

HCA Yöntemi ile Doğrusal Olmayan Bobin Devresi Kontrolü

Non-Linear Coil Circuit Control with HCA Method

Ramazan TUNÇEL¹, Murat DOĞRUEL¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul
murat.dogrue1@izu.edu.tr
tuncel.ramazan@std.izu.edu.tr

Özetçe

Periyodik referanslara ve bozulmalara sahip sistemler için Harmonik Kontrol Dizileri (ing.HCA) yaklaşımı, kontrol sinyalinin harmonik bileşenlerini değiştirerek hata sinyalini en aza indirir. Bu çalışmada HCA yöntemi ayrı zamanda doğrusal olmayan bir sisteme uygulanmıştır. Uygulama, Jiles-Atherton (J-A) modelinde çekirdeği doygunluk ve histerezis özelliği gösteren doğrusal olmayan bir indüktör ile seri bağlı bir doğrusal direnç içeren ve bir gerilim kaynağı tarafından beslenen devrede, periyodik sinüzoidal referans sinyali çıkışı sağlayan bir kontrolör tasarlanmıştır.

Abstract

For systems with periodic references and distortions, the Harmonic Control Arrays (HCA) approach minimizes the error signal by changing the harmonic components of the control signal. In this study, the HCA method was applied to a nonlinear system in continuous time. In the application, the control of the system is carried out for a periodic sinusoidal reference signal at the output of the circuit fed by a voltage source and containing a linear resistor and a non-linear inductor whose core shows saturation and hysteresis in the Jiles-Atherton (J-A) model.

1. Giriş

Harmonik Kontrol Dizileri (ing.HCA), periyodik referans ve distorsiyona sahip denetim sistemleri için geliştirilen bir yöntemdir [1-3]. Yöntemin ilkesi, seçilen denetim sinyali ya da sinyallerin, klasik kontrol yöntemlerindeki gibi direk olarak hata işaretinin üzerinde uygulanması yerine, hata işaretinin Fourier açılımının seçilen bileşenlerinin her birine ayrı ayrı uygulanması yatmaktadır. Yöntemin temel basamakları, lineer olmayan bir endüktansa sahip RL elektronik devresi üzerinde test edilecektir.

HCA iç yapısında kullanılan kontrol yöntemi olarak Oransal-İntegral (PI) denetimi seçilerek, hata işaretinin her bir Fourier bileşeni üzerine farklı oransal ve integral katsayıları (K_p ve K_i) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Referans olarak sinüzoidal bir gerilim kaynağına sahip sinyal seçilmiş ve doğrusal olmayan transfer fonksiyonuna sahip bir histerezisli indüktör ile seri bağlı bir doğrusal direnç içeren devre üzerinde

denenmiştir. HCA, aynı zamanda güç elektroniği uygulamaları olarak tek fazlı bağımsız invertörlere [4] ve aktif güç filtrelerine [5] uygulanabilir.

Histerezisli doğrusal olmayan bir indüktör, manyetik davranışı lineer olmayan ve histerezis etkileri sergileyen bir indüktörü ifade eder. Lineer bir indüktörde, manyetik akı uygulanan akımla doğru orantılıdır, fakat lineer olmayan bir indüktörde bu ilişki lineer değildir. Histerezis, manyetik alan değiştiğinde bir malzemenin manyetik özelliklerinin bir gecikme gösterdiği olguyu ifade eder.

1984 yılında, Jiles ve Atherton bir manyetik histerezis modeli geliştirdiler [6]. Bir indüktör bağlamında, indüktörde kullanılan çekirdek malzeme nedeniyle histerezis meydana gelebilir. Çekirdek malzemesi, indüktörün uygulanan akım ile ortaya çıkan manyetik akı arasında doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olmasına neden olan histerezis sergileyen manyetik özelliklere sahip olabilir.

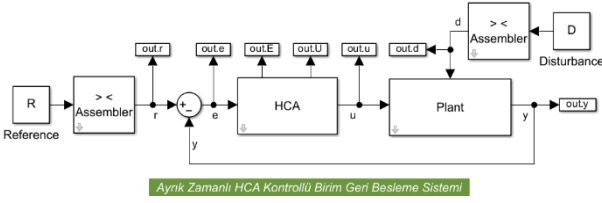
Doğrusal olmayan bir indüktörden bir akım geçtiğinde ve belirli bir seviyeye ulaştığında, manyetik alan şiddeti doyuma ulaşır ve endüktans azalır. Sonuç olarak, akımın zamana göre değişim hızı (di/dt) azalır ve devrenin davranışını etkiler [7]. Bu doğrusal olmama, dalga biçimlerinde bozulma, rezonans frekansındaki değişiklikler ve değişen frekans tepkisi dahil olmak üzere çeşitli sonuçlara sahip olabilir.

