل إشارة تحكم التهييج.

بتعويض الثوابت والقيم الابتدائية لنظام الطاقة الكهربائية [19] يمكن عندها توصيف نظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر المؤلف من ثلاث أنظمة فيما وحدات تحكم محلية تتبادل المعلومات المعبرة عن حالاتها عبر الشبكة باستخدام مصفوفات الحالة وفق العلاقة (19) للنظام الأول و(20) للثاني و(21) للثالث. وبتعويض مصفوفات الحالة المستنتجة في الأنظمة الفرعية الثلاثة بالعلاقة (22) يكون الاستنتاج النهائي لنظام التحكمي الشبكي المستمر المؤلف من 12 متغير حالة وثلاث مداخل معطى بالعلاقة (23)، مع إضافة ضجيج بقيمة 5% إلى مجموعة التوليد الأولى فقط.

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_1(t) \\ \Delta\delta_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.147 & -0.039 & -0.013 & 0 \\ -0.266 & -0.393 & -0.922 & 1 \\ -30.1 & -309.14 & -60.943 & -20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1(t) \\ \Delta\delta_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.004 & 0 & 0 \\ -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 \\ 24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_2(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.046 & 0.02 & 0.003 & 0 \\ -0.025 & 1.131 & 0.072 & 0 \\ 62.051 & -1675 & -10.194 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_3(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 800 \end{bmatrix} u_1(t) + \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_1(t) \\ y_1(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1(t) \\ \Delta\delta_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \end{bmatrix} + [0]u_1(t) \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_2(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.034 & -0.087 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1(t) \\ \Delta\delta_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.149 & -0.032 & -0.008 & 0 \\ -1.6 & -1.885 & -0.21 & 1 \\ 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_2(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ 0.467 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_3(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 900 \end{bmatrix} u_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_2(t) \\ y_2(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_2(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} + [0]u_2(t) \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_3(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.001 & -0.017 & -0.003 & 0 \\ 0.083 & 0 & -0.002 & 0 \\ -10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1(t) \\ \Delta\delta_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.017 & -0.01 & 0 & 0 \\ 0.22 & 0 & 0.011 & 0 \\ 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_2(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ -1.2 & -1.131 & -0.197 & 1 \\ 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_3(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1000 \end{bmatrix} u_3(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_3(t) \\ y_3(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_3(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + [0]u_3(t) \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{(1)}(t) \\ \dot{x}_{(2)}(t) \\ \dot{x}_{(3)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{E1}(t) \\ U_{E2}(t) \\ U_{E3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1(t) \\ W_2(t) \\ W_3(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(1)}(t) \\ x_{(2)}(t) \\ x_{(3)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{E1}(t) \\ U_{E2}(t) \\ U_{E3}(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.124 & -0.039 & -0.013 & 0 & 0.022 & 0.004 & 0 & 0 & 0.046 & 0.02 & 0.003 & 0 \\ -0.266 & -0.393 & -0.922 & 1 & -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 & -0.025 & 1.131 & 0.072 & 0 \\ -30.1 & -309.14 & -60.943 & -20 & 24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 & 62.051 & -1675 & -10.194 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.034 & -0.087 & 0 & -0.149 & 0.032 & -0.008 & 0 & 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 & -1.6 & -1.8854 & -0.21 & 1 & 0.467 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 & 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 & 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0.001 & -0.017 & -0.003 & 0 & 0.017 & -0.01 & 0 & 0 & -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ 0.083 & 0 & -0.002 & 0 & 0.22 & 0 & 0.011 & 0 & -1.2 & -1.131 & -0.197 & 1 \\ -10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 & 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 & 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 900 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

بعد الحصول على مصفوفات الحالة المستمرة الممثلة لنظام التحكم الشبكي المستمر، نطبق العلاقة (7) لتقطيع النظام المستمر إلى متقطع بمعدل أخذ عينات $T=0.01\text{sec}$ وبطريقة (ZOH) فنحصل على مصفوفات الحالة المتقطعة $F(K), H(K), G(K)$ والموضحة في العلاقة (17).

3-5 تصميم متحكم LQR للحد من تأثير التأخير الزمني في نظام الطاقة الكهربائية المدروس:

يتم تطبيق المتحكم LQR على نظام الطاقة الكهربائية المستنتج في العلاقة (17). حيث يوضح الجدول (1) قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P ، وبما أن P مصفوفة موجبة التحديد Pd (جميع محدداته الخاصة أكبر من الصفر) فالنظام التحكمي المتقطع مستقر ويمكن أمثله.

الجدول (1) المحددات الخاصة بالمصفوفة P .

