

Design of Luenberg State Observer Based Resolver to Digital Converter in Permanent Magnet Synchronous Motors for Position Accuracy

 Yunis TORUN^{1,*}  Ahmet AKSÖZ² 
¹Sivas Cumhuriyet University, Electrical and Electronics Engineering Department, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet University, Department of Energy Science and Technology, Merkez/SİVAS

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 19/07/2019

Revision: 25/12/2019

Accepted: 07/06/2020

Highlights

 Luenberger durum
 gözlemcisi,
 Pozisyon doğruluğu,
 RDK,
 Resolver.

Keywords

 Luenberger state observer,
 Position accuracy,
 RDC,
 Resolver.

The Luenberg state observer produces better parameters in steady state. When obtaining higher position accuracy of PMSM, the Luenberg state observer (LSO) based RDC has been compared with the classic RDC under nominal load at the constant reference speed. Firstly, the mathematical model of PMSM and the theoretical control algorithm of two RDC cases have been given. Thus, the position error and the related speed error values can be found for PMSM. Where used resolver has 7.07 V (rms) and a 400Hz. A simulation model has been implemented to achieve absolute position and maximum accuracy or minimum electrical error. Luenberg state observer based RDC and classical RDC performance results have been compared to show whether LSO using is required or not.

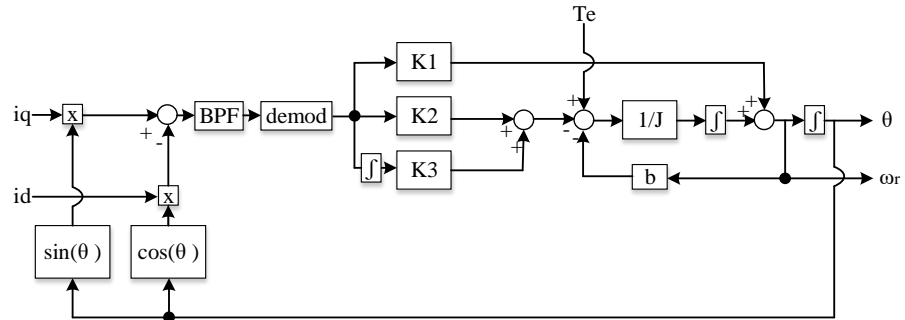


Figure A Luenberg state observer based RDC block diagram

Purpose: Resolver sensor is a sensor that provides precise results used in electrical machines, especially for position measurement. Although these sensitive results are sufficient in many applications, it is a need to increase the sensitivity result in high accuracy works such as military applications. This sensitivity requirement can be achieved during the design of the resolver sensor or with an observer-based control system using resolver to digital converter (RDC) data.

Theory and Methods: For an observer design, the system model can be used with the resolver sensor input and output information. Because the observer is a mathematical structure and can be used to achieve the desired position results by observing. Luenberg state observer can estimate the state variables associated with control variables, system model and measured output data.

Results: Better resolution and electrical precision mean lower error and closer rotor position angle. RDC results with the Luenberg state observer algorithm supply both better resolution and better electrical precision.

Conclusion: In this study, the proposed resolver approaches have been verified in the vector-controlled driver system of PMSM. The resolver sensor can be used to obtain absolute position data from a motor shaft. However, the position error should be within the acceptable range According to results of the energy efficiency and the sensor resolution efficiency. The sine and cosine signal received from the resolver sensor is used to calculate position data. For this purpose, classical RDC and the Luenberg state observer based RDC have been studied as a simulation study. As a result of the study, the Luenberg situation observer based RDC approach, which is named as status 2, has been confirmed by the results obtained that it increased the position accuracy for PMSM at constant speed and constant load. When necessary comparisons are made, 49 arcmin and 21 arcmin position accuracy results are obtained respectively. It can be clearly seen that situation 2 has better position accuracy of about 57%.



Pozisyon Doğruluğu için Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Luenberg Durum Gözlemcisi Tabanlı Resolver Dijital Konverter Tasarımı

Yunis TORUN^{1,*} Ahmet AKSÖZ²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58340, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Enerji Bilimi ve Teknolojisi Bölümü, 58340, Merkez/SİVAS

Öz

Bu çalışmada, geri besleme sinyalleri olarak bir resolver sensörün çıkış sinyalleri kullanılarak bir elektrik motorunun pozisyon kontrolü sunulmuştur. Resolver sensörü, motor rotor açısının konum verisini elde etmek için kullanılır. KMSM (Kalıcı mıknatıslı Senkron Motor)'un enerji verimliliği motor pozisyon hatalarından etkilenir. Çünkü motor pozisyonu hataları enerji kaybına neden olur. Artan pozisyon doğruluğu aynı zamanda enerji verimliliğini de artırır. Resolver sensörü yüksek çözünürlüğe sahiptir, ancak bu doğruluk optimize edilebilir. RDK (resolver dijital konverter) içerisinde bir gözlemci yöntemi kullanılabilir. Özellikle, Luenberg durum gözlemcisi kararlı halde daha iyi parametreler üretir. KMSM'lerde referans hızda nominal yük altında Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK tasarımı klasik RDK ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak, KMSM'un matematiksel modeli kararlı durumda bulunmuştur. Ek olarak, resolver ve RDK teorik olarak açıklanmıştır. Böylece, hata değerleri PMSM için bulunabilir. Ayrıca, RDK içerisinde Luenberg durum gözlemcisi, 7,07 V(rms) ve 400Hz'lik bir resolver için tasarlanmıştır. Mutlak pozisyonu ve maksimum doğruluğu veya minimum elektrik hatasını elde etmek için bir benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Önerilen Luenberg durum gözlemcisi esaslı yöntem modelde uygulanmaktadır. Bu nedenle, Luenberg durum gözlemcisi enerji verimliliğine dayalı RDK performansı, klasik RDC kullanarak tartışılmaktadır.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 19/07/2019
 Düzeltme: 25/12/2019
 Kabul: 07/06/2020

Anahtar Kelimeler

Luenberger durum gözlemcisi, Pozisyon doğruluğu, RDK, Resolver.

