جامعة حلب

كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية

قسم نظم القدرة الكهربائية

تحسين جودة القدرة الكهربائية لشبكة كهربائية تغذي حمل غير خطي

إعداد الطالب: محمد علي قطّان 207047

إشراف المهندسة: بيان عقاد

14 أيار/مايو 2026

26 ذو القعدة 1447

الفهرس

الوظيفة 1 : مرشح التردد الرنيني 1

القسم الأول: توصيف المنظومة والنمذجة 2

القسم الثاني: الحسابات النظرية للمرشحات 5

القسم الثالث: التطبيق العملي على MATLAB 7

القسم الرابع: الاستنتاجات 19

الوظيفة 2 : مرشح التمرير المنخفض 20

الوظيفة 1

تصميم مرشحات التردد الرنيني (Tuned Filters) للتوافقية السابعة والحادية عشرة في نظام قدرة ثلاثي الطور مع حمولة غير خطية للتخلص من التوافقيات وضمان جودة الطاقة ضمن الحدود المسموح بها.

1

توصيف المنظومة والنمذجة

تتمثل الخطوة الأساسية في هذه الدراسة في بناء نموذج دقيق للنظام الكهربائي باستخدام مكتبة Specialized Power Systems في بيئة MAT-LAB R2023b. تم تصميم الدارة لتمثيل شبكة تغذية تغذي حملاً غير خطي، مع الأخذ بعين الاعتبار الممانعات المختلفة التي تؤثر على جودة القدرة.

1.1 مكونات الشبكة (Network Components)

يتألف النموذج من العناصر التالية، والتي تم ضبط بارامتراتها بناءً على الحسابات الهندسية الموضحة في الجلسة الثانية:

1. **منبع الجهد (Three-Phase Source)**: يمثل محطة التحويل بجهد اسمي قدره $400V$ (بين الأطوار) وتردد $50Hz$. تم ضبط قيمة الذروة في الموديل لتكون $220\sqrt{2}V$.

تذكر

يجب ضبط الإزاحة الطورية بين المنابع الثلاثة بزاوية $120°$ لتكون $(0°, -120°, 120°)$ للأطوار A و B و C على التوالي، لتجنب ظهور تيارات تسلسل صفري غير مرغوبة.

2. **ممانعة القصر للشبكة (Z_{sc}):** تم تمثيلها باستخدام بلوك Series RLC Branch بقيم محسوبة لتعكس استطاعة قصر قدرها $500MVA$، حيث بلغت المقاومة $R_{sc} = 3.184 \times 10^{-3}\Omega$ والحث $L_{sc} = 1mH$ لضمان ظهور تشوه الجهد بوضوح عند التحليل.

3. **ممانعة المحولة (Z_T):** تم تمثيل المحولة $(1000KVA)$ بممانعة تسلسلية منسوبة للطرف الثانوي قيمتها $R_T = 2.08 \times 10^{-3}\Omega$ و $L_T = 3.05 \times 10^{-5}H$.

4. **ممانعة الكبل (Cable Impedance):** كبل نحاسي بطول $230m$ ومقطع $16mm^2$، بممانعة قدرها $R = 0.256\Omega$ و $L = 6.05 \times 10^{-5}H$.

5. **الحمل غير الخطي (Non-linear Load):** يتكون من جسر تقويم ديودي سداسي النبضات (Universal Bridge) يغذي حملاً مستمراً (RL Load) باستطاعة $25KW$، حيث تبلغ مقاومة الحمل 10.6Ω وتحريضه $1mH$.

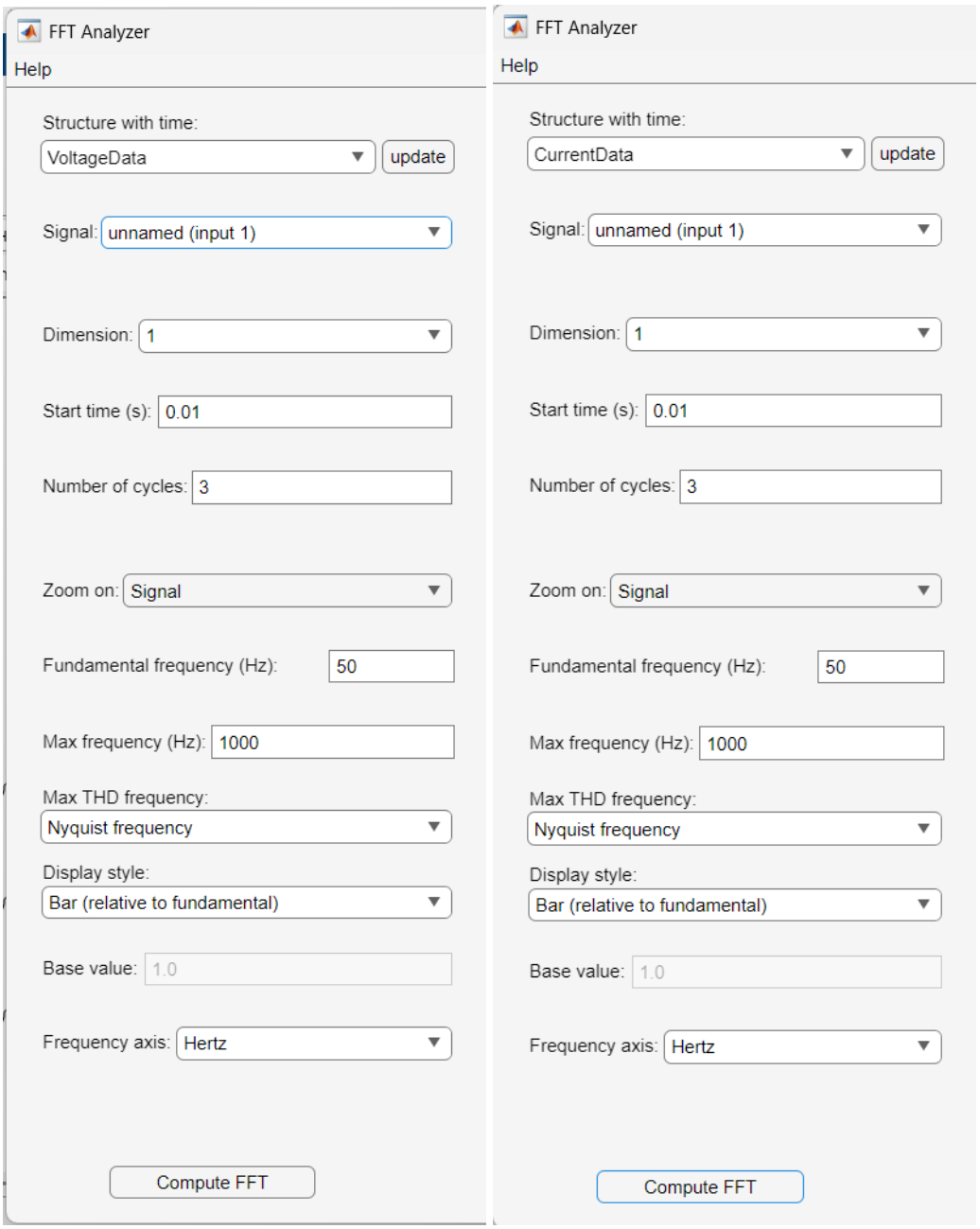
2.1 إعدادات المحاكاة (Simulation Settings)

للحصول على نتائج دقيقة في تحليل التوافقيات $(FFTAnalysis)$، تم ضبط بلوك powergui وفق المعايير التالية:

- تم اختيار **Simulation type** على الوضع Discrete (متقطع) بدلاً من الوضع المستمر، وذلك لأن النظام يحتوي على عناصر إلكترونيات قدرة (Diodes) تتطلب تمثيلاً دقيقاً لعمليات التبديل.
- تم تحديد زمن العينة **Sample time** بقيمة دقيقة جداً وهي $1 \times 10^{-6}s$. هذا الزمن الصغير ضروري جداً لالتقاط الرتب التوافقية العالية بدقة ومنع حدوث أخطاء "الطي" (Aliasing) في الطيف الترددي.