2. Harmonik Kontrol Dizileri

Şekil 1'de gösterildiği gibi, $e(t)$, referans girişi $r(t)$ ile sistem çıkışı $y(t)$ arasındaki fark ve $u(t)$, denetleyici tarafından üretilen sistem girişi olan tipik bir birim geri besleme sistemi ele alalım. Kontrolör olarak bir HCA seçildiğinde, belirli bir sinyal periyodu olan T 'nin temel periyot olarak belirtilmesi gerekir. Açısal frekans $\omega = 2\pi/T$ olarak tanımlanır [8]. Dikkate alınan en yüksek harmonik sayı H 'dir. Bir HCA'nın iç blokları aşağıdaki gibidir.

Dağıtıcı: Yürüyen bir Fourier serisi integrali kullanılarak, harmonik bileşenler bir zaman alanı sinyalinden elde edilebilir. Burada, herhangi bir zamanda, gelen sinyalin son zaman dilimini dikkate alıyoruz. Bu nedenle, harmonik sinyallerin karmaşık seviyelerindeki değişiklikleri mümkün olduğunca hızlı bir şekilde sürekli olarak takip ediyoruz. h harmoniği için hatanın dağılmış sinyali şu şekilde elde edilir:

$$\langle e \rangle_h(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^T e(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$



Şekil 1: HCA kontrolörü birim geri besleme sistemi.

Bu dağılık sinyalleri vektör formunda birleştirerek e 'nin dağılımını elde edilmektedir.

$$\langle e \rangle = \begin{bmatrix} \langle e \rangle_0 \\ \langle e \rangle_1 \\ \vdots \\ \langle e \rangle_H \end{bmatrix} \quad (2)$$

$e(t)$ 'nin gerçek değerli bir sinyal olduğu varsayılır, bu nedenle burada negatif harmonikleri hesaplamaya gerek yoktur. Eğer $e(t)$ sinyali T ile periyodik ise, $\langle e \rangle$ zaman içinde karmaşık bir sabit vektör değerine sahip olacaktır. (1)'in ayrık zamanlı versiyonu şu şekilde verilebilir:

$$\langle e \rangle_h[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n e[k] e^{-j2\pi h \frac{k}{N}} \quad (3)$$

Burada $N = T/T_s$, tamsayı olması gereken temel periyottaki örneklerin sayısıdır ve T_s örnekleme zamanıdır. H , en yüksek harmonik sinyalin iyi temsil edilmesi için yeterince yüksek olmalıdır. Özellikle N yüksek olduğunda, denklem (3)'ün hesaplama yükü çok fazla olabilir. Bu durumda, ayrık zamanlı dağıtıcı için aşağıdaki eşdeğer hesaplamayı kullanabiliriz.

$$\langle e_h \rangle[n] = \langle e \rangle_h[n] + (e[n] - e[n-N]) e^{-\frac{j2\pi hn}{N}} / N \quad (4)$$

Üstel terimler önceden hesaplandıktan sonra, denklem (4) yalnızca bir karmaşık çarpmaya ve N gerçek sayıların arabelleğine ihtiyaç duyar.

HCA PI Denetleyici: HCA dahili denetleyicisi, dağıtıcıdan elde edilen her harmonik sinyali ayrı ayrı ele alır ve kontrol sinyali harmoniklerini oluşturmaya çalışır, böylece hata asimptotik olarak mümkün olduğunca hızlı sifra yaklaşır. Normal olarak, bunu başarabilmek için her bir harmonik sinyali

için integral kontrolörlere ihtiyaç duyulur. Böylece, hata sifra ulaştığında dahi integral çıkışlar sistem girişine enjekte edilecek uygun karmaşık değerleri üretebilir. Geçici durumu kısaltmak için ise oransal denetleyiciler kullanılabilir. Bu nedenle, sistem girişinin dağılımının elde edilmesi için aşağıdaki hesaplama kullanılır.

$$\langle u \rangle(t) = K_p \langle e \rangle(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Burada, K_p ve K_i karmaşık değerli oransal ve integral kazanç matrisleridir. Bu matrislerdeki köşegen dışı veya çapraz terimler, doğrusal olmayan sistemler için yararlı olabilir; ancak, kullanılmadığı takdirde, bu matrisler köşegen matrisler olarak seçilebilir; bu durumda, her hata harmonik sinyali, yalnızca karşılık gelen kontrol harmonik sinyalini değiştirir. Harmonik Kontrol Dizisi terimi, her bir harmonik için ayrı bir denetleyicinin kontrol sinyalini oluşturmak üzere çalışması nedeniyle türetilmiştir.

