

İndüksiyon motor denetiminde interpolasyon tekniklerinin kullanımı

The use of interpolation techniques in induction motor control

Özcan OTKUN^{1*} 

¹Üç Nokta Akademi Şti, Trabzon, Türkiye.
ozcanotkun@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 18.11.2018,
Kabul Tarihi/Accepted: 21.05.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 15.05.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.51333
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

İndüksiyon Motor'lar (IM) farklı yüklerde çalışırken nominal hızın gerisinde kaldıkları bilinmektedir. Bu bağlamda motor sürücülerini önem kazanmaktadır. Bu konu geçmişten günümüze pek çok bilim insanının dikkatini çekmiştir. Bu çalışmada, IM sürücüsü başarımını arttırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. IM sürücüsü de Skaler Denetim (SD) yöntemi kullanılmıştır. SD'de değişken frekanslı kontrol tekniği tercih edilmiştir. Böylece farklı yüklerde çalışan IM'nin nominal hızda çalışabilmesi için frekans değiştirilecektir. Frekans değişimini sağlamak için Gregory-Newton Interpolasyon (GNI) ve Lagrange Interpolasyon (LI) çözüm teknikleri kullanılmıştır. Bu iki farklı çözüm yöntemi, farklı yüklerle karşılık nominal hız için gereken frekansı hesaplayarak sürücüye iletmektedir. Çalışma Matlab/Simulink programında test edilmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar iki interpolasyon tekniğinin de başarılı sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Benzer sonuçlar üreten bu iki teknikte; GNI tekniğinin farklı yüklerle cevap verme süresi yaklaşık 0.041-0.065 s arasında iken, LI tekniğinin cevap verme süresi 0.003 s'dir. Çalışma sonunda Oransal-Integral (PI) denetleyici ile performans incelemesi yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, önerilen teknikler farklı hız ve yük değişimlerine hızlı cevap vermiş, daha hassas ve kararlı bir hız denetimi sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Hız kontrol, İndüksiyon motor sürücüsü, Interpolasyon, Lagrange, Gregory-Newton, IM.

Abstract

Induction Motors (IM) are known to remain behind the rated speed when operating at different loads. In this context, motor drivers gain importance. This subject has attracted the attention of many scientists from past to present. In this study, in order to increase the performance of IM driver was performed. Scalar Control (SC) method was used in IMD. The variable frequency control technique was preferred in SC. Thus, the frequency will be changed so that the IM operating in different loads can operate at nominal speed. Gregory-Newton Interpolation (GNI) and Lagrange Interpolation (LI) solution techniques were used to ensure frequency variation. These two different solution methods calculate the frequency required for the nominal speed in response to different loads to the driver. The study was tested in the Matlab/Simulink program. The results obtained from the tests showed that two interpolation techniques produced successful results. In these two techniques producing similar results; The response time of the GNI technique to the different loads is between 0.041-0.065 s, while the response time of the LI technique is 0.003 s. At the end of the study with Proportional-Integral (PI) controller the performance analysis was performed. The results showed that the proposed techniques gave quick response to different speed and load changes, resulting in more precise and stable speed control.

Keywords: Speed control, Induction motor drive, Interpolation, Lagrange, Gregory-Newton, IM.

1 Giriş

IM'ler endüstriyel uygulamaların pek çoğunda tercih edilmektedir. Bakımlarının kolay olması, maliyetlerinin düşük olması bu durumun başlıca nedenleri arasında gösterilebilir [1],[2]. Buna karşın yük hızı ve/veya şebeke frekansının değişkenlik göstermesi motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Bu durum geçmişten günümüze araştırılan, önerilerde bulunulan, çözüm yöntemleri üretilen ve halen güncelliğini koruyan konular arasındadır [4].

IM'lerin hız denetiminde klasik (skaler ve vektörel) yöntemler kullanılmaktadır [2],[5]. Denetim sistemlerinden beklenen, değişken hız ve yük durumlarına hızlı ve doğru cevap vermesi, hassas ve kararlı bir denetim sağlamasıdır [6]. SD düşük performanslı uygulamalarda yeterli olurken; yüksek performanslı, değişken yük ve hız uygulamalarında vektör denetim tercih edilmektedir [3],[7]. Literatüre bakıldığında, klasik denetim yöntemlerinin performansının artırılması için Oransal-Integral-Türevsel (PID) denetim yöntemleri ile birlikte kullanıldığı görülmektedir [8]-[11]. Bu denetim yöntemlerinin de motor parametrelerinin değişim göstermesi durumunda performansının azaldığı ve P, PI ya da PID denetim

parametrelerinin değişmesi gerektiği anlaşılmaktadır [12]-[14]. Hız denetim performansının artırılması için tork, akı vb. gibi denetimlerin önerildiği çalışmalar bulunmaktadır [15]-[17]. Yine klasik denetim yöntemlerine ek olarak Kalman Filter [18], alan yönlendirme [19],[20], pozisyon [21], adaptif [22], sonlu elemanlar [23], sonlu farklar [24], lojik [25], gibi yöntemler bulunmaktadır. Ayrıca, durum geri-beslemeli [26], stator voltaj [27], gözlemci tabanlı [28], matris teori [29], kayma modu [30], dijital sinyal işlemci [31], sensörlü-sensörsüz [32], dayanıklı [33] denetim gibi pek çok yöntem önerilmektedir [1],[2],[34]. Son yıllardaki çalışmalar incelendiğinde akıllı denetim yöntemlerinin geliştirildiği (Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık (BM), Genetik Algoritmalar (GA) vb.) ve bu yöntemlerin klasik yöntemlerle birlikte kullanıldığı çalışmalara rastlamaktayız. Sadece klasik yöntemlerle kullanılan çalışmalar olduğu gibi yukarıda belirtilen yöntemlere ek olarak YSA, BM, GA gibi denetim yöntemlerinin kullanıldığını görmekteyiz [35]-[42].

Sayısal analiz, mühendislikte analitik çözümü bulunamayan birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır [43],[44]. Bu problemler; belirli bir hata aralığına bağlı olarak ya da bilinen değerlerden bilinmeyen değerleri bulma şeklinde

*Yazışılan yazar/Corresponding author

gerçekleşmektedir. Çözümü zor olan bu problemler bilgisayar yardımı ile çözümlenmektedir [45],[46]. Hız denetimi alanında sıklıkla kullanılmamasının nedeni bugüne değin olan bilgisayarların işlemci hızının düşük olması olabilir. Ancak günümüzde çok hızlı işlem gören, işlemci hızı yüksek bilgisayarlar bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında; Elektrik-Elektronik, Makine, İnşaat, Kimya vb. gibi pek çok mühendislik alanında sayısal analiz yöntemlerinin kullanıldığını görmekteyiz [47]-[50]. Sayısal analiz yöntemleri içerisinde bizzat denetimde kullanılmayan Newton-Raphson (NR) [51], LI [52],[53], En küçük kareler [54], vb. gibi yöntemler bulunmaktadır. [55]'te, Rotor akı belirsizliği göz önünde bulundurularak Luenberger gözlemcisinin denklemindeki tahmin hatasını minimuma indiren en küçük kareler metodunu önerilmekte, deneysel sonuçlar, bu algoritmanın çok düşük hızda ve sıfır hızda, yüksüz ve yükte performans açısından pozitif sonuçlar ürettiği görülmektedir. [56] ve [57]'de, Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışma test edilmiş, bulunan sonuçların yapılan çalışma sonuçları ile örtüştüğü belirtilmiştir. [58]'de, hız sabit mknatıslı senkron motor için tasarlanmış geniş hız aralıklı ve yüksek performanslı sürücülerde geleneksel yöntemleri ve sayısal analiz yöntemi hesaplayarak akımı karşılaştırmışlardır. Önerilen hesaplama yönteminin kullanılabilceği görülmüştür. [59]'de, IM'in hız kontrolünde YSA tabanlı bir kontrol algoritması üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yöntemde, YSA sonuçları NR ile hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Kontrol çalışmalarında simülasyon sonuçlarının kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Tüm bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde; Sayısal analiz yöntemleri, karşılaştırma ve doğrulama amaçlı olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır [60],[61].

