

## FIRÇASIZ DA MOTORUN KONTROLÜNDE PWM VE HİSTERİSİZ BANT TEKNİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yasin BEKTAŞ \*, N. Füsün OYMAN SERTELLER \*\*

### Özet

Fırçasız DA Motorlar (FSDAM) güç elektroniği ve kontrol teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak yüksek performanslı kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik olarak anahtarlanan bu motorlarda, salınım olmadan konum denetiminin yapılması arzu edilen bir durumdur. FSDAM kontrol yöntemlerinin asıl amacı motorun verimli bir şekilde kontrol edilmesidir. Bunu gerçekleştirmek için farklı kontrol çalışmaları mevcuttur (Juan W. Dixon and Ivan Leal, 2002). Bu çalışmada, PWM kontrol yöntemi ile Histerisiz Bant Kontrolünün, moment, hız ve pozisyon kontrolü yönünden karşılaştırılması **Matlab®/Simulink®** programı ile bilgisayar ortamında yapılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** *FDAM, FSDA motor kontrol yöntemleri, PWM, Değişken DC-Hat gerilim kontrolünü.*

## A COMPARISON OF PWM AND HYSTERESIS BAND METHOD FOR CONTROLLING BRUSHLESS DC MOTORS

### Abstract

Brushless DC Motors (BLDCs) are widely used at high-performance control systems depending on developments in power electronics and control technology. These motors are electronically switched that makes position control oscillation free and it is a desirable situation. The main aim of BLDC control methods is built on controlling the motor effectively. To accomplish this, there are different available work structures. In this study, PWM control method of hysteresis band control, torque control, speed control aspects comparison has been done with Matlab ® / Simulink ® software environment. Observation shows that the controller which has been designed in this study has less oscillation and a fast dynamic response.

**Key words:** BLDC, BLDC motor control methods, PWM, variable DC-line voltage control.

### 1.GİRİŞ

Fırçasız D.A motorları üzerine yapılan çalışmalar, genellikle motorda kullanılan mıknatıslar ve motorun kontrolünün nasıl yapılabileceği üzerinde yoğunlaşmıştır.

1983' de Demerdash iki farklı malzeme (Samaryum-Kobalt ve Ferrit) kullanarak aynı güçlü iki fırçasız DA motor gerçekleştirmiştir. 1985' de Ilzuka evirici devresindeki güç yarıiletkenlerini bir bilgisayar ile tetikleyerek geri besleme kullanmadan fırçasız DA motorunun hız kontrolünü yapmıştır (Ilzuka 1985). Pillay akımı ve zıt EMK' sı sinusoidal olan motorları sürekli mıknatıslı senkron motor, akımı dikdörtgen ve zıt EMK' sı yamuk biçimli

\* Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 34722 Ziverbey/İstanbul. E-posta: [yasibektas528@hotmail.com](mailto:yasibektas528@hotmail.com)

\*\* Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 34722 Ziverbey/İstanbul. E-posta: [fserteller@marmara.edu.tr](mailto:fserteller@marmara.edu.tr)

olan motorları da fırçasız DA motor olarak adlandırmıştır. Pillay sürekli mıknatıslı senkron motoru iki fazda modellerken, fırçasız DA motorlarını da üç fazda modellemiştir(Pillay 1989). Low sinusoidal akım kontrolüne alternatif olarak fırçasız DA motor kontrolünde moment kontrol yöntemini kullanmıştır. Low, moment kontrol yöntemini pozisyon kontrolünde ve hız kontrolünde uygulamıştır. Low, pozisyon kontrolünde değişken yapı yaklaşım yöntemini kullanmış ve hız kontrolünde da PI kullanmıştır(Low 1992). FDAM'unun akım kontrolü için çok çeşitli yöntemler vardır. Bunlar sağladıkları avantajların yanında birçok dezavantaja sahiptir. En temel dezavantajı sürekli durumda oluşturduğu yüksek frekanslı gürültüdür. Bu gürültü anahtarlama frekansına bağlıdır(Chen ve Tang, 1999).

Lee ve Ehsani (2003), tarafından yapılan çalışmada, fırçasız DC motor sürücülerin ileri simülasyon modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, PWM inverter elemanlarının akım ve gerilimleri gibi, hız ve momentin dinamik karakteristikleri etkili olarak gözlenebilmekte ve analiz edilmektedir. Bu yüzden, geliştirilen simülasyon modelinin fırçasız DC motor kontrol algoritmalarının geliştirilmesine kolaylık sağlayacağı ve hesaplama zamanı ile hafıza boyutlarını azaltacağı belirtilmektedir. Xi Xiao ve Yongdong Li, FSDA motorun düşük moment salınımları için yeni bir kontrol stratejisi geliştirmiştir. Önerilen metodun geçerliliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için bir simülasyon çalışması yapılmıştır(2005). Cunshan Zhang ve Dunxin Bian Fırçasız DC motorlarda stator manyetik alanının oluşturduğu moment salınımlarının ortadan kaldırmak için yeni bir PWM kontrol algoritması sunmuştur(2008). Lineer bir FSDA motoru için yeni bir PID denetleyicinin tasarımını yaparak ant colony algoritması geliştirmiştir (2009 N. Navidi M. Bavafa ).

Fırçasız Doğru Akım (DA) motorları, yüksek verim, yüksek kalkınma momenti ve sessiz çalışma gibi özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Fırçasız DA motorların çalıştırılabilmesi için, bir kontrol sistemine ve rotor pozisyonunu belirleyen sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişen teknolojiyle sensörsüz kontrol edilebilen sistemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada sistemin sensör veya sensörsüz olmasından ziyade farklı iki kontrol yöntemi arasında karşılaştırması yapılmıştır.

Çalışmanın sonucunda, fırçasız DA motorların PWM kontrolü ve Histerisiz Bant Kontrolünü pratik olarak gerçekleştirilmiştir.

