

Reaktif Güç Ölçümü İçin Bir Sayısal Filtre Tasarımı

A Digital Filter Design For Reactive Power Measurement

Fatih Yıldırım¹, İsmail Kaya¹, Ertuğrul Onat Yüngül¹, Salim Kahveci¹

¹Elektrik – Elektronik Mühendisliği

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi

yldirim.ftih@gmail.com, kyaismail08@gmail.com, yungulonat@gmail.com, salim@ktu.edu.tr

Özet

Alternatif akımın kullanıldığı güç sistemlerinde bağlı olunan güç dağıtım hattından çekilen akım seviyesinin belirlemek için akım trafoları kullanılmaktadır. Her analog ölçümde olduğu gibi ölçüm sonuçlarındaki gürültü, girişim ve harmonik gibi istenmeyen bileşenlerin varlığı ölçüm sonuçlarında hataya sebep olmaktadır. Ölçüme dahil olan bu istenmeyen bileşenlerin ölçüm sonuçlarından çıkarılması için uygulamalarda gerek gösterdikleri performans gerekse de kolaylıkla değiştirilebilir özelliklerinden dolayı sayısal filtreler tercih edilmektedir. Bu çalışma, ticari bir projenin de konusu olan, güç dağıtım hatlarındaki reaktif güç tüketimine ait ölçümleri %1'den daha düşük hata ile süzülmesini sağlayan sayısal bir filtrenin MATLAB® ortamında tasarlanması üzerinedir. Tasarımda modellenen akım işareti 1kHz'de örneklenmiş $I_{PP}=2V$ 50Hz'lik bir sinüs iken istenmeyen bileşenleri modellemede ise farklı varyans ve ortalama değerlerde Gauss gürültü kullanılmıştır.

Abstract

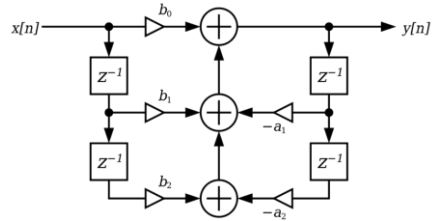
The electric meters used to measure the amount of electricity consumption measure both active and reactive power consumption in the distribution line with current transformers. As it is encountered in every analog measurement, existing of undesired components such as noises, interferences and harmonics are caused mistakes. In order to remove this undesirable information included in the measurement from the measurement results, digital filters are used in applications because of their performance and their easily replaceable features. In this study, the subject of a commercial project is to design a digital filter in MATLAB® environment, which allows filtering the measurements of reactive power consumption in power distribution lines with less than 1% error. While the power signal modeled in the design is a sine of $V_{PP}=2A$ 50 Hz, Gaussian noise with different variances and mean values is used in modeling the unwanted components.

1. Giriş

Tüketilen elektrik enerjisine ait miktarın ölçülmesinde elektrik sayaçları kullanılmaktadır. Tüketilen bu enerjinin hesaplanabilmesi için hattın gerilimi ve bu hattın çekilen akımın ölçülmesi gerekmektedir. Güç dağıtım hattından çekilen akım bilgisi, akım trafoları kullanılarak ölçülmektedir. Yapılan ölçümler analog olduğu için akım trafosundan alınan sonuçlar devrede bulunan mikrodenetleyicideki analog – sayısal çevirici birimler tarafından sayısal olarak çevrilerek tüketim miktarı hesaplanmaktadır. Buradaki problem ise her analog ölçümde

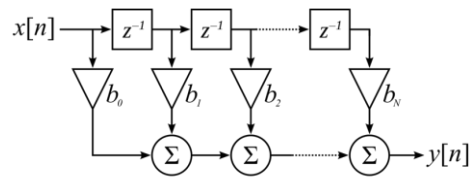
olduğu gibi alınan işaretlere istenmeyen bileşenlerin yani gürültü, girişim ve harmoniklerin de eklenmesinden kaynaklı ölçüm sonuçlarının bozulmasıdır. Uygulamalarda DC bileşenin etkisini ortadan kaldırmak için kuplaj kondansatörleri ve alınan işaretin frekans bandını sınırlamak için de örtüşme – önler filtreler kullanılmaktadır. Ancak bunlar da alınan analog işaretteki istenmeyen bileşenlerden sadece DC gücü ve harmoniğin etkisini ortadan kaldırırken gürültü ve girişimler ölçüm sonuçlarını etkilemeye devam etmektedir. Tam da bu noktada gerek dinamik bir yapıya sahip olmaları gerekse de analog filtrelere göre daha kesin sonuçlar vermelerinden ötürü gürültü ve girişimlerin etkisini kaldırmak için uygulamalarda sayısal filtreleme yöntemlerine başvurulur. Temelde iki tür sayısal sayısal filtre vardır:

1. IIR (Infinite Impulse Response – Sonsuz Vuruş Tepkisi)
2. FIR (Finite Impulse Response – Sonlu Vuruş Tepkisi)



Şekil 1: Direct Form- I Yöntemi İle Gerçeklenen IIR Filtre Yapısı

Şekil 1 ve Şekil 2'de IIR ve FIR filtrelerin, bu çalışmada da kullanılan Direct – Form I yöntemiyle gerçekleştirme yapısı yer almaktadır.



Şekil 2: Direct Form- I Yöntemi İle Gerçeklenen FIR Filtre Yapısı

Şekil 1 ve Şekil 2 kıyaslandığında, IIR filtre ile FIR filtre arasında bir geri besleme farkı olduğu görülmektedir. Bu geri besleme sayesinde aynı sistemleri IIR filtreler ile daha düşük mertebelerde tasarlamak mümkündür. Yapılan literatür

taramasında araştırmacılar tarafından güç tüketimindeki ölçümlerin süzülmesinde,

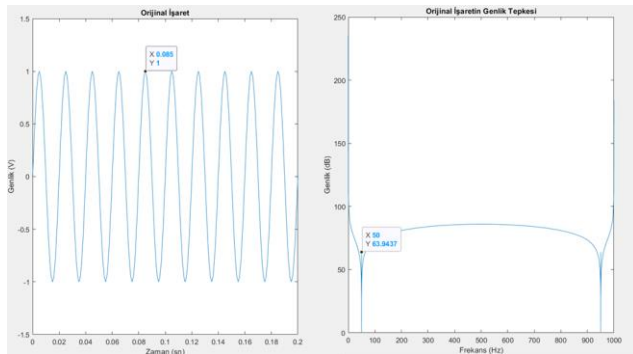
1. Seri IIR Alçak – Geçiren Filtre [1]
2. IIR Bant – Geçiren Filtre [2]
3. Paralel IIR Alçak – Geçiren Filtre [3]
4. Adaptif Alçak – Geçiren Filtre [4]
5. IIR Alçak – Geçiren Filtre [5]

filtre tasarımlarını kullandıkları gözlenmiştir. Bu çalışmaların ortak yanı, tasarlanan filtreler ya DSP mikroişlemcilerinde ya da alanda programlanabilir mantık dizilerinde (FPGA) çalıştırılmış olmasıdır. Bu çalışmanın sonuçları ticari bir projenin araştırma konusu olduğundan, tasarlanan filtrenin performansı kadar maliyeti de önem arz etmektedir. Bu sebeple yapılan çalışma kapsamında düşük – güçlü bir mikrodenetleyicide çalışırken %1’den az hata ile sonuç üreten bir sayısal filtrenin tasarlanması üzerinde durulmuştur. Sahadan alınan ölçüm sonuçları incelendiğinde ilgililenen sistemin güç dağıtım hattından $I_{PP}=2.08A$ çektiği görüldü. Bilindiği üzere şehir şebekesi 50Hz bir sinüstür. Ölçüm sonuçlarının modellenenebilmesi ve hata analizinin yapılabilmesi için MATLAB® ortamında $I_{PP}=2.0A$ 50Hz bir sinüs üretilmiştir. Üretilen bu sinüse rastgele bir sayı üreticisine bağlı çalışan Gauss gürültü eklenmiştir. Bu şekilde belirlenen başarımların kriteri olan %1’den az hata kriterinin incelenmesi amaçlanmıştır. Takip eden süreçte ise filtreli ve filtersiz sonuçlar kıyaslanarak filtrelerin başarımlarını sağlayıp sağlamadıkları belirlenmiştir.