Denklem (5) ayrık zamanlı versiyonu şu şekilde kullanılabilir:

$$\langle u \rangle[n] = K_p \langle e \rangle[n] + K_i T_s \sum_0^n \langle e \rangle[n] \quad (6)$$

Toparlayıcı: Harmonik toparlayıcı (birleştirici), gerçek zamanlı kontrol sinyalini oluşturmak için HCA dahili denetleyicisinden elde edilen harmonik bileşenleri yeniden birleştirir. $e(t)$ ve $u(t)$ 'nin gerçek değerli sinyaller olduğunu varsayarak, kontrol sinyalini şu şekilde oluşturmak için Fourier serisi sentezini kullanabiliriz:

$$\langle u \rangle(t) = \langle u_0 \rangle(t) + 2Re \left\{ \sum_{h=1}^H \langle u_h \rangle(t) e^{j\omega t} \right\} \quad (7)$$

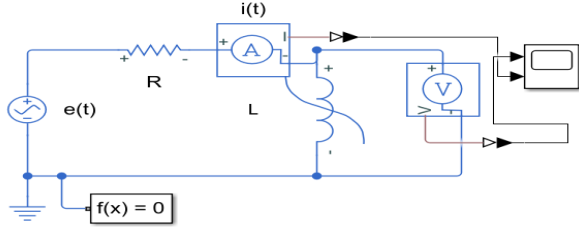
Ayrık versiyonun benzer şekilde elde edilebileceği denklem:

$$\langle u \rangle[n] = \langle u_0 \rangle[n] + 2Re \left\{ \sum_{h=1}^H \langle u_h \rangle[n] e^{\frac{j2\pi hn}{N}} \right\} \quad (8)$$

Her bir harmonik bileşen üzerindeki denetleme işlemi HCA bloğu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Harmoniklerin sayısını belirlemek, donanım yeterlilikleri içinde kalmak üzere tasarımcının kontrolünü gerçekleştirdiği sistem üzerinden tasarımcının inisiyatifindedir. Böylece harmonik sayısının artırılması, daha fazla işlem gücü kullanma bedeliyle, özellikle doğrusal olmayan yüklerde daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan bir histerezisli indüktör ile seri bağlı bir doğrusal direnç RL devresi kullanılmış ve referans olarak da sinüzoidal bir işaret seçilmiştir.

3. Histeretik Doğrusal Olmayan İndüktörlü Elektrik Devresi

Sistem uygulaması için histeretik ve doyurulabilir bir indüktöre sahip bir seri RL devresi ele alınmıştır [9]. Devre normalde sinüzoidal voltaj kaynağı $e(t)=E\sin(2\pi ft)$ tarafından sürülür. $i(t)$ indüktördeki akım, $\theta(t)$ manyetik akı, $v(t)$ ise indüktör üzerindeki voltajdır. (Şekil 3).

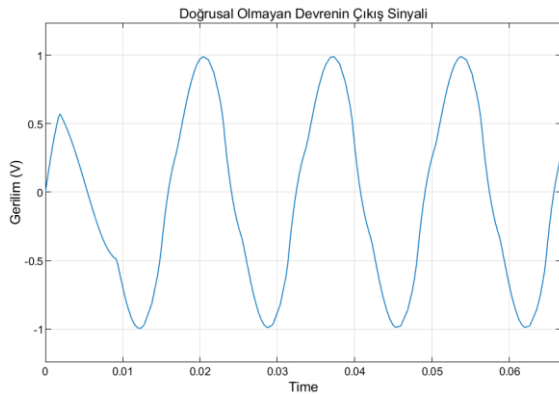


Şekil 3: Devrenin şematik temsili

Deney devresinde frekans 60Hz olarak seçilirken, 1 volt AC gerilim ve $R=0.5\Omega$ değerleri kullanılmıştır. İndüktör 100 sarımdan oluşturulmuştur. Bobinde doğru parametre seçimi ile Jiles ve Atherton [10], deneysel sonuçlarla mükemmel uyum sağlar. Devrede kullanılan doğrusal olmayan bobin parametreleri MATLAB/Simulink ortamında şu şekilde seçilmiştir. H , manyetik alan kuvvet vektörü olup değeri $[0 \ 199 \ 398 \ 597 \ 796 \ 995]$ A/m'dir. B , manyetik akı yoğunluğu vektörü $[0 \ 0.75 \ 1.20 \ 1.39 \ 1.46 \ 1.49]$ Tesla'dır. l_e , etkili çekirdek uzunluğu 0.032 m'dir. A_e etkili çekirdek kesit alanı olup değeri $1.6e-5 \text{ m}^2$ 'dir.

