

FFT İLE ANİ MIKNATISLANMA AKIMININ HARMONİK BİLEŞENLERİNE AYRILMASI

Okan ÖZGÖNENEL¹

Güven ÖNBİLGİN²

^{1,2}Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun

¹e-posta:okanoz@omu.edu.tr

²e-posta: gonbilgi@omu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Diferansiyel koruma, sayısal koruma, sayısal işaret işleyici (DSP), hızlı Fourier dönüşümü (FFT)

ABSTRACT

Transformers are usually protected by means of a differential scheme. If the transformer was disconnected and switched on, the current waveform would induce inrush current. Unlike the bus differential scheme, the transformer differential relay should be designed such that it does not misoperate during magnetizing inrush and overexcitation conditions which fool differential relay operation. To avoid needless trip by magnetizing inrush current, the second harmonic component is commonly used for blocking differential relay in power transformers. In this paper, fast Fourier transform is used to extract harmonic components of magnetizing inrush current of a model transformer in laboratory environment.

1. GİRİŞ

Harmonik bileşenler dağıtım hatlarında doğrusal olmayan yükler tarafından meydana gelmektedir. Ayrıca yüksüz durumda enerjilenen güç transformatörlerinin birincil akımı da harmonik bileşenler içermektedir. Çünkü akı yoğunluğu ve transformatör çekirdeğindeki manyetik alan şiddeti arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Buna ek olarak, demir çekirdeğin cinsi ve bu çekirdeğin müsaade ettiği maksimum akı yoğunluğu da transformatörün boş çalışma akımında harmonik bileşenlere neden olur.

Transformatör koruma amacıyla mıknatıslanma akımı ve harmonik bileşenler üzerine kurulu algoritmalar şunlardır: [1], [2]

- Sinüs ve kare dalga ile cross-correlation tekniği
- Kartezyen fourier dönüşümünden elde edilen ayrık Fourier dönüşümü
- Sonlu vuruş tepke süzgeçleri
- Ayrık Fourier dönüşümü
- En küçük kareler eğri uydurma yöntemi
- Yapay us yaklaşımı
- Haar fonksiyonları
- Walsh fonksiyonları
- Kalman Filtresi yöntemi

Bu çalışmada, deneysel bir transformatörün boş çalışma akımının harmonik bileşenleri hızlı Fourier dönüşümü hem Matlab ortamında hem de TMS320C31 (kayan noktalı) DSP kartı ile kuramsal ve uygulamalı olarak incelenmiştir.

Transformatörde oluşan bu harmoniklerin etkileri şöyle sıralanabilir:

- Transformatör koruma sistemlerinde bozukluğa neden olur ve diferansiyel röleler gereksiz yere açma sinyali gönderir.
- Haberleşme cihazlarında parazitlere neden olur.
- Üçgen bağlı sargılarda ısı artışına neden olur.
- Yıldız bağlı sargının nötr ucunda aşırı yüklenme söz konusudur.

Sonraki bölümde ani mıknatıslanma akımından bahsedilecektir.

2. ANİ MIKNATISLANMA AKIMI

Transformatör çekirdeğindeki artık mıknatıslanma ve enerjilenme anındaki giriş geriliminin zamanına bağlı olarak çok yüksek miktarda ani mıknatıslanma akımı akabilir. Bir önceki bölümde bahsedilen diferansiyel rölelerin gereksiz açma sinyali göndermesi iletim hatlarını koruyan diferansiyel röleler içinde geçerlidir. Güvenli bir koruma sistemi tasarlamak için, ani mıknatıslanma akımının etkileri hesaba katılmalıdır. Ani mıknatıslanma ve doyma halleri dışında harmoniklere neden olan şu unsurları da göz önüne almak gerekmektedir: akım transformatörlerinin doyma noktasına gelmesi, doğrusal olmayan arıza direnci ve sistemin rezonansa gelmesi, iletim hatlarında dış arıza sonucunda gerilim düzelmesi veya paralel bağlı transformatörün enerjilenmesi gibi durumlarda harmoniklere neden olur. Mıknatıslanma akımlarının genlikleri ve dalga şekilleri bir çok etkenlere bağlıdır ve çoğu zaman da tahmin edilmeyebilir. Aşağıda maddeler halinde genel olarak mıknatıslanma akımlarının karakterleri verilmiştir:

- Genellikle dc offset, tek harmonikler ve çift harmonikler içermektedir.

b) Tipik olarak tek veya çift kutuplu titreşimlerden oluşmuştur.

c) Tek kutuplu mıknatıslanma akımlarının tepe değerleri oldukça düşüktür. Zaman sabiti, üssel olarak azalan arıza akımının dc offset bileşeninkinden çok daha büyüktür.

d) İkinci harmonik bileşeni düşük değerlerde başlar ve mıknatıslanma akımı azalırken artar.

Transformatör ile yüksek gerilim barası arasındaki hat empedansından dolayı enerjilenme anında gerilim düşüşü olmadığı kabul edilmektedir. Mesafe koruma rölesinin veya röle algoritmasının ne ölçüde ani mıknatıslanma akımına maruz kalacağı hesaplanmalıdır. Ani mıknatıslanma durumunda aşağıdaki eşitlikle empedans hesaplanır:

$$Z_{\max} = 2.5 \frac{V_{\text{anma}}}{I_{\text{tepe}}} \quad (1)$$

Transformatörün şalt sahasına çok yakın olduğu düşünülürse, hesaplanan empedans değeri transformatör empedansının 0.75 inden daha büyük olamaz. Şayet mıknatıslanma akımının tepe değeri transformatörün anma akım değerinin K katı ise, aşağıdaki eşitlik ile K değeri hesaplanır. Bu şu anlama gelir: Eğer mesafe koruma rölesi transformatör empedansının %75'i kadar bir değere ayarlanırsa, röle ani mıknatıslanma durumunda açma sinyali göndermez.

$$Z_{\max} = 0.75 Z_T = 0.75 X_{\%} \frac{V_{\text{anma}}}{\sqrt{3} I_{\text{anma}}} < 2.5 \frac{V_{\text{anma}}}{K I_{\text{anma}}}$$
$$K < \frac{2.5 \cdot \sqrt{3}}{0.75 \cdot X_{\%}} = \frac{5.77}{X_{\%}} \quad (2)$$

Transformatörün kısa devre gerilim değeri anma gerilim değerinin %10'u olduğu varsayılırsa, K=57.7 olarak hesaplanır. Yani maksimum ani mıknatıslanma akım değeri anma akımının 57 katından düşük olduğu sürece mesafe koruma rölesinin açma sinyali göndermesi önlenmiş olmaktadır. [3]

Aşağıdaki bölümde FFT fonksiyonunun Matlab ortamında tanımlanmasından bahsedilecektir.

3. FFT FONKSİYONUNUN TANIMI

Matlab ortamında fft bir vektörün ya da matrisin ayrık Fourier dönüşümünü hesaplamaktadır. Fonksiyonun matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$X(k+1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+1) W_N^{kn} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ dir ve $N = \text{length}(x)$ 'dir. Yukarıdaki eşitlikte vektör n+1 ve k+1 olarak tanımlanmıştır. Çünkü Matlab ortamında vektörler 1 den N değerine kadar çalışır. Vektörlerin 0 dan N-1 değerine kadar okunma olasılığı yoktur. $y = \text{fft}(x)$ ifadesi ile x vektörünün ayrık

Fourier dönüşümünü elde edilir. Şayet x bir matris ise, matrisin her bir sütununun fft değeri y dir. Eğer vektörün uzunluğu ikinin katları şeklinde ise, fft fonksiyonu radix-2 hızlı Fourier dönüşümünü uygulamaktadır. $y = \text{fft}(x, n)$ komut satırı ile, x vektörünün n noktalı fft'sini almak mümkün olmaktadır. Şayet x değeri n değerinden büyükse, x dizisi n değerinden sonra alınmamaktadır. X vektörünün ikinin katları şeklinde olmadığı durumlarda fft fonksiyonu %40 daha yavaş çalışmakta ve elde edilen değerler kompleks olmaktadır.