P1=625.63	P2=9.83e+08	P3=3.17e+11	P4=1.45e+10	P5=3.59e+12	P6=7.47e+17
P7=1.37e+20	P8=7.07e+18	P9=1.15e+22	P10=8.31e+28	P11=1.21e+31	P12=6.3e+29

عند تطبيق المتحكم LQR على نظام التحكم الشبكي المتقطع المدروس نختار قيمة Q (12x12) و R (3x3) بحيث تكون عناصر قطرها الرئيسي وفق الاتي وباقي عناصر المصفوفة أصفار:

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

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

يجب أن يتم اختيار المصفوفة Q بأن تكون مصفوفة مربعة متناظرة (nxn) موجبة التحديد (جميع المعينات المتتابعة أكبر تماماً من الصفر) أو شبه موجبة التحديد (المعينات المتتابعة أكبر أو تساوي الصفر)، وكذلك الأمر بأن تكون المصفوفة R (أبعادها mxm حيث m طول شعاع الدخل) موجبة التحديد. وذلك لأن مسألة التحكم الأمثل تهدف إلى إيجاد شعاع التحكم $U(t)$ (الذي تم إيجاده بالعلاقة (24) لنظام القدرة الكهربائية) الذي ينقل حالة النظام من أي حالة ابتدائية معطاة $X(t_0)$ إلى المنطقة المطلوبة من فضاء الحالة التي تكون من أجلها دالة الإنجاز الموصوفة بالعلاقة (2) أصغرية J_{min}

وعند حل المعادلة (3) نحصل على إشارات التحكم U_1, U_2, U_3 وفق العلاقة (24) للتغذية العكسية الناتجة من الأنظمة الفرعية الثلاث المكونة لنظام التحكم الشبكي المتقطع وفق العلاقة (8) والتي من الممكن أن تتغير حسب القيم المختارة للمصفوفات R و Q وتساوي إلى:

$$U_1(K) = 0.0184\Delta\omega_1(kT - \tau) - 1.1858\Delta\delta_1(kT - \tau) - 0.1100\Delta e_{q_1}(kT - \tau) - 0.0050\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) - 0.1090\Delta\omega_2(kT - \tau) + 4.5672\Delta\delta_2(kT - \tau) - 5.7313e - 04\Delta e_{q_2}(kT - \tau) + 6.5750e - 05\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) - 0.0444\Delta\omega_3(kT - \tau) + 11.2420\Delta\delta_3(kT - \tau) - 0.0142\Delta e_{q_3}(kT - \tau) - 6.3360e0 - 4\Delta e_{FD_3}(kT - \tau)$$

$$U_2(K) = 0.0062\Delta\omega_1(kT - \tau) + 0.0121\Delta\delta_1(kT - \tau) + 0.0051\Delta e_{q_1}(kT - \tau) + 9.990e - 05\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) - 0.0363\Delta\omega_2(kT - \tau) - 0.8007\Delta\delta_2(kT - \tau) - 0.0724\Delta e_{q_2}(kT - \tau) - 0.0034\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) - 0.0243\Delta\omega_3(kT - \tau) - 0.1466\Delta\delta_3(kT - \tau) + 0.0036\Delta e_{q_3}(kT - \tau) + 1.2202e - 04\Delta e_{FD_3}(kT - \tau)$$

$$U_3(K) = 0.0034\Delta\omega_1(kT - \tau) + 0.4856\Delta\delta_1(kT - \tau) - 0.0198\Delta e_{q_1}(kT - \tau) - 8.0088e - 04\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) + 0.0059\Delta\omega_2(kT - \tau) + 1.5369\Delta\delta_2(kT - \tau) + 0.0022\Delta e_{q_2}(kT - \tau) + 1.2761e - 04\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) - 0.0657\Delta\omega_3(kT - \tau) + 7.0021\Delta\delta_3(kT - \tau) - 0.0675\Delta e_{q_3}(kT - \tau) - 0.0032\Delta e_{FD_3}(kT - \tau) \quad (24)$$

4-5 دراسة تأثير التأخير الزمني على استقرار نظام الطاقة الكهربائية المدروس:

يمثل الجدول (2) قيم جذور المعادلة المميزة لنظام حلقة التحكم المفتوحة والمغلقة باستخدام المتحكم LQR. نلاحظ بأن بعض قيم القسم الحقيقي لجذور النظام في الحلقة المفتوحة موجبة وبالتالي تقع على يمين الساحة العقدية في فضاء لابلاس S ويكون بذلك نظام التحكم الشبكي غير مستقر، بينما نستنتج بأن القيمة المطلقة لجذور النظام في الحلقة المغلقة تقع كلها داخل الدائرة الواحدة في الفضاء z وبالتالي فإن النظام الشبكي المتقطع مستقر باستخدام المتحكم LQR.

