

Enerji Sistemlerinde Uyarlanabilir Süzgeç Kullanan Sıfır Geçiş Algoritması ile Frekans Kontrolü

Frequency Control with Zero Crossing Algorithm by Using Adaptive Filter in Power Systems

Cengiz Polat Uzunoglu¹, Mukden Uğur¹

¹ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Üniversitesi, Avcılar, İstanbul

{polat,mugur}@istanbul.edu.tr

Özetçe

Frekans enerji sisteminin çok önemli bir parametresidir ve nominal değerinden kolaylıkla sapabilir. Nominal frekans değerinden sapmış enerji sistemlerinde cihazlar zarar görebilir. Bu nedenle enerji sistemlerinde frekans kontrolü ve kararlılığı hayati öneme sahiptir. Enerji sistemlerinde frekans ölçümü ve kontrolü yapan çeşitli algoritmalar mevcuttur. Bu çalışmada, sıfır geçiş algoritması kullanılmıştır. Gürültü ve harmonik nedeniyle oluşan performans bozulmalarını engellemek ve sıfır geçiş algoritmasının performansını arttırmak için uyarlanabilir süzgeç yapısı yeni bir yaklaşım olarak önerilmiştir. Uyarlanabilir süzgeç kullanıldığı ve kullanılmadığı durumdaki algoritma performansına incelenmiştir. Bu algoritma sayesinde gerçek zamanlı frekans ölçümü ve kontrolü daha hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca, önerilen algoritmanın başarımını destekleyen bilgisayar benzetimleri verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıfır geçiş algoritması, frekans kontrolü, uyarlanabilir süzgeç, RLS algoritması

Abstract

Frequency is an important operating parameter of a power system, which can easily deviate from its nominal value due to a generation-load mismatch. Deviation from the nominal frequency could result in the collapse of the power system itself (by triggering protective system actions, for example). Since frequency control is vital in power systems, several frequency control algorithms to measure frequency at a power system bus have been developed. In this study, zero crossing algorithm is used. To measure power system frequency free from noise and harmonic effect, adaptive filter with zero crossing algorithm is proposed as a new approach. The performance of the algorithm with or without adaptive filter is examined. Real time frequency tracking at a power system bus is

fulfilled more accurately with this new adaptation algorithm. Moreover, the simulation results that supported the performance of the algorithm are given in the paper.

Key Words: Zero crossing algorithm, frequency control, adaptive filter, RLS Algorithm

1. Giriş

Bir enerji sistemi nominal frekans, gerilim ve yük akışı ile nitelendirilen, çalışma seviyesinde korunmalıdır. Bizim amacımız enerji sistemini yeterince küçük tolerans seviyesinde frekans dengesizliklerine karşı koruyabilmektir. Kontrol sistemleri, elektriksel olarak birbirine bağlı olması bakımından çok güçlüdür fakat bütün kontrol sistemi tek frekansla kontrol edilir [2]. Eğer sistem, sabit nominal frekansından saparsa, karasızlaşır. Bu nedenle frekansın sabit kalmasını sağlayan ve bunu sürekli denetleyen kontrol algoritmalarına ihtiyaç vardır. Bu algoritmalar sistem frekansında bozulma olduğunda devreye girerek sisteme müdahalede bulunur. Bu nedenle sistem frekansını etkin bir şekilde kontrol edebilmek enerji sistemleri için hayati öneme sahiptir.

Frekans kararlılığını sağlamak için yükteki tüketim ile üretim arasında denge sağlamak gerekmektedir. Üretim tüketimden fazla olduğunda frekans artar. Tüketim üretimden fazla olduğunda ise frekans azmaktadır. Dengesizlik kontrolsüz bir şekilde yüklerin kapanmasına yol açar. Bazı durumlarda tüm sistem kapanabilir. Bu nedenle sistemdeki frekans kontrolü ve ölçümü sürekli sağlanmalıdır [3].