Fırçasız doğru akım motoru (FSDAM), komitasyon işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren DA motorlarda, rotordaki sarımlara elektrik iletimi fırça-kolektör yapısı ile sağlanır. Dilimli bir yapıda olan kollektör düzeneği sayesinde, rotor sarımlarından geçen akımın yönü motor dönerken kendiliğinden değişir. Bu sistemin kıvılcım oluşturma, bakım gerektirme ve fırçalarda aşınma gibi problemleri vardır(Juan W. Dixon and Ivan Leal, Mart 2002).

Fırçasız doğru akım motorlarında fırça-kolektör düzeneğinin görevini elektronik bir denetleyici (kontrolör) üstlenir. Denetleyicide, yüksek akımı anahtarlama görevini yürüten yarıiletken devre elemanları ve anahtarlama ile ilgili zamanlamayı sağlayan mikro denetleyici bulunur. Motorun dönüşünde aksama olmaması için denetleyicinin uygun bir hızda rotoru takip etmesi gerekir. Bu işlem, rotor pozisyonunun bilinmesini gerektirir. Çoğu uygulamada Hall etkili sensörleri kullanılarak rotor pozisyonu kolayca tespit edilir.

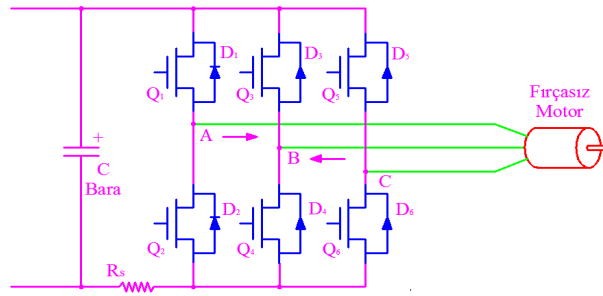
## 2.FSDAM Kontrol Yöntemleri

FSDA motorun üç farklı kontrol yönteminden sadece ikisi **Matlab®/Simulink®** ile PC test edilir. Kontrol edilen değişkenler, hız ve konum, dönme momentidir. Biz sadece moment kontrol ve hız kontrol yönünden karşılaştırma yapacağız.

Fırçasız DC Motorun kontrol yöntemlerinden en çok kullanılanlarından bazıları aşağıdaki gibidir.

- ✓ Histerisiz Bant Kontrol
- ✓ PWM Kontrol
- ✓ Değişken DC-Hat Gerilim Kontrolü

Bu çalışmada yalnızca ilk ikisi arasında karşılaştırma yapılacaktır.



Şekil 2.1: Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücü Devresi

## 3.Histerisiz Bant Kontrol

Histerisiz bant kontrolü en basit kapalı-döngü kontrol düzeneğinden biridir. Histerezis bant kontrolünde değişken kontrolünün değeri belirli bir sınırlar (Histerezis bant) içerisinde kalmaya zorlanır. Bir örnekle motor hız kontrolünde, eğer hız referans hız üzerinde belli bir seviyeye ulaştığında motor durur hız referans hız altında belirli bir düzeyin altına düşerse ters döner (2004,Daniel Hansson). Histerezis bant kontrol tekniğinin dezavantajı yüksek ve kontrolsüz anahtarlama frekansında dar bir histerezis bant ve büyük dalgalarda geniş histerezis bant kullanılır(April 2005, K.S. Low M.F. Rahman ve K.W. Lim. ). Belirsiz anahtarlama frekansı akustik ve elektromanyetik gürültüsünü filtrelemek yapmak zordur(Texas Instruments Incorporated, 1997).

Burada kullanılan anahtarlama yöntemi yumuşak kıyıcı yöntemdir, sadece alttaki anahtar açıkken üsteki anahtar kapalıdır. Bu yöntem sert kıyıcı yönteminden daha az moment dalgalanma ve daha az anahtarlama kayıp üretmektedir. Burada sadece moment kontrolü ve hız kontrolü yapılır. Nedeni eğer pozisyon kontrolü varsa aynı şekilde moment ve pozisyon kontrolü yapmak sadece rotor hızını sürekli ters çevirerek mümkün olacaktır böylece rotor açısı histerezis bant içinde kalacaktır. Hem mekanik parçalarda hem de elektronik cihazlarda yüksek zorlama yapacağından bu pratik bir çözüm değildir(K.S. Low M.F. Rahman and K.W. Lim, 2007).

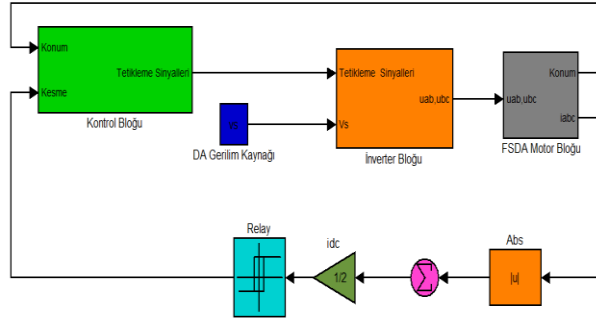
### 3.1 Moment Kontrol

Bu kontrol düzeneğinde aşağıda sunulduğu gibi yalnızca bir akım denetleyicisi kullanılır. Önerilen ve sunulan bu strateji basittir ve DA-hat akımın zor algılamasını önler(Juan W.