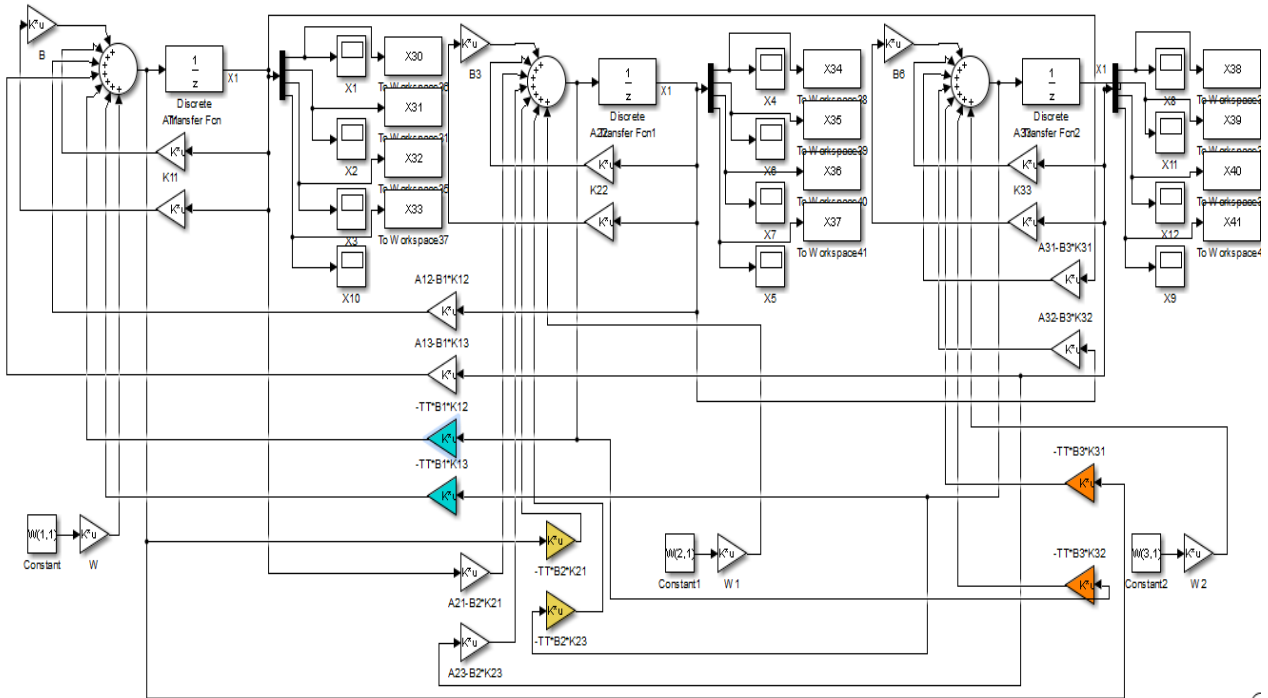
الجدول (2) جذور المعادلة المميزة لنظام التحكم الشبكي المتقطع

OPEN LOOP	CLOSE LOOP (LQR Controller)
-18.9067 + 0.0000i	0.8328 + 0.0000i
-17.0247 + 0.0000i	0.8500 + 0.0000i
-14.7709 + 0.0000i	0.8718 + 0.0000i
0.3238 + 8.0203i	0.9136 + 0.0000i

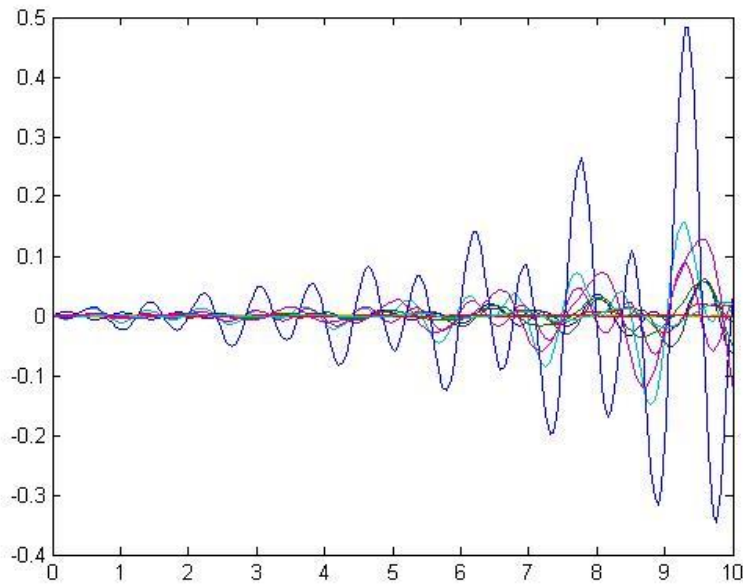
OPEN LOOP	CLOSE LOOP (LQR Controller)
0.3238 - 8.0203i	0.9908 + 0.0795i
-0.1555 + 7.2387i	0.9908 - 0.0795i
-0.1555 - 7.2387i	0.9951 + 0.0731i
-7.1255 + 0.0000i	0.9951 - 0.0731i
0.4544 + 4.2083i	0.9926 + 0.0426i
0.4544 - 4.2083i	0.9926 - 0.0426i
-3.3831 + 0.0000i	0.9429 + 0.0000i
-1.3876 + 0.0000i	0.9455 + 0.0000i