Bu çalışmada, ilk olarak en çok kullanılan algoritmalarından biri olan sıfır geçiş algoritması incelenmiştir. Bu algoritmanın gürültü ve harmonik eklenmiş işaret karşısındaki performansına incelenmiştir. Sıfır geçiş algoritması sıfır eksenindeki dalgalanmalara karşı duyarlı olduğu için

daha doğru sonuç elde edebilmek için genelde alçak geçiren süzgeç ile birlikte kullanılmaktadır.

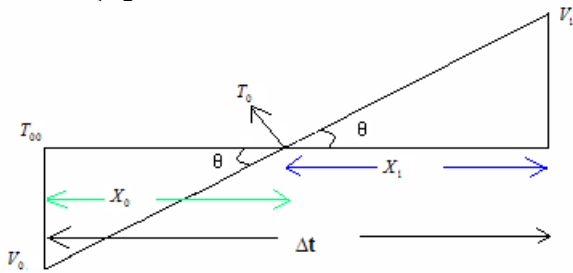
Bu çalışmada alçak geçiren süzgeç yerine yeni bir yaklaşım olarak uyarlanabilir süzgeç önerilmiştir. Süzmenin gerektiği birçok uygulamada, gerekli frekans cevabı önceden bilinmeyebilir ya da sistemin değişen bir frekans cevabı olabilir. Bu tür uygulamalarda kendi kendini ayarlayan ve sistemdeki değişimlere cevap verebilen uyarlanabilir bir süzgeç kullanımı söz konusudur. Uyarlanabilir süzgeçler kendi kendini değişen durum için ayarlama özelliğine sahiptir. Girişine uygulanan işaret değiştiğinde süzgeç, ayarlama kabiliyeti ile orantılı olarak kendini yeni duruma uyarlar [1].

Uyarlanabilir süzgeç adaptasyon algoritması, süzgecin transfer fonksiyonunu sisteme göre değiştirmesini sağlar. Bu çalışmada uyarlanabilir süzgeç uygulaması olan uyarlanabilir gürültü temizleme (ANC) yardımıyla yinelemeli en küçük kareler (RLS, recursive least squares) algoritması kullanılmıştır. Gürültüyle bozulmuş şebeke işaretinden, Matlab programı yardımıyla şebeke işaretinin kestirimi yapılmıştır ve süzgeç katsayılarının değişimine bakılmıştır [1]. Daha sonra kestirilen işaretin sıfır geçiş algoritması ile frekansı hesaplanmıştır.

2. Sıfır Geçiş Algoritması

Algoritma temel olarak işaretin sıfır noktalarından geçişleri arasındaki zamanı ölçmeye dayanır. İşaret bir periyot boyunca N tane nokta sayısınca örneklenirse her bir örneğin periyodu $\Delta t = T/N$ olur. T işaretin temel frekansdır [4].

Algoritmanın doğruluğu, örneklenen bölgeler için sıfır geçiş noktaları oluşturulması ile artar. İki örnek noktası arası düz çizgi olarak kabul edilir.



Şekil 1. Sıfır geçiş noktalarının belirlenmesi

İki örnek arası düz bir çizgi olarak kabul edilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\tan \Theta = V_0 / X_0 = V_1 / X_1 \quad (1)$$

$$\Delta t = X_0 + X_1 \quad (2)$$

$$X_0 = V_0 / V_1 (\Delta t - X_0) \quad (3)$$

$$X_0 + (V_0 / V_1) X_0 = (V_0 / V_1) \Delta t \quad (4)$$

$$X_0 = (V_0 \Delta t) / (V_0 + V_1) \quad (5)$$

İlk örnek noktası T_{00} olarak kabul edilirse sıfır geçiş noktası,

$$T_0 = T_{00} + X_0 \quad (6)$$

Benzer şekilde ikinci nokta da bulunabilir.

$$T_1 = T_{01} + X_1 \quad (7)$$

Bu iki noktanın birbirinden çıkarılmasıyla kesin ölçüm yapılabilir. Ve frekans değeri hesaplanır.