Dixon ve Ivan Leal, Mart 2002). DA-hat akımı için eşdeğer sinyal iki faz akımının ölçümünden sentez yapılır. Bu yöntemin geçerliliği için gerekli koşul faz akımlarının toplamının sıfır olmasıdır. Üç fazlı yıldız bağlı motorun nötr noktası topraklanmıştır. DA-hat akımı referans değeri moment referansından ilişki kurularak türetilmiştir.

$$I_{ref} = \frac{T_{ref}}{k_t}$$

Histerisiz bant kontrolü şekil 3.1 de gösterildiği gibi bir geçiş bloğu ile uygulamak kolaydır. Histerisiz bandın alt ve üst limitler referans akım artı ve eksidedir. Akım üst sınıra ulaştığında röle bloğu çıkışı inverter için sinyalleri kesmeyi sağlayan kontrol bloğuna yüksek bir sinyal üretir. Akım alt sınıra ulaştığında röle bloğu çıkışı inverter için sinyalleri kesmeyi sağlayan kontrol bloğunu durduran düşük bir sinyali üretir.

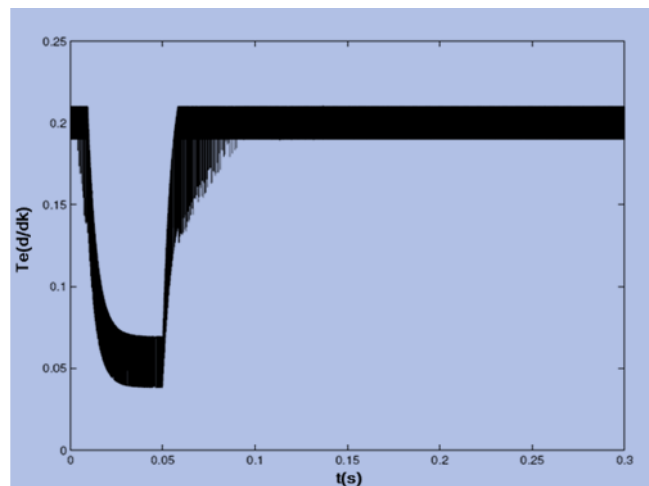


Şekil 3.1: Histerisiz moment kontrol sistemi

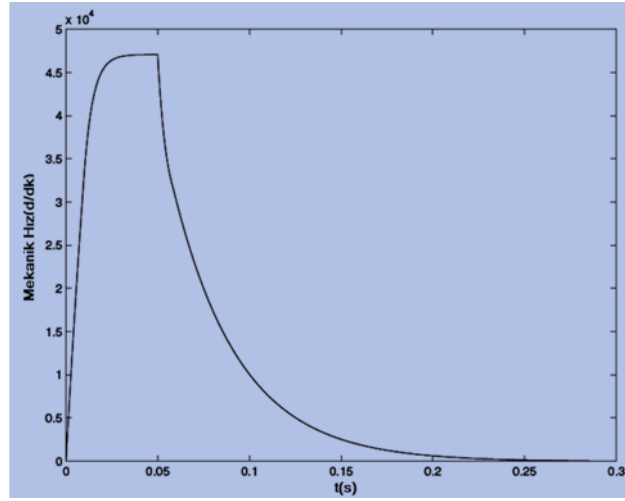
Şekil 3.2 Elektriksel moment referans değeri 0,2 mNm olduğunda ve yük momenti referans değerinde 0.05s uygulandığını gösterir. Moment kontrolsüz, elektrik moment 0,5 mNm den başlayacaktır ama histerisiz bandın üst sınırı üzerine çıkmaz.

Burada histerisiz bant genişliği referans değerinin % 10'dur. Yük momenti uygulandığında elektriksel moment aynı kalır bu neden ile hız Şekil 3.3 gösterildiği gibi sıfıra düşer. Bu durumda komitasyon dalgacıklarında artık bir sorun vardır. Bu kontrol stratejisi tarafından üretilen dalgacıklar özellikle histerisiz bant genişliğinde çok daha büyük bir etkisi vardır.

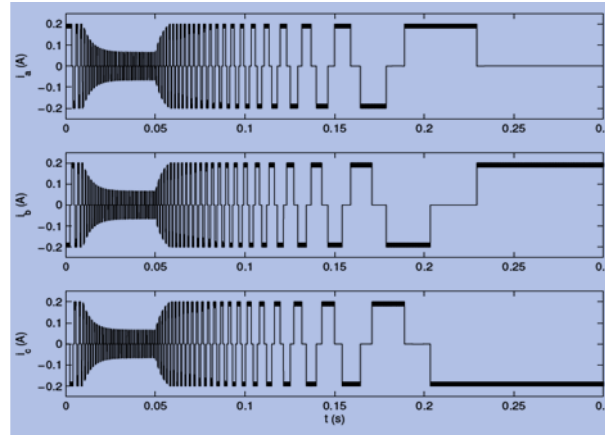
Şekil 3.4 Faz akımlarını gösterir.



Şekil 3.2: Histerisiz Moment Kontrolde Yük Adımına Göre Elektriksel Moment



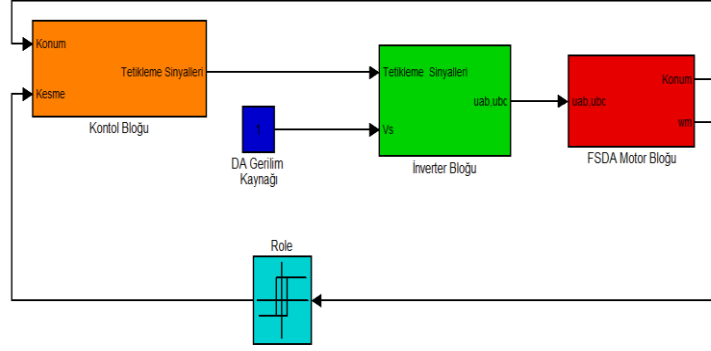
Şekil 3.3: Histerisiz Moment Kontrolde Yük Adımına Göre Rotor Hızı