Fft işlemi sonucunda bulunan verilen doğru şekilde yorumlanması amacıyla normalleştirme işlemi yapılmaktadır. Normalleştirilmiş ayrık Fourier dönüşümü işlemi aşağıdaki eşitlikle yapılmaktadır. [4]

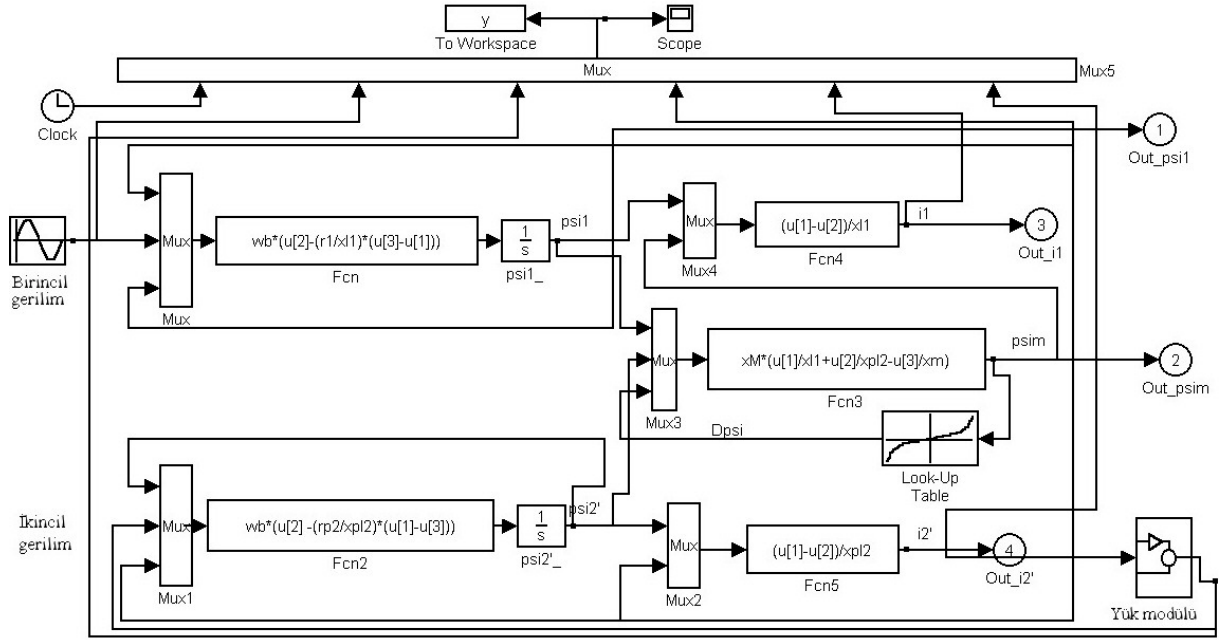
$$P_n = \text{abs}(\text{fft}(x)) * 2 / \text{length}(x) \quad (4)$$

3.1 MATLAB BENZEŞİMİ ve ANİ MIKNATISLANMA AKIMININ İNCELENMESİ

Bu bölümde Matlab ortamında artık mıknatıslanmanın sıfır olduğu ve giriş geriliminin de sıfır zamanında uygulandığı varsayılarak elde edilen ani mıknatıslanma akımı incelenecektir.