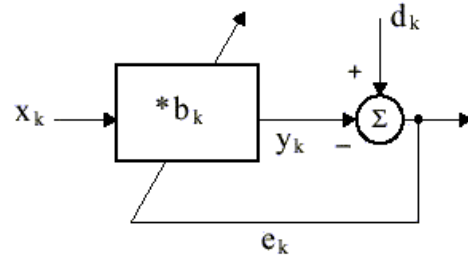
$$T = T_1 - T_0 \quad (8)$$

$$f = 1/T \quad (9)$$

Bu algoritma sık kullanılan basit yapıli algoritmadır. Ardı ardına gelen sıfır geçiş noktalarının belirlenmesine dayanır. Harmonik ve gürültü nedeniyle işaretin sıfır geçiş noktaları dolayısıyla frekansı bozulabilir. Bu nedenle algoritma uygulanmadan önce işaret süzgeç yardımıyla temizlenmelidir. Algoritmanın verimli çalışabilmesi için tam bir periyoda ihtiyacı vardır. Örnekleme oranı arttıkça noktalar arası lineerlik iyileşir ve algoritmanın doğruluğu artar [5].

3. Uyarlanabilir Süzgeç Yapısı

Uyarlanabilir süzgeç, süzgeç katsayılarını güncelleme yeteneğine sahiptir. Katsayı üretici güncellediği yeni katsayıları süzgece gönderir. Katsayı üretici uyarlanabilir bir algoritmaya sahiptir ve giriş işaretindeki değişimlere cevap verir.



Şekil 2. Genel uyarlanabilir süzgeç modeli

Şekil 1' de girişine x_k işareti uygulanmış bir uyarlanabilir süzgeç görülmektedir. Süzgeç çıkışı (y_k) istenen işaret olan d_k işareti ile karşılaştırılarak yapılan hataya (e_k) göre b_k katsayıları güncellenerek süzgeç kendini adapte etmektedir [1].

Uyarlanabilir süzgeçler iki çeşit girdi bilgisine ihtiyaç duyar:

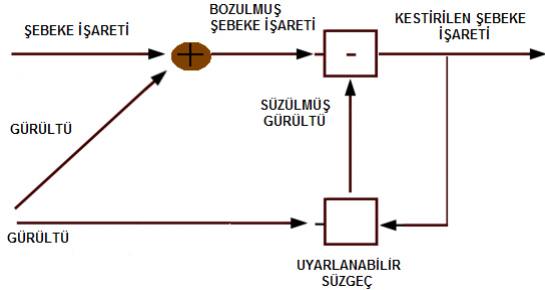
- Giriş işareti $x(n)$

- Referans (istenen) giriş işareti

Uyarlanabilir süzgeç adaptasyon algoritması, süzgecin transfer fonksiyonunu sisteme göre değiştirmesini sağlar. Algoritma sistem hakkındaki bilgi yetersizliğini karşılamak amacıyla bir dizi başlangıç koşuluyla başlar ve alınan gerçek sinyalleri temel alarak, en uygun süzgeç tasarımını bulmaya çalışır.

3.1. Uyarlanabilir Gürültü Temizleme (ANC)

Uyarlanabilir süzgeçler, uyarlanabilir gürültü temizleme (adaptive noise cancellation ANC) sistemi içinde kullanılarak adaptasyon sağlanabilir. ANC bilinmeyen işaret ve gürültü bileşenlerinin oluşturduğu bozulmuş gözlemlerden, işaret veya gürültü ile ilişkili bir işaret ya da gürültünün kullanılarak istenen işaretin elde edilmesi için kullanılır [7].



Şekil 3. Uyarlanabilir Gürültü Temizleme (ANC) modeli

Gerçek hayat ANC uygulaması genellikle sisteme gürültü ile bozulmuş işaret ve gürültünün ayrı ayrı girilmesi ile olur. Şekil 3'te verilen örnekte gürültülü şebeke işareti ile sadece gürültü işareti ayrı ayrı sisteme girilmektedir. Gürültü işareti RLS Algoritması ile çalışan uyarlanabilir süzgeçten geçirilerek gürültülü işaret ile karşılaştırılır ve çıkışta temizlenmiş işaret elde edilir.