Şekil 3.4: Histerisiz Moment Kontrolde Yük Adımına Göre Faz Akımları

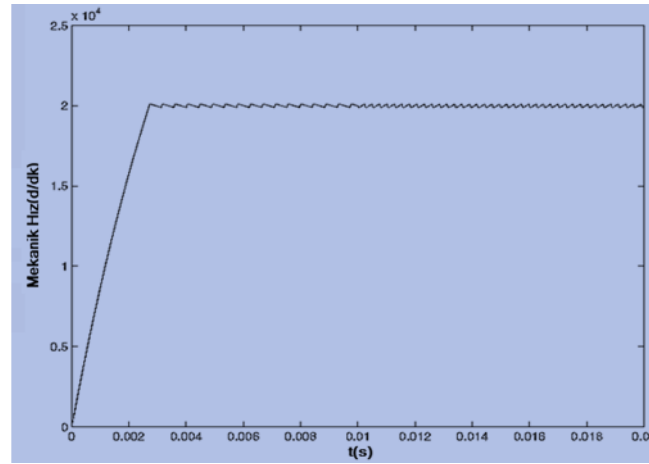
### 3.2 Hız Kontrol

Şekil 3,5 Histerisiz hız kontrol ile FSDA motoru gösterir. Moment kontrol prensip şeması önceki bölümde açıklanan şemaya benzer. Burada röle bloğu rotor hızı geçişi için beslenir. Bu durumda röle bloğunun alt ve üst limitleri referans hız değeri artı ve eksi histerisiz bant genişliğinin yarısıdır. Şimdi histerisiz bant genişliği referans hızın % 1'dir. Konum sinyali rotor hızını hesaplamak için kullanılabilir ama rotor hızı ve sonra pozisyon sinyali hesaplamak için pozisyon sinyalinden hızını hesaplamak gereksiz bir hesaplama olacaktır. Hız ve pozisyon kontrolü uygulandığında yüksek çözünürlüklü konum sensörleri kullanılır.

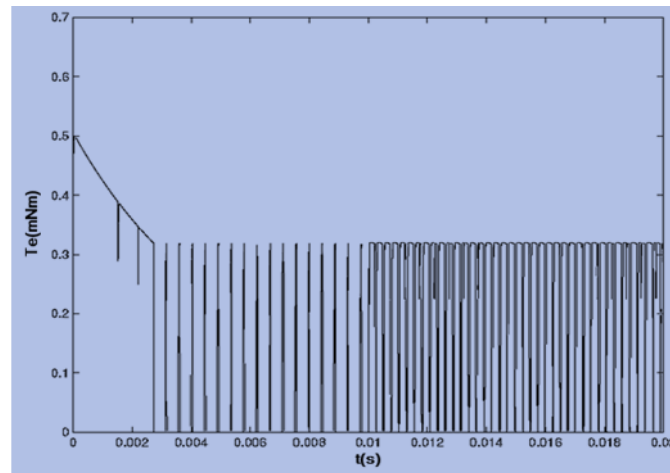


Şekil 3.5: Histerezis Hız kontrol

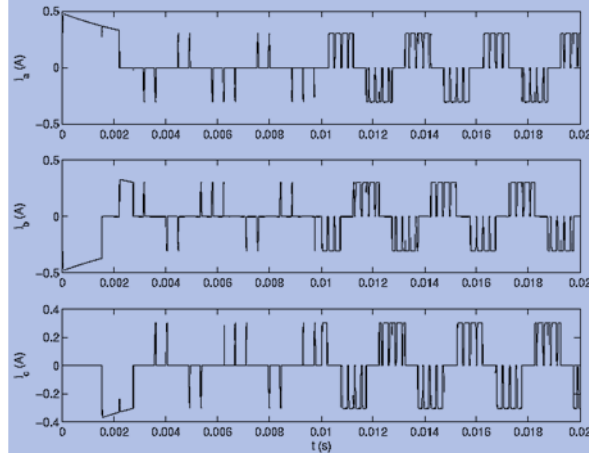
Şekil 3.6 0.01sn yük momenti uygulandığında rotor hızını gösterir. Referans hızı 20.000 d/d'dir ve yükün büyüklüğü maksimumdur sürekli yüke (0,23 mNm) izin verilir. Şekilde görüldüğü gibi hız dalgalanmasının frekansı yük adımından sonra artar. Bu frekans değişikliği ilerideki sayfalarda araştırılacaktır. Ancak hız, referans değeri etrafında histerezis bant içinde kalır. Şekil 3.7 Elektriksel momenti gösterir. Moment dalgalanmaları güçlüdür ve kısa bir süre için tamamıyla moment sıfıra gider. Elektriksel moment orantılıdır ve aynı frekans içeriğine sahiptir. Şekil 3.8 Faz akımlarını gösterir.



Şekil 3.6: Histerezis Moment Kontrolde Yük Adımına Göre Rotor Hızı



Şekil 3.7: Histerezis Moment Kontrolde Yük Adımına Göre Elektriksel Moment



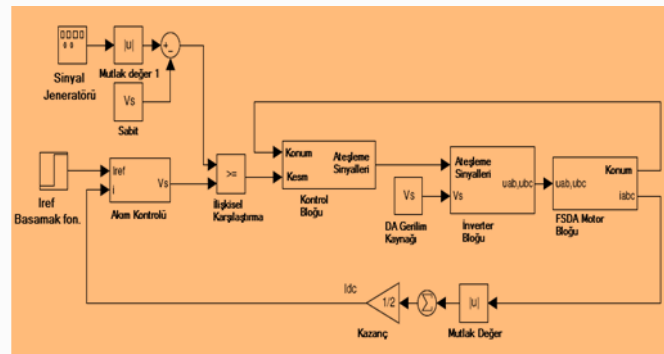
Şekil 3,8: Histerisiz Moment Kontrolde Yük Adımına Faz Akımları

#### 4. PWM Kontrol

PWM kontrolünde motor, ara sıra yüksek bir oranda döner. Kıyıcı frekansı sabittir ama görev döngüsü kontrol hata uzunluğuna bağlıdır. Aslında frekans sabittir akustik ve elektromanyetik gürültü daha kolay filtreleme yapılır. Anahtarlama frekansı genellikle 20-50 kHz dir ve burada başlangıçta motorları oldukça yüksek hızda çalıştırabiliriz, frekansı 50 kHz olarak seçilmiştir(Y. BEKAŞ, 2010 Yüksek Lisans Tez).