3.1 إعدادات أداة التحليل (FFT Tool Configuration)

قبل البدء بعملية الترشيح، تم ضبط السكوبات الخاصة بالجهد والتيار لتسجيل البيانات في مساحة العمل (Workspace) بتنسيق Structure with time. في أداة FFT، تم ضبط التردد الأساسي على $50Hz$، وتحليل الإشارة بدءاً من الزمن $0.01s$ لضمان استقرار الدارة.



شكل 1: إعدادات أداة التحليل (FFT) للتيار (يمين) وللجهد (يسار)

2

الحسابات النظرية للمرشحات

لتحسين جودة القدرة وتخفيض نسبة التشوه التوافقي (THD)، يتم تصميم مرشحات تردد رنيني **(Tuned Filters)** تسلسلية من النوع (RLC). الهدف من هذه المرشحات هو توفير مسار منخفض الممانعة لتيارات التوافقيات عند ترددات الرنين الخاصة بها، مما يمنعها من الانتشار في الشبكة.

تعتمد الحسابات على البارامترات الأساسية التالية المستخرجة من "الجلسة الثالثة":

- **التردد الأساسي (f):** $50Hz$.
- **سعة المكثف (C):** تم حسابها سابقاً لتصحيح عامل الاستطاعة وهي ثابتة لكافة المرشحات: $C = 3.339 \times 10^{-5}F$.
- **عامل الجودة (Q):** تم اختياره بقيمة 75 لتحقيق دقة ترشيح مناسبة وتوازن بين عرض الحزمة وممانعة الرنين.

1.2 قوانين التصميم المستخدمة

تعتمد عملية الحساب على القوانين الفيزيائية التالية:

1. **تردد الرنين (f_r):** $f_r = n \times f$ (حيث n هي رتبة التوافقية).
2. **قانون الحث (L):** يُشتق من علاقة الرنين الأساسية $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ليصبح:

$$L_n = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 \times C}$$

3. **قانون المقاومة (r):** يُشتق من علاقة عامل الجودة $Q = \frac{X_0}{r}$ حيث $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$، ليصبح:

$$r_n = \frac{\sqrt{L_n/C}}{Q}$$

2.2 حسابات مرشح التوافقية السابعة ($n = 7$)

- **تردد الرنين:** $f_{r7} = 7 \times 50 = 350Hz$.
- **حساب الحث (L_7):**

$$L_7 = \frac{1}{(2\pi \times 350)^2 \times 3.339 \times 10^{-5}} \approx \mathbf{0.00619H} \text{ أو } (6.19mH)$$

- **حساب المقاومة (r_7):**

$$r_7 = \frac{\sqrt{0.00619/3.339 \times 10^{-5}}}{75} \approx \mathbf{0.1815}$$

3.2 حسابات مرشح التوافقية الحادية عشرة ($n = 11$)

- **تردد الرنين:** $f_{r11} = 11 \times 50 = 550Hz$.
- **حساب الحث (L_{11}):**

$$L_{11} = \frac{1}{(2\pi \times 550)^2 \times 3.339 \times 10^{-5}} \approx \mathbf{0.0025H} \text{ أو } (2.5mH)$$

- **حساب المقاومة (r_{11}):**

$$r_{11} = \frac{\sqrt{0.0025/3.339 \times 10^{-5}}}{75} \approx \mathbf{0.115}$$

4.2 ملخص قيم عناصر المرشحات

الجدول التالي يلخص القيم التي سيتم إدخالها في نموذج **Simulink** لإتمام عملية الترشيح:

رتبة التوافقية (n)	التردد (Hz)	الحث (L) [H]	المقاومة (R) [Ω]	السعة (C) [F]
التوافقية 5	250	0.0121	0.253	3.339×10^{-5}
التوافقية 7	350	0.00619	0.1815	3.339×10^{-5}
التوافقية 11	550	0.0025	0.115	3.339×10^{-5}

جدول 1: ملخص قيم عناصر مرشحات القدرة في نموذج المحاكاة

3

التطبيق العملي على MATLAB

يتناول هذا القسم مراحل تنفيذ النموذج وتطويره تدريجياً، مع توضيح الإعدادات البرمجية اللازمة لضمان الحصول على تحليل دقيق للتوافقيات باستخدام أداة **FFT Analysis** الملحقة ببلوك **powergui**.

1.3 إعداد أدوات القياس

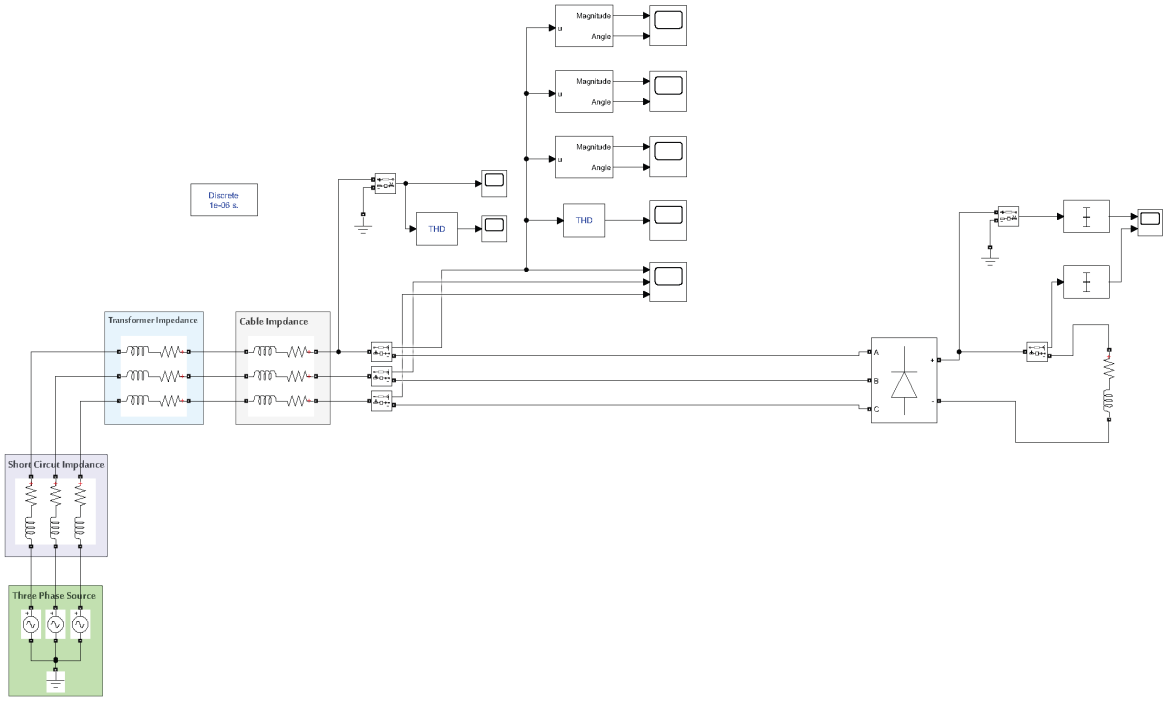
لتمكين البرنامج من تحليل الإشارات، تم إجراء تعديلات تقنية هامة على كتل السكوب (Scopes) الخاصة بالجهد والتيار قبل المقوم:

- **تسجيل البيانات (Data Logging):** تم تفعيل خيار **Log data to workspace** لضمان تصدير قيم الجهد والتيار إلى مساحة عمل ماتلاب.
- **تنسيق البيانات (Save Format):** تم ضبط تنسيق الحفظ على **Structure with time**، وهو التنسيق الوحيد الذي تتعرف عليه أداة تحليل FFT في النسخ الحديثة.
- **إعدادات الموديل:** تم إلغاء تحديد خيار **Single simulation output** من إعدادات الموديل (Model Settings) لضمان ظهور المتغيرات بشكل مستقل في قائمة FFT Analyzer.

- **اسم المتحولة (Variable Name):** تم تسمية المتحولة الخاصة بالتيار "CurrentData" وبالجهد "VoltageData" لتسهيل التعرف عليها أثناء التحليل.

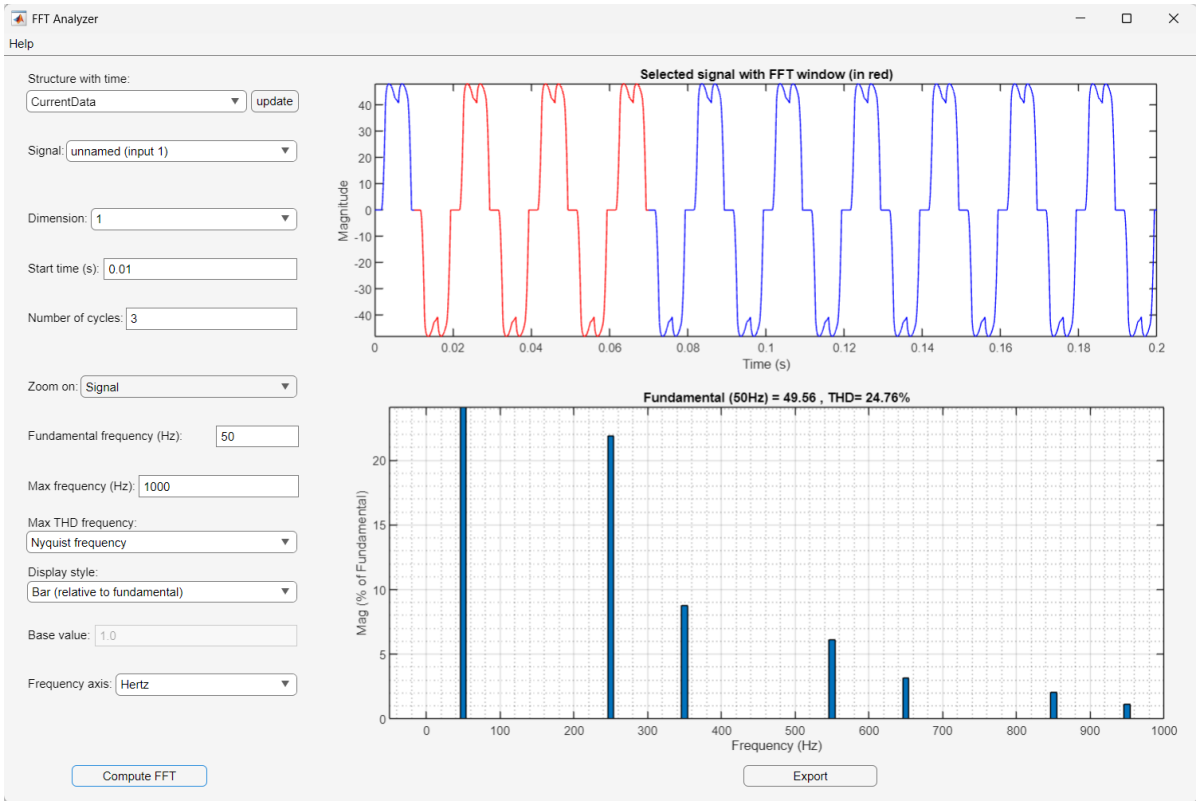
2.3 المرحلة الأولى: النظام بدون ترشيح

في هذه المرحلة، تم تشغيل الدارة في حالتها الأصلية حيث يغذي المنبع حمل القنطرة الديودية مباشرة عبر ممانعات الشبكة والكبل.

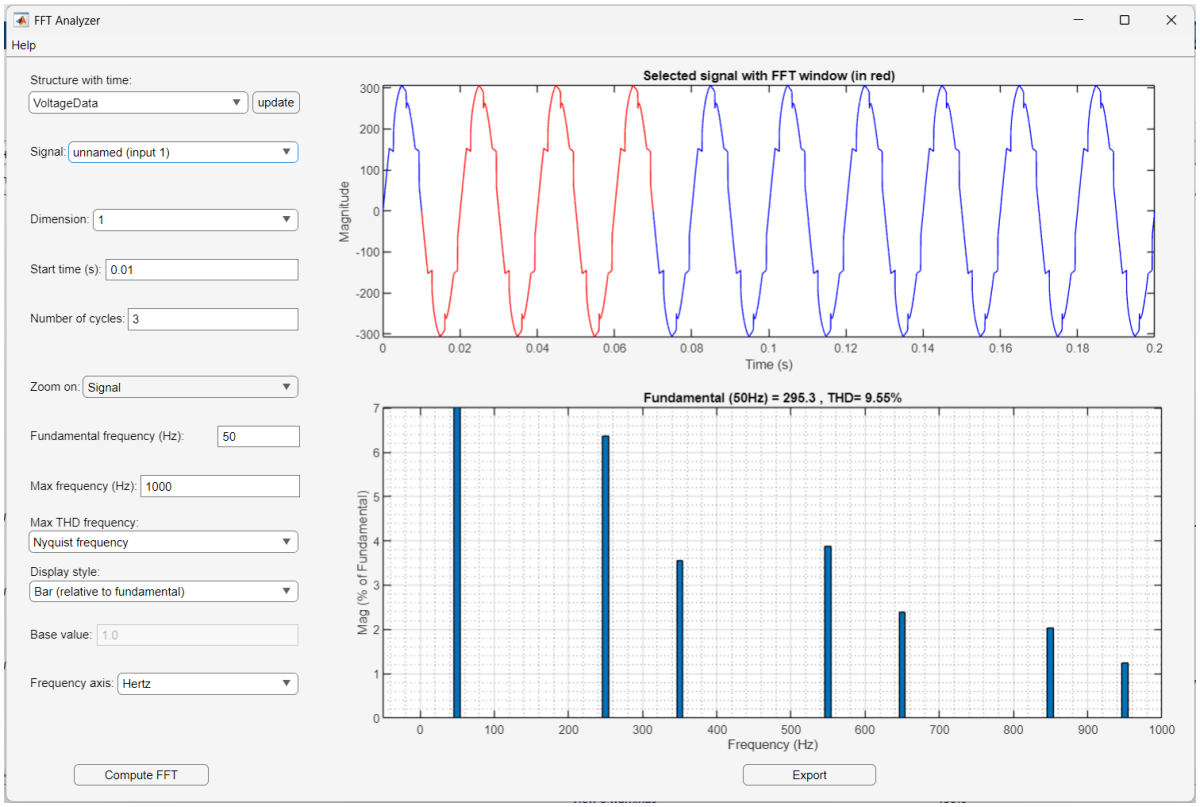


شكل 2: المخطط الكامل للدارة بدون مرشحات

أظهرت نتائج التحليل في هذه المرحلة تشوهاً كبيراً جداً في موجة التيار، حيث بلغت نسبة $THD_I = 24.76\%$, بينما كانت موجة الجهد أقل تأثراً بنسبة $THD_V = 9.55\%$ نتيجة وجود ممانعات الشبكة التي تعمل كمخمدات طبيعية.



