

# Endüstriyel Fan Uygulamaları İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sensörsüz Kontrol Performanslarının Karşılaştırılması

## Comparison of the Sensorless Control Performance of Permanent Magnet Synchronous Motors for Industrial Fan Applications

Arda Tüfekçi<sup>1</sup>, Reha Özgür Şimşek<sup>1</sup>, Ramazan Çalık<sup>1</sup>, Ömer Cihan Kıvanç<sup>2</sup>

<sup>1</sup>WAT Motor Sanayi ve Ticaret A.Ş., Endüstriyel Elektronik Araştırma Geliştirme Departmanı  
Arçelik A.Ş. Çayırova Kampüsü, Tuzla, İstanbul  
arda.tufekci@wat.com.tr, rehaozgur.simsek@wat.com.tr, ramazan.calik@wat.com.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
İstanbul Okan Üniversitesi, Tuzla, İstanbul  
cihan.kivanc@okan.edu.tr

### Özetçe

Fan, pompa ve iklimlendirme gibi endüstriyel uygulamalarda bütünsel sürücülü sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) sahip oldukları kontrol kabiliyetleri ve yüksek verimleri sebebiyle son yıllarda öne çıkmaktadır. Bu uygulamalar sık çalışma periyotları, çevresel koşulları ve düşük maliyetleri dikkate alındığında pozisyon sensörlerinin yüksek maliyeti ve düşük dayanımları sebebiyle sensörsüz kontrole ihtiyaç duymaktadır. Özellikle “Kayan Kipli Gözlemleyici (KKG)” ve “Genişletilmiş Luenberger Gözlemleyici (GLG)” SMSM’nin sensörsüz kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metotların kullanım amaçlarına göre birbirlerine üstünlükleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmada bir sürekli mıknatıslı senkron fan motoru için her iki metot test edilerek performans karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar WAT Motor firmasının üretmiş olduğu SMSM ve sürücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda GLG’nin endüstriyel fan uygulamaları için daha yüksek performansa sahip olduğu gözlenmiştir.

### Abstract

In recent years, electronically commutated (EC) permanent magnet synchronous motors (PMSM) have gained prominence in industrial applications such as fans, pumps, and HVAC systems due to their control capabilities and high efficiency. These applications, considering their frequent operation periods, environmental conditions, and costs, often require sensorless control. Particularly, “Sliding-Mode Observer (SMO)” and “Extended Luenberger Observer (ELO)” are widely used for sensorless control of PMSMs. These methods have advantages over each other based on their intended purposes of use. In this study, both methods are tested, and their performance is compared for a fan motor. The experimental studies are performed using a PMSM and a drive manufactured by WAT Motor company. Experimental results show that the Extended Luenberger Observer exhibited higher performance for industrial fan applications.

### 1. Giriş

Enerji arzında yaşanan problemler ve yüksek verim gereksinimleri sebebiyle fan, pompa ve iklimlendirme uygulamalarında sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) endüstride önemli bir yer edinmiştir [1]. Pompa ve fan uygulamalarında sıklıkla kullanılan asenkron motorlardan farklı olarak sürekli mıknatıslı senkron motorlar ihtiyaç duydukları kontrol gereksinimleri sebebiyle güç elektroniği devresine ihtiyaç duymaktadır [2]. Özellikle son yıllarda yarı iletken teknolojisinde yaşanan gelişmeler, kompleks kontrol algoritmalarına uygun işlemcilerin ucuzlaması daha yüksek güç seviyelerinde de SMSM’lerin kullanımını cazip hale getirmektedir [3]. Fan ve pompa uygulamasında sıklıkla tercih edilen asenkron motorların kontrolü hem maliyet hem de kolay uygulanabilmesi sebebiyle çoğunlukla skaler kontrole dayanmaktadır [4]. Ancak skaler kontrolde güç elektroniği büyüklüklerinin sadece gerilim ve frekans olmasından ötürü kontrol bant genişliği ve dinamik tepkiler vektör kontrol metotlarına kıyasla yetersiz kalmaktadır [5]. Özellikle son yıllarda, enerji verimlilik standartlarında yapılan düzenlemeler, pompa ve fan uygulamalarında enerji tasarrufu için ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyetli hız kontrolü için skaler kontrol metotları yerine alan yönlendirmeli vektör kontrolüne (AYK) dayalı motor sürücüler kullanılmaktadır [6, 7]. Dolayısıyla endüstrinin ihtiyaç duyduğu verim, performans ve dayanıklılık kabiliyetlerini karşılamak için alan yönlendirmeli kontrol edilen sürekli mıknatıslı senkron motorlar fan, pompa ve iklimlendirme uygulamalarında ön plana çıkmaktadır.