##### IV.1 Moment Kontrol

Akım kontrol stratejisi histerisiz bant kontrolünde kısaca açıklanmıştır(Juan W. Dixon ve Ivan Leal, Mart 2002). Burada aynı akım algılama yöntemi kullanılır yani tek akım denetleyicisi kullanılır. Şekil 3.9 Kontrol sistemini gösterir. Faz akımları DA-hat akımı eşdeğeri dönüştürülür. Bu değer bant kontrolünde olduğu gibi moment referansından hesaplanan bir referans değerinden çıkarılır. Hata akımı akım denetleyicisinden beslenir ve denetleyicinin çıkışı üçgen dağla şekli ile karşılaştırılır.



Şekil 3.9: PWM Moment Kontrol Sistemi

Akım denetleyicisi PI denetleyicisidir ve tasarımı bir DA motor için sunulan bir akım denetleyicisine dayanmaktadır(Lennart Harnfors,2002). Akım için bir  $t_{re}$  yükselme zamanı seçerek tasarım çalıştırılır.  $\alpha_e$  sabit olarak belirlenir.

$$\alpha_{elk} = \frac{\ln 9}{t_{re}}$$

Kontrol parametreleri aşağıdaki gibidir,

$$k_p = \alpha_e \cdot L$$

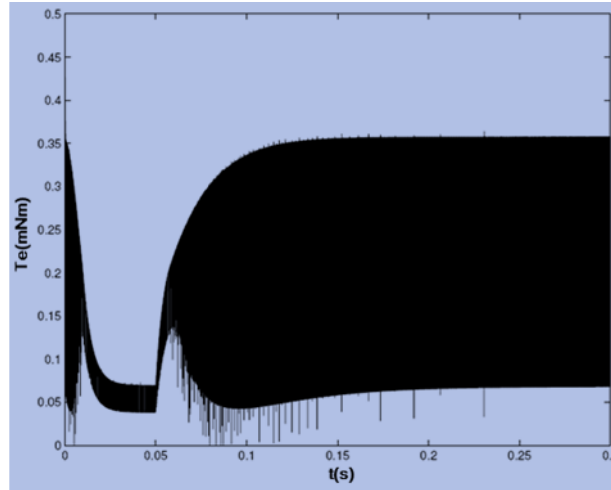
$$k_i = \alpha_e \cdot R$$

Seçilen 0,1 ms artış süresi de kazançlar,

$$k_p = 2.00.10^3$$

$$k_i = 2.75.10^5$$

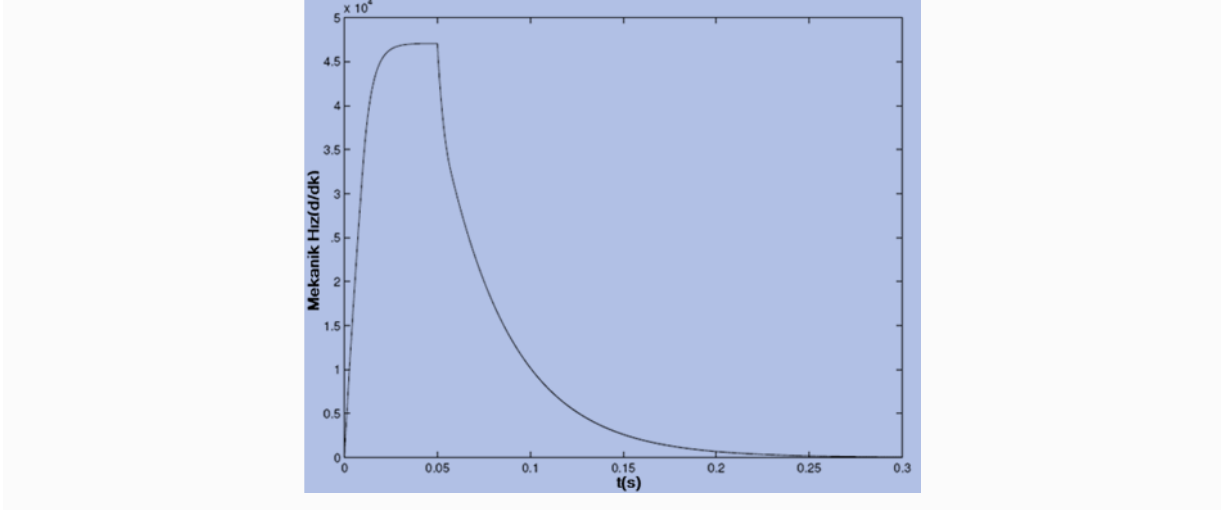
Ayrıca denetleyici inverteri korumak için geri hesaplama kullanılır(2002,Lennart Harnfors). Blok gerilim doyması  $\pm 6V$  talep edildi. Şekil 3.10 Elektriksel momenti gösterir. Referans moment ve yük adımı hala 0,2 mim'dir ama moment dalgalanması histerezis kontrolünkinden daha büyüktür. Bunun nedeni, elektrik dinamiklerin çok hızlı anahtarlama frekansı ile karşılaştırılmasıdır.