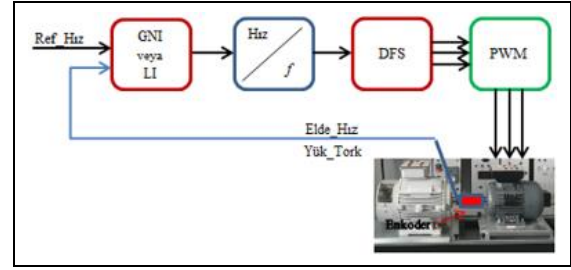
Bu çalışmada sayısal analiz yöntemleri olarak bilinen GNI ve LI teknikleri kullanılmıştır. Bu yöntemler bilinen değer aralıklarından bilinmeyen değerleri bulma yöntemi olarak bilinmektedir [43]. Literatürde bu yöntemlerin denetleyici olarak kullanıldığı bir denetim yöntemi bulunmamaktadır. Bu durum çalışmanın özgün yanını ortaya çıkarmaktadır. Kaldı ki, bu çalışmanın amacı bilinen yöntemlerin pozitif ve negatif yönlerini ortaya koymak değil, literatürde bilinen yöntemleri farklı bir alanda kullanarak farklı bir çözüm yöntemi ortaya koymaktır. Bu anlamda Değiştirilebilir Frekanslı Sürücünün (DFS) frekans denetimi önerilen interpolasyon yöntemleriyle gerçekleştirilecektir. Böylece sürücü denetimi sağlanıp IM'nin nominal hızda ya da istenen hızda olması sağlanacaktır. Sonuçların gösterimi için Matlab yazılımı kullanılmış ve sayısal benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda önerilen yöntemlerin PI denetleyicisi ile performans incelemesi yapılmıştır.

2 Materyal ve metod

Çalışmada kullanılan motor, sürücü ve önerilen yöntemlere ait matematiksel ifadeler, parametreler aşağıda sunulmuştur. Çalışmanın GNI ve/veya LI'ye ait blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Çalışmada önerilen yöntemlerin hesaplama işlemi Matlab/Simulink'de hazırlanan program yardımıyla yapıp denetimde kullanılan sürücüye iletilmektedir.

2.1 İndüksiyon motorun matematiksel modeli

Benzetim ve test çalışmalarında kullanılan eksen dönüşüm denklemleri aşağıda verilmiştir [62]. Bu denklemler IM modeli oluşturulurken kullanılmaktadır.



Şekil 1: GNI ve/veya LI blok şeması.

Figure 1. GNI and/or LI block diagram.

a - b - c eksen sisteminin d - q eksen sistemine dönüşümü,

$$\begin{bmatrix} s_d \\ s_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - (2\pi/3)) & \cos(\theta + (2\pi/3)) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - (2\pi/3)) & -\sin(\theta + (2\pi/3)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

d - q eksen sisteminin a - b - c eksen sistemine dönüşümü,

$$\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - (2\pi/3)) & -\sin(\theta - (2\pi/3)) \\ \cos(\theta + (2\pi/3)) & -\sin(\theta + (2\pi/3)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_d \\ s_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'deki s parametresi Manyetik Akı, Akım ve Gerilimi ifade etmektedir. IM'nin d - q eksen sistemine ait matematiksel ifadeleri aşağıda verilmiştir.

Manyetik akı denklemleri;

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= \int (v_{ds} - i_{ds} R_s) dt \\ \psi_{qs} &= \int (v_{qs} - i_{qs} R_s) dt \\ \psi_{dr} &= -\int (w_r \psi_{qr} + i_{dr} R_r) dt \\ \psi_{qr} &= \int (w_r \psi_{dr} + i_{qr} R_r) dt \end{aligned} \quad (3)$$

Akım denklemleri;

$$\begin{aligned} i_{ds} &= (\psi_{ds} - \psi_{dr} (L_m / L_r)) (1 / (L_s - (L_m^2 / L_r))) \\ i_{qs} &= (\psi_{qs} - \psi_{qr} (L_m / L_r)) (1 / (L_s - (L_m^2 / L_r))) \\ i_{dr} &= (\psi_{dr} - \psi_{ds} (L_m / L_r)) (1 / (L_r - (L_m^2 / L_r))) \\ i_{qr} &= (\psi_{qr} - \psi_{qs} (L_m / L_r)) (1 / (L_r - (L_m^2 / L_r))) \end{aligned} \quad (4)$$

Elektromanyetik tork denklemi;

$$T_e = \frac{3p}{4} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

Hız denklemleri;

$$w_r = \frac{p}{2} \int (T_e - T_L) \frac{1}{j} dt \quad (6)$$

veya

$$w_r = 2\pi f_r \quad (7)$$

IM'nin parametreleri;

$R_s=4.85 \Omega$, $R_r=3.81 \Omega$, $L_s=L_r=0.274$ H, $L_m=0.258$ H, $j=0.031$ kgm², $P=1.5$ kW, $p=4$.

2.2 Önerilen interpolasyon teknikleri

Deneysel çalışmalar veya sayısal işlemler sonucunda doğru bilinen değerler kullanılarak istenen ya da bilinmeyen noktaların değerlerinin yaklaşık olarak hesaplanmasına interpolasyon denir. Doğru olarak bilinen bu değerler bir fonksiyonun ayrık noktaları ise bu ayrık noktalardan faydalanarak bağımlı değişken değerleri hesaplanabilir. Örneğin a_1-a-a_n sınırları içinde farklı a değerleri ve bu değerler karşılık $q(a)$ noktaları bir test sonucunda edilmiş ise a 'nın bu aralıktaki herhangi bir değeri için hesaplanan $q(a)$ değerine interpolasyon denir. İnterpolasyon farklı tekniklerle yapılabilmektedir. Burada çoğunlukla tercih edilen GNI ve LI teknikleri incelenecektir [44].

2.2.1 Gregory-Newton interpolasyon tekniği

Teorem 1: GNI tekniğinde ileri yön sonlu farklar ve geri yön sonlu farklar yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerden ileri yön sonlu farklar yöntemi; a 'nın r gibi eşit aralıklı değerlerine karşılık elde edilen $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ değerleri için,

$$\begin{aligned} \uparrow q_0 &= q_1 - q_0 \\ \uparrow^2 q_0 &= \uparrow q_1 - \uparrow q_0 = q_2 - 2q_1 + q_0 \\ \uparrow^3 q_0 &= \uparrow^2 q_1 - \uparrow^2 q_0 = q_3 - 3q_2 + 3q_1 - q_0 \end{aligned} \quad (8)$$

olduğu hatırlandığında,

$$\begin{aligned} \uparrow q_0 &= q_1 - q_0 \\ \uparrow^2 q_0 &= \uparrow q_1 - \uparrow q_0 = q_2 - 2q_1 + q_0 \\ \uparrow^3 q_0 &= \uparrow^2 q_1 - \uparrow^2 q_0 = q_3 - 3q_2 + 3q_1 - q_0 \end{aligned} \quad (9)$$

denklemleri elde edilir. Buradan genelleştirilen denklem,

$$q_n = (1 + \uparrow)^n q_0 \quad (10)$$

elde edilir. Burada binom açılımı yardımıyla,

$$q_n = q_0 + \frac{n}{1!} \uparrow q_0 + \frac{n(n-1)}{2!} \uparrow^2 q_0 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \uparrow^3 q_0 + \dots \quad (11)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıya ileri yön sonlu farklar GNI bağıntısı denir. Ayrıca

$$q_n = f(a_n) = f(a_0 + n \cdot h) \quad (12)$$

İfadesinden n 'inci noktanın herhangi bir nokta olması durumunda, yani herhangi bir a noktası için