$$\frac{d\theta}{dt} = -Ri + e(t), \quad i = i[\theta(t)] \quad (9)$$

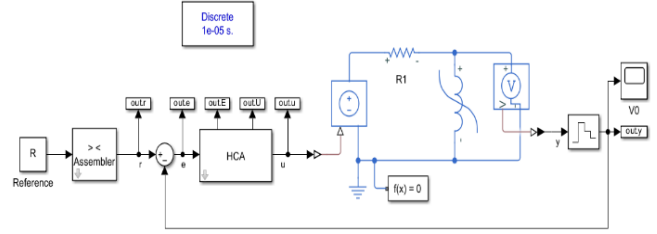
Burada doğrusal olmayan işlevsel $i=i[\theta(t)]$ histeretik indüktörün davranışını tanımlar. Verilen parametreler için devrenin çıkış gerilimi Şekil 4'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi devrenin çıkış gerilim grafiği tam olarak sinüzoidal değildir. HCA yöntemi uygulanması ile $e(t)$ kontrol edilerek, çıkışta olabildiğince sinüzoidal bir sinyal elde edilecektir.



Şekil 4: Doğrusal olmayan devrenin çıkış sinyali

4. MATLAB/Simulink Kullanarak Sistem Modelleme

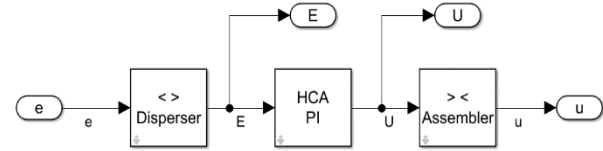
Şekil 1'deki birim geri besleme sistemine, dinamik sistem olarak RL elektrik devresi entegre edilmiştir (Şekil 5). HCA sisteminin her bloğu aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır.



Şekil 5. HCA ile sistem devresi

A. HCA Bloğu

HCA bloğu, Şekil 6'de gösterildiği gibi ve önceki bölümde açıklanan dağıtıcı, HCA, PI denetleyicisi ve toparlayıcıdan oluşur.



Şekil 6. HCA yapısındaki bloklar.

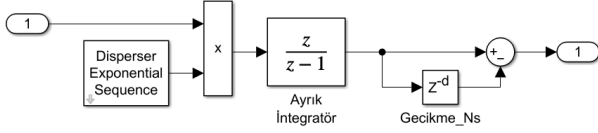
Burada, büyük harfler E ve U, gerçek zamanlı e ve u sinyallerinin harmonik dağılımlarını temsil eder.

B. Dağıtıcı

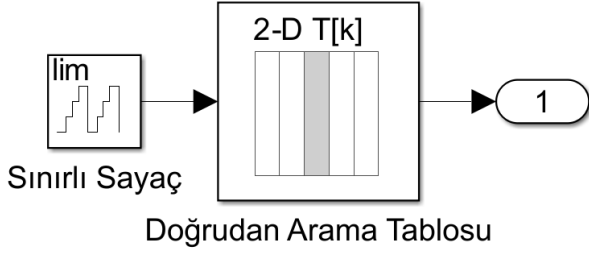
Dağıtma işlemi denklem (4), Şekil 7'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Burada, normalde ayrıntı entegratör son blok olacaktır. Ancak bu tür bir yapı için, sayısal hatalar sürekli olarak birikerek sistem performansını saptırabilir [11]. İntegral toplamında birikmiş hatalar olsa bile sondaki gecikme ve fark bloğu tarafından giderilsin diye integral bloğunu daha önce kullanıyoruz. Dağıtıcı Üstel Dizisi bloğu, Şekil 8'de gösterilen bloklardan oluşur; burada Doğrudan Arama Tablosu matrisi şu şekilde seçilir:

$$Wd = \exp\left(-1j * 2 * \pi * [0:H]' * \frac{[0:N-1]}{N}\right) / N \quad (10)$$

Bu yapı mevcut örnek sayısına karşılık gelen karmaşık bir vektör olarak gerekli üstel diziyi üretir.