3.2 Yinelemeli En Küçük Kareler (RLS) Algoritması

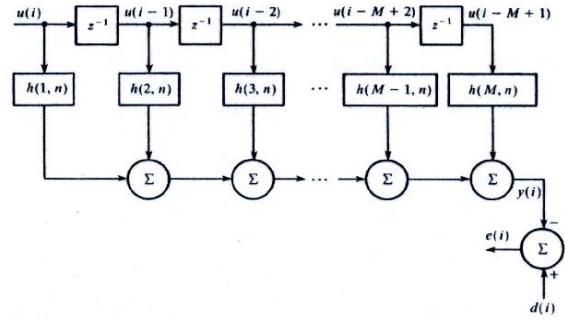
Yinelemeli en küçük kareler (RLS) yöntemi en küçük kareler yöntemini temel olarak alır. En küçük kareler yöntemini inceleyerek yinelemeli en küçük kareler yöntemine geçiş yapabiliriz. Amacımız süzgeci, hatanın karesinin toplamalarını minimum yapacak şekilde tasarlamaktır [6].

$$J(n) = \sum_{i=1}^n e^2(i) \quad (10)$$

Filtre çıkışı konvolüsyon toplamı şeklinde ifade edilir.

$$y(i) = \sum_{k=1}^M h(k, n)u(i-k+1) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$e(i) = d(i) - y(i) \quad (12)$$



Şekil 4: RLS Algoritması için kullanılan süzgeç modeli

Amaç fonksiyonumuz (13) numaralı eşitlikteki halini alır.

$$J(n) = \sum_{i=1}^n d^2(i) - 2 \sum_{k=1}^M h(k, n) \sum_{i=1}^n d(i)u(i-k+1) + \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M h(k, n)h(m, n) \sum_{i=1}^n u(i-k+1)u(i-m+1) \quad (13)$$

$$\Rightarrow M \leq n$$

Giriş işaretleri için deterministik korelasyonlarını n uzunluğu için (14) numaralı eşitlik verir.

$$\phi(n; k, m) = \sum_{i=1}^n u(i-k)u(i-m) \quad k, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (14)$$

İstenen çıkışla giriş işareti için deterministik korelasyon ifadesi ise (15) numaralı eşitlikte gösterilmiştir.

$$\theta(n; k) = \sum_{i=1}^n d(i)u(i-k) \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (15)$$

İstenen cevabın enerjisini de belirleyebiliriz.

$$E_d(n) = \sum_{i=1}^n d^2(i) \quad (16)$$

$$J(n) = E_d(n) - 2 \sum_{k=1}^M h(k, n)\theta(n; k-1) + \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^M h(k, n)h(m, n)\phi(n; k-1, m-1) \quad (17)$$

Eşitliğin $h(k, n)$ ifadesine göre türevi alınır.

$$\frac{\partial J(n)}{\partial h(k, n)} = -2\theta(n; k-1) + 2 \sum_{m=1}^M h(m, n)\phi(n; k-1, m-1) \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

Eşitlikte $h(k, n)$ ifadesi k 'nci derece süzgeç katsayısıdır. Türevi sifıra eşitleyerek hatayı minimize eden değere ulaşırız.

$$\sum_{m=1}^M \hat{h}(m, n)\phi(n; k-1, m-1) = \theta(n; k-1) \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

M tane eşzamanlı eşitlik bizi, çözümü en küçük kareler (Least-Squares) süzgecini belirleyen deterministik normal eşitliklere ulaştırır. En küçük kareler süzgeci için vektör formu ise:

$$\hat{\mathbf{h}}(n) = \begin{bmatrix} 1, n, \hat{h}(2, n), \dots, \hat{h}(M, n) \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

şekindedir. Girişler için olan korelasyon matrisi aşağıda verilmiştir.