$$q = f(a) = f(a_0 + n \cdot h) \quad (13)$$

olacaktır. Bu denklemlerde n değeri,

$$n = \frac{a - a_0}{h} \quad (14)$$

n değeri tam sayı veya kesirli bir sayı olabilir. h değeri genelleştirilirse

$$h = a_n - a_{n-1} \quad (15)$$

Benzer şekilde geri yön sonlu farklar GNI bağıntısı elde edilebilir. Bu bağlamda \uparrow operatörü ile \downarrow operatörü arasındaki

$$W = 1 + \uparrow = \frac{1}{1 - \downarrow} = (1 - \downarrow)^{-1} \quad (16)$$

ifade kullanılır. Böylece

$$\begin{aligned} q_n &= (1 + \uparrow)^n q_0 = \left(\frac{1}{1 - \downarrow}\right)^n q_0 = (1 - \downarrow)^{-n} q_0 \\ q_n &= q_0 + \frac{n}{1!} \downarrow q_0 + \frac{n(n-1)}{2!} \downarrow^2 q_0 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \downarrow^3 q_0 + \dots \end{aligned} \quad (17)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemleri geri yön sonlu farklar GNI bağıntısı denir. İleri yön sonlu farklar tablosunun elde edilmesi Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu tablodan hareketle interpolasyonu istenen noktanın en yakın a değeri, a_0 değeri olarak alınır ve bu noktanın satırına tablonun "Temel Satır" denir. Yine tablodan h değeri,

$$h = a_3 - a_2 = a_2 - a_1 = a_1 - a_0 \quad (18)$$

olarak hesaplanır. Benzer şekilde Geri yön sonlu farklar GNI tablosu elde edilebilir.

2.2.2 Lagrange interpolasyon tekniği

LI aslında bir eğri uydurma olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla burada iki noktadan hareketle nokta sayıları artırılarak istenen LI bağıntısının ya da polinomunun elde edilmesi gösterilecektir.

Teorem 2: Bu yöntemde nokta sayısı birlikte bağıntının derecesi de değişmektedir. Verilen ' $n+1$ ' adet verinin ' n ' dereceden bir bağıntısı olur. Dolayısıyla verilen değerler ister eşit aralıklı isterse farklı aralıklı olsun, elde edilen bağıntıdan hareketle herhangi bir a noktasına karşılık $q(a)$ değeri bulunur.

Tablo 1. İleri yön sonlu farklar tablosunun elde edilmesi.

Table 1. Obtaining a forward direction finite difference table.

n	a	$q(a)$	$\uparrow q$	$\uparrow^2 q$	$\uparrow^3 q$
0	a_0	$q(a_0)$	$\uparrow q_0 = q(a_1) - q(a_0)$	$\uparrow q_1 - \uparrow q_0$	$(\uparrow q_2 - \uparrow q_1) - (\uparrow q_1 - \uparrow q_0)$
1	a_1	$q(a_1)$	$\uparrow q_1 = q(a_2) - q(a_1)$	$\uparrow q_2 - \uparrow q_1$	0
2	a_2	$q(a_2)$	$\uparrow q_2 = q(a_3) - q(a_2)$	0	0
3	a_3	$q(a_3)$	0	0	0

İki nokta kullanılarak LI; Bu bir doğru denklemi olarak ifade edilebilir. Doğru denkleminin genel yapısı;

$$q(a) = c_0 + c_1 a \quad (19)$$

olursa c_0 ve c_1 aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\begin{aligned} q_0(a_0) &= c_0 + c_1 a_0 \\ q_1(a_1) &= c_0 + c_1 a_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Burada a_0 ve a_1 'e karşılık düşen q_0 ve q_1 bilindiğinden c_0 ve c_1 ;

$$\begin{aligned} c_0 &= q_0 - \frac{q_0 - q_1}{a_0 - a_1} a_0 \\ c_1 &= \frac{q_0 - q_1}{a_0 - a_1} \end{aligned} \quad (21)$$

Bulunan değerler Denklem 19'da yerine konursa,

$$q(a) = c_0 + c_1 a = q_0 - \frac{q_1 - q_0}{a_1 - a_0} a_0 + \frac{q_1 - q_0}{a_1 - a_0} a \quad (22)$$

buradan,

$$q(a) = \frac{a - a_1}{a_0 - a_1} q_0 + \frac{a - a_0}{a_1 - a_0} q_1 \quad (23)$$

$$q(a) = LI_0(a)q_0 + LI_1(a)q_1 \quad (24)$$

olur. Burada LI_0 ve LI_1 LI katsayılarıdır. İki'den fazla nokta için LI;

$$q(a) = c_0 + c_1 a + c_2 a^2 \quad (25)$$

Bu genel ifade ile Denklem 21 göz önüne alındığında c_0 , c_1 , c_2 bulunur. Katsayılar belirlendikten sonra,

$$q(a) = \frac{(a - a_1)(a - a_2)}{(a_0 - a_1)(a_0 - a_2)} q_0 + \frac{(a - a_0)(a - a_2)}{(a_1 - a_0)(a_1 - a_2)} q_1 + \frac{(a - a_0)(a - a_1)}{(a_2 - a_0)(a_2 - a_1)} q_2 \quad (26)$$

elde edilir. LI katsayıları cinsinden yazacak olursak,

$$q(a) = LI_0(a)q_0 + LI_1(a)q_1 + LI_2(a)q_2 \quad (27)$$

LI bağıntısını genelleştirecek olursak;

Tablo 3. Testlerden elde edilen veriler.

Table 3. The data obtained from the tests.

n	Değişken Tork-Sabit Hız				Değişken Hız-Sabit Tork			
	Yük Tork	Ref. Hız	Elde Hız	Hız Hatası	Ref. Hız	Yük Tork	Elde Hız	Hız Hatası
0	0	30	30.00	0.00	20	2	16.17	3.83
1	1	30	28.61	1.39	30	2	27.06	2.94
2	2	30	27.06	2.94	40	2	37.43	2.57
3	3	30	25.31	4.69	50	2	47.61	2.39
4	4	30	23.35	6.65	60	2	57.72	2.28
5	5	30	21.13	8.87	70	2	67.78	2.22

$$q(a) = \sum_{i=0}^n LI_i(a) \cdot q(a_i) \quad (28)$$

LI, Tablo 2' ye bakılarak basitçe hesaplanabilir. Burada verilen değerler deneyler ya da sayısal hesaplar sonucu bulunmaktadır.

Tablo 2. LI için basit hesap tablosu.

Table 2. A simple spreadsheet for LI.

n	a	q(a)
0	a_0	$q_0(a_0)$
1	a_1	$q_1(a_1)$
2	a_2	$q_2(a_2)$
3	a_3	$q_3(a_3)$

2.3 Değiştirilebilir frekanslı sürücü modeli

Bir IM'nin senkron hızının frekansa bağlı olduğu bilinmektedir. Bu anlamda DFS ile Darbe Genişlik Modülasyonunun (Pulse Width Modulation-PWM) frekansı değiştirilerek IM hızı kontrol edilecektir. Hız [63];

$$w_r = \frac{120f}{p} \quad (29)$$

Benzetimde kullanılan üç fazlı voltaj kaynağının matematiksel modeli denklem 30'da verilmiştir. Denklemde bulunan w_r değeri denklem 29'dan alınmaktadır. Hesaplanan f değeri denklem 29'un değerini değiştirmektedir. Böylece istenen hız değeri elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} v_a &= v_m \cos w_r t \\ v_b &= v_m \cos(w_r t + \theta) \\ v_c &= v_m \cos(w_r t - \theta) \end{aligned} \quad (30)$$

3 Benzetimden elde edilen test verileri

Bu çalışmada iki farklı benzetim testi uygulanmıştır. Birinci testte Değişken Tork-Sabit Hız, ikinci testte Değişken Hız-Sabit Tork uygulamasıdır. Bu uygulamalar DFS'den elde edilen verilerdir. Testlerde yapılan hız hataları verilmektedir. Önerilen yöntemler belirlenen hız hatalarını tekrar sistem girişine uygulayarak olması gereken hızı belirlemektedir. Veriler Tablo 3'te toplu olarak gösterilmiştir.