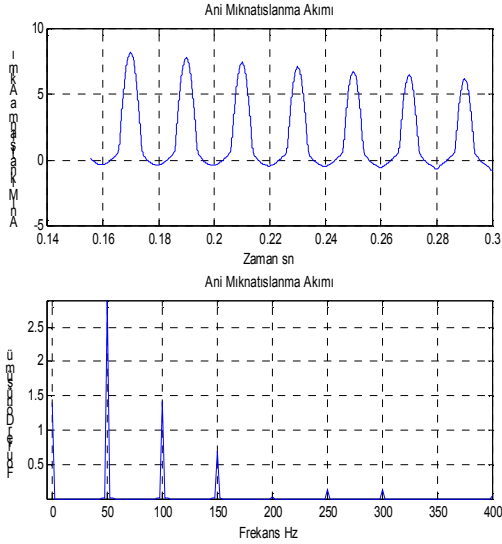
Şekil 1 de Matlab – Simulink ortamında deneysel transformatörün doymalı modeli görülmektedir. Yukarıdaki benzeşim modelinde görülen look – up table içerisinde 82x2 lik bir matris yer almaktadır. Bu matris deneysel transformatörün boş çalışma deneyinden elde edilen verilere doğrusal interpolasyon uygulanarak elde edilmiştir. Matlab kullanılarak yapılan benzetimde look-up tablosu Nonlinear blok kütüphanesinde yer almaktadır. Look-up tablosunun giriş ve çıkış arasındaki ilişki aynı uzunluktaki giriş ve çıkış vektörleri tarafından tanımlanır. Bu benzeşimden elde edilen zaman (t), birincil gerilim (v_1), birincil akım (i_1), halkalanma akısı (Ψ_m) ve ikincil gerilim (v_2) değerleri benzeşim zamanı süresince (3s) çalışma ortamına (To Workspace) kaydedilmiştir. Hızlı Fourier dönüşümünü uygulayabilmek için, bütün bu değerlerin düzgün aralıklarla dağıtılması gereklidir. En küçük ve en büyük adım aralığı optimal bir şekilde belirlenmediği sürece, elde edilen sonuçlarda doğruluk derecesi de düşmektedir. Bu yüzden çalışma ortamına benzeşim zamanı boyunca yapılan kayıtlar ile tüm verilerin düzgün bir şekilde tutulması sağlanmaktadır. Yukarıdaki benzeşimde görülen zaman bloğu (clock) hızlı Fourier dönüşümü için gereklidir. Matlab ortamında fft.m fonksiyonu ayrık Fourier dönüşümü yapmaktadır. Bu fonksiyon kullanılarak yazılan bir dizi Matlab dosyası yardımıyla birincil akımın harmonik bileşenleri frekans domeninde grafiksel olarak gösterilmiştir. Deneysel transformatörün Matlab ortamında doymalı benzeşimi sonucunda elde edilen birincil akımı

aşağıdaki şekilde görüldüğü gibidir. Bu benzeşimde 4612 örnek alınmıştır ve yaklaşık 0.13s sonra eğri kararlı hale gelmektedir.



Şekil 1. Deneysel transformatörün Simulink benzeşimi [4]

Deneysel transformatörün (1000VA, 220/220V, N1=N2=245 sarım) Matlab ortamında doymalı benzeşimi sonucunda elde edilen birincil akımı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibidir. Bu benzeşimde 4612 örnek alınmıştır ve yaklaşık 0.13s sonra eğri kararlı hale gelmektedir.



Şekil 2. Deneysel transformatörün birincil akımı ve harmonik bileşenleri.

Şekil 2 den de görüldüğü gibi enerjilenme anında ikinci harmonik bileşeninin genliğinin birinci harmoniğin genliğine oranı yaklaşık %40 dır. Diferansiyel röle uygulamalarında genellikle bu oran %20 nin üzerinde olduğunda rölenin açma sinyali göndermesi önlenir ve gecikme fonksiyonları ile

transformatörün normal çalışma şartlarına dönmesi beklenir.

Ancak normal çalışma anında ikinci harmonik bileşeninin yüzdesinde artma olduğunda transformatörde iç arıza durumu algılanır ve röle açma sinyali gönderir. Yine yukarıdaki şekilden görüleceği gibi beşinci harmonik bileşeninin genliğinin birinci harmoniğe oranı yaklaşık %10 civarındadır. Bu oranda diferansiyel röle yazılımında %15 olarak alınmaktadır. Bu oran transformatörün doyma şartlarını belirlemektedir.