2. Gürültülü Sinyalin Üretilmesi Ve Filtrenin Tasarlanması

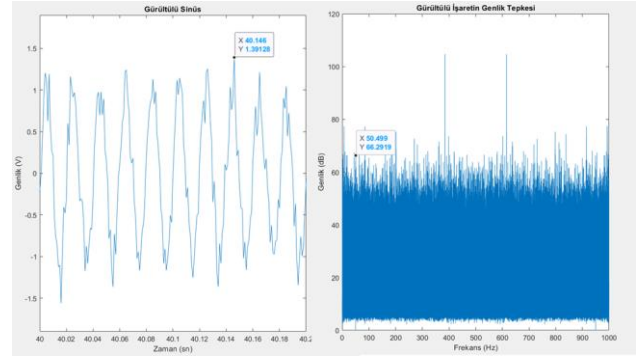
2.1. Gürültülü Sinyalin Üretilmesi

Güç sistemlerinde kullanılan işaretler 50Hz sinüzoidaldir. Bu sebeple üretilen işaret de 50Hz bir sinüs olarak modellenmiştir. Ölçüme toplamsal eklenen gürültünün hangi frekansta olduğu bilinmediği için de gürültü modeli olarak Gauss gürültü kullanılmıştır. Şekil 3’te üretilen sinüsün zaman ve frekans uzayındaki çıktıları yer almaktadır.



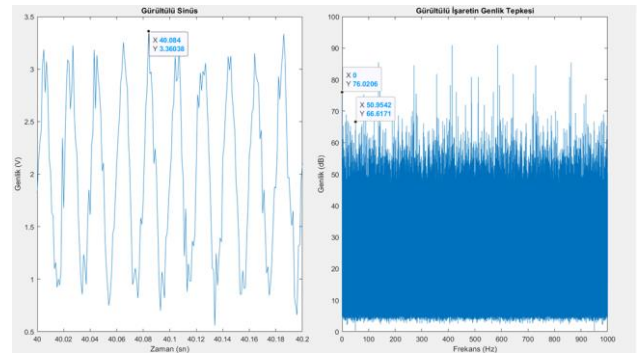
Şekil 3: $\sin(2\pi 50t)$ İşaretinin Zaman Ve Frekans Uzayındaki Çıktıları

Eklenecek Gauss gürültünün değiştirilebilecek 3 parametresi vardır; genlik, ortalama değer ve varyans. Bu çalışmada yalnız ortalama değer ve varyansın etkileri üzerinde durulmuştur. 0 ortalomalı 0.04 varyanslı Gauss gürültü sinüse eklendiğinde elde edilen zaman ve frekans uzayındaki çıktıları Şekil 4’te yer almaktadır.



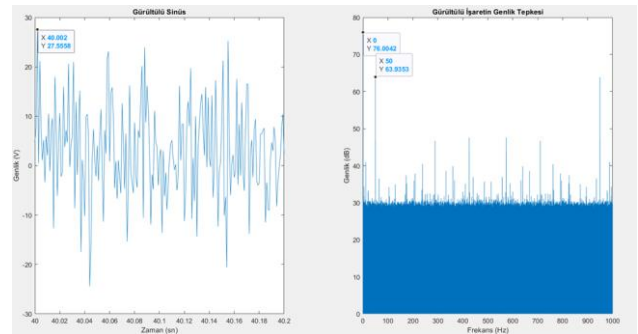
Şekil 4: $\mu=0, \sigma = 0.2$ Gauss Gürültünün Eklmesiyle Üretilen $\sin(2\pi 50t)$ İşaretinin Zaman Ve Frekans Uzayındaki Çıktıları

Eklenecek Gauss gürültünün varyansı 0.04’te sabit tutulup DC bileşen etkisini göstermek amacıyla ortalama değeri 2 yapılarak sinüse eklendiğinde Şekil 5’teki çıktı elde edilmiştir.