يوضح الشكل (6) نمذجة منظومة التحكم الشبكية المتقطعة لمجموعات التوليد الثلاث متضمنة إدخال تأثير التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية مع المتحكم LQR في التغذية الخلفية باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK. بينما يظهر الشكل (7) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية للنظام في الحلقة المفتوحة بدون وجود المتحكم LQR وعندما يكون التأخير الزمني معدوم، ونلاحظ عدم استقرار أي متغير من متغيرات الحالة الإجمالية لنظام القدرة الكهربائية. وتعتبر الأشكال البيانية (8, 9, 10) عن الاستجابة الزمنية لخرج مجموعات التوليد (السرعة الزاوية) الأولى والثانية والثالثة على التوالي في الحلقة المغلقة مع وجود المتحكم LQR عند قيم متعددة للتأخير الزمني (TD=0, 0.35, 0.5, 0.77, 0.95 Sec). بينما يوضح الجدول (3) تأثير التأخير الزمني بالنسبة لخرج مجموعات التوليد الثلاث على بارامترات الاستجابة الزمنية. ونستنتج منه النقاط التالية:

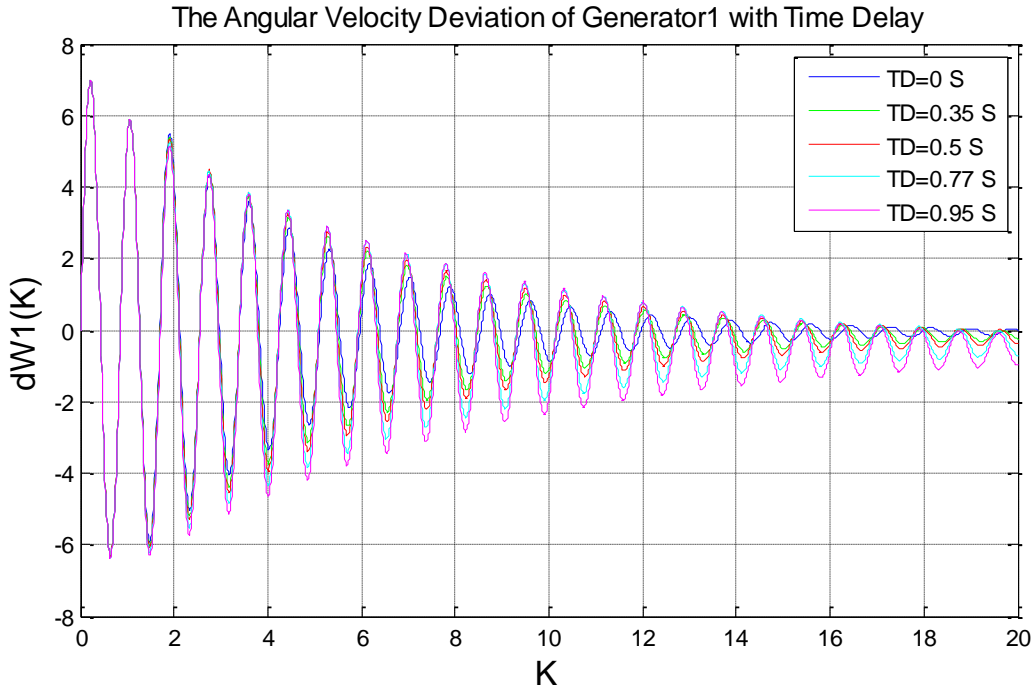
- ازدياد طفيف في قيمة المقدار Peak to Peak مع زيادة التأخير الزمني بالنسبة لخرج مجموعة التوليد الأولى، وتناقص طفيف في قيمته بالنسبة لخرج مجموعة التوليد الثانية والثالثة.
- زيادة قليلة في عدد الحواف الصاعدة Rising Edge (الحواف الموجبة +Edge والسالبة -Edge) بالنسبة لخرج مجموعات التوليد الثلاث حتى الوصول إلى القيمة $\tau = 0.77S$ عندها تعود للتناقص.
- يأخذ زمن الارتفاع Rise Time قيم متغيرة بالنسبة لخرج مجموعات التوليد الثلاث مع زيادة التأخير الزمني وهو متغير له تأثير هام جداً في دراسة نظم التحكم الحديث، ولكن تأرجحه ضمن هذه القيمة يعود إلى أن النظام التحكمي ما زال مستقراً على الرغم من زيادة التأخير (ضمن المجال [0-0.77S]). وعند زيادة التأخير الزمني عن القيمة $\tau = 0.77S$ واستمراره في الزيادة يزداد زمن الارتفاع بشكل ملحوظ للدلالة على أن خرج نظام التحكم الشبكي المتقطع أصبح غير مستقر حتى مع وجود المتحكم الأمثل LQR.
- كما هو ملاحظ فإن زمن السقوط Fall Time يسلك سلوك زمن الارتفاع Rise Time، وذلك لأن البارامترات المطلوب دراستها هي التغير في السرعة الزاوية لخرج مجموعات التوليد الثلاث.
- ازدياد قيمة التردد بشكل واضح مع زيادة التأخير الزمني بالنسبة لخرج مجموعات التوليد الثلاث، إذ يحدث تشوه في الاستجابة الزمنية وتباطؤ في الاستقرار. للدلالة على أن استقرار نظام التحكم الشبكي يتأثر بشكل كبير عند زيادة التأخير الزمني عن المجال [0-0.77S].