Bu verilere göre; değişken tork-sabit hız ileri yön sonlu farklar ve değişken hız-sabit tork ileri yön sonlu farklar tabloları sırasıyla Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Değişken tork-sabit hız değerleri.

Table 4. Variable torque-constant speed values.

n	Yük Tork	Hız	Hız + Hata	\hat{q}_0	\hat{q}_0^2	\hat{q}_0^3	\hat{q}_0^4	\hat{q}_0^5
0	0	30	30.0000	1.3900	0.1600	0.0400	-0.0300	0.0700
1	1	30	31.3900	1.5500	0.2000	0.0100	0.0400	0
2	2	30	32.9400	1.7500	0.2100	0.0500	0	0
3	3	30	34.6900	1.9600	0.2600	0	0	0
4	4	30	36.6500	2.2200	0	0	0	0
5	5	30	38.8700	0	0	0	0	0

Tablo 5. Değişken hız-sabit tork değerleri.

Table 5. Variable speed-constant torque values.

n	Ref. Hız	Yük Tork	Hız+ Hata	\hat{q}_0	\hat{q}_0^2	\hat{q}_0^3	\hat{q}_0^4	\hat{q}_0^5
0	20	2	23.8300	-0.8900	0.5200	-0.3300	0.2100	-0.1100
1	30	2	32.9400	-0.3700	0.1900	-0.1200	0.1000	0
2	40	2	42.5700	-0.1800	0.0700	-0.0200	0	0
3	50	2	52.3900	-0.1100	0.0500	0	0	0
4	60	2	62.2800	-0.0600	0	0	0	0
5	70	2	72.2200	0	0	0	0	0

Tablo 3, 4 ve 5'te kullanılan parametrelerin birimleri için Tork (Nm), Hız (rad/s)'dir. Bu tablolardan elde edilen yeni hız değeri için gerekli frekans hesaplanarak sürücünün frekans değeri değiştirilir. Böylece motor hangi yük torkunda veya hangi hızda çalıştırılmak istenirse istensin, önerilen teknikler bu frekansı hesaplayarak sürücüye uygular. İstenen hız elde edilmiş olur. Teorem 1 ve 2'nin ispatı da Tablo 4 ve 5 ayrı ayrı kullanılarak yapılmış olur.

4 Benzetim çalışma sonuçları ve tartışma

Önerilen her iki yöntem için; bilinen değerlerden – bilinen değerlere ulaşma ve bilinen değerlerden-bilinmeyen değerlere ulaşma testleri yapılmış elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.

4.1.1 Değişken tork - sabit hız sonuçları

Şekil 2'de bilinen değerlere (yani benzetimde uygulanan test verilerine) ulaşma test sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara bakıldığında 1, 2, 3 ve 4 Nm yük torku için önerilen her iki tekniğin benzer sonuçlar ürettiği görülmektedir. DFS-SC beklenen hızın gerisinde bir sonuç üretmiştir. Şekil 3'te bilinmeyen değerlere (yani benzetim testlerinde olmayan verilere) ulaşma test sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara bakıldığında 1, 2, 3 ve 4 Nm yük torku için önerilen her iki tekniğin benzer sonuçlar ürettiği görülmektedir. DFS-SC beklenen hızın gerisinde bir sonuç üretmiştir. Değişken tork-sabit hız testlerinden elde edilen veriler Tablo 6'da toplu olarak verilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 4(a) hız grafikleri incelendiğinde; $4.5 \leq \text{Yük_Tork} \leq 5$ aralığında GNI tekniğinin hata yaptığı görülmektedir. Burada 5 Nm yük torkunun verilen aralıkta doğru sonuç bulabilmesi için test değerleri çalışmasına 6 Nm yük torku verileri eklenmelidir. Dolayısıyla ileri yön sonlu farklar tablosu ve GNI hesaplaması değişecektir. Ancak bu durumda doğru hesaplama gerçekleşecektir. Belirtilen aralık için bir veriye daha ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Verilen aralık için doğru hız cevabı sadece 5 Nm'de elde edilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde GNI tekniğinin ihmal edilecek düzeyde de olsa hata yaptığı, LI tekniğinin ise hatasız sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Tablo 6. 30 rad/s hızda elde edilen veriler.

Table 6. Data obtained at 30 rad / s speed.

Yük_Tork	Elde_DFS_Hız	Elde_GNI_Hız	Elde_LI_Hız
1	29.30	30.00	30.00
1.7	28.74	29.99	30.00
2	28.49	30.00	30.00
2.5	28.03	30.02	30.00
3	27.54	30.00	30.00
3.3	27.22	30.02	30.00
4	26.40	30.00	30.00
4.7	25.46	30.83	30.00

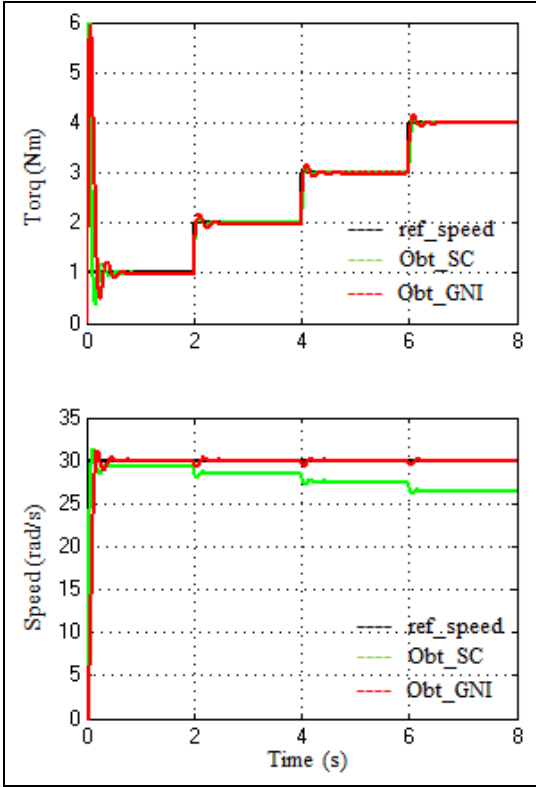
4.1.2 Değişken hız-sabit tork sonuçları

Şekil 4'te bilinen değerlere ulaşma test sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara bakıldığında 30, 40, 50 ve 60 rad/s hızlar için önerilen her iki tekniğin benzer sonuçlar ürettiği görülmektedir. DFS-SC beklenen hızın gerisinde bir sonuç üretmiştir. Şekil 5'te bilinmeyen değerlere ulaşma test sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara bakıldığında 25, 43, 57 ve 65 rad/s hızlar için önerilen her iki tekniğin benzer sonuçlar ürettiği görülmektedir. DFS-SC beklenen hızın gerisinde bir sonuç üretmiştir. Değişken hız-sabit tork testlerinden elde edilen veriler Tablo 7'de toplu olarak verilmiştir.