Yukarıdaki örnekte birincil akım 4000 Hz de örneklenip 10000 örnek alındığından, fft işleminin sonucunda da yine 10000 örnek elde edilmiştir. Daha sonra denklem (4) kullanılarak normalleştirme işlemi yapılmıştır. Yeni oluşturulan 10000 örnekli vektörün birinci örneği DC bileşen değerini vermektedir. $4000/10000 = 0.4$ Hz değeri bize her bir örneğin frekansını vermektedir. Örneğin, 50 Hz lik frekansın genliği $50 / 0.4 = 125$ olduğundan, yeni oluşturulan vektörün 125 nolu elemanı birinci harmonik frekansının genliğini verecektir. Benzer şekilde, ikinci harmonik bileşeninin genliği, $100 / 0.4 = 250$, yeni oluşturulan vektörün 250 nolu elemanıdır. Beşinci harmonik bileşeninin genliği ise, $250 / 0.4 = 625$, fft vektörünün 625 nolu elemanıdır.

4. FFT UYGULAMASI

Ayrık Fourier dönüşümü bir çok sayısal işaret işleme sistemlerinin vazgeçilmez bir uygulamasıdır. Bu bölümde TMS320C31 temelli bir DSP kartı ile FFT uygulamasına örnek vereceğiz.

N uzunluğunda bir giriş vektörünün ayrık Fourier dönüşümü aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitlikte W_N ifadesi kompleks değerlikli $e^{-j2\pi/N}$ fazörüdür. Bu işlemde N adet kompleks çarpma işlemi, N çıkış örneğinin her biri için N-1 kompleks toplama işlemine gereksinim duyulur. Sonuç olarak, tüm N değerlerinin ayrık Fourier dönüşümünü hesaplamak için N^2 kadar kompleks çarpma işlemine ve N^2-N kadar da kompleks toplama işlemine ihtiyaç vardır. Yine denklem (5) için $4N$ kadar reel çarpma işlemi ve de $4N-2$ adet reel toplama işlemine ihtiyaç vardır. Denklem (5) kullanılarak FFT işlemini gerçekleştirmek yetersizdir çünkü periyodik W_N fazörleri hesaplanmaz.

Bu bölümde radix - 2 (zamana göre yok etme) yöntemi üzerinde durulacaktır. Bölüm 3'de de bahsedildiği gibi giriş vektörü ikinin katları şeklinde ise bu yöntem uygulanabilir. Bu yöntemde N giriş vektörü iki guruba ayrılır: ilki çift örnek dizisi diğeri ise tek örnek dizileridir. Daha sonra iki adet N/2 uzunluğuna sahip vektörler bu sıra ile işlenir ve çıktıları N uzunluğunda ayrık Fourier dönüşümü sonucunu verir. Bu yöntemin görsel ifadesi Şekil 3 de görülmektedir. Denklem (5) ile ifade edilen eşitliğin çift ve tek alt dizileri denklem (6) ile ifade edilir:

$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x[2n] W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x[2n+1] W_N^{(2n+1)k} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x[2n] W_N^{2nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} x[2n+1] W_N^{2nk} \end{aligned} \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte

$$W_N^{2nk} = (e^{-j2\pi/N})^{2nk} = W_N^{nk}$$

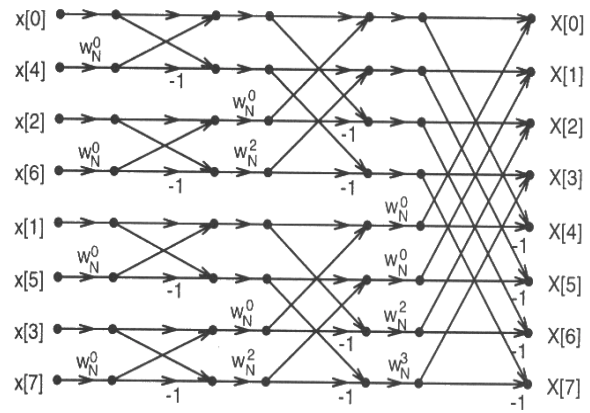
$$x_1[n] = x[2n]$$

$$x_2[n] = x[2n+1] \text{ yazılabilir.}$$

Bu değerler denklem (6) da yerine konursa denklem (7) elde edilir.