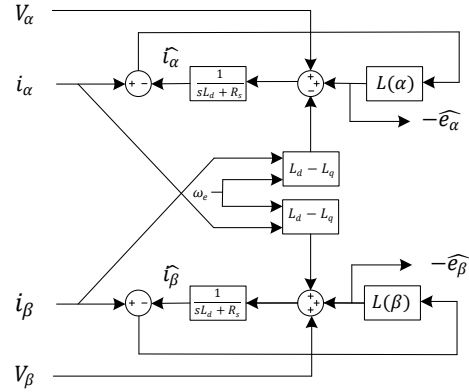
Alan yönlendirmeli kontrol yüksek kontrol performansına sahip olmasına karşılık rotor akı vektörünün konumunu belirlemek için trigonometrik dönüşümlere ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında rotor konumunun tespiti için pozisyon bilgisi gerekmektedir [8]. Yüksek hassasiyetli uygulamalarda konum bilgisi için motor miline montajlanmış bir pozisyon sensörü kullanılsa da hem yüksek maliyeti hem de fan ve pompa motorlarının çalıştığı zorlu çevre koşullarına karşı düşük dayanımı sebebiyle bu uygulamalarda pozisyon sensörünün

kaldırılarak sensörsüz kontrole odaklanılmaktadır. Sensörsüz kontrolde her ne kadar konum sensörü elemine edilmiş olsa da rotor konumu motor akımları, evirici bara gerilimi ve motor terminal gerilimleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron motor sensörsüz hız kontrol uygulamalarında iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi model tabanlı yöntemlerken diğeri sinyal enjeksiyonuna dayalı metotlardır [2, 9]. Model tabanlı yöntemler motor parametre hassasiyeti, başlangıç rotor konum hatası, stator akım ve gerilim ölçüm hataları gibi nedenlerden dolayı düşük hız çalışma bölgesinde oldukça düşük bir kontrol performansına sahiptir [10]. Buna karşılık orta ve yüksek hız bölgelerinde yüksek bir kontrol performansı sunmaktadır. Diğer taraftan sinyal enjeksiyonuna dayanan metotlar ise zıt elektromotor kuvveti (EMK) ve motor parametre bilgisine ihtiyaç duymadığı için sıfır, düşük, orta ve yüksek hız bölgelerinde yüksek performans sunmaktadır [11, 12]. Ancak pompa, fan ve iklimlendirme uygulamaları düşük maliyetli ve rekabetçi bir uygulama alanı olduğundan dolayı sinyal enjeksiyonuna dayalı metotların ihtiyaç duyduğu gelişmiş yüksek hızlı işlemci ve kompleks algoritmalar için cazip görülmemektedir [13]. Bu sebeple uygulamada çoğunlukla model tabanlı yaklaşımlar öne çıkmaktadır [14]. Sürekli mıknatıslı senkron motorların zıt EMK'sının elde edilmesi için endüstriyel uygulamalarda gözlemleyici tabanlı yöntemlerden "Genişletilmiş Luenberger Gözlemleyici" [15, 16], "Kalman Filtresi" [17, 18], "İndirgenmiş Meritbe Gözlemleyici" [19] ve "Kayan Kipli Gözlemleyici" [20, 21] kullanılmaktadır. Ancak bu metotlarda farklı yük koşulları ve sürekli-geçici hal çalışma bölgelerine göre birbirlerine karşı avantaj ve dezavantaj sağlayabilmektedir.