Keywords

Luenberger state observer, Position accuracy, RDC, Resolver.

Design of Luenberg State Observer Based Resolver to Digital Converter in Permanent Magnet Synchronous Motors for Position Accuracy

Abstract

In this study, a motor position control is presented using output signals of a resolver sensor as feedback signals. The resolver sensor is used to obtain position data of the rotor angle. Energy efficiency of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) is affected by the motor position errors. Because the motor position errors cause energy losses. Increased position accuracy also increases the energy efficiency. The resolver sensor has high resolution, but this accuracy can be optimized. An observer method may be used in resolver to digital converter. Especially, the Luenberg state observer produces better parameters in steady state. The design of Luenberg state observer based RDC in PMSMs under a nominal load at the reference velocity is compared with the classical RDC. Firstly, the mathematical model of the PMSM is established in steady state. In addition, the resolver and the resolver to digital converter (RDC) are theoretically described. Thus, the error values can be found for PMSM. Also, the Luenberg state observer is designed in resolver to digital converter for 7,07 V(rms) and 400Hz resolver sensor. In order to obtain the absolute position and the maximum accuracy or the minimum electrical error, a simulation model is realized. Proposed Luenberg state observer-based method is applied in the model. Because of the fact that, the Luenberg state observer based RDC performance on the energy efficiency has been discussed using the classical RDC.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Resolver sensörü, özellikle otomotiv endüstrisi, askeri uygulamalar ve makine endüstrisi gibi ciddi uygulamalarda kullanılabilir. Resolver, sıcaklık, korozyon, nem ve çarpmalara karşı oldukça dayanıklıdır [1]. Resolverın tercih edilmesi, zorlu endüstriyel ortam gereksinimlerine uyması nedeniyle artmıştır [2].

Resolver dijital konverter (RDK) in dijital dönüşümleri sayesinde resolver sensörden üretilen çıkış sinyalleri pozisyon verisi üretmede kullanılabilir [3]. Uyarım sinyali, sinüs sinyali ve kosinüs sinyali RDK'da pozisyon tespiti yapmak için kullanılmaktadır [4]. Karşılaşılan pozisyon hatasını azaltmak ya da hassas konum doğruluğu elde etmek için çeşitli RDK yöntemleri kullanılarak RDK'nın ölçüm doğruluğu artırılabilir [5].

Genlik dengesizliği ve referans faz kayması, resolver sinyalinin ideal olmayan ve üstesinden gelinmesi gereken özellikleridir [6]. İdeal olmayan özellikleri çözmek için birçok yöntem çalışılmıştır. Parametre gözlemcisi yöntemleri kararlı durum analizi için önemlidir [7]. Özellikle, Luenberger durum gözlemcisi RDK ile kullanılabilir [8]. Bununla birlikte, Luenberger gözlemcisine dayalı parametre gözlemcisi tasarımıyla, genlik dengesizliğinden kaynaklanan tork dalgalanmasının azaltılabileceği söylenebilir [9]. Daha iyi bir pozisyon verisi elde etmek için, kullanılacak gözlemciye bir sistem modeli ve bir sensör modeli tanımlanmalıdır [10].

Genel olarak, bir pozisyon sensörü elektrikli eyleyici pozisyon bilgisi elde etmek için birçok uygulamada;

- Aviyonik sistemlerde,
- Askeri teçhizatlar da,
- Deniz taşımacılığında,
- Karayolu taşımacılığında (kara ve demiryolu, endüstriyel araçlar vb.),
- Rüzgâr türbinlerinde,
- Robotik sistemlerde,
- Çeşitli test platformlarında,
- Teker yapım ekipmanlarında,
- Hareketli güneş panellerinde,
- Medikal ekipmanlarda,
- Tekstil makinelerinde,
- Paketleme makinelerinde kullanılabilir [11]

Bir sistemin durum değişkenlerini gözlemleyen sisteme durum gözlemcisi denir [11]. Bir durum gözlemcisi, sistem girdilerinin, çıktıların ve diferansiyel veya fark denklemlerine dayalı bir sistem modelinin ölçümlerini kullanır. Ölçülemeyen durum değişkenlerini tahmin etmek için birçok gözlemci türü araştırılmıştır. Luenberg gözlemcisi, resolver sensör giriş ve çıkış parametreleri tanımlanarak gerekli ara durumları gözlemlemek için de kullanılabilir [12].