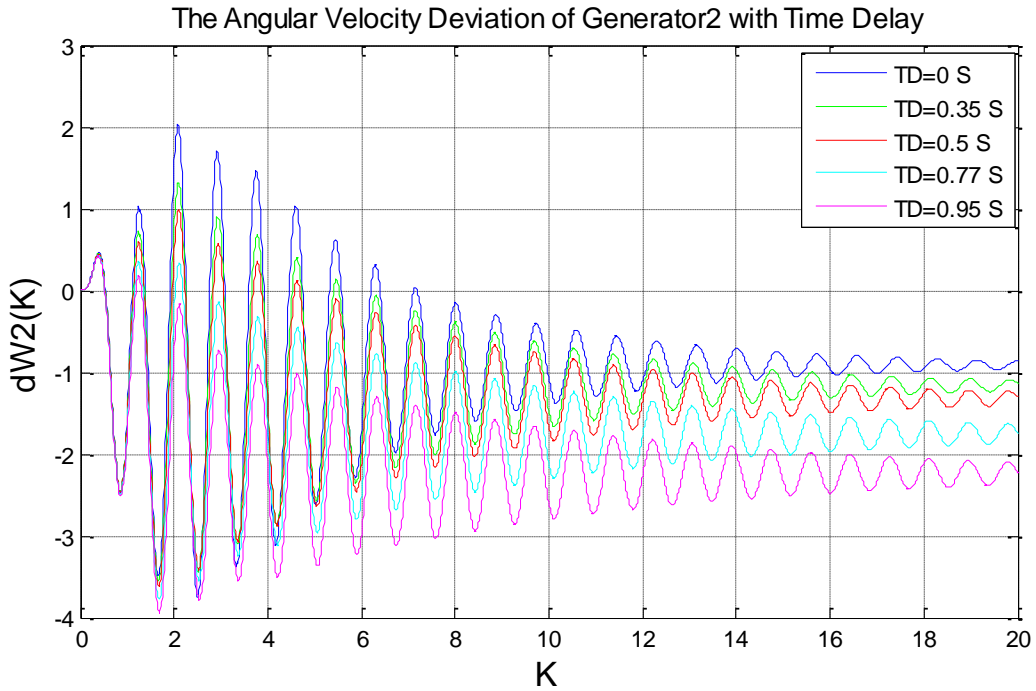
الشكل (6) نمذجة منظومة التحكم الشبكية المتقطعة لمجموعات التوليد الثلاث.



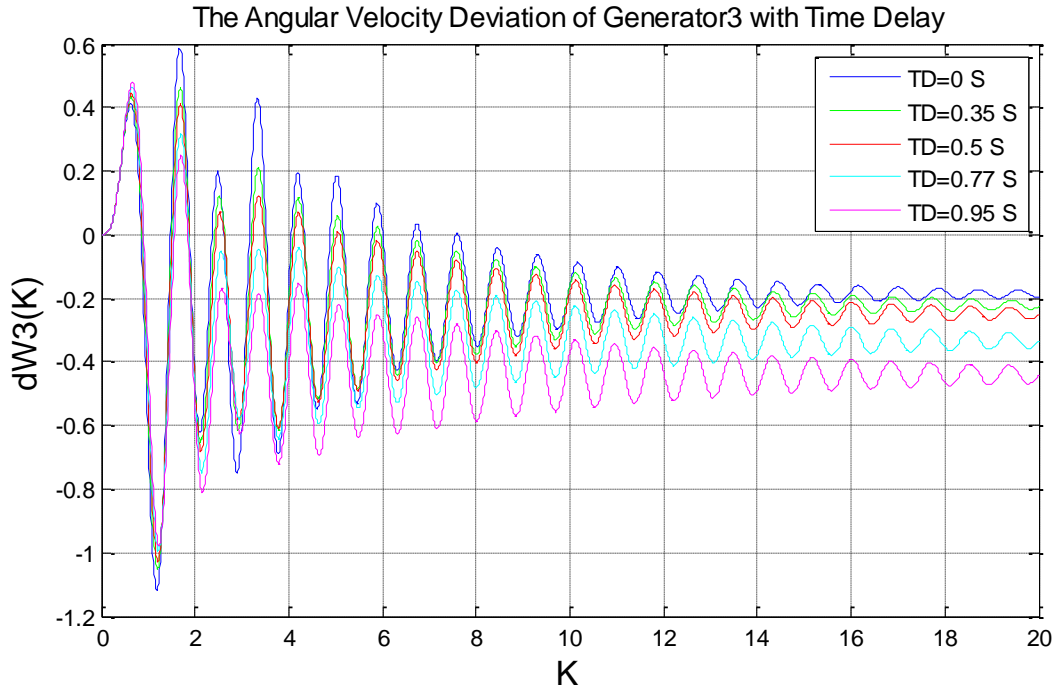
الشكل (7) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المفتوحة ($\tau = 0s$).