$$\Phi(n) = \begin{bmatrix} \phi(n;0,0) & \phi(n;0,1) & \dots & \phi(n;0, M-1) \\ \phi(n;1,0) & \phi(n;1,1) & \dots & \phi(n;1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(n; M-1,0) & \phi(n; M-1,1) & \dots & \phi(n; M-1, M-1) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Deterministik çapraz korelasyon vektörü ise (22) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$\boldsymbol{\theta}(n) = \begin{bmatrix} \theta(n;0), \theta(n;1), \dots, \theta(n; M-1) \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$\Phi(n)\hat{\mathbf{h}}(n) = \boldsymbol{\theta}(n) \quad (24)$$

$\phi(n)$ matrisin tersi olduğu varsayımıyla aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$\hat{\mathbf{h}}(n) = \Phi^{-1}(n)\boldsymbol{\theta}(n) \quad (25)$$

Sonuçta ise süzgeç için ardışık karesel hataların toplamının minimum eden ifadeyi elde ederiz.

$$J_{\min}(n) = E_d(n) - \hat{\mathbf{h}}^T(n)\boldsymbol{\theta}(n) \quad (26)$$

Yinelemeli En Küçük Kareler (RLS) Algoritmasına bu genel ifadelerden geçiş yapabiliriz.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}(n) &= \hat{\mathbf{h}}(n-1) + \mathbf{k}(n) \left[\boldsymbol{\theta}(n) - \mathbf{u}^T(n)\hat{\mathbf{h}}(n-1) \right] \\ &= \hat{\mathbf{h}}(n-1) + \mathbf{k}(n)\xi(n) \end{aligned} \quad (27)$$

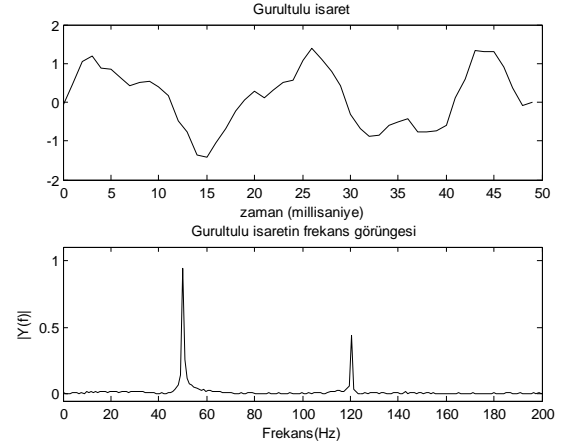
$\xi(n)$ kestirim hatasıdır ve (28) numaralı eşitlikteki gibi ifade edilir.

$$\xi(n) = d(n) - \mathbf{u}^T(n)\hat{\mathbf{h}}(n-1) \quad (28)$$

Bu iki eşitlik RLS Algoritmasını oluşturur.

4. Bilgisayar Benzetimleri

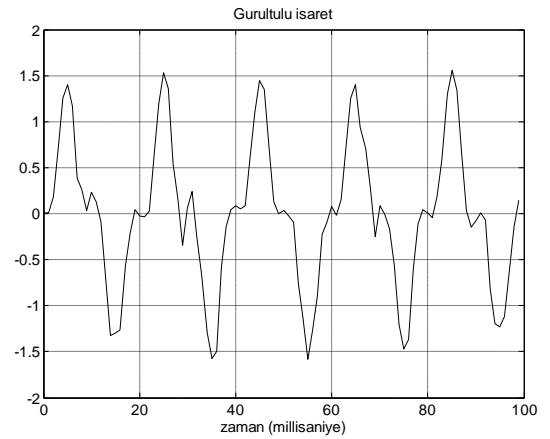
Bu çalışmada ilk olarak 50 Hz sinüzoidal işarete beyaz gürültü ve 120 Hz frekansa sahip olan sinüs bileşeni eklenerek gürültülü işaret elde edilmiştir. Şekil 5'te gürültülü işaret ve frekans cevabı görülmektedir.