Resolver sensörü elektrik makinalarında özellikle pozisyon ölçümü için kullanılan hassas sonuçlar sağlayan bir sensördür. Bu hassas sonuçlar birçok uygulamada yeterli olsa da askeri uygulamalar gibi yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda hassasiyet sonucunun artırılması bir ihtiyaçtır. Bu resolver sensörün tasarımı sırasında veya resolver to digital converter (RDC) verilerinin kullanılarak gözlemci tabanlı bir kontrol sistemiyle mümkündür. Literatürde Luenberg gözlemcisi tabanlı bir RDC uygulamasına rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışma uygulamada yenilik konusunda özgünlük taşımaktadır. Enerji verimliliği ve sistem verimi üzerinden sonuçlar ile makale benzerim çalışması sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada, Kalıcı mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) milinin gerçek konumu ve Resolver sensörünün çıkış sinyalleri vasıtasıyla elde edilen konum arasındaki hatayı azaltmak için iki RDK yaklaşımın karşılaştırılmıştır. Yaklaşım 1, durum 1 olarak tanımlanan klasik RDK yöntemidir. Yaklaşım 2 ise, durum 2 olarak tanımlanan Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK dır. Clark-park dönüşümü ve uzay vektör modülasyonu ile kontrol blok şeması çıkarılan bir KMSM için her döngüde konum hatası hesaplanabilir. Sistem teorisi ve sistemin matematiksel modeli Bölüm II'de gösterilmektedir. Bu bölümde, PMSM modeli, resolver modeli, hata hesaplaması ve Luenberger durum gözlemcisi anlatılmaktadır. Klasik RDC performansı ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDC performansı, Bölüm III'te verilmektedir. Son olarak, bu çalışma Bölüm IV'te özetlenmektedir.

2. SİSTEMİN TEORİK İFADESİ VE MATEMATİK MODELİ (THEORITICAL DESCRIPTION OF SYSTEM AND MATHEMATICAL MODEL)

2.1. KMSM Modellenmesi (Modelling of the PMSM)

Rotor akı bağlantılarıyla senkronize dönen referans çerçeve modeli içerisinde KMSM'nin matematiksel modeli Eş. 1-8'de ifade edilmektedir. Burada kullanılan parametreler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem değişkenleri ve sabitler

| Değişken ve sabitler | Açıklaması |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Vd ve Vq | d-q ekseninde stator voltajları |
| id ve iq | d-q ekseninde stator akımları |
| λ_d ve λ_q | d-q ekseninde stator akıları |
| Λ_m | Kalıcı mıknatıs akı bağlantısı |
| Te | Elektromanyetik tork |
| wr | Rotorun açısal hızı |
| rs | Stator direnci |
| Ls | Stator öz endüktansı |
| P | Kutup sayısı |
| k | Resolver dönüş hızı |
| U0 | Tepe değeri |
| wref | Uyarma sinyalinin frekansı (rad / sn) |
| Φ | Rotor pozisyonu (rad) |
| θ | Ölçülen pozisyon (rad) |

Üstelik tasarım için gerekli olan KMSM'nin sayısal parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerleri kullanarak, sistem için bir KMSM modellenmiştir.

Tablo 2: KMSM Parametreleri

| | |
|-------------------------|----------------|
| Stator rezistansı | 2,2 Ω |
| Stator endüktans | 0,0029 mH |
| Kutup sayısı | 4 |
| Baz gerilimi | 179,629 V |
| Baz akımı | 10 A |
| Baz akı bağlantısı | 1 volt.sec/rad |
| Baz elektriksel frekans | 200 Hz |
| Baz hız | 3000 rpm |

Referans motor değerleri, 367 Nm, K_i 68,7, K_e 29,4, R 2,2 ohm, L 29 mH +/-%30 (faz-faz) ve J 0,10 Ke-m²'dir [13]. KMSM, Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) dayanan d-q referans çerçevesi modeli ve matematiksel denklemlere göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_{sd} & -\omega_r L_{sq} \\ \omega_r L_{sd} & R + sL_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda \end{bmatrix} \quad 1$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}) \quad 21$$

$$\beta = \frac{1}{L_s} \quad 3$$

$$\gamma = \frac{r_s}{L_s} \quad 4$$

Eş 3 ve 4 kullanarak, d-q eksenindeki akımlar ve elektrik torku şu şekilde yeniden yazılabilir;

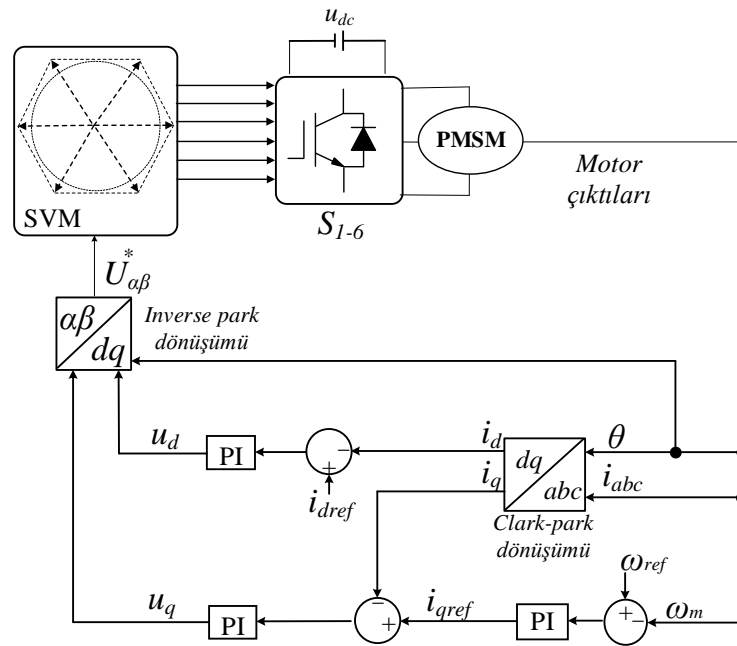
$$\frac{di_d}{dt} = -\gamma i_d + \omega_r i_q + \beta V_d \quad 5$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\gamma i_q + \omega_r i_d + \beta \omega_r \lambda_m + p V_q \quad 6$$

$$\lambda_d = \lambda_m \quad 7$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_m i_q) \quad 8$$

Burada Eş. 8'de de görüleceği üzere i_d , kontrol döngüsünde yaklaşık olarak sıfırdır. Bu eşitlikler kullanılarak KMSM sisteminin kontrol blok diyagramı aşağıda Şekil 1'deki gibi gösterilebilir.