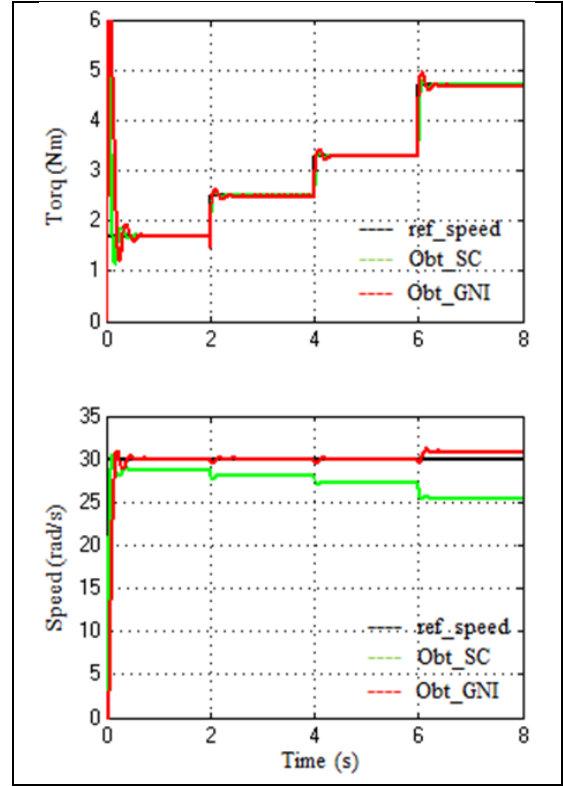
Tablo 7. 2 Nm yük torkunda elde edilen veriler.

Table 7. Data obtained at 2 Nm load torque.

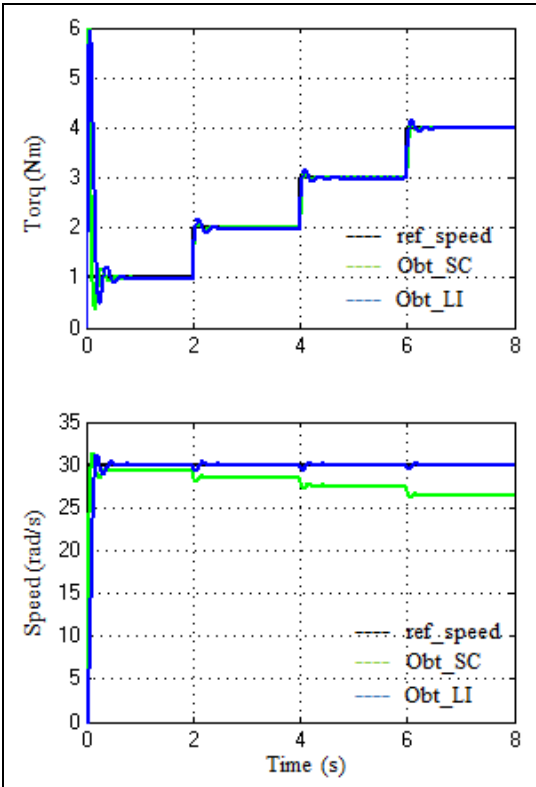
Yük_Tork	Elde_DFS_Hız	Elde_GNI_Hız	Elde_LI_Hız
25	23.28	24.12	25.00
30	28.49	29.42	30.00
40	38.70	39.70	40.00
43	41.73	42.75	43.00
50	48.80	49.83	50.00
57	55.84	56.88	57.00
60	58.86	59.90	60.00
65	63.87	64.88	65.00



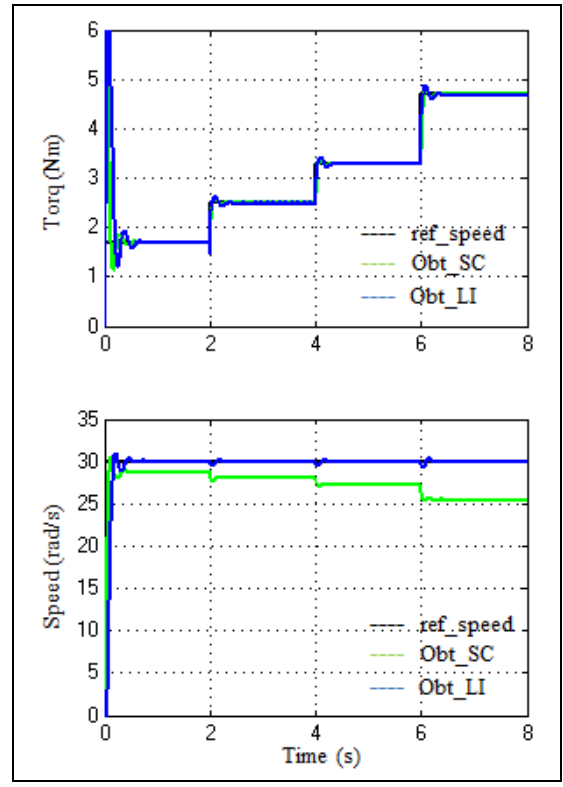
(a)



(a)



(b)



(b)

Şekil 2. 1, 2, 3 ve 4 Nm için sabit hız değerleri. (a): GNI, (b): LI.

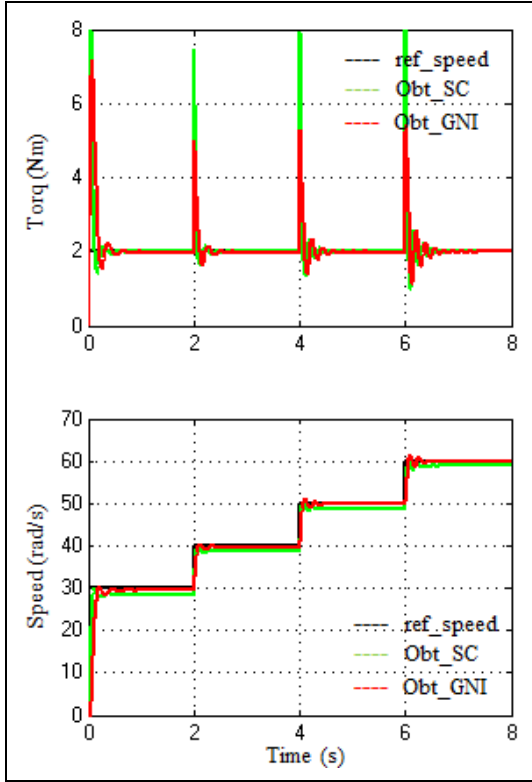
Figure 2. Constant speed values for 1, 2, 3 and 4 Nm. (a): GNI, (b): LI.

Şekil 3. 1.7, 2.5, 3.3 ve 4.7 Nm için sabit hız değerleri.

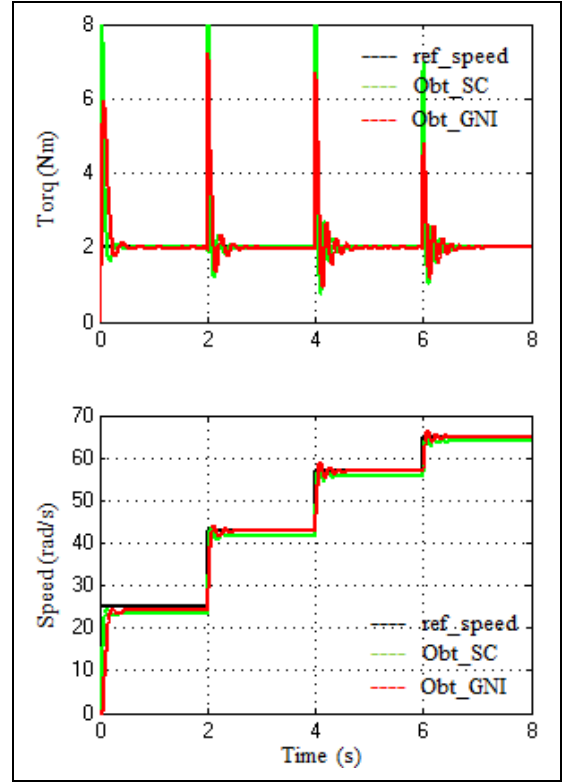
(a): GNI, (b): LI.

Figure 3. Constant speed values for 1.7, 2.5, 3.3 and 4.7 Nm.