Şekil 7. Dağıtıcı yapısı

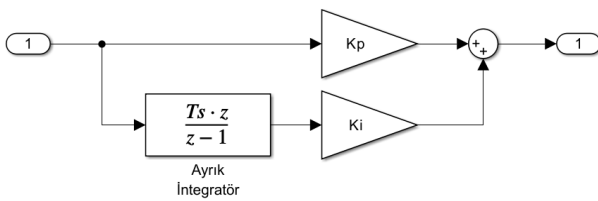


Şekil 8. Dağıtıcı üstel dizi üretici

Sınırlı Sayıcı bloğu, tekrarlı olarak 0'dan $N-1$ 'e kadar geçerli örnek sayısını üretir.

C. PI Denetleyici

HCA dahili denetleyicisi, birçok farklı kontrol tekniği kullanılarak oluşturulabilir. Burada, Şekil 9'da gösterilen PI denetleyicilerini ele alıyoruz. PI kontrolörü, ölçülen proses değişkeni ile integral ayar noktası arasındaki fark olan bir hata değerini hesaplar [12]. K_p ve K_i , (6)'da açıklandığı gibi kare matrisler olarak kullanılabilir. Ancak köşegen dışı değerler kullanılmıyorsa K_p ve K_i vektörleri olarak da seçilebilir. Bu durumda, Şekil 9'daki kazanç blokları eleman bazında çarpma olarak uygulanmalıdır.



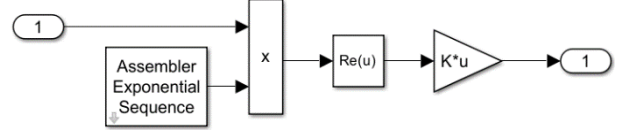
Şekil 9. HCA PI denetleyici yapısı

D. Toparlayıcı

Toparlayıcı bloğu, (8)'de açıklandığı gibi ve Şekil 10'da gösterildiği gibi kontrol sinyalini oluşturmak için harmonik vektörü yeniden birleştirir. Burada Toparlayıcı Üstel Dizisi bloğu, aşağıdaki Doğrudan Arama Tablosu matrisini içeren Şekil 10'da gösterilen bloklardan oluşur:

Burada, kazanç bloğundaki kazanç $[1 \ 2 \ \dots \ 1] \cdot H$ olarak seçilir, böylece (8) düzgün şekilde hesaplanır.

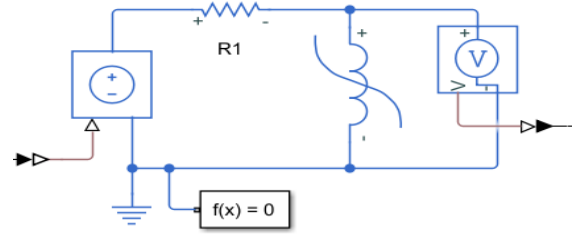
$$W_a = \exp\left(1j \cdot 2 \cdot \pi \cdot [0:H] \cdot \frac{[0:N-1]}{N}\right) / N \quad (11)$$