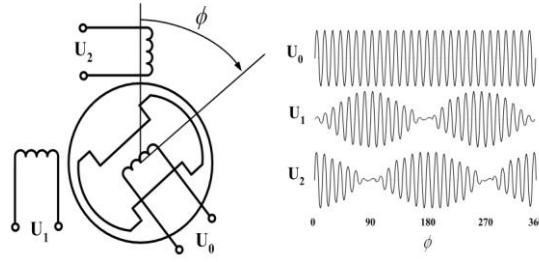


Şekil 1. Vektör kontrollü KMSM blok diyagramı

Bu vektör kontrollü KMSM sistemi, SVM (uzay vektör modülasyonu) ile birlikte bir 6 anahtarlı evirici, KMSM bloğu ve d-q dönüşümünden oluşur. Bu blok diyagramında motor geri bildirimleri motor çıkışları şeklinde akım ve voltaj olarak ölçülür. Bu geri bildirimler, d-q dönüşümünün yapılması için Clark-park dönüşümünde kullanılır. Bu sistem bloğunda i_{dref} 0'dır ve referans hız 3000rpm olarak seçilmiştir. Burada ölçülen veriler geri besleme sinyali olarak kullanıldığından ve her bir döngüde iyileştirilmeye çalışıldığı için çok önemlidir. Bundan dolayı, ölçüm ekipmanı seçimi motor kontrol performansına ve pozisyon hatasına etki eder.

2.2 Resolver Sensör Model ve Hata Hesabı (Resolver Sensor Model and Error Calculation)

Resolver ana prensibi bir motorun konumunu ölçmektir. Açısal pozisyonun değişimi üzerinden pozisyon hatası incelenir. Resolver sensör, uyarma sinyaliyle sinüs ve kosinüs çıkış sinyallerinin giriş ve çıkış sinüzoidal sinyalleri olarak uygulandığı bir giriş iki çıkış portlu elektromekanik bir sensör sistemidir. Uyarım sinyali, stator sargısına uygulanan sinüzoidal bir sinyaldir (U_0). Bir transformatör gibi stator ve rotor arasındaki elektromanyetik etkileşimi kullanarak sinüs bobini ve kosinüs bobini üzerinden resolver çıkışlarında sinüs ve kosinüs sinyalleri (U_1 ve U_2) üretebilir. Resolver elektromanyetik etkileşimin prensibi Şekil 2'de görülebilir.



Şekil 2. Resolver elektromanyetik etkileşim prensibi[12]

Üstelik rotor pozisyonu (Φ) aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$U_0(t) = \dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 9$$

$$U_1(\phi, t) = \dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \phi \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 10$$

$$U_2(\phi, t) = \dot{U}_0 \cdot k \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_{ref} t \quad 11$$

Denklem 9,10 ve 11 kullanılarak pozisyon hatası aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

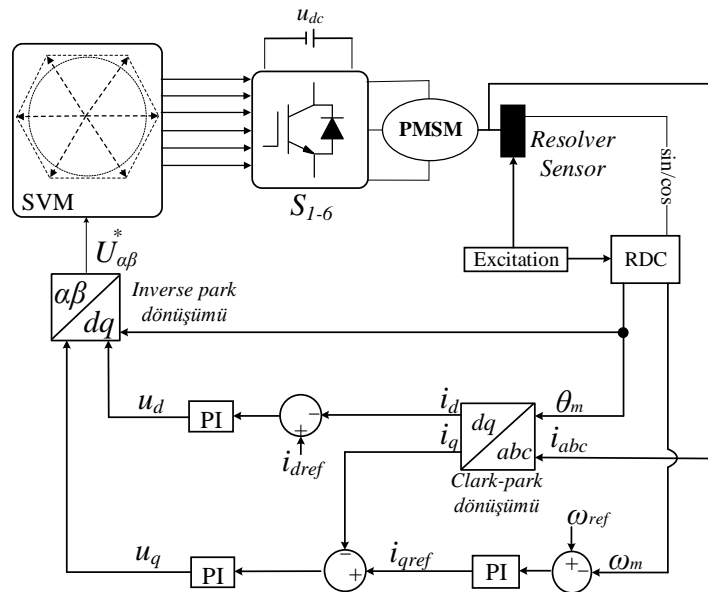
$$err = (\dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \cdot \cos \theta) (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \phi \cdot \sin \omega_{ref} t) - (\dot{U}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t \cdot \sin \theta) (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_{ref} t) \quad 12$$

$$err = \dot{U}_0(t) \cdot (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \omega_{ref} t) [\sin(\phi - \theta)] \quad 13$$

1 arcsec (") 4,848 137 e-6 radyandır ve arcmin (') 0,290 888 10⁻³ radyandır. Bununla birlikte bir dairesel dönüşteki 1" 0,000004848 radyana eşittir. 1" nin 100m radyusta 1mm lik değişimi demektir. Böylece arcsec cinsinden pozisyon doğruluğu Eş.14'teki gibi hesaplanabilir;