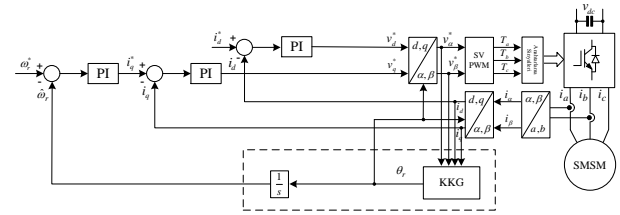
Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda oldukça sık çalışmaya konu olan MRAS (Model Referans Adaptif Sistem), Kayan Kipli Gözlemleyici motor parametre değişiminden az etkilenmesi, gürültülere karşı dayanımı ve hızlı yakınsama kabiliyetleri ile öne çıkmaktadır [22]. Ancak doğası gereği KKG'nin geçiş durumlarında çatırtı problemine sahip olduğu bilinmektedir [23]. Buna karşılık araştırmacılar Genişletilmiş Kalman Filtresi'nin rotor akı tahmininde başarılı sonuçlar vermesine karşılık karmaşık algoritması sebebiyle parametre adaptasyonu, başlangıç parametrelerinin atanması ve gürültüye karşı düşük dayanımının olduğunu öne çıkarmaktadır [24]. Literatürde yapılan karşılaştırma çalışmasında KKG ve MRAS karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre KKG'nin dinamik performansı MRAS'tan iyi elde edilmesine rağmen KKG'nin çatırdama problemi sebebiyle moment salınım performansı MRAS'a göre düşük elde edilmiştir [25]. Genel bir kıyaslamayla Kayan Kipli Gözlemleyici GKF'ye kıyasla hesaplama yükü düşük ve daha kısa süreli gecikme kabiliyetiyle endüstride tercih edilmektedir. Diğer taraftan, Genişletilmiş Luenberger ve Kalman gözlemleyicileri, sırasıyla yaygın olarak uygulanan doğrusal olmayan zamana bağlı deterministik ve stokastik hız tahminçileridir. Bunlardan GLG yüksek konum tahmin performansı ve daha az kompleks uygulamalara kolay adaptasyonu sebebiyle endüstride tercih edilmektedir [15, 16]. Özellikle işlemci üreten firmalar fan ve pompa gibi adet olarak çok talep gören ve daha düşük performans gerektiren uygulamalarda Luenberger Gözlemleyici'ye dayanan sensörsüz kontrol yaklaşımını öne çıkarmaktadır.

Çalışmanın ana hedefi çok adetli üretim yapan ve sensörsüz motor kontrolüne ihtiyaç duyan endüstri firmalarının yöntem belirlerken ihtiyaçlarına göre hangi yaklaşımı hızla adapta

edebileceği yönünde karar vermesini sağlamaktır. Yapılan çalışmada ise WAT firması tarafından üretilen bir entegre sürücülü, sürekli mıknatıslı senkron motorun kontrolü için sensörsüz kontrol metotları arasında fan uygulamaları için KKG ve GLG'ye dayalı iki metot karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yaklaşımı dayanıklılık, hız yakınsaması, komplekslik, motor parametrelerine bağımlılık kriterleri ekseninde değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında SMSM, KKG ve GLG eşitlikleri sunulmaktadır. Üçüncü kısımda ise deneysel çalışmalar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda metotların birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajlarına karşılık fan uygulamaları özelinde GLG'ye dayalı sensörsüz kontrol yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1: GLG prensip şeması.



Şekil 2: KKG'ye dayalı kontrol şeması.