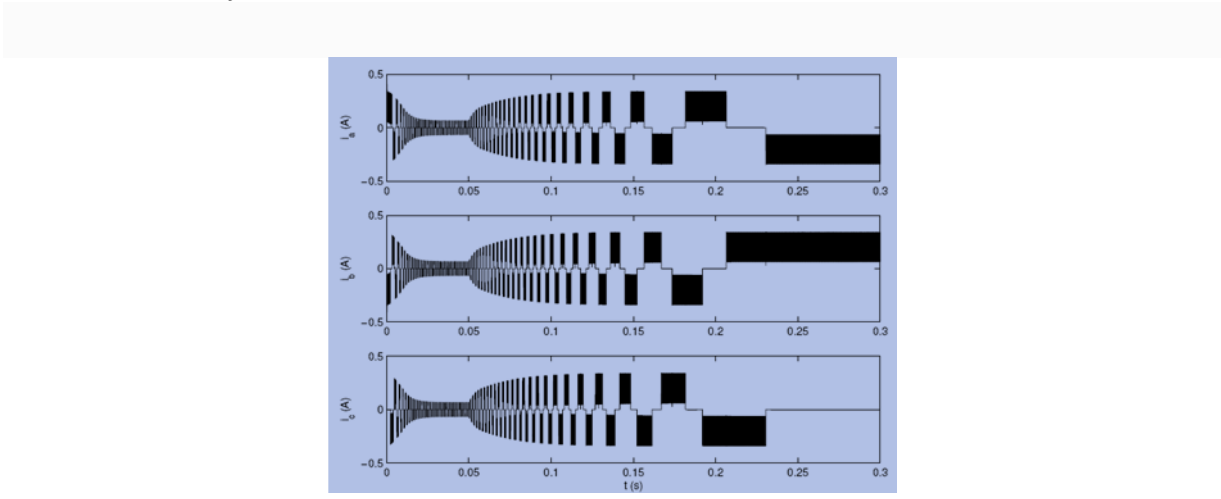
Şekil 3.10: PWM Kontrolünde Yük Adımına Göre Elektriksel Moment

Şekiller karşılaştırarak faz akımları görülebilir. Kırıyıcı çentikleri PWM düzeninde çok derin. Daha yüksek anahtarlama frekansı dolayısıyla mevcut yumuşak moment daha az varyasyon üretecektir. Rotor hızı şekil 3.11 de gösterilir.





Şekil 3.11: PWM Kontrolünde Yük Adımına Göre Rotor Hızı



Şekil 3.12: PWM Kontrolünde Yük Adımına Göre Faz Akımları

#### 4.2 Hız Kontrol

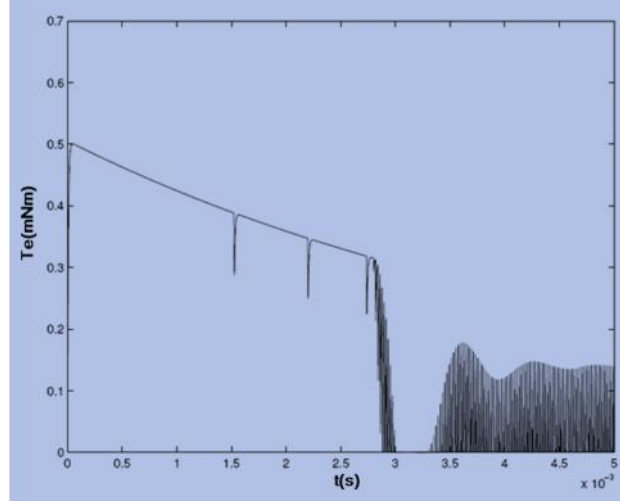
PWM hız kontrol sistemi şekil 3.13 de gösterilir. Rotor hızı şekil 3.14 gösterilir ve histerisiz kontrol düzeneğinde hız olarak aynı eğri izler. Aynı akım denetleyici gibidir ama bir PI hız denetleyicisi eklenir. Hız kontrol parametreleri akım denetleyicisi parametreleri için de benzer bir mantık kullanılarak türetilmiştir(K.S. Low M.F. Rahman ve K.W. Lim,2007). Parametreler,

$$k_p = \alpha_\omega \cdot J$$

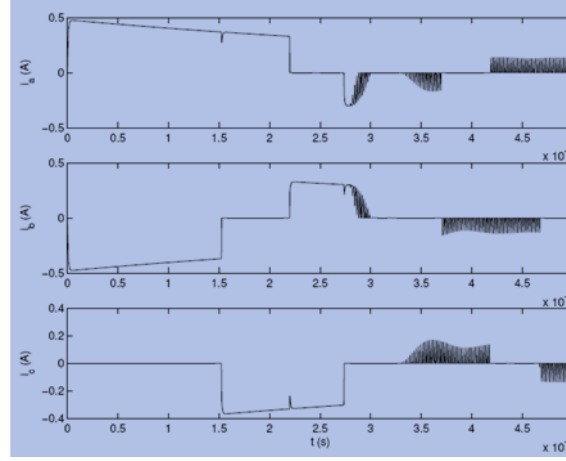
$$k_i = \alpha_\omega \cdot k_f$$

Olarak hesaplanır ve istenen hız artış zamanı  $\alpha_\omega$ 'e bağlıdır. Burada  $\alpha_\omega$  üç değeri denenecek. İlk değeri hızlı akım kontrolü olarak hız kontrolü yapar, ikincisi yüz kere yavaşlatır son değerle on kat yavaşlatır(Y. BEKAŞ, 2010 Yüksek Lisans Tez).