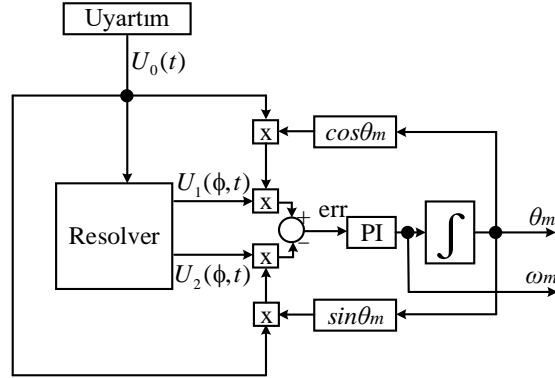
$$accuracy = \frac{err}{0.000004848 \cdot radius} = \frac{\dot{U}_0(t) \cdot (\dot{U}_0 \cdot k \cdot \sin \omega_{ref} t) [\sin(\phi - \theta)]}{0.000004848 \cdot radius} \quad 14$$

Vektör kontrollü KMSM sürücü sisteminin resolver sensör ile birlikte blok diyagramı, Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Resolver sensör kullanılan vektör kontrollü KMSM blok diyagramı

Yukarıda resolver sensör içeren blok diyagramı görülmektedir. Burada görülebileceği üzere uyartım bloğu sayesinde sinüs ve kosinüs sinyali üretilir. Üretilen bu sinyaller RDK bloğu içerisinde uyartım sinyali ile karşılaştırılarak pozisyon bilgisi bulunabilir. Eş. 9-13 kullanılarak geliştirilen RDK bloğu Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu blok durum 1 olarak daha önce bahsedilen klasik SDK yaklaşımıdır.

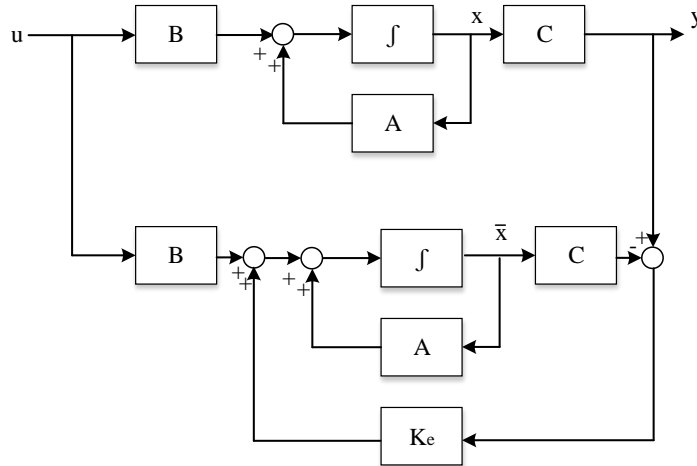


Şekil 4. Klasik RDK yaklaşımı blok diyagramı

Yukarıda görülebileceği üzere U_1 ve U_2 sinyalleri U_0 sinyali ile karşılaştırılarak hata elde edilebilir. Hata çıktısı, PI bloğundan çıktığında ω_m hız bilgisi ve bu bilgisinde integrali alındığında θ_m pozisyon bilgisi elde edilir. Pozisyon bilgisinin sinüs ve kosinüs değerleri kullanılarak trigonometrik bağlantılar ile hata değeri azaltılabilir. Açısal shaft konum bilgisi olarak ifade edilebilen bu pozisyon bilgisi hız bilgisi vasıtasıyla bulunsa da resolver sensörler daha çok pozisyon kontrolünde kullanılır. Bu çalışmada uyartım voltajı ($U_0(t)$) tepeden tepeye 10 Volt 5 kHz sinüs sinyalidir. Resolver dış çapı 56 mm dir. Dış çap bilgisi trigonometrik hesaplamalarda derece-arcsec dönüşümünde önemlidir.

2.3. Luenberger durum gözlemcisi (Luenberger state observer)

Bir gözlemci tasarımı için resolver sensör giriş ve çıkış bilgileri ile sistem modeli kullanılabilir. Çünkü gözlemci matematiksel bir yapıdır ve gözlem yaparak istenen sonuçlar elde etmede kullanılabilir. Luenberg durum gözlemcisi ise kontrol değişkenleri, sistem modeli ve ölçülen çıkış verileriyle ilişkili olan durum değişkenlerini tahmin edebilir. Şekil 5 Luenberg durum gözlemcisi blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 5. Luenberg durum gözlemcisi dönüştürme yapısı

Yukarıda A karakteristik matris, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve K_e gözlemci kazanç matrisidir. Ayrıca u kontrol giriş sinyali, x durum değişkenleri, \hat{x} gözlemlenen durum değişkenleri ve y çıkış sinyalini ifade eder. Bunlara arasındaki matematiksel eşitlikler ve hata hesabı aşağıdaki gibidir.