## 2. Yöntemlerin Matematiksel Modellenmesi

Alan Yönlendirmeli Kontrolde SMSM'yi analiz etmek için dinamik  $dq$  modeli dönen senkron referans düzleminde kullanılmaktadır. SMSM'nin stator gerilim denklemleri dönen  $dq$  referans düzleminde (1) ve (2) denklemlerinde görüldüğü gibi ifade edilmektedir [26].

$$v_q = i_q R_s + L_q \frac{di_q}{dt} + (\omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_f) \quad (1)$$

$$v_d = i_d R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2)$$

Denklemlerde  $v_d$ ,  $v_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $R_s$ ,  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $\omega_e$  ve  $\lambda_f$  sırasıyla  $d$ -ekseni stator gerilimi,  $q$ -ekseni stator gerilimi,  $d$ -ekseni stator akımı,  $q$ -ekseni stator akımı, stator direnci,  $d$ -ekseni endüktansı,  $q$ -ekseni endüktansı, rotorun açısal elektriksel hızı ve rotor akısını ifade etmektedir. Yapılan çalışmada basitliği ve akıdan bağımsızlığı sebebiyle "Akım Tabanlı Luenberger Gözlemleyici" kullanılmıştır. GLG prensip şeması Şekil 1'de sunulmaktadır. SMSM AYK eşitlikleri ve trigonometrik

dönüşümlerinin ardından modelin  $\alpha\beta$  eksenlerinde akımlarının elde edilmesi için (3) ve (4) denklemleri kullanılmaktadır [27, 28].

$$i_{\alpha} = \frac{V_{\alpha} - \omega_e(L_d - L_q)i_{\beta} + L(\alpha)}{R_s + sL_d} \quad (3)$$

$$i_{\beta} = \frac{V_{\beta} + \omega_e(L_d - L_q)i_{\alpha} + L(\beta)}{R_s + sL_d} \quad (4)$$

Luenberger Gözlemleyiciye dayalı yöntemin yaklaşımını ifade eden temel eşitlikte yer alan  $L(\alpha)$  ve  $L(\beta)$  sırasıyla  $\alpha\beta$  - eksenlerinde gözlemleyicinin stabil kalmasını sağlayan PI kompanzatorlardır. Rotor konumu ve hız bilgisini elde edebilmek içinse bir açı takip gözlemcisine ihtiyaç duyulmaktadır. Açı takip gözlemcisi (ATG) PLL hata kompanzasyon prensibine dayanmakta olup trigonometrik formüllerin kullanımıyla rotor konum bilgisini elde etmektedir. (5) denkleminde ATG'nin temel yaklaşımını ortaya koyan eşitlik sunulmaktadır [28].

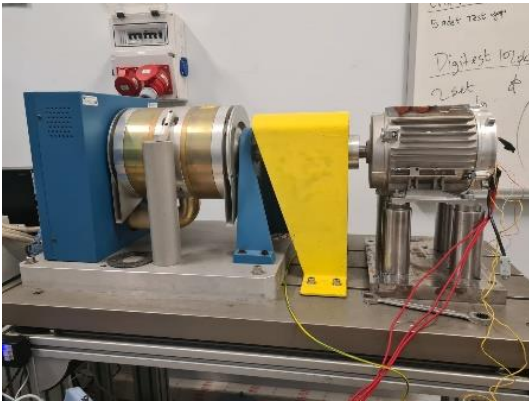
$$\sin \theta_e \cos \tilde{\theta}_e - \cos \theta_e \sin \tilde{\theta}_e = \sin(\theta_e - \tilde{\theta}_e) \quad (5)$$

Denklemlerde  $\theta_e$  ve  $\tilde{\theta}_e$  sırasıyla rotor elektriksel açısı ve tahmin edilen rotor elektriksel açısını simgelemektedir. Diğer taraftan KKG'de temel yaklaşım  $\alpha\beta$  - eksen eşitlikleri kullanılarak zıt-EMK gerilimlerini elde etmektir. KKG'ye dayalı sensörsüz motor kontrole ait blok diyagram Şekil 2'de sunulmaktadır. (6)'da KKG'nin çalışma prensibini ortaya koyan denklem gösterilmektedir [20, 27].