Şekil 5. Algoritmaya girilen gürültü eklenmiş işaret ve frekans cevabı

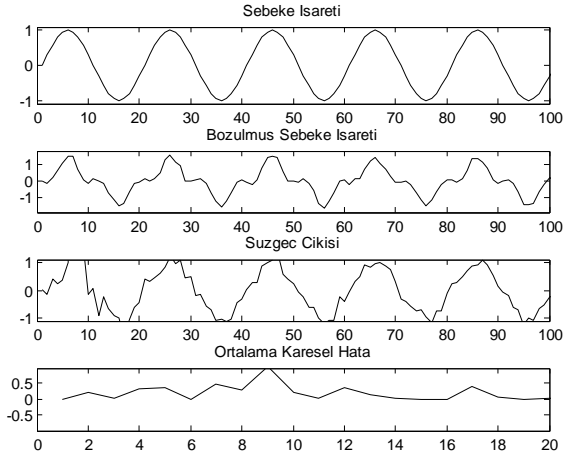
Sıfır geçiş algoritması çıkışında 50.01 Hz frekans ölçümü olarak alınmıştır. Sıfır eksenini etrafında dalgalanmalar olmadığı performans yeterlidir. İkinci aşamada 50 Hz saf sinüs işarete beyaz gürültü, 150 Hz sinüs ve 220 Hz sinüs işareti eklenerek gürültülü işaret elde edilmiştir. Bu işaret şekil 7'de görülmektedir ve sıfır eksenini etrafında dalgalı bir karakteristik göstermektedir. Süzgeç kullanılmayan sıfır geçiş algoritması çıkışında frekans 136.8 Hz olarak ölçülmüştür. Algoritma çıkışında gerçek değerden büyük bir sapma gözlenmiştir. Daha sonra genelde uygulanan bir çözüm olan alçak geçiren süzgeç kullanan sıfır geçiş algoritmasının performansı incelenmiştir. Alçak geçiren filtre kullanan sıfır geçiş algoritması frekansı 49.950 Hz

Son aşamada bu çalışmada önerilen RLS algoritması kullanan uyarlanabilir süzgeç yapısı oluşturulmuştur. Uyarlanabilir süzgecin çıkışı sıfır geçiş algoritması yardımıyla hesaplanarak performansı incelenmiştir. Bu senaryo için şekil 6'da verilen gürültülü şebeke işareti kullanılmıştır.



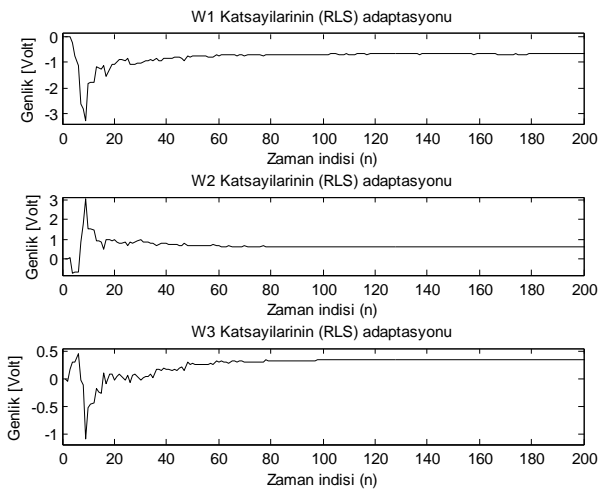
Şekil 6. Algoritmaya girilen gürültü eklenmiş işaret