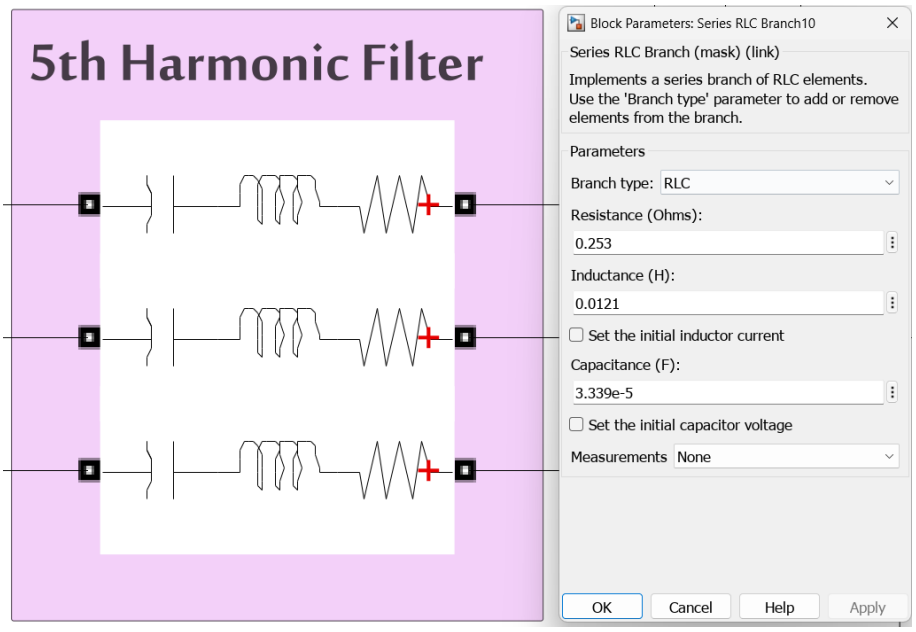
شكل 3: نتائج تحليل FFT للتيار قبل الترشيح - تظهر THD بنسبة 24.76%



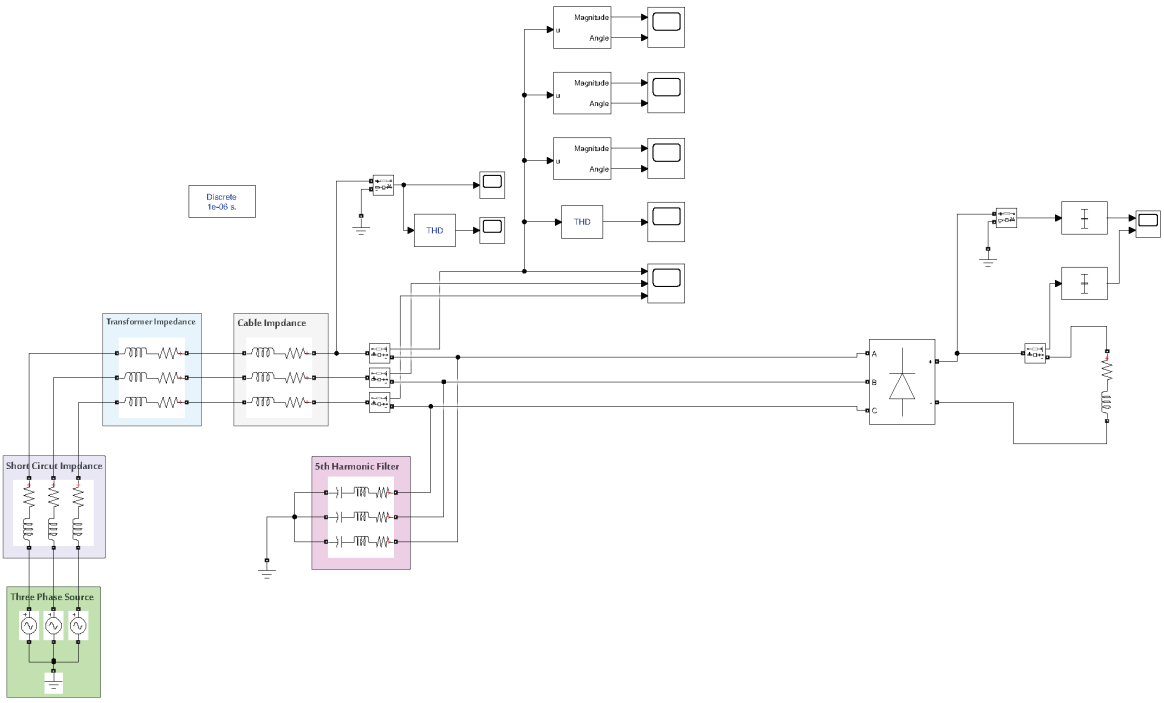
شكل 4: نتائج تحليل FFT للجهد قبل الترشيح - تظهر THD بنسبة 9.55%

3.3 المرحلة الثانية: إضافة مرشح التوافقية الخامسة ($n = 5$)

تمت إضافة أول فرع ترشيح رنيني (RLC) مصمم لاستهداف التوافقية الخامسة ($250Hz$)، وتم ضبط معاييره كما يلي: $R = 0.253\Omega$، $L = 0.0121H$، $C = 3.339 \times 10^{-5}F$.