$$\dot{\bar{x}} = Ax + Bu \quad 15$$

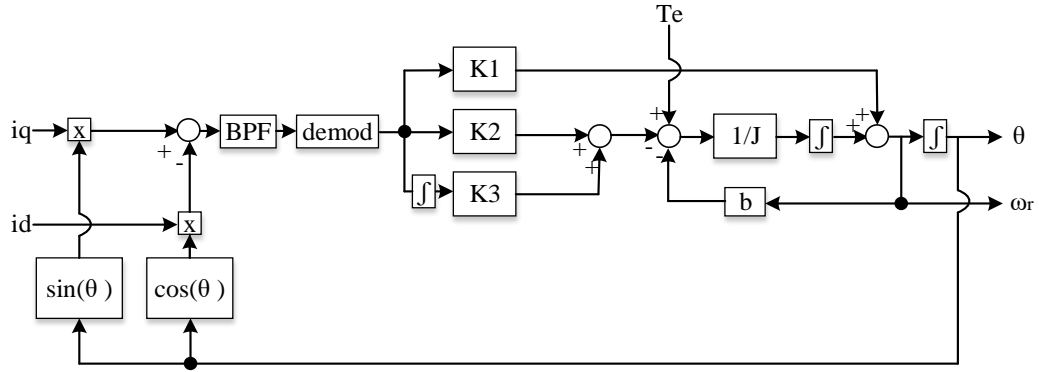
$$y = Cx \quad 16$$

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bu + K_e(y - C\bar{x}) \quad 17$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, Luenberger durum gözlemcisi resolver sensör parametreleri için uygulanabilir. Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK durum 2 yi ifade etmektedir. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK için hata hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{\bar{x}} &= Ax - A\bar{x} + Bu + K_e(Cx - C\bar{x}) \\ &= (A - K_eC)(x - \bar{x}) \end{aligned} \quad 18$$

$e = x - \bar{x}$ değeri ile bulunan hata değeri için gözlemci kazanç matrisi K_e 'nin $(A - K_eC)$ özdeğerlere sahip olduğu tasvir edilmiştir. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK blok diagramı Şekil 6 da verilmiştir.

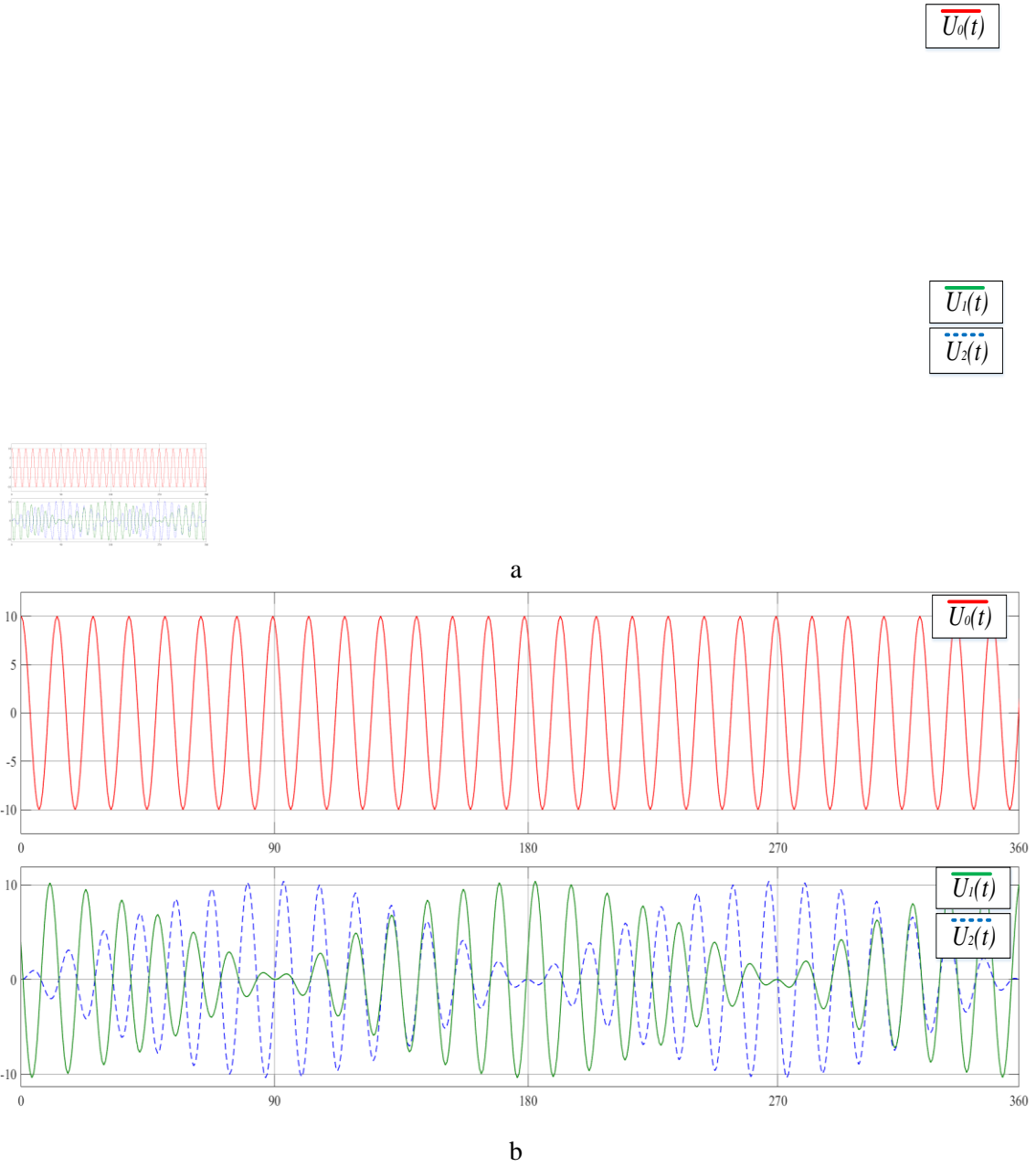


Şekil 6. Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK blok diyagramı

Durum 2, mevcut durum tahminlerini, tahmin hatası ile orantılı bir miktarda, mevcut çıktı eksi gerçek ölçüm tahminiyle orantılı bir miktarda düzelten bir terim içeren denklemlerle karakterize edilir. Bu düzeltme, gözlemlenen sistem kararsız olsa bile gözlemcinin kararlılığını ve yaklaşmasını sağlar. Bu nedenle, doğruluğu da etkilerler. Çözücü çıktısı ve doğruluk bir sonraki bölümde elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