5. Sonuçlar



Şekil 7. Uyarlanabilir süzgeç cevabı

Son aşamada bu çalışmada önerilen RLS algoritması kullanan uyarlanabilir süzgeç yapısı oluşturulmuştur. Uyarlanabilir süzgecin çıkışı sıfır geçiş algoritması yardımıyla hesaplanarak performansı incelenmiştir. Bu senaryo için şekil 6'da verilen gürültülü şebeke işareti kullanılmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi süzgeç katsayıları yaklaşık 40–50 yinleme sonunda hızlı bir şekilde istenen değerlere yakınsamaktadır. Süzgeç çıkışı yeterince iyi sonuç vererek şebeke işaretini kestirmemize olanak sağlamıştır. Ortalama karesel hata ise birkaç adımda sonra yaklaşık sıfır değerine gitmektedir. RLS Süzgeç katsayıları sırasıyla $-0,6890$, $0,6208$ ve $0,3386$ olarak bulunmuştur. Süzgeç çıkışı sıfır geçiş algoritmasına girildiğinde frekans değerini $50,0050$ Hz olarak hesaplanmıştır. Uyarlanabilir süzgeç yapısı kullanan sıfır geçiş algoritması frekansı etkili bir şekilde takip edebilmektedir. Şebeke işaretine eklenen gürültü karakteristiği değişse bile uyarlanabilir süzgeç katsayılarını yeni duruma uyarlayarak iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 8. Uyarlanabilir süzgeç katsayılarının adaptasyonu

Bu çalışmada, enerji sistemlerinde frekans kontrolü ve ölçümü yapan sıfır geçiş algoritması incelenmiştir. Bu algoritmanın performans analizi için 50 Hz sinüs şebeke işareti üzerine harmonik ve rasgele beyaz gürültü eklenmiş gürültülü periyodik işaret kullanılmıştır. Harmonik ve gürültü nedeniyle işaretin sıfır geçiş noktaları dolayısıyla sıfır geçiş algoritma başarımı bozulmaktadır. Bu nedenle sıfır geçiş algoritması süzgeç ile birlikte kullanılmalıdır.

Benzetim örneklerinde süzgeç kullanılmadığı durumda çıkış çok kötü sonuç vermiştir ama alçak geçiren süzgeç kullanılması durumunda algoritmanın performansı çok iyileşmiştir.

Bu çalışmada yeni bir yaklaşım olarak alçak geçiren süzgeç yerine uyarlanabilir süzgeç ve RLS algoritması önerilmiştir. Uyarlanabilir süzgeçler kendi kendini değişen durum için ayarlama özelliğine sahiptir. Girişine uygulanan işaret değiştiğinde süzgeç, ayarlama kabiliyeti ile orantılı olarak kendini yeni duruma adapte eder. Uyarlanabilir süzgeç kullanan sıfır geçiş algoritması oldukça iyi bir başarımla sergilemiştir. Alçak geçiren süzgeçten farklı olarak şebeke işaretine eklenen gürültünün karakteristiğinin değişmesi durumunda kendini hızlı bir şekilde adapte ederek ve katsayılarını güncelleyerek çıkışında şebeke işaretini doğrulukla kestirebilmektedir.

6. Kaynakça

- [1] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Chown G. A., Wigdorowitz B., "A Methodology for the Redesign of Frequency Control for AC Networks", Ieee Transactions On Power Systems, Vol. 19, No. 3, August 2004, ISSN: 1558-0679.
- [3] Kirby B. J., Dyer J., Martinez C., "Frequency Control Concerns In The North American Electric Power System", Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.
- [4] Sreenivas T.V. and Niederjohn R.J., "Zero-crossing Based Spectral Analysis and SVD Spectral Analysis for Formant Frequency Estimation in Noise", IEEE Trans. Sig. Proc., 1992, vol.40, no. 2,
- [5] Uğur M., "Implementation of a frequency measuring algorithm on an IBM-PC", M.S. Thesis, UMIST University, Manchester, 1992.
- [6] Haykin S., Sayed A., Zeidler J., Yee P., and Wei P., "Adaptive tracking of linear time-variant systems by extended RLS algorithms," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 45, May. 1997., pp. 1118–1128.
- [7] Widrow B. , Glover J. , McCool J., Kaunitz J. , Williams C., Hearn R., Zeidler J., Dong E., Goodin R., "Adaptive noise canceling: principles and

applications”, Proc. IEEE, 63, December 1975.,
pp.1692-1716.