$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_1[n] W_N^{nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_2[n] W_N^{nk} \\ &= X_1[k] + W_N^k X_2[k] \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7) \end{aligned}$$

Denklem (7) de $X_1[k]$ ve $X_2[k]$ ifadeleri N/2 noktalı ayrık Fourier dönüşümünü simgelemektedir. Bu yolla, daha büyük ayrık Fourier ifadeleri küçük guruplara ayrılabilir. Yukarıda tanımlanan bu işleme radix-2 butterfly da denir. Butterfly FFT işleminin çekirdek hesaplama birimidir. FFT hesaplamasında W_N terimleri katsayılar olarak görünmektedir. Tam bir FFT işlevi üç ana gurupta gerçekleştirilir.



Şekil 3. 8 noktalı ayrık Fourier dönüşümü [5]

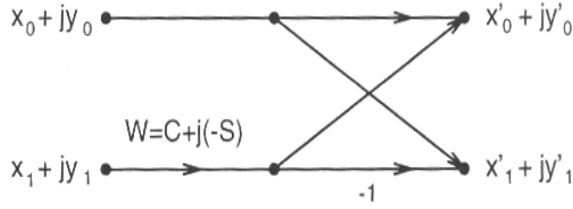
Şekil 3 de her bir eleman parçası bir butterfly'ı simgelemektedir ve tam bir FFT işlemi bu butterfly'lar sayesinde gerçekleştirilmektedir [5], [6].

4.1 TMS320C31 İLE ÖRNEK UYGULAMA

DSP kartı kullanılarak FFT hesaplaması genellikle 3 ana gurupta yapılır. Bunlar basamak, grup ve butterfly evreleridir. Bu üç grup içerisinde, butterfly hesaplaması çok sık tekrarlanır ve RPTB (blok-tekrar) komutu ile gerçekleştirilir. Bir grup içerisindeki tüm butterfly'lar tek bir RPTB çevrimi ile hesaplanabilir. TMS320C31'in paralel çarpma ve toplama özelliğinden ötürü katsayılar hızlı bir şekilde hesaplanabilir. N uzunluğundaki bit FFT'de $\frac{N}{2} \log_2(N)$ adet butterfly olacağından, butterfly hesaplamasından çıkartılan her bir işlem $\frac{N}{2} \log_2(N)$ zamanı kadar tasarruf sağlar. Örneğin, N=1024 ise, her bir komut satırında 0.3 ms tasarruf sağlanır.

TMS320C31'in donanımsal özelliklerinden biri olan "bit-reversed" özelliği kullanılırsa %30 daha hızlı FFT hesaplaması gerçekleştirilir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, FFT hesaplamasının çekirdek yapısı butterfly hesaplamasıdır. Şekil 4 de bu hesaplamasının grafiksel ifadesi yer almaktadır.



Şekil 4. Radix-2 FFT butterfly

Şekil 4 de görülen x ve y değişkenleri örneklenen işaretin sırasıyla reel ve sanal kısımlarını ifade etmektedir. Fourier katsayıları, W_N , aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir.

$$W_N^\alpha = e^{-j2\pi\alpha/N} = \cos(2\pi\alpha/N) - j \sin(2\pi\alpha/N) \quad (8)$$

Denklem 8 kısaca $C + j(-S)$ ile ifade edilir.