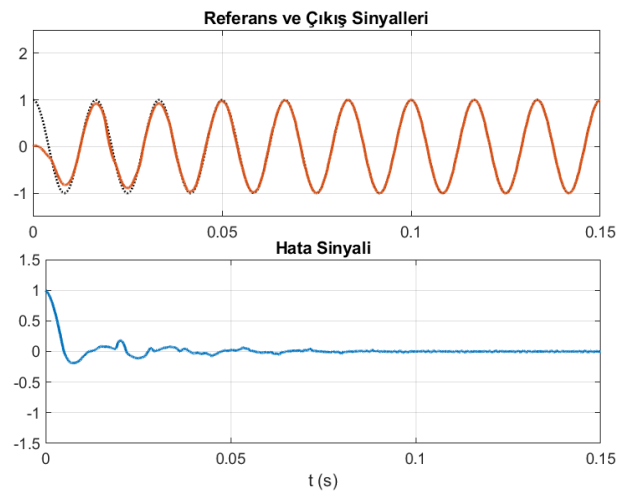
Şekil 10. Toparlayıcı yapısı

E. Dinamik Sistem ve Geri Besleme

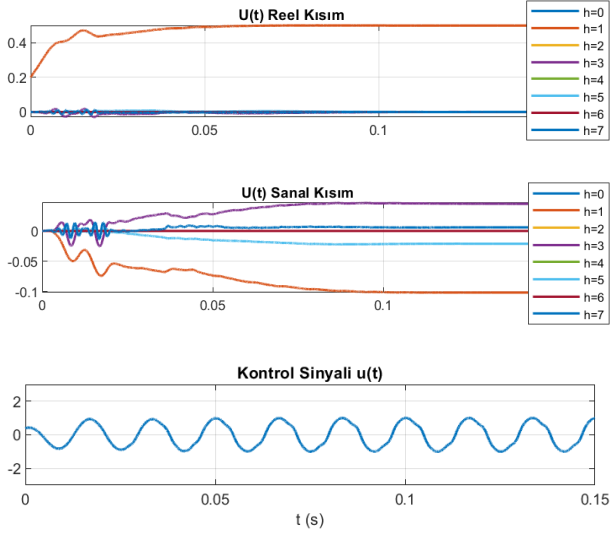
Bu çalışmada dinamik sistem bloğu, Şekil 11'de gösterildiği gibi doğrusal olmayan bir histerezisli indüktör ile seri bağlı bir doğrusal dirençli bir RL devresidir.



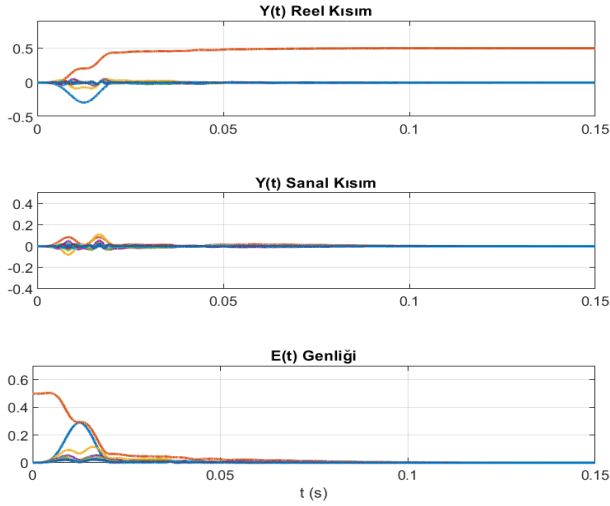
Şekil 11. Dinamik sistem



Şekil 12. Referans, sistem çıkışı ve hata sinyalleri



Şekil 13. Kontrol sinyalinin frekans bileşenlerinden gerçek zamanlı kontrol sinyali oluşturulması.



Şekil 14. Sistem çıkışının dağılımları (reel ve sanal kısımlar) ve hata (büyüklük) sinyalleri.

$T_s = 10 \mu s$ örnekleme süresi, $H = 7$ harmonik sayısı, $R = [0; 0.5; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]$ referans dağılım vektörü şeklinde seçildiğinde, HCA PI kazançları Şekil 15'te şu şekilde belirlenmiştir:

HCA PI Kazancı	Harmonik Sayısı							
	0	1	2	3	4	5	6	7
K_p	0	0.4	0	0.5	0	0.2	0	0.7
K_i	0	60	0	$100 \cdot \exp(1j \cdot 0.1)$	0	90	0	$150 \cdot \exp(1j \cdot 6.6)$

Şekil 15. Referans dağılımında HCA PI kazançları

Referans, hata ve bozulma sinyalleri ile birlikte sistem çıkışı için simülasyon sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir.

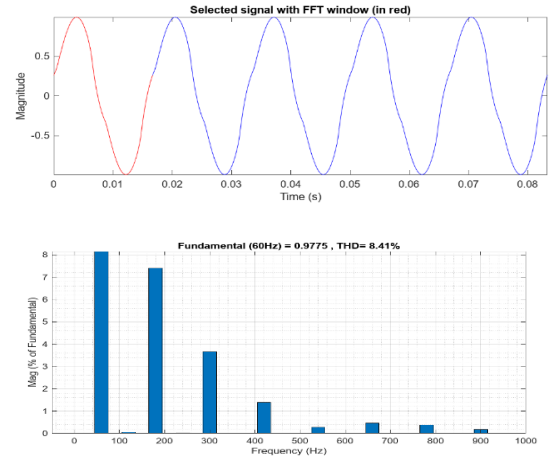
Gördüğümüz gibi, bozulma ve gecikmeye rağmen, kararlı durum hatası yaklaşık beş periyotta sifıra yaklaşan çıkış sergiler. Şekil 13'da dengeleyici kontrol sinyalinin yapısı, dağılımının gerçek ve sanal kısımları olarak gösterilmektedir. Uygun karmaşık kazançlarla her bir harmonik için çalışan entegratörler, hata dağılımını sıfır yapmak için gerekli harmonik kontrol seviyelerini kademeli olarak bulurlar. Assembler bloğu daha sonra sistem girişine enjekte edilecek gerçek zamanlı kontrol sinyalini üretmek için bu harmonikleri birleştirir.