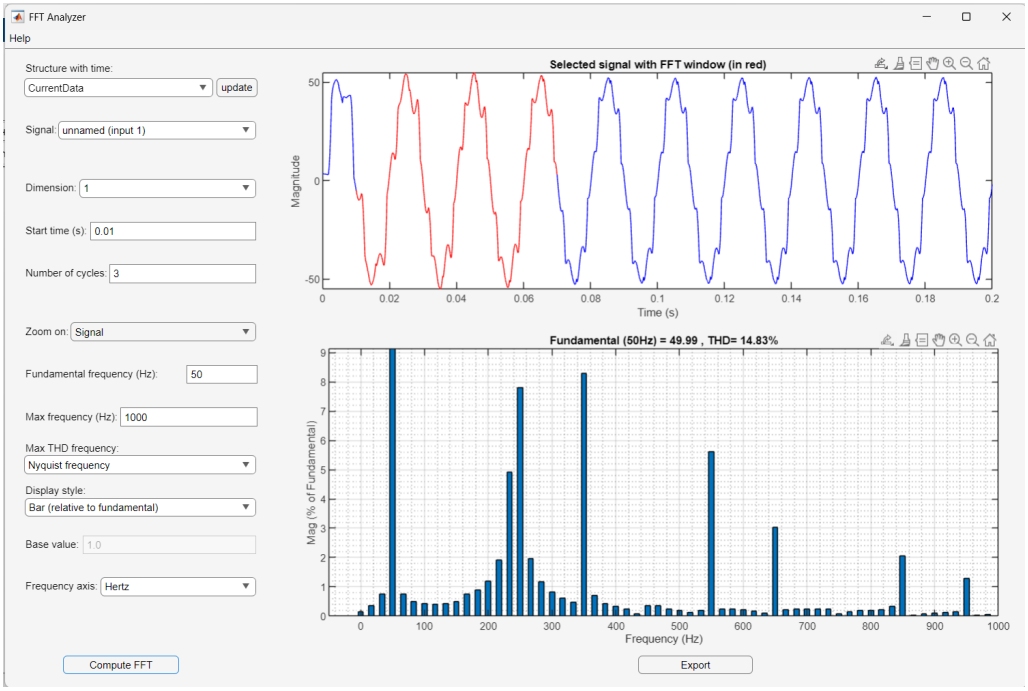


شكل 5: نافذة بارامترات مرشح التوافقية الخامسة في ماتلاب

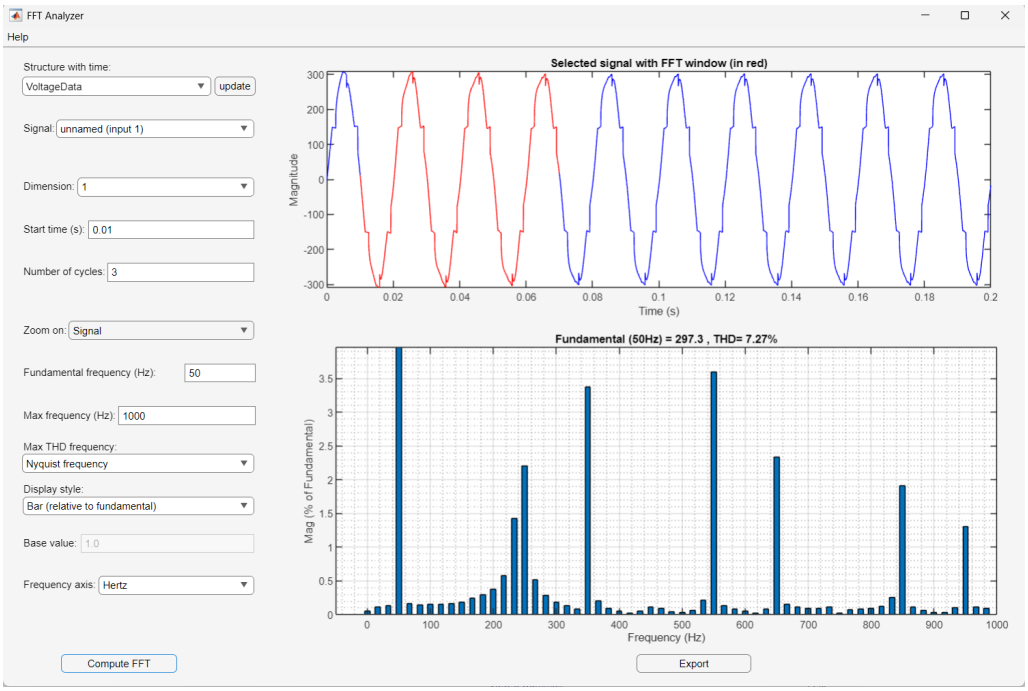


شكل 6: شكل الدارة بعد إضافة المرشح الأول ($n = 5$)

عند إضافة المرشح الأول ($n = 5$)، نلاحظ من خلال أداة التحليل تلاشي القمم المقابلة لهذا التردد في طيف التردد:



شكل 7: نتائج تحليل FFT للتيار بعد اضافة المرشح الأول - تظهر THD بنسبة 14.83%



شكل 8: نتائج تحليل FFT للجهد بعد اضافة المرشح الأول - تظهر THD بنسبة 7.27%

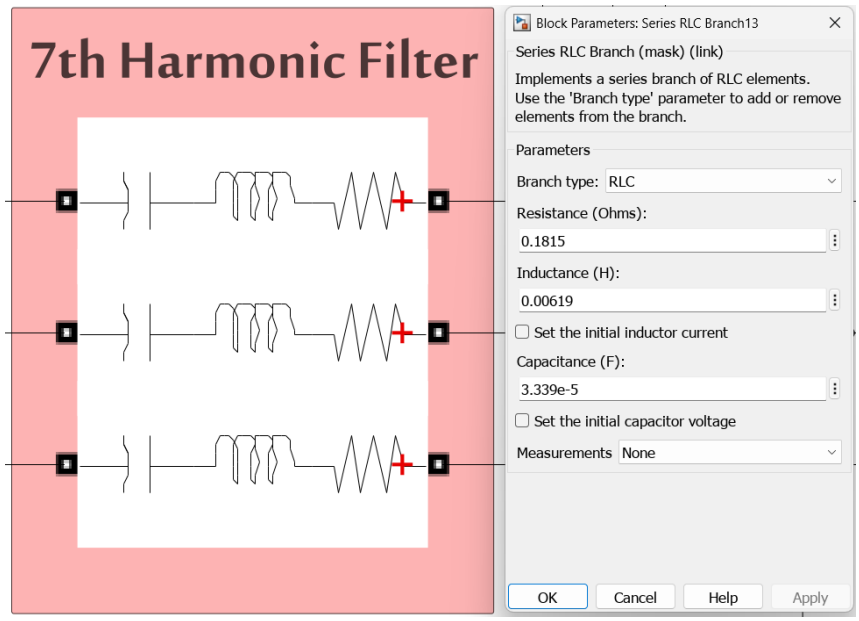
- أظهرت النتائج في الصورة (الشكل 7) انخفاضاً ملموساً في نسبة تشوه التيار بعد اضافة المرشح الأول، لتصل إلى 14.83%.
- أظهرت النتائج في الصورة (الشكل 8) استقرار نسبة تشوه الجهد عند 7.27% (بناءً على بارامترات ممانعة الشبكة المستخدمة في النموذج).

بعد المحاكاة، لوحظ انخفاض ملموس في نسبة التشوه التوافقي، مما يؤكد فعالية المرشح في امتصاص تيارات الرتبة الخامسة.