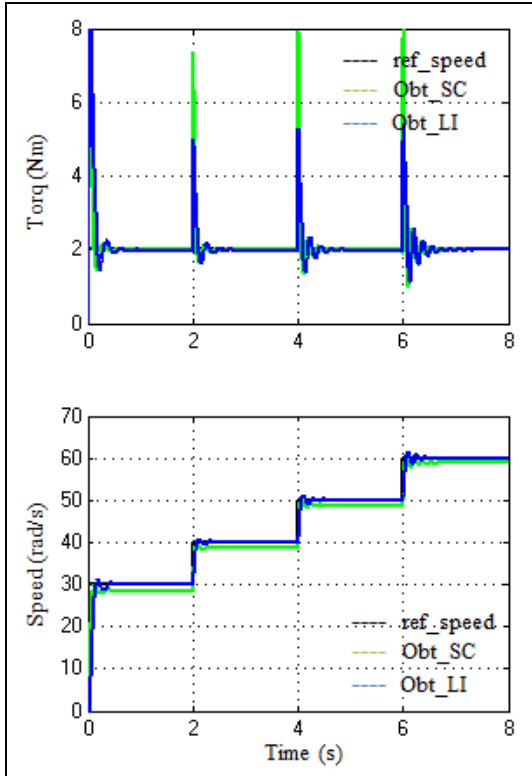
(a): GNI, (b): LI.



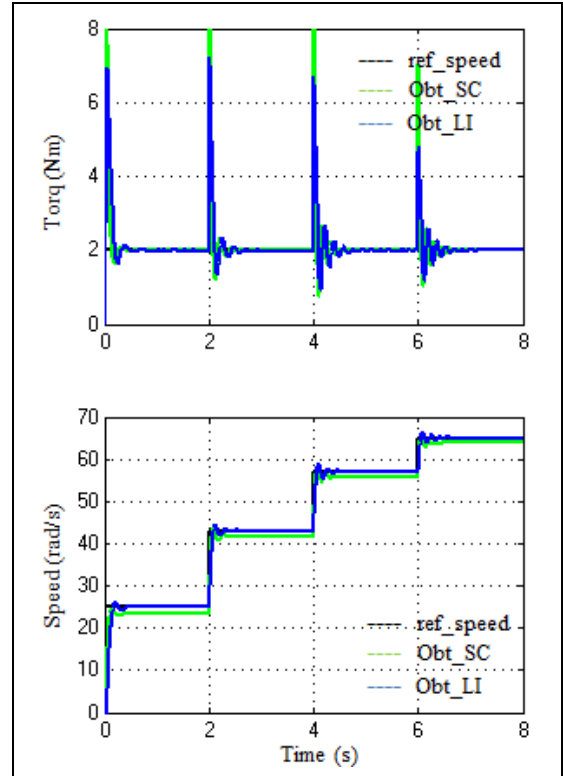
(a)



(a)



(b)



(b)

Şekil 4. 30, 40, 50 ve 60 rad/s için sabit tork değerleri.
 (a): GNI, (b): LI.

Şekil 5. 25, 43, 57 ve 65 rad/s için sabit tork değerleri.
 (a): GNI, (b): LI.

Figure 4. Constant torque values for 30, 40, 50 and 60 rad / s.
 (a): GNI, (b): LI.

Figure 5. Constant torque values for 25, 43, 57 and 65 rad / s.
 (a): GNI, (b): LI.

Önerilen GNI ve LI tekniklerinin çalışma zamanı Tablo 8'de verilmiştir. Buradaki veriler Matlab/Simulink "Run and Time" sekmesinden elde edilmiştir.

Tablo 8. Çalışma-zamanı verileri.

Table 8. Run-time data.

Önerilen Teknikler	Bilinen Değer Zamanı			
	30 rad/s 1 Nm	30 rad/s 2 Nm	30 rad/s 3 Nm	30 rad/s 4 Nm
GNI	0.044	0.041	0.042	0.041
LI	0.003	0.003	0.003	0.003

Önerilen Teknikler	Bilinmeyen Değer Zamanı			
	30 rad/s 1.4 Nm	30 rad/s 2.7 Nm	30 rad/s 3.2 Nm	30 rad/s 2 Nm
GNI	0.065	0.041	0.042	0.048
LI	0.003	0.003	0.003	0.003

Bu veriler girilen değerlerin hesaplanıp sistem girişine uygulanma zamanını göstermektedir. Birimi saniye (s) olarak verilmiştir. Tablo 8'deki verilere bakıldığında; GNI tekniğinin çalışma zamanı 0.041-0.065 s arasında, LI tekniğinin çalışma zamanı 0.003 s olarak gerçekleştiği görülmektedir.

4.1.3 Önerilen tekniklerin PI denetleyici ile performansı

Çalışmanın sonunda PI denetleyici ile performans durumu incelenmiştir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6 ve Tablo 9'da verilmiştir.

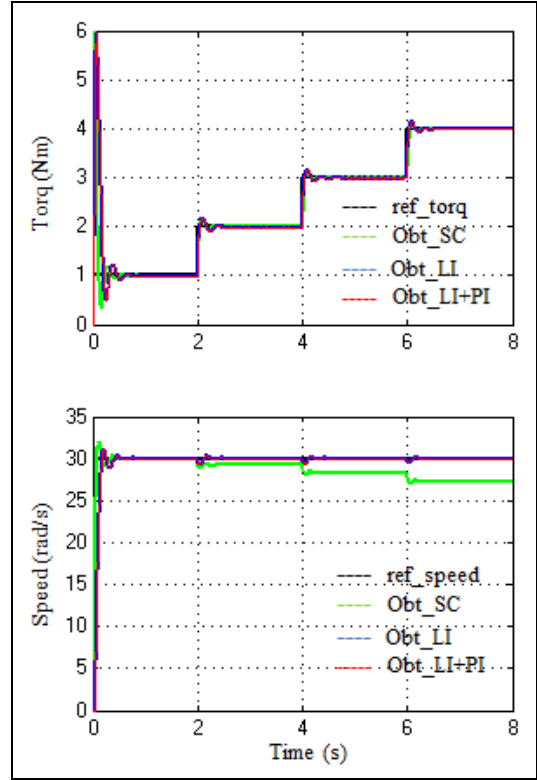
Tablo 9. PI denetleyici ile hız denetim verileri.

Table 9. Speed control data with PI controller.

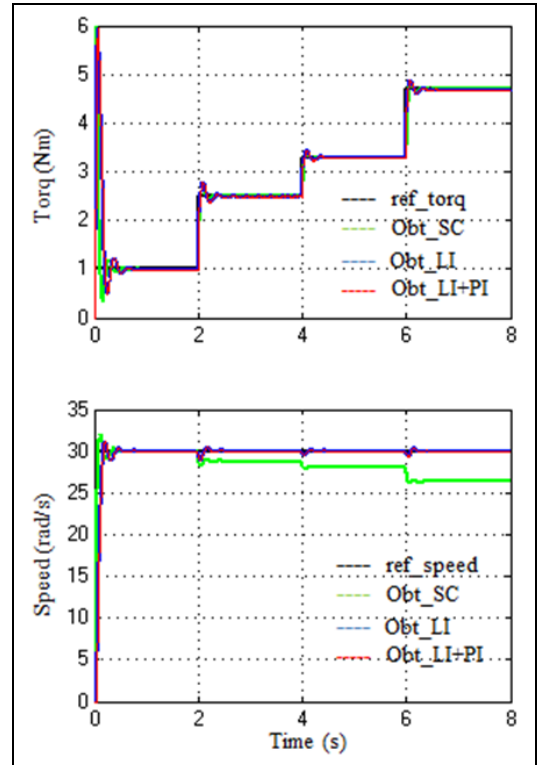
Hız	Yük_Tork	DFS	PI+DFS	LI+DFS	LI+PI+DFS
30 rad/s	1	29.30	30.00	30.00	30.00
	2	28.49	29.22	30.00	30.00
	2.5	28.03	28.78	30.00	30.00
	3	27.54	28.30	30.00	30.00
	3.3	27.22	28.00	30.00	30.00
	4	26.40	27.22	29.99	29.99
	4.7	25.46	26.33	29.99	29.99

Bu sonuçlara bakıldığında 1 Nm yük torku için PI denetleyici ile DFS pozitif sonuç üretmiştir. İstenen hız değeri elde edilmiştir. DFS ile PI+DFS arasındaki diğer sonuçlar literatürü doğrulamaktadır. Yük torku değiştiğinde PI denetleyicinin katsayıları değişmelidir. LI+DFS ve LI+PI+DFS sonuçları incelendiğinde benzer sonuçlar ürettiği, örtüştüğü görülmektedir. PI denetleyicinin burada bir katkısı görülmemektedir. LI+DFS, PI+DFS'nin yerini almış ve PI+DFS'den daha iyi sonuçlar üretmiştir. Ancak PI+LI+DFS biçiminde bir sürücü modeli test edildiğinde Şekil 7'deki grafikler elde edilmiştir.