$x_1 + jy_1$ girişi $C + j(-S)$ ile çarpılır. Bu çarpma işleminin sonucu $x_0 + jy_0$ girişi ile toplanır. Bu işlem sonucunda $x'_0 + jy'_0$ elde edilir. Yine bu çarpma işleminin sonucu $x_0 + jy_0$ girişinden çıkartılırsa $x'_1 + jy'_1$ elde edilir. Bu işlemler aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir:

$$t_1 = C * x_1 - (-S) * y_1$$

$$t_2 = C * y_1 - (-S) * x_1$$

$$x'_0 = x_0 + t_1$$

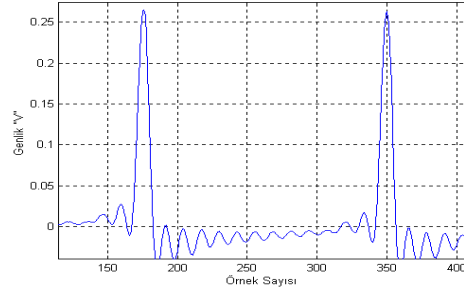
$$y'_0 = y_0 + t_2$$

$$x'_1 = x_0 - t_1$$

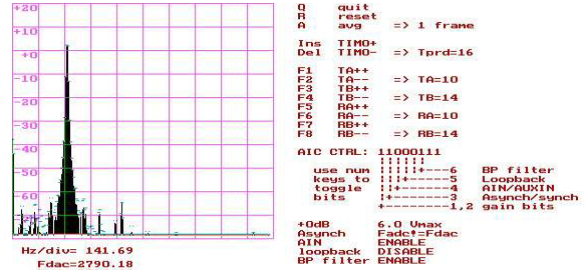
$$y'_1 = y_0 - t_2$$

Aşağıdaki şekillerde TMS320C31 DSP'nin girişine uygulanan çeşitli frekanslardaki sinyallerin FFT görüntüsü yer almaktadır.

Şekil 5 de 3kHz lik bir sinüs işaretin harmonik bileşenlerine ayrılması görülmektedir. Bu örnekte gerçek zamanlı girişten 1024 örnek alınarak FFT uygulanmıştır. Şekilde görülen ikinci tepe noktası FFT'nin simetrisini ifade etmektedir. Yatay eksen örnek sayısını, dikey eksen ise Volt cinsinden genliği vermektedir.



Şekil 5. 3kHz'lik bir sinüs işaretin FFT uygulaması.



Şekil 6. 300Hz'lik bir sinüs işaretin FFT uygulaması. Yukarıdaki Şekil 6'da girişe 300 Hz'lik bir sinüs işaret uygulanmıştır. 512 örnek alınarak uygulanan bu örnekte ise yatay eksen frekans aralığını, dikey eksen ise kazancı vermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada 8 noktalı radix-2 FFT uygulaması ele alınmış ve çeşitli frekanslardaki gerçek sinyalleri kayan noktalı bir DSP kartına uygulayarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. DSP teknolojilerinden de yararlanılarak %30 daha hızlı FFT uygulamalarını gerçekleştirmek mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. Habib, M.A. Marin "A Comparative Analysis Of Digital Relaying Algorithms for Differential Protection Of Three Phase Transformers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3. No. 3, August 1988.
- [2] M. A. Rahman, B. Jeyasurya "A State-Of-The-Art Review Of Transformer Protection Algorithms, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988.
- [3] B. Kastenny, I. Voloh, M. Adamiak, J. Zeek, "Application of Current Differential Protection To Tapped Transmission Lines" 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, April 3-5, 2001.
- [4] Che-Mun Ong "Dynamic Simulation Of Electrical Machinery, Using Matlab / Simulink" Prentice Hall Ptr. , Upper Saddle River, New Jersey 07448, 1998
- [5] Rulph Chassaing "Digital Signal Processing, Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31 DSK", Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, 1999 by John Wiley & Sons, Inc.
- [6] John Reekle, "Realtime DSP: The TMS320C30 Course Revision 3", School of Electrical Engineering University of Technology, Sydney, PO Box 123, Australia.