الشكل (8) الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الأولى في الحلقة المغلقة عند قيم متعددة للتأخير الزمني.



الشكل (9) الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الثانية في الحلقة المغلقة عند قيم متعددة للتأخير الزمني.



الشكل (10) الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الثالثة في الحلقة المغلقة عند قيم متعددة للتأخير الزمني.

الجدول (3) تأثير التأخير الزمني بالنسبة لخرج مجموعات التوليد الثلاث على بارامترات الاستجابة الزمنية.

خرج مجموعة التوليد الأولى ($\Delta\omega_1(kT)$)						
τ (Sec)	P2P	+Edge	Rise Time (ms)	-Edge	Fall Time (ms)	F (Hz)
0	13.317	16	31.120	17	31.516	1.177
0.35	13.332	17	26.640	18	26.771	1.191
0.5	13.339	18	25.523	19	25.520	1.193
0.77	13.353	19	22.694	20	22.519	1.196
0.95	13.362	18	68.646	19	69.429	1.191
خرج مجموعة التوليد الثانية ($\Delta\omega_2(kT)$)						
0	5.779	21	44.090	22	46.180	1.177
0.35	4.878	23	61.887	23	56.581	1.185
0.5	4.612	22	58.749	22	54.602	1.188
0.77	4.208	22	68.996	23	70.978	1.193
0.95	4.360	13	81.382	14	81.362	1.205
خرج مجموعة التوليد الثالثة ($\Delta\omega_3(kT)$)						
0	1.705	12	56.471	12	52.911	1.153
0.35	1.512	12	36.376	12	34.537	1.161
0.5	1.472	16	28.668	16	27.429	1.167
0.77	1.460	15	69.404	16	69.890	1.182
0.95	1.459	7	98.521	8	95.061	1.186

5-5 استنتاج مجموعة من الشروط والقواعد المعممة بهدف ضمان استقرار نظام التحكم الشبكي مع وجود التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية:

يمكن اتباع القواعد والشروط التالية ليتمكن الباحث من دراسة تأثير التأخير الزمني على أي نظام تحكم شبكي متقطع:

- 1- الحصول على القيم والثوابت الابتدائية الممثلة لنظام التحكم الشبكي المراد دراسة تأثير التأخير الزمني بين عناصره الفرعية، بشكل مشابه للثوابت الموصوفة في العلاقة (18).
- 2- ضرورة ان تكون العلاقة خطية بين العناصر الفرعية المشكلة لنظام التحكم الشبكي.
- 3- تحديد أبعاد مصفوفات الحالة A, B, C, D, F الممثلة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر من خلال عدد الأنظمة الفرعية (i) وعدد المداخل (u) والمخارج (y) وفي حال وجود ضجيج (F) مطبق على بعض أو كل الأنظمة الفرعية بنسب مختلفة، كما يلي:

$$A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, C \in R^{p \times n}, D \in R^{p \times m}, F \in R^{n \times l}$$

فمثلاً من أجل ثلاث أنظمة فرعية ($i=j=3$) وكل نظام فرعي مؤلف من ($n=4$) متغيرات حالة تصبح أبعاد مصفوفات الحالة وفق الآتي:

$$A_{ij} \in R^{4 \times 4}, B_i \in R^{4 \times 1}, F_i \in R^{4 \times 1}, C_i \in R^{1 \times 4}, A \in R^{12 \times 12}, B \in R^{12 \times 3}, F \in R^{12 \times 3}, C \in R^{3 \times 12}, D \in R^{3 \times 3}$$