Şekil 5: $\mu=2, \sigma = 0.2$ Gauss Gürültünün Eklmesiyle Üretilen $\sin(2\pi 50t)$ İşaretinin Zaman Ve Frekans Uzayındaki Çıktıları

Ortalama 2’de sabit tutulup varyans 100 yapılarak üretilen gürültülü işaretin zaman ve frekans uzaylarındaki çıktıları da Şekil 6’da yer almaktadır.



Şekil 6: $\mu=2, \sigma = 10$ Gauss Gürültünün Eklmesiyle Üretilen $\sin(2\pi 50t)$ İşaretinin Zaman Ve Frekans Uzayındaki Çıktıları

Son 4 şekil karşılaştırıldığında;

1. Gauss gürültünün ortalama değerindeki artış orijinal işarettteki DC seviyesinin artmasına sebep oldu (Şekil 5). Buradaki DC’nin gücü orijinal işaretin gücünden 13dB daha fazladır.

2. Olasılıktan da bilindiği üzere Gauss Dağılımı Normal Dağılım olarak da adlandırılır. Bunun sebebi, bu modelin bütün frekans

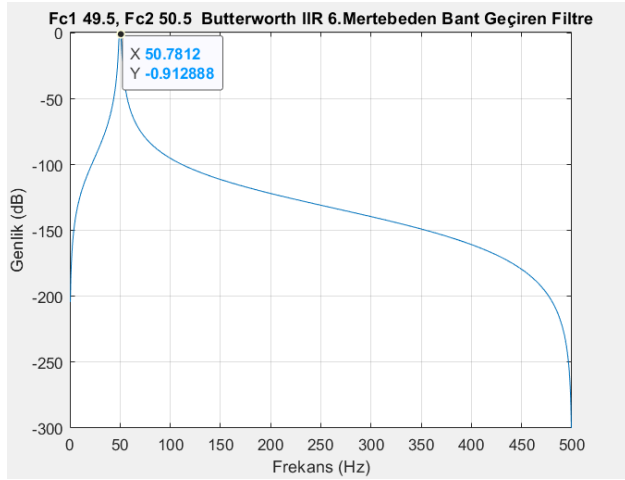
bölgesine eşit olarak etki etmesidir. Gürültünün varyansı artırıldığında ise açıklanan bu durum gözlenmiş, üretilen gürültünün bütün frekans bölgesinde yaklaşık aynı güçte olduğu görülmüştür (Şekil 6).

3. Varyanstaki artış sonucunda gürültünün normal dağılıma benzemesi sağlanmıştır (Şekil 6).

2.2. Filtrenin Tasarlanması

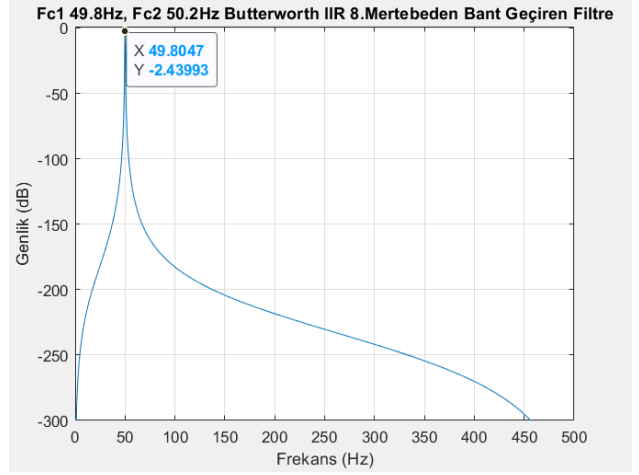
Filtrenin tasarımı aşamasında yapılan ölçümlerin gerekli izolasyonların sağlanarak DC bileşenin alınmadığı varsayılmıştır. Böylece spektrumdaki önemli bir istenmeyen bileşen yok edilmiş olur.