Şekil 3.15: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Elektriksel Momenti ( $\alpha_\omega = \alpha_e$ )



Şekil 3.16: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Faz Akımları ( $\alpha_\omega = \alpha_e$ )

$$k_p = 1.10.10^{-7}$$

$$k_i = 3.03.10^{-6}$$

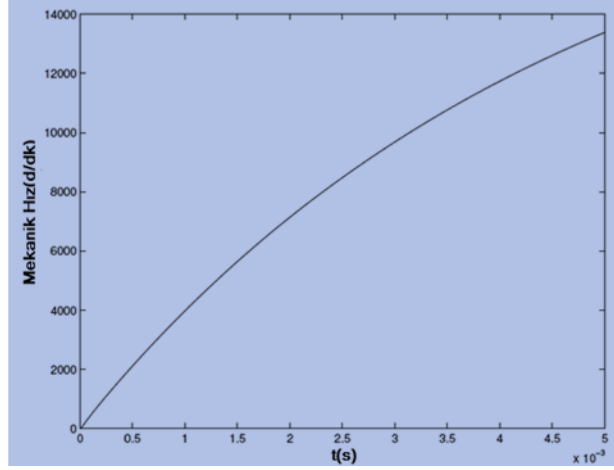
Burada hiçbir aşma yoktur ama kararlı durum hatası kalır. Hız artışını yavaşlatmak amacı ile şekil 3.18 ve 3.19 da gösterildiği gibi PWM işlemi sağ baştan başlar.  $\alpha_\omega = \alpha_e$  Çok hızlı ve  $\alpha_\omega = 0.01\alpha_e$  yavaş, bu yüzden  $\alpha_\omega = 0.1\alpha_e$  uzlaşma bir değer olarak kullanılır. Çıkan kontrol parametreleri;

$$k_p = 1.10.10^{-6}$$

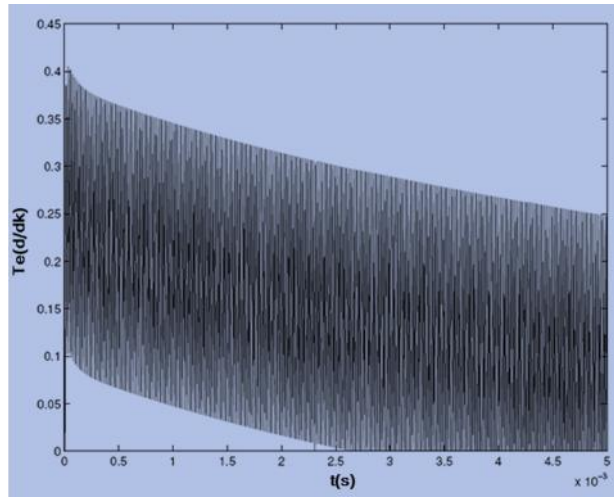
$$k_i = 3.03.10^{-6}$$

Şekil 3.20 Bu parametrelerin daha iyi sonuç verdiğini gösterir. Hiçbir aşma yok gibi görünüyor ama küçük bir kararlı durum hatası vardır. Daha uzun bir simülasyon zamanı kullanma küçük bir aşım olduğunu ortaya çıkarır ve kararlı durum hatası şekil 3.20 de görünenden daha küçük olur. Şekil 3.21 ve 3.22 sırasıyla elektriksel moment ve faz akımlarını gösterir.

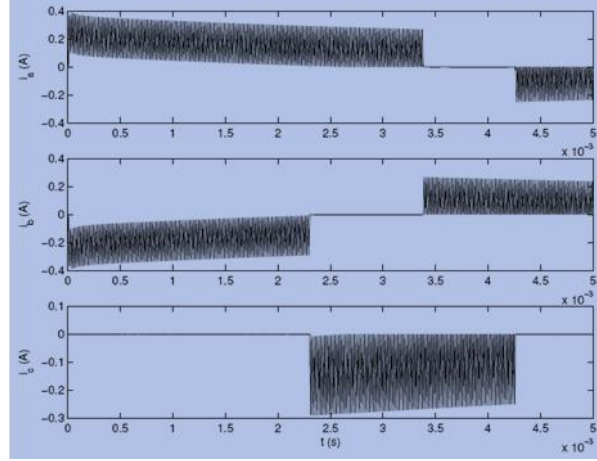
Şekil 3.23 Bu motora uygulanabilecek maksimum sürekli yükü 0,23 mNm den büyük bir yük adımına sistemin nasıl bir tepkisi olacağını gösterir. Hız düşmesi önemlidir.



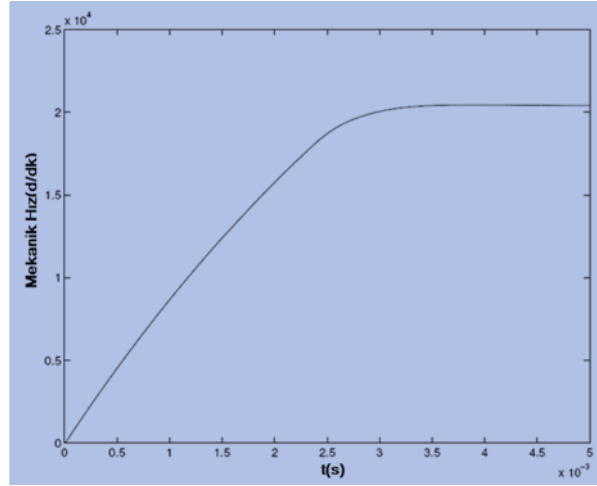
Şekil 3.17: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Rotor Hızı  
( $\alpha_o = 0.01\alpha_e$ )



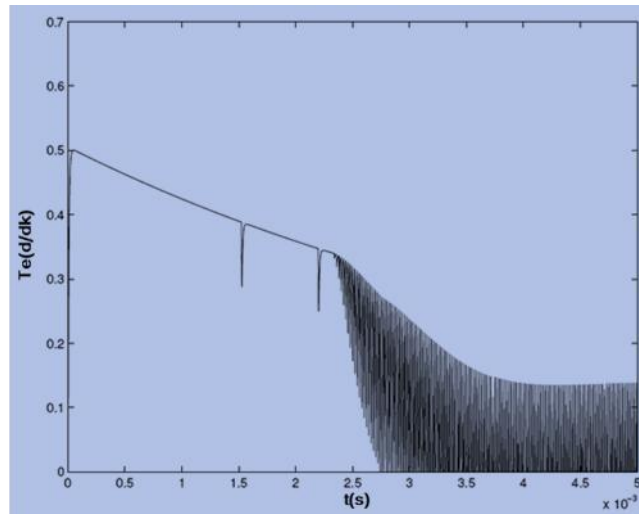
Şekil 3.18: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Elektriksel Moment ( $\alpha_o = 0.01\alpha_e$ )