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}' \\ i_{\beta}' \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha}' \\ e_{\beta}' \end{bmatrix} = \omega_e J \begin{bmatrix} e_{\alpha} \\ e_{\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

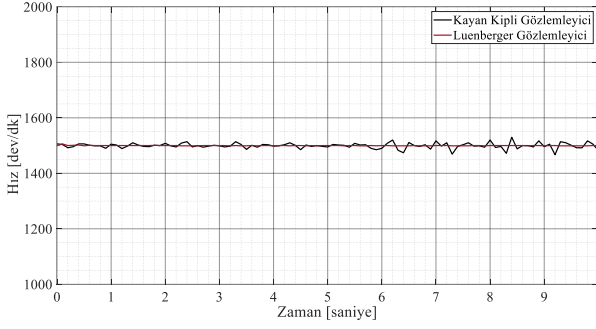
Denklemden  $J$  motor eylemsizlik momentini ifade etmektedir. KKG'de GLG'ye benzer şekilde çıkışında bir açı takip gözlemleyicisine ihtiyaç duymaktadır.



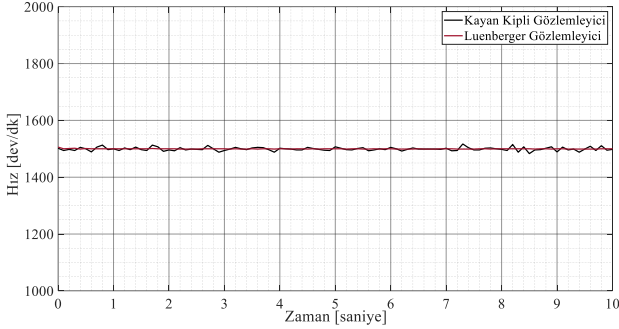
Şekil 3: Deneysel çalışmalarda kullanılan test düzeneği.