Bilindiği üzere sinüzoidal işaretlerin Fourier dönüşümü bir birim – vuruştur. Birim – vuruş ise genliği sonsuz, genişliği ise 0 olan teorik bir işaretir. Bu modelde ilgilenilen işaret bir sinüs dalga olduğu için tasarlanacak filtrenin de bant genişliği 0'a yakın ve 50Hz etrafında en az 50dB zayıflatan (Şekil 5) bant geçiren bir filtre olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Tasarlanacak filtrenin daha az sayıda aritmetik işlem yaparak düşük – güçlü mikrodenetleyicilerde de çalışabilmesi için IIR bir filtre kullanılması gerektiği ön görülmüştür, zira aynı performansı sağlayabilen FIR filtrelerin uzunlukları çok daha fazla olacaktır. Öte yandan geçiş bandında 0dB kazanç vermesinden dolayı Butterworth filtrenin kullanılması uygun görülmüştür. Bu seçimler sonucunda tasarlanacak filtrenin Butterworth IIR bant – geçiren filtre olmasına karar verilmiştir. Çalışma için toplamda 4 adet bant – geçiren filtre tasarlanmıştır.



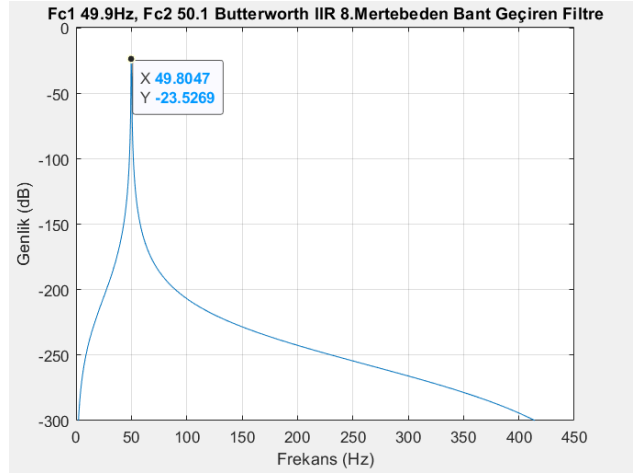
Şekil 7: Tasarlanan 1.Filtre

Şekil 7, tasarlanan 1. Filtrenin genlik tepkisini göstermektedir.



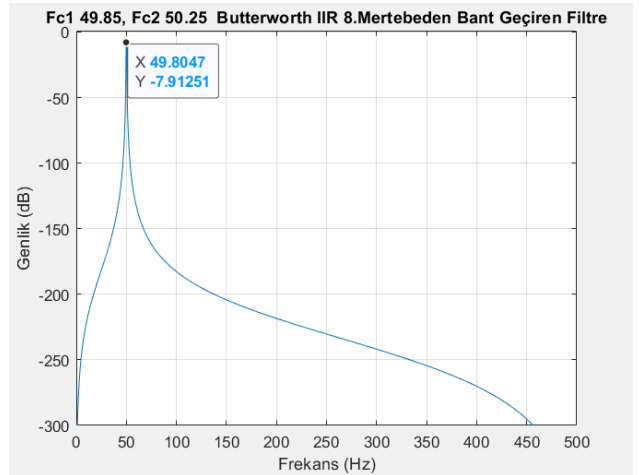
Şekil 8: Tasarlanan 2.Filtre

Şekil 8, tasarlanan 2. Filtrenin genlik tepkisini göstermektedir.



Şekil 9: Tasarlanan 3.Filtre

Şekil 9, tasarlanan 3. Filtrenin genlik tepkisini göstermektedir.

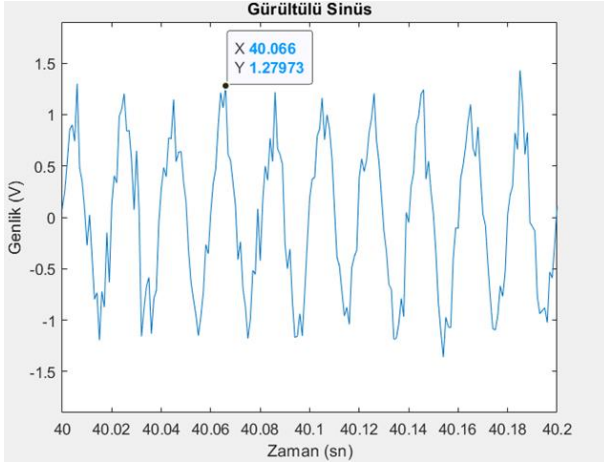


Şekil 10: Tasarlanan 4.Filtre

Şekil 10, tasarlanan 4. Filtrenin genlik tepkisini göstermektedir.