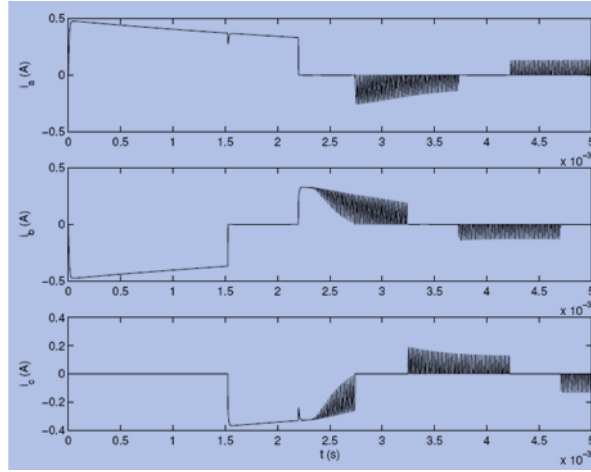
Şekil 3.19: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Faz Akımları ( $\alpha_\omega = 0.01\alpha_e$ )



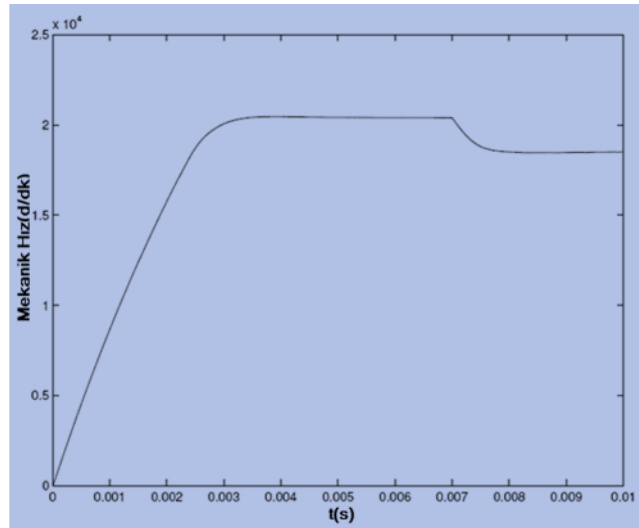
Şekil 3.20: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Rotor Hızı ( $\alpha_\omega = 0.1\alpha_e$ )



Şekil 3.21: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Elektriksel Moment ( $\alpha_\omega = 0.1\alpha_e$ )



Şekil 3.22: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Faz Akımları ( $\alpha_\omega = 0.1\alpha_e$ )



Şekil 3.23: PWM Hız Kontrolde Yüksüz Durumda Rotor Hızı ( $\alpha_\omega = 0.1\alpha_e$ )

## 5.Sonuçlar

Bu makalede üç fazlı yıldız bağlı fırçasız motorun Matlab ® / Simulink ® modeli Moment, hız ve pozisyon kontrolü histerezis bant kontrol, PWM kontrol kullanılarak uygulanmıştır. Sonuç olarak kontrol yöntemlerinin iyi performanslı, ancak her birinin dezavantajları olduğu görülmüştür. Histerezis bant tekniğinin kontrolsüz anahtarlama frekansı pek çok durumda kabul edilemez olabilir, histerezis bant çok dar ise anahtar kayıp bir sorun olabilir. Frekans bölgesi analizi DA hat akımının uygulanan yüksek yüke bağlı olduğunu göstermiştir. Bu flitlemeyi zorlaştırırsa da küçük yük değişmelerinin olduğu uygulamalarda histerisiz bant tekniğinin uygun bir teknik olabileceği görülmektedir.

PWM kontrolü çok iyi performanslı ve bundan ötürü bant kontrolünden daha iyi bir alternatif olacak bir tekniktir. Ancak bazı kararlı hal durum hız kontrol hataları vardır, bunlar araştırılmalıdır.

Anahtarlama frekansı 50kHz oldukça yüksek kullanılmıştır. Motor çok yüksek hızda çalıştırabilindiğinden yüksek frekans seçildi. Yüksek frekans aşırı anahtarlama kaybı gibi kayıplara neden olabilir ama Kayıpların büyüklüğü burada araştırılmadı.

Komitasyon gecikmesi mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır çünkü gecikme fırçasız motorda istenmeyen moment dalgalanmalarını artırır-

### **Kaynaklar**

K.S. Low M.F. Rahman and K.W. Lim. Approaches to the control of torque and current in a brushless dc drive. March-April 2005

Texas Instruments Incorporated. DSP Solutions for BLDC Motors, 1997.

Juan W. Dixon and Ivan Leal. Current control strategy for brushless dc motors based on a common dc signal. IEEE Transactions on Power Electronics, 17(2), March 2002.

Lennart Harnfors. Control of Variable-Speed Drives. Malardalen University, 2002.

Fırçasız DC Motoru ve Sürücü Devresi Eğitim Seti Analizi ve Geliştirilmesi Motorun Bilgisayar Ortamında İncelenmesi, Yasin Bektaş, 2010 Yüksek Lisans Tez.

K.S. Low M.F. Rahman and K.W. Lim. Approaches to the control of torque and current in a brushless dc drive.2007

Daniel Hansson. Study and test of a BLDC motor drive systems function and operation for a pump application. Master's thesis, Institutionen for Elteknik, Chalmers Tekniska Hogskola, 2004.