Tork ve Hız grafikleri incelendiğinde, motorun yük torku değişimlerine PI+LI+DFS sürücü modeli daha kısa sürede cevap verdiği anlaşılmaktadır. Yük torku değişse bile PI denetleyicinin katsayı değişimine ihtiyaç kalmadığı görülmektedir.



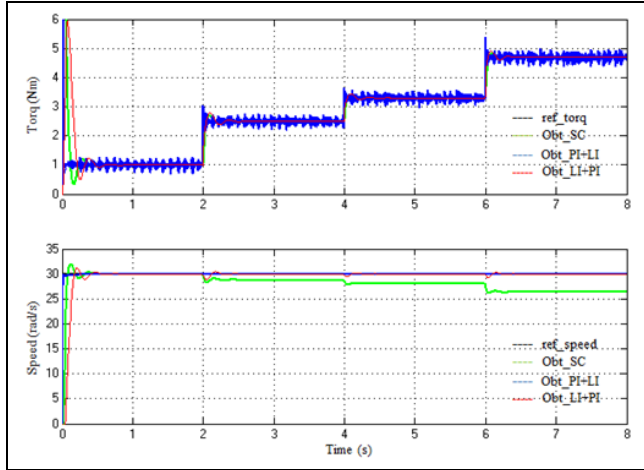
(a)



(b)

Şekil 6. Önerilen LI ve PI denetim grafikleri. (a): 1, 2, 3 ve 4 Nm, 30 rad/s, (b): 1, 2.5, 3.3 ve 4.7 Nm, 30 rad/s.

Figure 6. Recommended LI and PI control charts. (a): 1, 2, 3 and 4 Nm, 30 rad/s, (b): 1, 2.5, 3.3 and 4.7 Nm, 30 rad/s.



Şekil 7. PI+LI+DFS sürücü modeli grafikleri.

Figure 7. PI + LI + DFS drive model graphics.

5 Sonuçlar

Farklı interpolasyon teknikleri kullanarak IMS denetiminin gerçekleştirildiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Önerilen GNI+DFS ve LI+DFS teknikleri sürücünün performansını arttırmıştır. Bu anlamda DFS'den daha başarılı sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır (Tablo 6 ve 7),
- Önerilen teknikler kendi aralarında değerlendirildiğinde LI tekniğinin yük torku değişimlerine daha kısa sürede cevap verdiği görülmüştür (Tablo 8),
- Deneysel sonuçlarla elde edilen veriler (Tablo 3) dışındaki değerlerle yapılan testlerde LI tekniğinin daha başarılı olduğu görülmüştür (Tablo 6 ve 7),
- Performans açısından değerlendirildiğinde GNI, değişken yük - sabit tork testinde beklenen sonuçlara kabul edilebilir hata ile ulaşmıştır (Tablo 7),
- PI denetleyicisi ile birlikte yapılan performans testlerinde PI+LI+DFS modelinin en başarılı sonuçları ürettiği görülmüştür. Bu şekilde bir model ile PI denetleyici katsayılarının değişimine gerek kalmadığı anlaşılmaktadır (Tablo 9, Şekil 7),
- Farklı sayısal çözüm yöntemleri denetleyici olarak kullanılabilir. Farklı çözüm yolları üretilebilir.

Sayısal çözüm yöntemlerinden biri olan interpolasyon teknikleri doğrudan bir denetleyicinin denetiminde kullanılmış ve sonuçların ileride yapılacak çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Bu alandaki çalışmalar düşünüldüğünde daha pek çok çalışmanın yapılabileceği anlaşılmaktadır.

6 Simgeler

- Ψ : d - q ekseninde stator (s) ve rotor (r) akısı,
 v : d - q ekseninde stator (s) ve rotor (r) gerilimi,
 i : d - q ekseninde stator (s) ve rotor (r) akımı,
 w_r : Rotor hızı (elde edilen hız),
 R_{s-r} : Stator (s) ve rotor (r) direnci,
 L_{s-r} : Stator (s) ve rotor (r) indüktansı,
 L_m : Karşılıklı indüktans,
 p : Kutup sayısı,
 T_l : Yük torku,
 j : Atalet katsayısı
 f : Frekans.

7 Kaynaklar

- [1] Trzynadlowski AM. *Control of Induction Motors*. 1st ed. London, UK, Academic Press, 2001.
- [2] Krishnan R. *Electric Motor Drives-Modeling Analysis and Control*. 1st ed. NJ, USA, Prentice-Hall, 2001.
- [3] Patel, S. *Speed Control of Three-Phase Induction Motor Using Variable Frequency Drive*, 1st ed. Long Beach. California State University, 2018.
- [4] Kesler, S. "Performance analysis of different PWM techniques on V/f-based speed control with adjustable boost voltage application for induction motors". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(5), 797-808, 2018.
- [5] Bakshi UA, Bakshi VU. *Electrical Technology*. 1st ed. Pune, Technical Publications, 2009.
- [6] Saghaflinia A, Wooi H, Ping H, Rahman MA. "High performance induction motor drive using hybrid fuzzy-pi and pi controllers: A review". *International Review of Electrical Engineering*, 5(5), 2000-2012, 2010.
- [7] Bose BK. *Power Electronics and AC Drives*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986.
- [8] Halim A, Rizal MF. *Single Inverted Pendulum with Novel Hardware*. Doctoral Dissertation, Murdoch University, Perth, Australia 2018.
- [9] Boussak M, Jarray K. "A high-performance sensorless indirect stator flux orientation control of induction motor drive". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 41-49, 2006.
- [10] Zhang G. "Speed control of two-inertia system by PI/PID control". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(3), 603-609, 2000.
- [11] Jain JK, Ghosh S, Maity S, Dworak P. "PI controller design for indirect vector controlled induction motor: A decoupling approach". *ISA Transactions*, 70, 378-388, 2017.
- [12] Åström KJ, Tore H. "The future of PID control". *Control Engineering Practice*, 9(11), 1163-1175, 2001.
- [13] Tang KS, Man KF, Chen G, Kwong S. "An optimal fuzzy PID controller". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4), 757-765, 2001.
- [14] Ammar HH, Azar AT, Tembi TD, Tony K. "Design and implementation of fuzzy PID controller into multi agent smart library system prototype". *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*, Cairo, Egypt, 22-24 February 2018.
- [15] Bermudez M, Gonzalez-Prieto I, Barrero F, Guzman H, Duran MJ, Kestelyn X. "Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 902-911, 2017.
- [16] Odhano S, Bojoi R, Formentini A, Zanchetta P, Tenconi A. "Direct flux and current vector control for induction motor drives using model predictive control theory". *IET Electric Power Applications*, 11(8), 1483-1491, 2017.
- [17] Wang K, Robert LD, Noor AB. "Improvement of back-EMF self-sensing for induction machines when using deadbeat-direct torque and flux control". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 4569-4578, 2017.
- [18] Zhang Y, Zhonggang Y, Guoyin L, Jing L, Xiangqian T. "A novel speed estimation method of induction motors using real-time adaptive extended Kalman filter". *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(1), 287-297, 2018.