- 4- بتعويض الثوابت والقيم الابتدائية في النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المستمر (بشكل مشابه لنموذج مجموعة التوليد الموصوف بالعلاقة (18)) نحصل على معادلات الحالة ومنها نصل إلى قيم مصفوفات الحالة الممثلة للنظام الفرعي وترابطه مع غيره من الأنظمة الفرعية الأخرى بشكل مماثل للعلاقات (19, 20, 21).
- 5- تطبيق العلاقة (22) لاستنتاج نظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر المؤلف من $n \times i$ متغير حالة و u مدخل، مع إضافة ضجيج F بنسب مختلفة لبعض أو كل الأنظمة الفرعية.
- 6- تقطيع مصفوفات الحالة A, B, C, D, F الممثلة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر وفق العلاقة (7) لنحصل على نظام التحكم الشبكي الإجمالي المتقطع بمصفوفات الحالة المتقطعة $F(K), H(K), G(K)$ مع إمكانية تغيير طريقة التقطيع وزمن أخذ العينات T.
- 7- نختار قيم المصفوفات R و Q بأن تكون موجبة التحديد Pd، لتكون دالة الإنجاز الممثلة لنظام التحكم الشبكي والموصوفة بالعلاقة (2) أصغرية، وفق الأبعاد التالية:

$$Q \in R^{n \times n}, R \in R^{m \times m}$$

- 8- تطبيق المتحكم LQR على نظام التحكم الشبكي الإجمالي المتقطع والتأكد من أن المصفوفة P موجبة التحديد Pd من العلاقة (4) عندها فإن النظام التحكمي المتقطع مستقر ويمكن أمثله.
- 9- حساب مصفوفة الريح الخلفي K للمتحكم LQR لنظام التحكم الشبكي من العلاقة (3).
- 10- حساب إشارات التحكم للتغذية العكسية الناتجة من الأنظمة الفرعية المكونة لنظام التحكم الشبكي المتقطع وفق العلاقة (8).

11- نحسب قيم جذور المعادلة المميزة لنظام حلقة التحكم المغلقة باستخدام المتحكم LQR ومع وجود التأخير الزمني بين الأنظمة الفرعية لنظام التحكم الشبكي. وعند التغيير في قيمة التأخير الزمني نراقب قيم القسم الحقيقي لجذور النظام. في حال وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على يمين الساحة العقدية في فضاء لابلاس S عندها يكون نظام التحكم الشبكي المستمر غير مستقر. وعند وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على المحور

التخيلي في الفضاء S عندها فإن النظام الشبكي المستمر مستقر استقراراً حرجاً. من جهة أخرى للتأكد من استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع في فضاء الحالة مع وجود التأخير الزمني. نحسب القيمة المطلقة لجذور النظام في الحلقة المغلقة. في حال وجود قيمة واحدة على الأقل تقع خارج الدائرة الواحدة في الفضاء z عندها فإن النظام الشبكي المتقطع غير مستقر باستخدام المتحكم LQR. وعند وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على محيط الدائرة الواحدة في الفضاء z عندها فإن النظام الشبكي المتقطع مستقر استقراراً حرجاً باستخدام المتحكم LQR.

6- الخلاصة:

- 1- التوصل إلى مجموعة من الشروط والقواعد تطبق على أي نظام تحكم شبكي متعدد المداخل والمخارج بغض النظر عن أبعاد مصفوفات الحالة التي تصفه، بالإضافة إلى الضجيج الذي يمكن أن يطبق عليه بهدف التقليل من التأخير الزمني وضمان استقرار نظام التحكم الشبكي باستخدام متحكم LQR.
- 2- التوصل إلى أسلوب نمذجة مرن يمكن الباحث من التغيير بسهولة في قيمة التأخير الزمني ضمن برامج المحاكاة الحاسوبية لأي نظام تحكم شبكي يعاني من تأخير زمني بين أنظمتها الفرعية.
- 3- تم تطبيق القواعد والشروط المعممة والمستنتجة في الدراسة على نظام تحكم شبكي لثلاث مجموعات توليد متزامنة متواجدة في ثلاث مناطق جغرافية منفصلة مع أخذ التأخيرات الزمنية فيما بينها بعين الاعتبار. بالإضافة إلى تطبيق ضجيج بمقدار 5% على مجموعة التوليد الأولى. ومقارنة قيم متعددة للتأخير الزمني بين المولدات الثلاث، ومراقبة سلوك النظام عند تغير تلك القيم. إذ لوحظ تحسن كبير في استقرار النظام الشبكي المتقطع وسرعة في الاستجابة باستخدام المتحكم LQR، من خلال سرعة إخماد الاهتزازات الناشئة في النظام.
- 4- نصل عند زيادة التأخير الزمني باستخدام برامج المحاكاة الحاسوبية إلى مجال محدد يخرج عندها النظام بالكامل عن الاستقرار على الرغم من تطبيق المتحكم LQR. وهو المجال الذي يسمح للنظام مع وجود المتحكم بأن يكون مستقراً وعند تجاوزه يخرج النظام بالكامل عن الاستقرار. وبالتالي بالإمكان ضمان استقرار النظام عند حدود معينة للتأخير الزمني.