Şekil 14, çıkış ve hata sinyallerinin dağılımını göstermektedir. Çıkış sinyallerin dağılımı gerçek ve sanal kısımları şekilde gösterildiği gibi hata dağılımının büyüklüğü sifıra yakınsayacak şekilde, referansın sinyal dağılımının aynı seviyelere kademeli olarak yerleştirildiğini görmekteyiz.

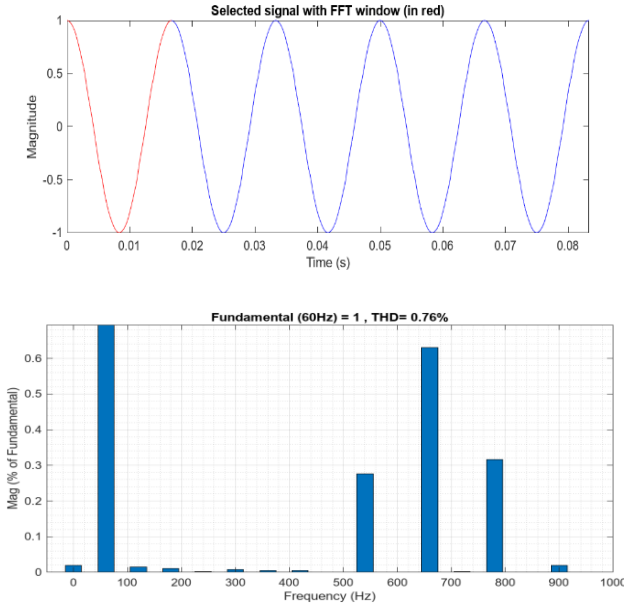
5. Sistem Çıkışı FFT analizi ve THD İçeriği

Doğrusal olmayan sistemlerde, THD analizi tipik olarak giriş sinyaline göre çıkış sinyalinin harmonik içeriğinin değerlendirilmesini içerir. Uygulanan gerilime ilişkin empedans değişikliği, doğrusal olmayan yük anlamına gelir. Doğrusal olmayan yük, akım çekildiğinde sinüzoidal olmayan kalma eğilimindedir [13]. Bu, çıkış sinyalinde bulunan harmonik bileşenleri giriş sinyalinin temel bileşeniyle karşılaştırmak anlamına gelir. Doğrusal olmayan bir RL devresinde THD'yi analiz etmek için, genellikle sisteme bilinen bir giriş sinyali (örn. sinüs dalgası) uygulanarak çıkış sinyali ölçülür. Ardından, bir spektrum analizörü veya benzer araçlar kullanarak, çıkış sinyalini harmonik bileşenlerine ayırır ve bunları giriş sinyalinin temel bileşeniyle karşılaştırır. Bu tür devrelerde akım kesintileri doğrusal olmayan yükü karakterize eder ve çeşitli akım bileşenleri sağlanarak bileşenlerin harmoniklerini ifade eder. THD, tüm harmonik bileşenlerin gücünün toplanması ve temel bileşenin gücüne bölünmesiyle hesaplanır.

HCA metodu ile doğrusal olmayan bir sinyal çıkışı, doğrusal bir sinyal çıkışı olarak elde edilir. Bu sistemin THD analizi, MATLAB/Simulink yazılımı yardımıyla simüle edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 16. Sisteme HCA uygulamadan elde edilen THD içeriği



Şekil 17. HCA uygulanan sistemin THD içeriği

Şekil 16'da Toplam Harmonik Bozulma (THD) yüzdesi yüksek olduğu için, temel bileşene kıyasla sinyalde önemli miktarda (%8.41) harmonik bozulma olduğunu göstermektedir. THD yüzdesinin yüksek olmasının nedeni doğrusal olmayan yük ve sistemlerdir. Doğrusal olmayan bobinli RL devresinde, çıkış sinyali ideal sinüzoidal dalga biçiminden önemli ölçüde sapabilir. Böylece, temel frekansın katları olan harmonikleri ortaya çıkararak daha yüksek bir THD yüzdesine yol açar.