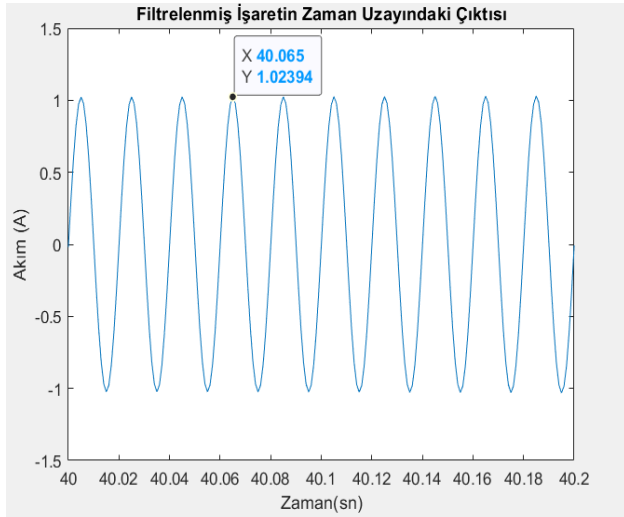
2.3. Simülasyon Çalışmaları

Simülasyon çalışmasında yukarıda da bahsedildiği gibi ölçüm devresi ile mikrodenetleyici arasında izolasyonun sağlandığı ve ölçüm sonuçlarından DC bileşenin çıkarıldığı varsayılarak 0 ortalamalı 0.04 varyanslı bir Gauss gürültü üretilmiş ve $I_{PP}=2A$ genlikli 50Hz sinüse toplamsal olarak eklenmiştir. Üretilen gürültülü sinüsün zaman uzayındaki çıktısı ise Şekil 11’de yer almaktadır.



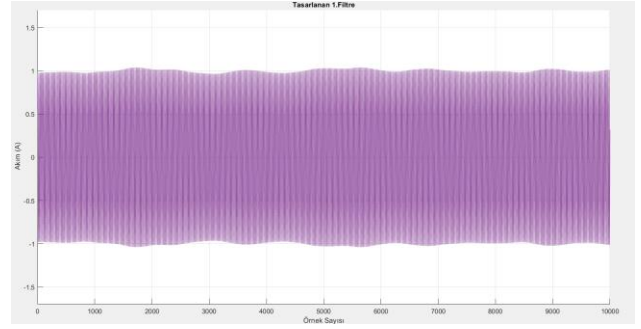
Şekil 11: Toplamsal Eklenen 0 Ortalamalı 0.04 Varyanslı Gürültü Sonrası Üretilen $\sin(2\pi 50t)$ İşareti

Şekil 11’deki gürültülü sinüs işaretinin 1. Filtre ile süzölmüş hali 10 periyot olarak Şekil 12’de yer almaktadır. Şekil 12’ye göre 1. Filtrenin istendiği gibi çalıştığı düşünülebilir ancak Şekil 13’teki gibi uzun süreli çalıştırıldığında salınım oluşturduğu görülmüş ve filtrenin kararsız bölgede kaldığı düşünüldüğünden kullanılmayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

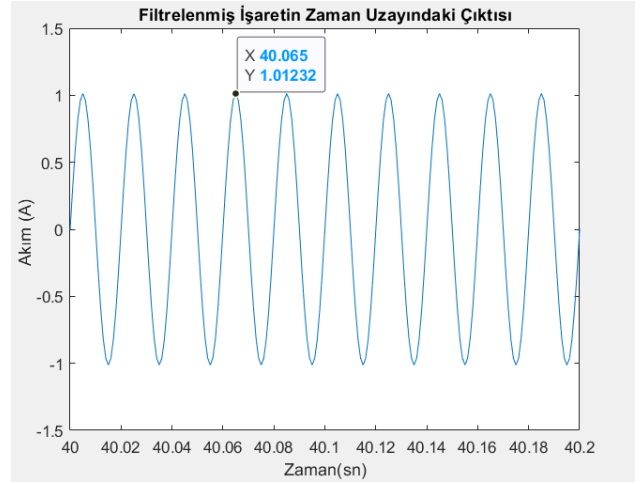


Şekil 12: 1. Filtre, Alt Kesim Frekansı 49.5Hz, Üst Kesim Frekansı 50.5Hz Olan 6.Mertebeden Bant – Geçiren IIR Butterworth Filtre Çıktısı