- [19] Xin Z, Zhao R, Blaabjerg F, Zhang L, Loh PC. "An improved flux observer for field-oriented control of induction motors based on dual second-order generalized integrator frequency-locked loop". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(1), 513-525, 2017.
- [20] Ehsani M, et al. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. 3rd ed UK, CRC Press, 2018.
- [21] Zhou Z, et al. "Neural network-based discrete-time command filtered adaptive position tracking control for induction motors via backstepping". *Neurocomputing*, 260, 203-210, 2017.
- [22] Wang N, Haisheng Y, Xudond L. "DTC of induction motor based on adaptive sliding mode control". *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, Shenyang, China, 9-11 June 2018.
- [23] Lftisi F, Rahman MA. "A novel finite element controller map for intelligent control of induction motors". *Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2017 8th IEEE Annual, Vancouver, BC, Canada, 3-5 October 2017.
- [24] Nozaki Y, Takafumi K, Eisuke M. "Analysis of linear induction motors for HSST and linear metro using finite difference method". *IEEE Conference on Linear Drivers and Industry Applications*, Kobe, Hyogo, Japan, 25-28 September 2005.
- [25] Zhao J, Bose BK. "Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive". *28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain, 5-8 November 2002.
- [26] Rashed M, Peter M, Stronach MA. "Nonlinear adaptive state-feedback speed control of a voltage-fed induction motor with varying parameters". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(3), 723-732, 2006.
- [27] Paice DA. "Induction motor speed control by stator voltage control". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 2, 585-590, 1968.
- [28] Feng Y, Zhou M, Han F, Yu X. "Speed control of induction motor servo drives using terminal sliding-mode controller". *Advances in Variable Structure Systems and Sliding Mode Control-Theory and Applications*, 115, 341-356, 2017.
- [29] Guo Y, Wang X, Guo Y, Deng W. "Speed-sensorless direct torque control scheme for matrix converter driven induction motor". *The Journal of Engineering*, 13, 432-437, 2018.
- [30] Lin FJ, Shen PH, Hsu SP. "Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor drive". *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 49(3), 184-194, 202.
- [31] Kubota H, Kouki M, Takayoshi N. "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(2), 344-348, 1993.
- [32] Holtz J. "Sensorless control of induction motor drives". *Proceedings of the IEEE*, 90(8), 1359-1394, 2002.
- [33] Li J, Hai-Peng R, Yan-Ru Z. "Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1), 712-720, 2015.
- [34] Irmak E, Vadi S. "Asenkron motorlarda frekans değişimi ile hız kontrolü deneyinin bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmesi". *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(1), 57-62, 2011.
- [35] Otkun Ö, Doğan RÖ, Akpınar AS. "Neural network based scalar speed control of linear permanent magnet synchronous motor". *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 30(3), 395-404, 2015.
- [36] Kumar R, Das S, Syam P, Chattopadhyay AK. "Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives". *IET Electric Power Applications*, 9(7), 496-511, 2015.
- [37] Rao GM, Srikanth G. "Comparative study of maximum torque control by pi ann of induction motor". *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(7), 4620-4625, 2018.
- [38] Sapkota K, Pradhan A, Singh AK, Rai P. "Speed control of single phase induction motor using fuzzy logic controller". *Advances in Communication, Devices and Networking*, 462, 719-727, 2018.
- [39] Sharma K, Anubhav A, Shuvabrata B. "Fuzzy logic controlled variable frequency drives". *Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms*, Singapore, Springer, 1, 1153-1164, 2019.
- [40] Orłowska-Kowalska T, Dybkowski M, Szabat K. "Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), 553-564, 2010.
- [41] Hui L, Yunfei L, Xin D, Huajug Z. "Optimization of adaptation gains of full-order flux observer in sensorless induction motor drives using genetic algorithm". *Information Technology Journal*, 8(4), 577-582, 2009.
- [42] Kesler S, Akpınar AS, Saygin A. "Bilezikli asenkron makinelerde anlık yüksek moment ve hız denetimi için rotor devresine bulanık mantık tabanlı güç enjeksiyonu". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 15(1), 13-23, 2009.
- [43] Stoer J, Roland B. *Introduction to Numerical Analysis*. 1nd ed. USA, Springer Science & Business Media, 2013.
- [44] Atkinson KE. *An Introduction to Numerical Analysis*. 2nd ed. USA, John Wiley & Sons, 2008.
- [45] Greenspan D. *Numerical Analysis*. 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2018.
- [46] Lyshevski SE. *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*, 1nd ed. London, England, CRC Press, 2018.
- [47] Kobayashi H, Seo Y, Ogawa K, Horikawa K, Tanigaki K. "Numerical analysis and experiment for stress wave propagation in two connected cylindrical bodies with different cross-sectional area and same mechanical impedance". *European Physical Journal Web of Conferences*, Arcachon, France, 9-14 September 2018.
- [48] İzol R, Gürel MA, Pekgökgöz RK, Avcil F. "Dikdörtgen payandalı yüksek yığma duvarların düzlem dışı deprem dayanımlarının yaklaşık hesabı". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18(2), 1007-1024, 2018.
- [49] Ekşim A, Yetik H. "Audio quality enhancement for ETSI TS 102 361 digital mobile radio standard compliant radios using volume optimization and better forward error correction scheme". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 641-648, 2018.
- [50] Bianco V, Scarpa F, Tagliafico LA. "Numerical analysis of the Al2O3-water nanofluid forced laminar convection in an asymmetric heated channel for application in flat plate PV/T collector". *Renewable Energy*, 116, 9-21, 2018.

- [51] Hu D, Xu W, Dian R, Liu Y, Zhu J. "Loss minimization control of linear induction motor drive for linear metros". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), 6870-6880, 2018.
- [52] Zhou Y, Li H, Liu R, Mao J. "Continuous voltage vector model-free predictive current control of surface mounted permanent magnet synchronous motor". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1(1), 899-908, 2018.
- [53] Le Flohic J, et al. "Model-based method for feed drive tuning applied to serial machine tool". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1-4), 735-745, 2018.
- [54] Moons C, Moor BD. "Parameter identification of induction motor drives". *Automatica*, 31(8), 1137-1147, 1995.
- [55] Cirrincione M, Pucci M, Cirrincione G, Capolino GA. "An adaptive speed observer based on a new total least-squares neuron for induction machine drives". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(1), 89-104, 2006.
- [56] Li Y, Lin H, Huang H, Chen C, Yang H. "Analysis and performance evaluation of an efficient power-fed permanent magnet adjustable speed drive". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 784-794, 2018.
- [57] Torkaman H, Ebrahim A, Mohammad ST. "New double-layer-per-phase isolated switched reluctance motor: concept, numerical analysis, and experimental confirmation". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 830-838, 2012.
- [58] Pervin S, Siri Z, Uddin MN. "Newton-Raphson based computation of id in the field weakening region of IPM motor incorporating the stator resistance to improve the performance". *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 6, 1-6, 2012.
- [59] Merabet A, Ouhrouche M, Bui RT. "Neural generalized predictive control with reference control model for an induction motor drive". *Control & Intelligent Systems*, 36, 144-152, 2008.
- [60] Xinghe F, Zou J. "Numerical analysis on the magnetic field of hybrid exciting synchronous generator". *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 4590-4593, 2009.
- [61] Wang H, et al. "Improved deadbeat predictive current control strategy for permanent magnet motor drives". *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, 21-23 June 2011.
- [62] Abu-Rub H, Iqbal A, Guzinski J. *High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models*. United Kingdom, Wiley, 2012.
- [63] Enemuoh FO, Okafor EE, Onuegbu JC, Agu VN. "Modelling, simulation and performance analysis of a variable frequency drive in speed control of induction motor". *International Journal of Engineering Inventions*, 3(5), 36-41, 2103.