3. KLASİK RDK VE LUENBERG DURUM GÖZLEMCİSİ TABANLI RDK PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF CLASSICAL RDC AND LUENBERGER OBSERVER BASED RDC PERFORMANCES)

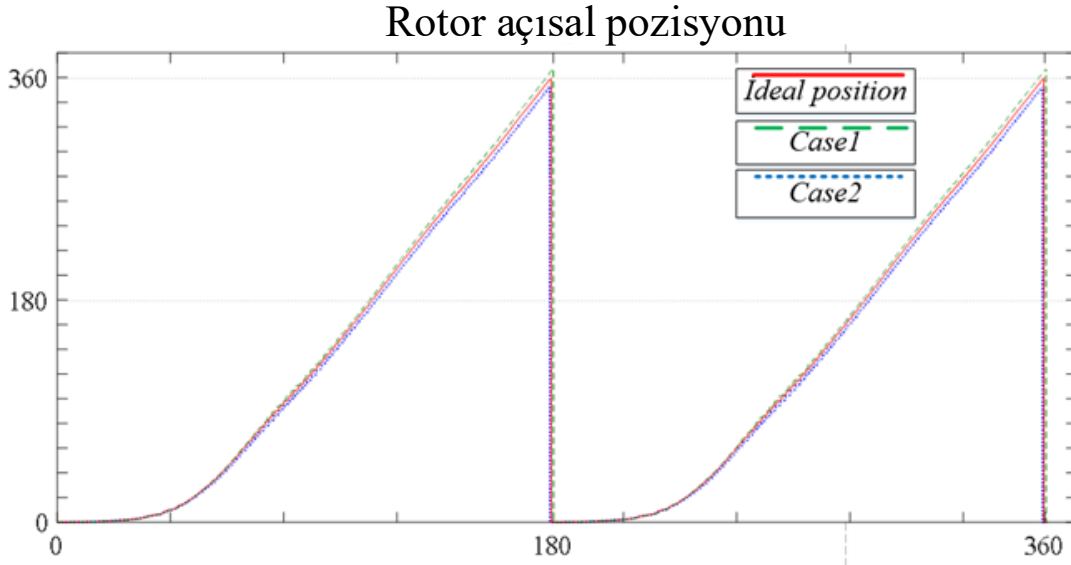
Resolver sensör sistemin performansını anlamak için klasik RDK ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK karşılaştırılır. Şekil 3 ve Şekil 6'daki tasarımlar kullanılarak simülasyon ortamında motor çıktılarına dikkat çekilebilir. Şekil 7'a da klasik RDK kullanıldığında resolver sensör sinyalleri gösterilmektedir. Şekil 7'b de ise Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK kullanıldığında resolver sensör sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 7.a. Klasik RDK pozisyon sinyalleri **b.** LDG tabanlı RDK pozisyon sinyalleri

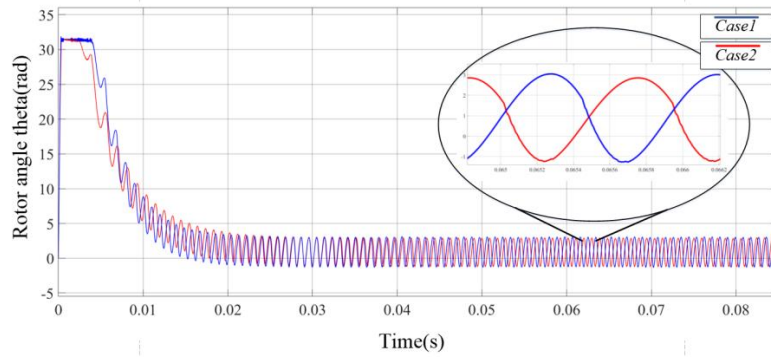
Şekil 7’de, uyarma sinyalini, sinüs sinyalini ve kosinüs sinyalini gösterir. Kırmızı sinyal uyarma sinyalini gösterir ($U_0(t)$), yeşil sinyal sinüs sinyalini ($U_1(t)$) gösterir ve mavi kesikli sinyal kosinüs sinyalini ($U_2(t)$) gösterir. Klasik RDK için hesaplanan hata 0,1832544 derecedir. Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK için hesaplanan hata ise 0,07330176 derecedir. Bu değerler de sırasıyla 49’ ve 21’ e denk gelir. Bu da Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı yani durum 2 tercih edildiğinde %57,143 daha doğru pozisyon bilgisi elde edildiği söylenebilir.

Bununla birlikte, iki durum içinde rotor açısız pozisyon değerleri ve ideal pozisyon bilgisi Şekil 8 de gösterilmiştir. İdeal pozisyon tepkisi her iki durum için de karşılaştırılırsa yine klasik RDK ya göre Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımının ideal pozisyona daha yakın olduğu aşağıda gösterilmiştir. Bu durum %57,143 lük benzetim pozisyon doğruluğu başarısının diğer bir ispatıdır. Şekil 8’deki rotor açısız pozisyon değerleri rotorun sabit yük ve sabit hızda bir tam dönüşü için çıkarılmıştır.