Tasarlanan 2. Filtrenin çıktısı da Şekil 14’te yer almaktadır. Şekil 14’e göre tasarlanan 2. Filtrenin istenen başarımlarını kısmen sağladığı görülmüştür.

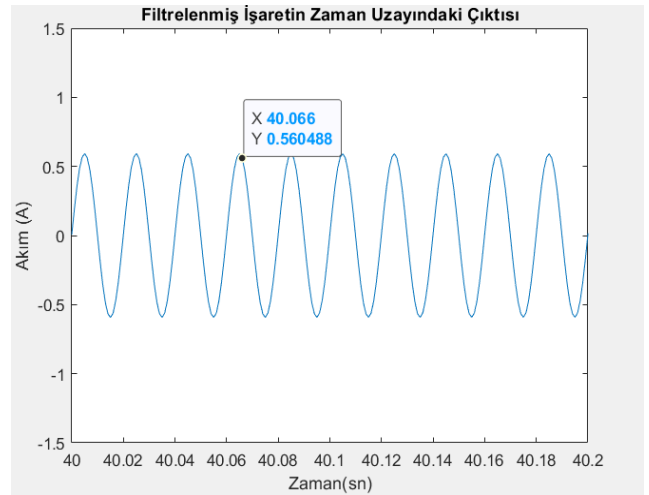


Şekil 13: 1. Filtre Çıktısının Genel Görünümü

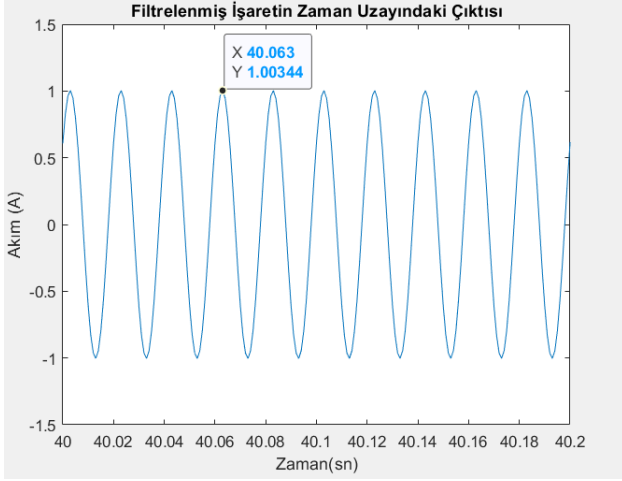


Şekil 14: 2. Filtre, Alt Kesim Frekansı 49.8Hz, Üst Kesim Frekansı 50.2Hz Olan 8.Mertebeden Bant – Geçiren IIR Butterworth Filtre Çıktısı

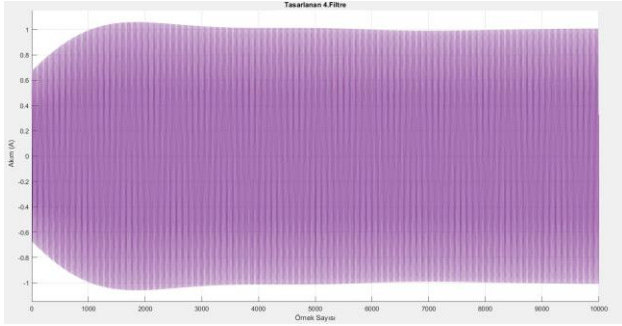
3. Filtrenin ürettiği çıktı ise Şekil 15’te yer almaktadır. Bu grafiğe bakıldığında tasarlanan filtrenin yaklaşık %44 oranında hatalı sonuç ürettiği görülmektedir. Bu sebeple bu filtre de kullanılmamıştır.