7- التوصيات والمقترحات.

يمكن للباحثين من خلال برامج المحاكاة الحاسوبية إيجاد مجال شبه تقريبي للحد الأعظمي للتأخير الزمني يجعل النظام مستقراً من خلال التجريب. ولكن من الصعوبة إيجاد القيمة الدقيقة جداً والتي من الممكن أن تختلف من نظام لآخر، لذلك نسعى لإيجاد طرق رياضية تعطي القيمة الدقيقة للتأخير الزمني تضاف إلى القواعد والشروط المعممة لأي نظام تحكم شبكي مع الأخذ بعين الاعتبار الضجيج المطبق عليه. وذلك لكون الكثير من الأنظمة التحكمية حساسة جداً للتأخيرات الزمنية الصغيرة، والتي يمكن أن تهمل في أنظمة أخرى.

8- قائمة المراجع.

- 1- Mahmood, A.K. and Khairy, H.S (2017)- Time delay compensation for wireless networked control systems based on modified smith predictor– Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 11(4), 14-23.

- 2- Ahmed, M.K (2017)- Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor – International Journal of Engineering Science and Computing, 7(7), 14069-14074.
- 3- Meghanasingh (2017)- Effects of Time Delay on different types of controller for networked control system – International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(4), 993-999.
- 4- Sakr, A., El-Nagar, A.M., El-Bardini, M. and Sharaf, M (2016)- Fuzzy Smith Predictor for Networked Control Systems– 2016 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), Cairo, Egypt, 20-21/12/2016. DOI: 10.1109/ICCES.2016.7822045.
- 5- Liu, F., Li, F. and Xiao, D.(2016)- The Design of Fuzzy PID Controller for Networked Systems with Random Time Delay – International Journal of Grid and Distributed Computing, 9(3), 117-124.
- 6- Khanesar, M.A., Kaynak, O., Yin, S.and Gao, H (2015)- Adaptive Indirect Fuzzy Sliding Mode Controller for Networked Control Systems Subject to Time-Varying Network-Induced Time Delay – IEEE Transactions on Fuzzy System, 23(1), 205-214.
- 7- Dang, X.K., Guan, Z.H., Li, T. and Zhang, D.X.(2012)- Joint Smith predictor and neural network estimation scheme for compensating randomly varying time-delay in networked control system. 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, China, 23-25/5/2012. DOI: 10.1109/CCDC.2012.6244077.
- 8- Mayank G, Avadh P, Sunil M, Bhargav A, Ersan K, Nicu B, and Phatiphat T (2021)- A Comprehensive Review of the Evolution of Networked Control System Technology and Its Future Potentials. MDPI. PP. 1–39. <https://doi.org/10.3390/su13052962>
- 9- Wang, F.Y. and Liu, D (2008)- Networked Control Systems: Theory and Applications – Beijing, China: Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-215-9>.
- 10- Nilsson, J(1998)- Real-time Control Systems with Delays. PhD Lund Institute of Technology.
- 11- Ling, W., Yu, X.D. and Zhi, E.D(2007)- Some basic issues in networked control systems. In: 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China, 23-25/5/2007. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318780.
- 12- Li, Z., Zhang, L. and Yu, B (2018)- H^∞ control for a kind of networked control systems with network induced time delay and data packet dropout. In: 2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hangzhou, 24-27/12/2018. DOI: 10.1109/ICCAIS.2018.8570343.
- 13- Vrdoljak, K., Peric, N. and Petrovic, I.(2010)- Sliding mode based load-frequency control in power systems. Electric Power Systems Research, 80(5), 514-527. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.10.026>
- 14- Liu, X., Nong, H., Xi, K. and Yao, X.(2013)- Robust distributed model predictive load frequency control of interconnected power system. Hindawi Publishing Corporation /Mathematical Problems in Engineering, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/468168>.

- 15- Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Pearson, 2009.
- 16- Jeffery B. Burl, (1999) - Linear Optimal Control, Addison-Wesley.
- 17- Kun L, Anton S and Emilia F (2019)- Survey on time-delay approach to networked control. Elsevier Science. PP. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.005>
- 18- OLUGBENGA O (2014)- DESIGN OF NONLINEAR NETWORKED CONTROL FOR WASTEWATER DISTRIBUTED SYSTEMS. Cape Peninsula University of Technology.
- 19- Marpaung, J., Saleh, M. and Hardiansyah.(2019)- Power system stability improvement through multilevel optimal control strategy. The International Journal of Engineering and Science (IJES), 8(11), 14–19.
- 20- S S Lee and J K Park (1998)- Design of power system stabilizer using observer/sliding mode, observer/sliding mode-model following and H^∞ /sliding mode controllers for small signal stability study Elsevier Science. Vol. 20, No. 8, PP. 543–553.