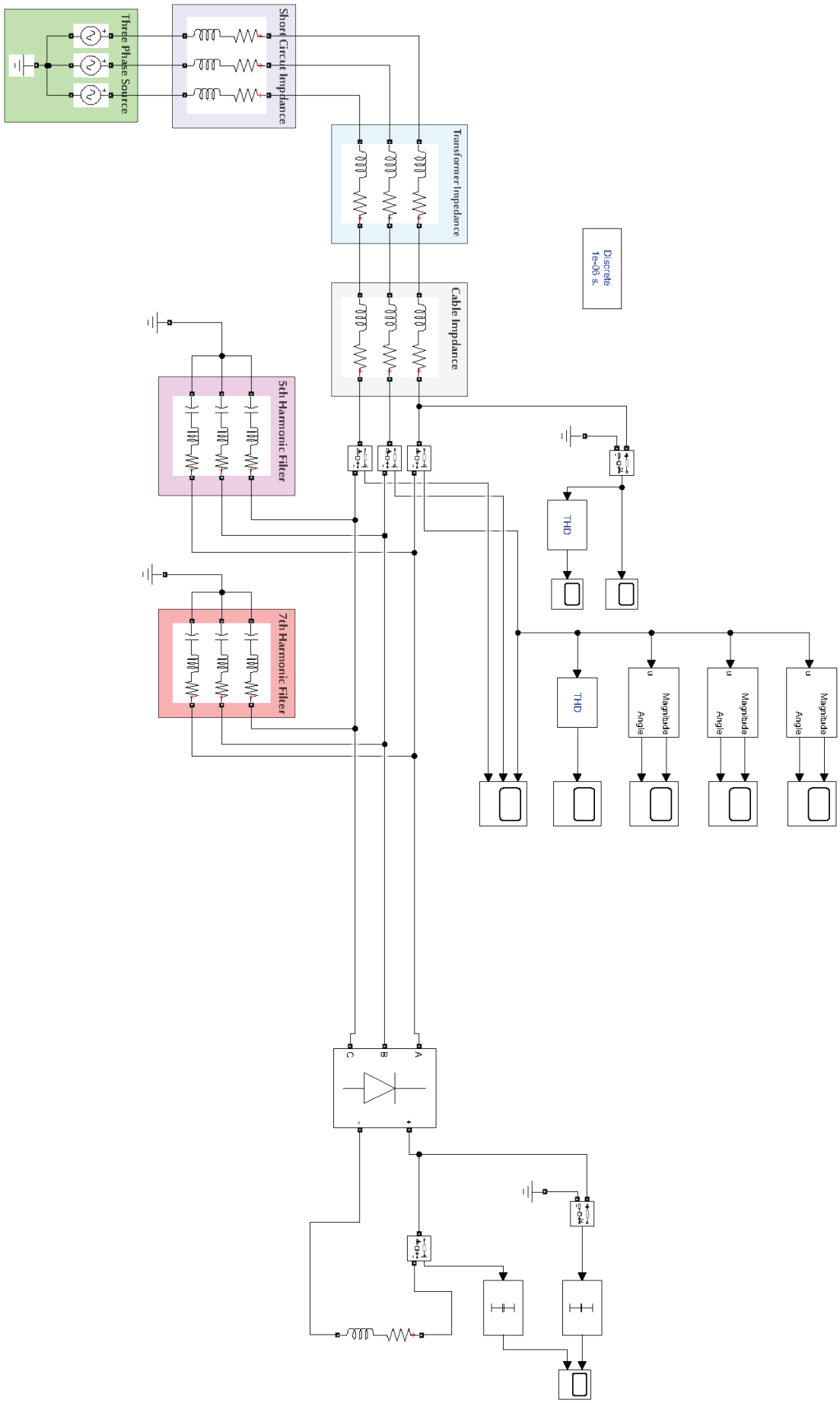
4.3 المرحلة الثالثة: الترشيح الكامل (إضافة الرتب $n = 7$ و $n = 11$)

وهي الخطوة المطلوبة في الوظيفة، حيث تم إدراج فرعين إضافيين على التوازي مع المرشح السابق:

1. **مرشح التوافقية السابعة ($n = 7$):** تم إدخال القيم المحسوبة نظرياً: $R = 0.1815\Omega$ و $L = 0.00619H$.

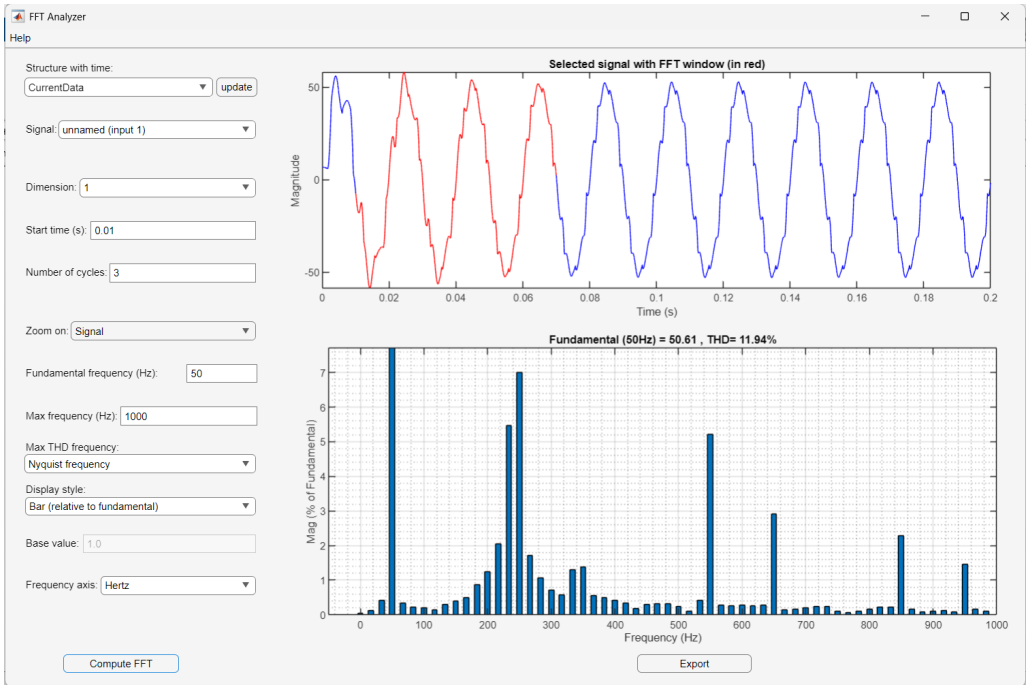


شكل 9: بارامترات مرشح التوافقية السابعة في ماتلاب

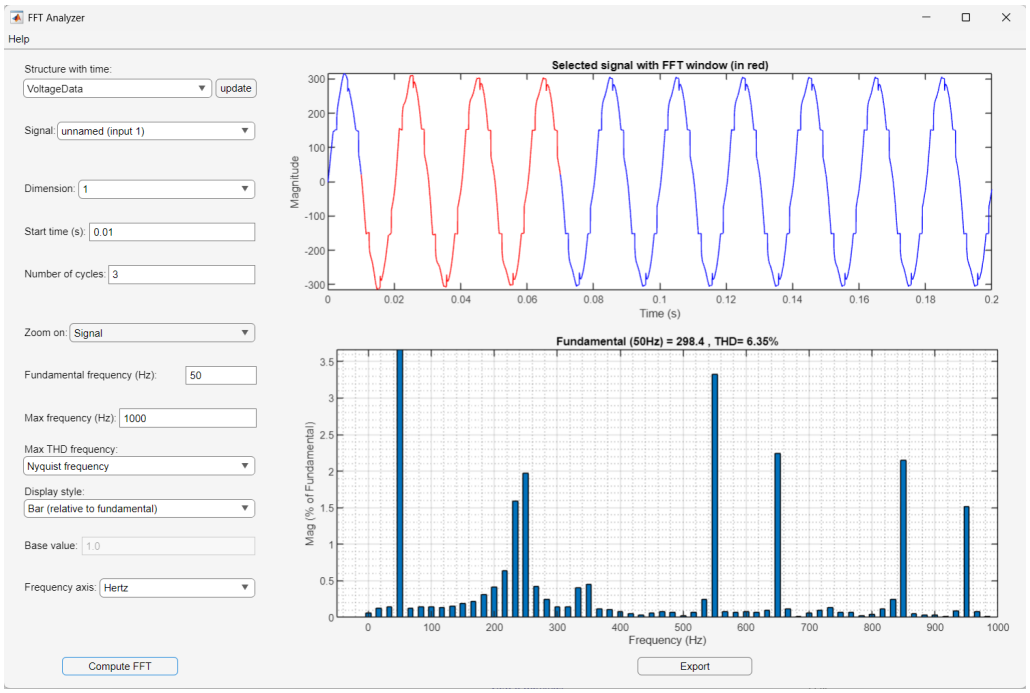


شكل 10: شكل الدارة بعد إضافة المرشح الثاني ($n = 7$)