Şekil 15: 3. Filtre, Alt Kesim Frekansı 49.87Hz, Üst Kesim Frekansı 50.17Hz Olan 8.Mertebeden Bant – Geçiren IIR Butterworth Filtre Çıktısı



Şekil 16: 4. Filtre, Alt Kesim Frekansı 49.85Hz, Üst Kesim Frekansı 50.25Hz Olan 8.Mertebeden Bant – Geçiren IIR Butterworth Filtre Çıktışı



Şekil 17: 4. Filtre Çıktısının Genel Görünümü

Şekil 16’da tasarlanan son filtrenin ürettiği 10 periyotluk çıktıya bakıldığında %0,3’lük bir hata oranıyla sonuç ürettiği görülmektedir. Bu çalışmadaki başarımların kriteri olan %1’den az hata ile sonuç üretmeyi sağlamıştır. Diğer yandan Şekil 17’deki uzun süreli filtreleme çıktısı göz önüne alındığında kalıcı duruma geçmeden önce yaklaşık %2 aşmaya ve 3 saniye gibi oldukça kısa bir oturma süresine sahip olması sebebiyle 4. Filtre bu çalışmada kullanılmıştır.

3. Sonuçlar

Filtrelenmiş işaretlerin çıktıları göz önüne alındığında tasarlanan 1. Filtrenin istenen başarımlarını sağladığı ancak kararlı çalıştığı, 2. Filtrenin %10 gibi oldukça yüksek bir aşmaya ve daha uzun oturma süresine sahip olduğu, 3. Filtrenin istenen kriteri sağlamayarak %49’luk hata oranına sahip olduğu ve 4. Filtrenin ise istenenden iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlar çerçevesinde Butterworth IIR bant – geçiren filtre tasarımı yapılırken, filtrenin mertebesi artırıldığında bant genişliğinin azaltılması gerektiği (bkz. 1. Filtre ile 2. Filtre) ve filtreleme işleminden önce DC bileşenin analog işaretten çıkarılması gerektiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Şekil 2’deki gibi, ölçüm işaretindeki DC bileşenin gücü ilgilenilen işaretin gücüne oldukça fazladır ve bu durum filtreleme işlemi zorlaştıracaktır.

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-B programı kapsamında 1139B412101728 başvuru numarası ile araştırma desteği almaya hak kazanmıştır.

4. Kaynaklar

- [1] Eski, A., Zavalani, O., and Komici, D., “The Implementation Of A Digital Filter-Based Algorithm For Active Power Measurement Using An ARM Microcontroller”, EJECE, vol. 1, no. 3, Dec. 2017.
- [2] Zhenhua, H., Jianye, C., Ling, S., Zanji, W., and Yi, W., "A Digital Controller Of Hybrid Filter Based On Pseudo-Inverse Filtering Technique", 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2005.1546749.
- [3] Hao, P., Zanji, W., and Jianye, C., "A Measuring Method Of The Single-Phase AC Frequency, Phase, And Reactive Power Based On The Hilbert Filtering", in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 3, pp. 918-923, June 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.894885.
- [4] Pereira, R. R., da Silva, C. H., da Silva, L. E. B., and Lambert-Torres, G., "Application Of Adaptive Filters In Active Power Filters", 2009 Brazilian Power Electronics Conference, 2009, pp. 770-774, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347654.
- [5] Serov, A. N., Serov, N. A., and Lupachev, A. A., "The Application Of Digital Filtration For The Active Power Measurement", 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2018, pp. 88-92, doi: 10.1109/EExPolytech.2018.8564414.
- [6] Duraiswamy, P., Selvaraja, S.K.,” Phase-Orthogonal FIR Filter Based Reactive Power Measurement For Power Meters”, Analog Integr Circ Sig Process 108, 317–322 (2021).
- [7] Tan, L. & Yiang, J. “Digital Signal Processing Fundamentals And Applications”, Elsevier Press, 2nd Edition, 2014
- [8] Batık, Z. “Sayısal Filtre Tasarım Yöntemleri ve Performans Analizleri”, Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011