Şekil 17'de Toplam Harmonik Bozulma (THD) yüzdesinin küçük olması, sinyalin temel bileşene kıyasla minimum harmonik bozulmaya sahip olduğunu gösterir. Bu sisteme HCA ile doğrusallaştırma işlemi uygulanmıştır. HCA yönteminde negatif birim geri besleme ile sistemin istenmeyen harmonikleri elimine edilerek, daha düşük THD yüzdesi (%0.76) elde edilmiştir.

6. Sonuçlar

HCA yöntemi, periyodik işaretin temel frekans ile istenilen gerekli sayıdaki harmonik bileşenlerine ayrı ayrı kontrol uygulandığından, özellikle doğrusal olmayan sistemler için önemli faydalar sağlamaktadır. Bu çalışmada HCA yöntemi ayrı zamanda doğrusal olmayan bir sisteme uygulanmıştır. Uygulama, histerezis özelliği gösteren doğrusal olmayan bir indüktör ile seri bağlı bir doğrusal direnç içeren ve bir sinüs gerilim kaynağı tarafından beslenen devrenin üzerine periyodik sinüzoidal referans sinyali uygulanarak sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir.

PI kontrolörleri olarak uygulanan HCA iç denetim bloğu, kontrol sinyalinin harmonik vektör bileşenlerini oluşturur. Daha sonra toparlayıcı blok, harmonik sinyalleri gerçek zamanlı bir kontrol sinyalinde birleştirir. Doğrusal olmayan etkilerden dolayı oluşan harmonikler uygun HCA PI katsayıları kullanılarak elimine edilerek saf sinüs sinyal çıkış elde edilebilmektedir. Sisteme HCA uygulamadan elde edilen THD içeriği ve uygulandıktan sonra elde edilen THD içeriği

karşılaştırılmasında HCA yönteminin doğrusal olmayan sistemlerde etkili bir çözüm sunduğu gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda, özellikle doyma ve histerezis görülen AC makinelerin HCA ile kontrolü üzerine inceleme ve tasarımlar yapılacaktır.

Kaynakça

- [1] M. Dogruel, "Harmonik kontrol dizileri," presented at the Turkish Nat. Symp. Autom. Control, Istanbul, Turkey, Jun. 2005.
- [2] M. Dogruel, "Harmonic control arrays," presented at the Syst. Control Theory Workshop, Gebze, Turkey, Sep. 2005.
- [3] M. Dogruel, H. H. Çelik, "Harmonic control arrays method with a real time application to periodic position control", IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 19, no. 3, pp. 521–530, May. 2011
- [4] M.-S. Karbasforooshan, M. Monfared and M. Dogruel, "Indirect control of single-phase active power filters using harmonic control arrays," 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), pp. 143-148, 2017
- [5] M.S. Karbasforooshan, M. Monfared, and M. Dogruel, "Application of the Harmonic Control Arrays Technique to Single-Phase Stand-Alone Inverters," IET Power Electronics, vol. 9, no. 7, pp. 1445-1453, 2016
- [6] J. H. B. Deane, "Modelling of a chaotic circuit containing a saturating and hysteretic inductor," Electronics Lett., vol. 29, no. 11, pp. 957-958, May 1993.
- [7] S. Bobbio, M. de Magistris, G. Mho, C. Visone, E. Zamparelli, "A New Model of Scalar Magnetic Hysteresis", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30. NO. 5, SEPTEMBER 1994
- [8] Murat Dogruel, "Modeling of Harmonic Control Arrays using MATLAB/Simulink with an Application to a Hot Rolling Mill Process", European Control Conference (ECC), Bukresh, Romania, 2023.
- [9] <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/inductor-with-hysteresis.html>
- [10] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis", J. Appl. Phys., vol. 55(6), 1984, pp. 2115- 2120
- [11] M. Dogruel, "Harmonik kontrol dizileri," presented at the Turkish Nat. Symp. Autom. Control, Istanbul, Turkey, Jun. 2005.
- [12] R. K. Mudi, and N. R. Pal. "A self-tuning fuzzy PI controller." Fuzzy sets and systems 115, no. 2 (2000): 327-338.
- [13] Yanfeng Shen, 'A fixed-frequency Bidirectional Resonant DC-DC Converter Suitable For Wide Voltage Gain Range'. Electronic ISSN: 2470-6647 Xiong Liu, Peng Wang, Member, IEEE, Poh Chiang Loh, Member, IEEE, Power Engg Division, "Optimal Coordination Control for Standalone PV System with Nonlinear Load," School of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University, Singapore.ConferenceProceedingsIPEC,2010