عند إضافة المرشح الثاني ($n = 7$)، نلاحظ من خلال أداة التحليل تلاشي المزيد من القمم، نتيجة ترشيح التوافقيات المقابلة لهذا التردد، مما أدى إلى تحسين إضافي في جودة القدرة:



شكل 11: نتائج تحليل FFT للتيار بعد اضافة المرشح الثاني - تظهر THD بنسبة 11.94%

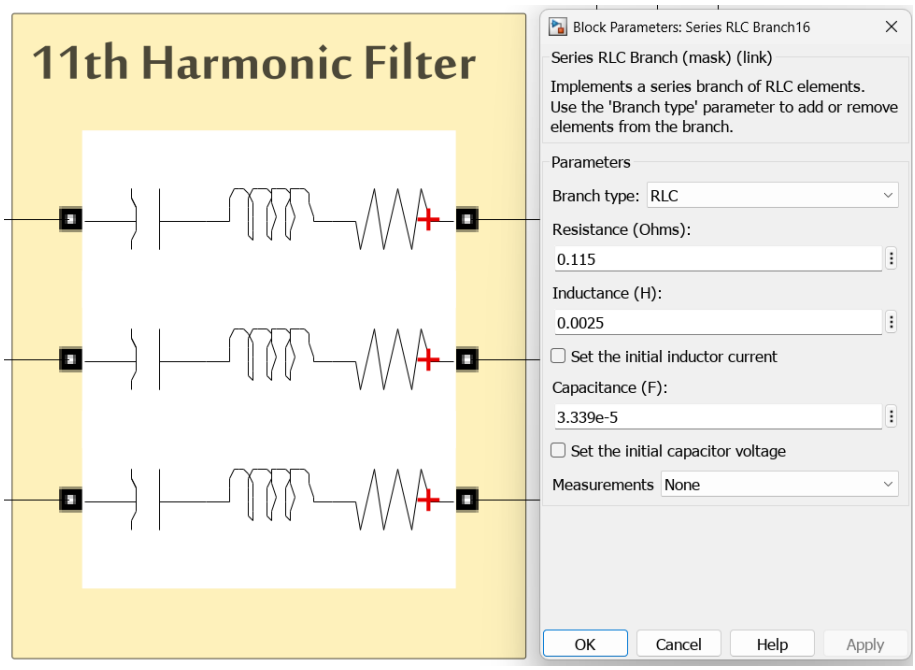


شكل 12: نتائج تحليل FFT للجهد بعد اضافة المرشح الثاني - تظهر THD بنسبة 6.35%

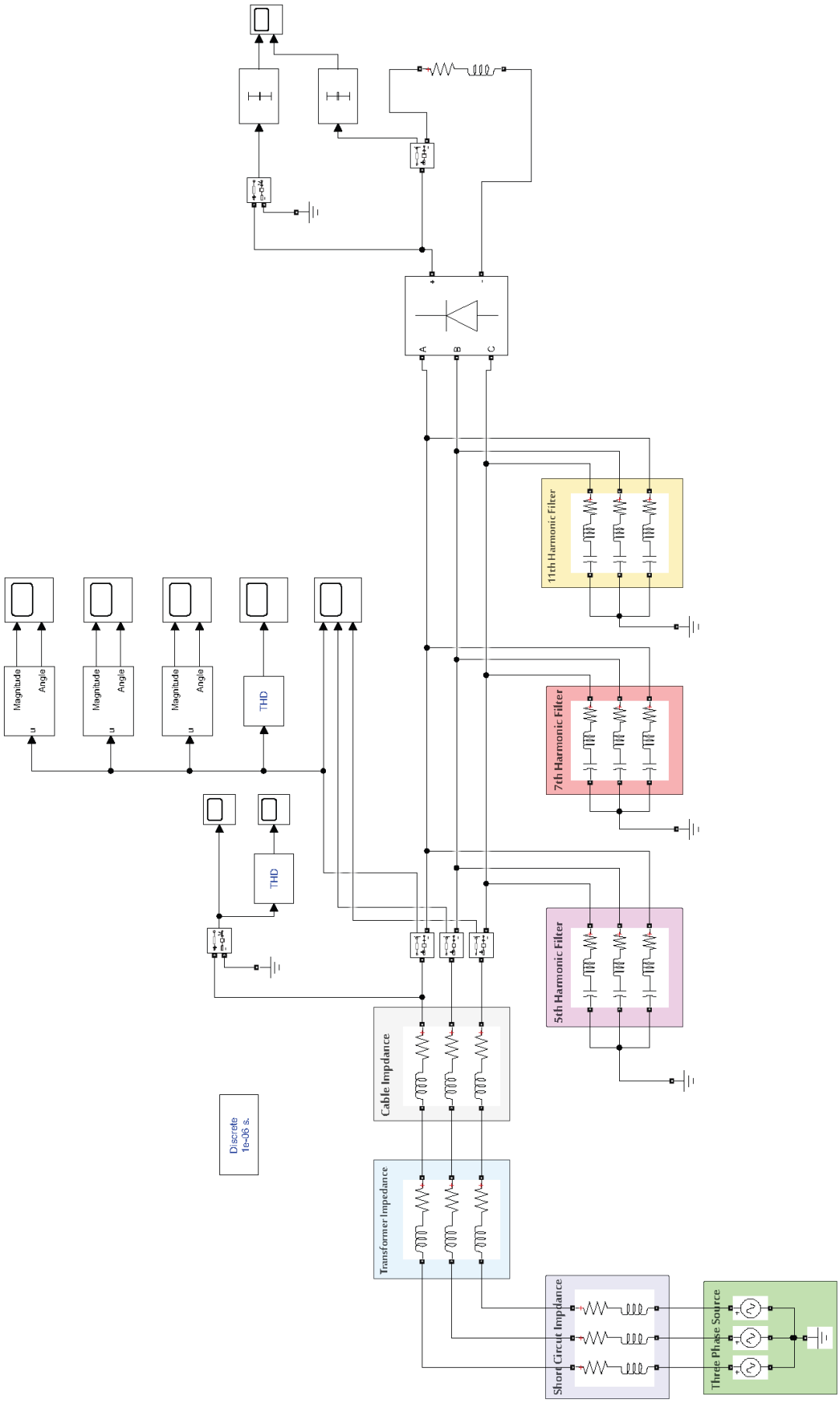
- أظهرت النتائج في الصورة (الشكل 11) المزيد من التحسن في نسبة تشوه التيار بعد اضافة المرشح الثاني، لتصل إلى 11.94%.
- أظهرت النتائج في الصورة (الشكل 12) تحسن آخر لا بأس به في نسبة تشوه الجهد واستقراره عند 6.35%.