Şekil 8. Durum 1 ve Durum 2 için ideal pozisyon cevaplarının karşılaştırılması

Şekil 8’de Durum 2’nin durum 1 e göre ideal pozisyona daha yakış seyrettiği görülebilir. Referans sabit ve hız sabit yükte rotor açısı theta nın zamana bağlı değişimi (pozisyon bilgisi) Şekil 9’da görülebilir.



Şekil 9. Her iki durum için referans sabit ve hız sabit yükte rotor açısı theta nın zamana bağlı değişimi

Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı kırmızı sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Mavi sürekli çizgi ise klasik RDK yaklaşımı sonucudur. Buradan da anlaşılacağı üzere durum 2 için istenene daha yakın rotor açısı ve daha düşük oturma süresi sağlar. Mevcut çalışmanın odağı pozisyon ölçüm doğruluğunun iyileştirilmesi ve sensör çözünürlüğündeki artış için bu sonuçlar sonuç bölümünde özetlenmiştir. Daha iyi çözünürlük ve elektriksel hassasiyet daha düşük hata ve daha yakın rotor pozisyon açısı anlamına gelmektedir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, önerilen resolver yaklaşımları KMSM'nin vektör kontrollü sürücü sisteminde doğrulanmıştır. Bir motor milinden mutlak konum verisi elde etmek için, resolver sensör kullanılabilir. Resolver sensör motor şaftına monte şekilde çalışan bir elektromanyetik sensördür ve şaft ile birlikte dönen resolver sensör rotoru vasıtasıyla pozisyon ölçümü yapılır. Ancak, günümüz şartlarında gelişen teknoloji enerji verimliliği ve sensör çözünürlük verimi için pozisyon hatası kabul edilebilir aralıkta olmalıdır. Resolver sensörden alınan sinüs ve kosinüs sinyali konum verilerini hesaplamak için kullanılır. Bu amaçla, klasik RDK ve Luenberger durum gözlemcisi tabanlı RDK KMSM üzerinde benzetim ortamında çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda ise durum 2 olarak isimlendirilen Luenberg durum gözlemcisi tabanlı RDK yaklaşımı sabit hız ve sabit yükte KMSM için pozisyon doğruluğunu artırdığı elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Gerekli karşılaştırmalar yapıldığında 49 arcmin ve 21 arcmin pozisyon doğruluğu sonuçları elde edilmiştir. Açıkça görülmektedir ki durum 2 ile yaklaşık %57'lik daha iyi bir

pozisyon doğruluğu elde edilmiştir. Benzetim sonuçları nominal yükte ve referans hızda gerçekleştirilmiştir. Nominal yükte resolver performansı bu makalede gösterilmeye çalışılan bir sonuçtur. Motorun farklı yüklerde çalıştırılması durumunda ve farklı hızlarda çalıştırılması durumunda deneysel bir çalışma geliştirilmektedir. Burada amaçlanan, motor performansının değil resolver çıktılarının değerlendirilmesidir. Çalışmanın devamında deneysel çalışmalar ile bu elde edilen sonuçların pratik ispatının yapılması ve diğer gözlemci metodlarının uygulanması düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma kapsamında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi ROBOLAB ekibine teşekkürler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. A. Verma and A. Engineer, Design considerations for resolver-to-digital converters in electric vehicles, 2016.
- [2] D. W. Brown et al., Real-Time Fault Detection and Accommodation for COTS Resolver Position Sensors, no. June 2014, 2008.
- [3] C. Mohan, R. Sivappagari, and N. R. Konduru, Sensors & Transducers Review of RDC Soft Computing Techniques for Accurate Measurement of Resolver Rotor Angle, vol. 150, no. 3, pp. 1–11, 2013.
- [4] F. Tootoonchian and Z. Nasiri-gheidari, Twelve-slot two-saliency variable reluctance resolver with non-overlapping signal windings and axial flux excitation, vol. 11, pp. 49–62, 2017.
- [5] L. Xiao, Z. Li, and C. Bi, Optimization of A Reluctance Resolver, 2018 Asia-Pacific Magn. Rec. Conf., no. c, pp. 1–2, 2018.
- [6] A. K. S. Baasch, E. C. Lemos, F. Stein, A. S. Paterno, J. De Oliveira, and A. Nied, Resolver-to-Digital Conversion Implementation—A Filter Approach to PMSM Position Measurement, no. May, 2011.
- [7] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, and J. T. Chen, A Novel Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Tooth-Coil Windings, vol. 30, no. 2, pp. 784–794, 2015.
- [8] F. Tootoonchian, Effect of damper winding on accuracy of and mixed-eccentricities, pp. 845–851, 2018.
- [9] I. Resolvers, Modeling and Simulation of Analog Angular Sensors for Manufacturing Purposes.
- [10] S. Hwang, Y. Kwon, J. Kim, and J. Oh, Compensation of Position Error due to Amplitude Imbalance in Resolver Signals, vol. 9, no. 5, pp. 748–756, 2009.
- [11] M. Bourogaoui, H. Ben Attia, and I. S. Belkhdja, Speed / position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives – A review Sales in 2007 Proximity Sales in 2011 Rotary Growth rate, ISA Trans., vol. 64, pp. 269–284, 2016.
- [12] W. Kaewjinda and M. Konghirun, Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Resolver Sensor, International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE), Vol 2 No 4, December, 2016.
- [13] A. Aksöz, A. Saygın, "Aynı Fiziksel ve Elektromanyetik Parametreler Altında EAKMSM ve ORKMSM'un Vuruntu Torkuna göre Karşılaştırılması". Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 6 (2018): 659-667