2. **مرشح التوافقية الحادية عشرة ($n = 11$):**

تم إدخال القيم: $R = 0.115\Omega$ و $L = 0.0025H$.

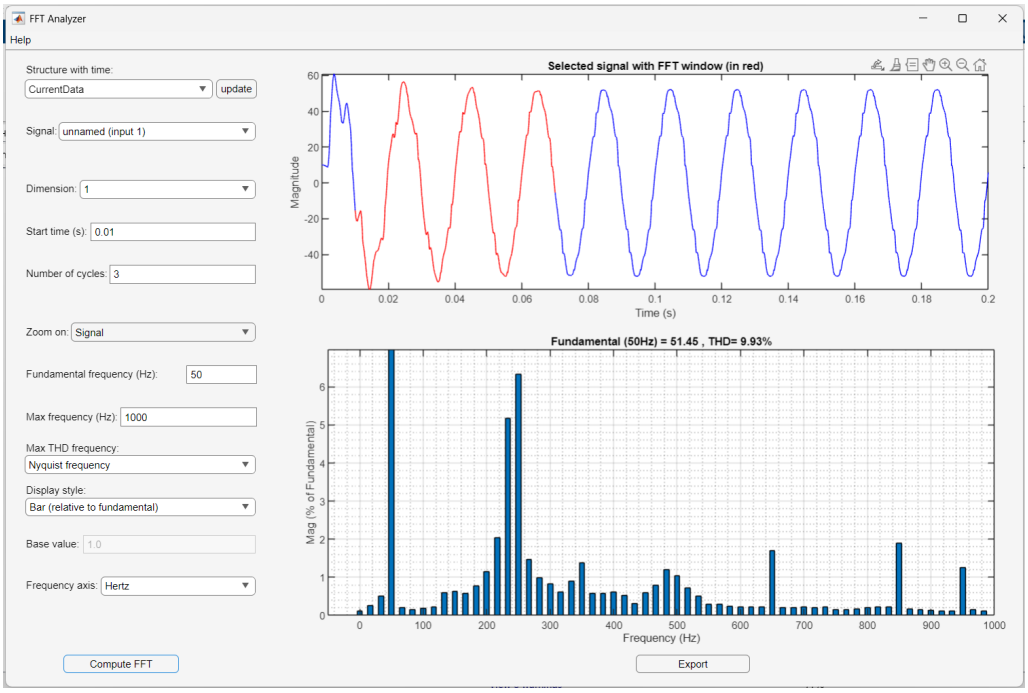


شكل 13: بارامترات مرشح التوافقية الحادية عشرة في ماتلاب

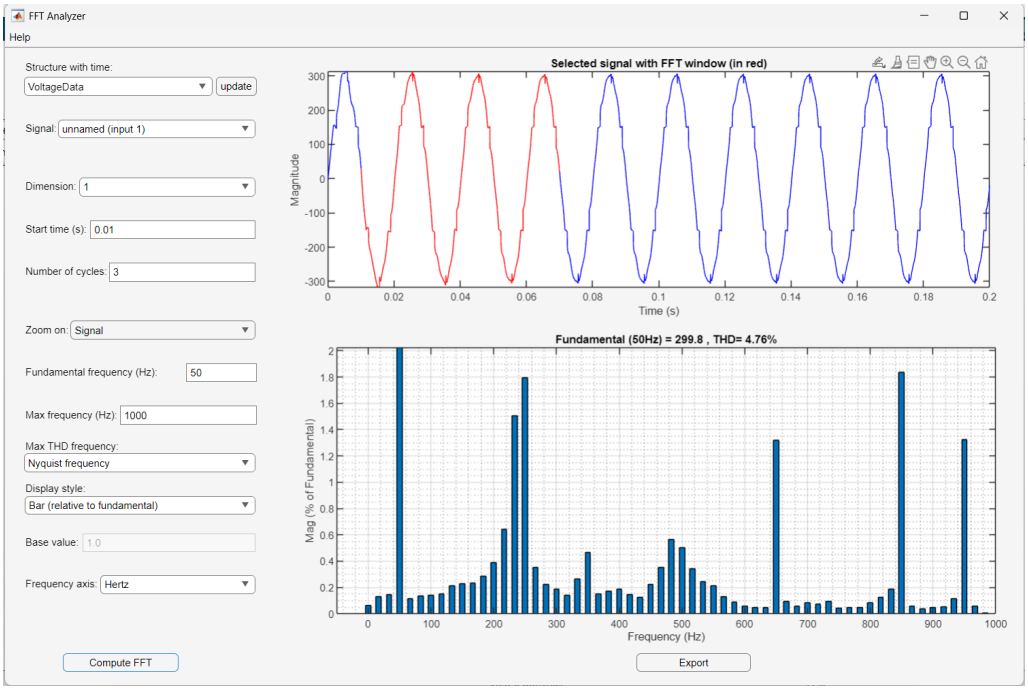


شكل 14: شكل الدارة النهائي مع كافة المرشحات

بإضافة المرشح الأخير المخصص للتوافقية الحادية عشرة ($550Hz$)، نصل إلى الحالة الشبه مثالية المطلوبة في الوظيفة:



شكل 15: نتائج تحليل FFT للتيار بعد اضافة المرشح الثالث - تظهر THD بنسبة 9.93%



شكل 16: نتائج تحليل FFT للجهد بعد اضافة المرشح الثالث - تظهر THD بنسبة 4.76%

- **تحليل التيار:** تظهر الصورة (الشكل 15) استمرار انخفاض نسبة التشوه الكلي للتيار واختفاء معظم المركبات التوافقية الضارة.
- **تحليل الجهد:** تظهر الصورة (الشكل 16) انخفاض نسبة THD للجهد إلى أدنى مستوياتها، مما يجعل موجة الجهد جيبية ونقية بشكل كبير.

4

الاستنتاجات

من خلال هذه الدراسة والمحاكاة العملية باستخدام برنامج **MATLAB R2023b**، يمكن تلخيص الاستنتاجات التالية:

1. **فعالية التصميم:** أثبتت مرشحات التردد الرنيني (**Tuned Filters**) كفاءة عالية في امتصاص تيارات التوافقيات عند ترددات الرنين المحددة، مما أدى لخفض نسبة THD بشكل تدريجي مع كل إضافة.
2. **تحسين جودة القدرة:** ساهمت المرشحات في تحسين معامل الاستطاعة وتقريب شكل موجة التيار والجهد من الشكل الجيبي النقي، مما يقلل من الفواقد والحرارة في عناصر الشبكة.
3. **مطابقة المعايير:** بفضل إضافة مرشحات الرتب 7 و 11، تمكنا من الحفاظ على جودة الجهد ضمن الحدود العالمية المسموح بها (غالباً أقل من 3% أو 5% حسب المواصفة).
4. **أهمية النمذجة:** أكدت الدراسة أن ضبط إعدادات المحاكاة (مثل وضع **Discrete** وزمن العينة الدقيق) واستخدام الإزاحة الطورية الصحيحة ($120°$) هي عوامل حاسمة للحصول على نتائج مطابقة للواقع الفيزيائي.

الوظيفة 2

تصميم مرشح التمرير المنخفض (Low-Pass Filter) للتقليل من أثر التوافقيات في نظام قدرة ثلاثي الطور مع حمولة غير خطية.