### 3. Deneysel Çalışmalar

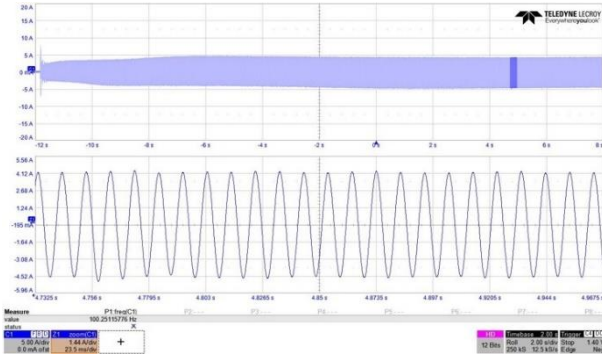
Deneysel çalışmalar Magtrol HD-815 model dinamometre, WAT firmasına ait Renesas R5F566TAAAFM işlemciye ait sürekli mıknatıslı senkron motor kontrolcü, güç elektroniği devresi ve arayüzden oluşan düzeneğe ile yapılmıştır. Şekil 3'te deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği dinamometre seti ve WAT firmasına ait SMSM gösterilmektedir. Kontrolü gerçekleştirilen motor WAT firmasına ait 1500 dev/dk nominal devre sahip, yüzey mıknatıslı senkron motor olarak belirlenmiştir. Seçilen motor endüstride yaygın olarak Fan sistemlerinde kullanılmakta olup yıllık satış adedinin diğer motorlara göre görece yüksek olması hedeflenen bir üründür. Bu sebeple sürücü maliyetinin düşük olması oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple çalışmalarda kompleks sensörsüz motor kontrol metotları yerine güvenilir, düşük karmaşıklıkta ve akademik olarak performansı doğrulanmış yöntemlere odaklanılmıştır. Bu sebeple yazılım geliştirme çalışmalarında Kayan Kipli Gözlemleyici ve Genişletilmiş Luenberger Gözlemleyici ile sensörsüz SMSM kontrolü yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda fan tipi uygulamalar göz önüne alınarak tam yük, yarı yük, düşük hız, boşta çalışma ve yazılım koşma süresine odaklanılmıştır. Çalışmada örnekleme zamanı 16 kHz olarak ayarlanmış olup her iki metot içinde gözlemleyici katsayıları en yüksek performans verecek değerler olarak atanmıştır. Kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde MO (Modulus Optimum) ve SO (Simetrik Optimum) yaklaşımları kullanılmıştır. Öncelikle iç döngüde yer alan akım kontrolörü katsayıları, sonrasında dış döngüde yer alan hız kontrolörü katsayıları istenilen oturma zamanı ve aşım miktarına göre MO ve SO kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar göre açık çevrim ve kapalı çevrim transfer fonksiyonları elde edilerek stabilize analizleri sonucu gerçek sistemdeki katsayılar belirlenmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla 12 Nm (tam yük) ve 6 Nm (yarı yük) yük altında nominal motor hızında hız kontrolü yapılmıştır. Her ne kadar fan sistemlerinde hız hata oranı servo sistemler kadar yüksek olmasa da Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi Luenberger Gözlemleyici'nin kullanıldığı sensörsüz yaklaşımda sürekli halde hız hatası daha düşüktür. Buna karşılık Kayan Kipli Gözlemleyici'nin kullanıldığı yöntemde  $\pm 15$  dev/dk hız hatası görülmektedir. Özellikle debi kontrolü gibi uygulamalarda yüksek hassasiyetli hız kontrolü tercih edilebilmektedir. Bu tip uygulamalar için GLG'ye dayanan sensörsüz metodun kullanımı daha uygundur. Ayrıca çalışmalar esnasında 12 Nm'den 6 Nm'ye geçiş sırasında KKG uygulamasında çarptırma etkileri görülmüştür. Literatürde sıklıkla KKG'nin dezavantajı olarak sunulan [23] çarptırma sırasında kontrol sinyalinde yüksek frekanslı osilasyonlar görülmüş olup bu durumun sık kullanılan fan uygulamalarında titreşim ve ekstra gürültüye sebep olacağı görülmüştür. Bu sebeple uzun süreli çalışma koşulları dikkate alınarak GLG'nin endüstriyel fan uygulamalarında kullanımı önem kazanmaktadır. Diğer taraftansa sürekli hal akım dalga şekilleri Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmaktadır. Hız kontrolündeki yüksek performansına karşılık GLG'ye dayanan metotta akım dalga formu sinüzoidal formdan sapmalar göstermektedir. Buna karşılık KKG'de akım dalga formu sinüzoidal forma çok yakındır. Fan uygulamalarında geçerli olan regülasyonlar düşünüldüğünde toplam harmonik bozulma açısından KKG daha iyi sonuç vermektedir.



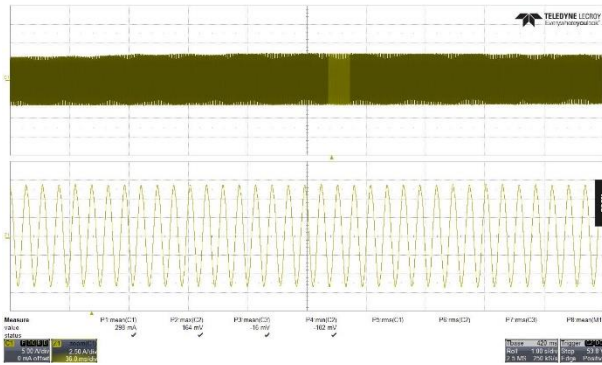
Şekil 4: 12 Nm yük altında 1500 dev/dk hız referansı için KKG ve GLG performansı.



Şekil 5: 6 Nm yük altında 1500 dev/dk hız referansı için KKG ve GLG performansı.



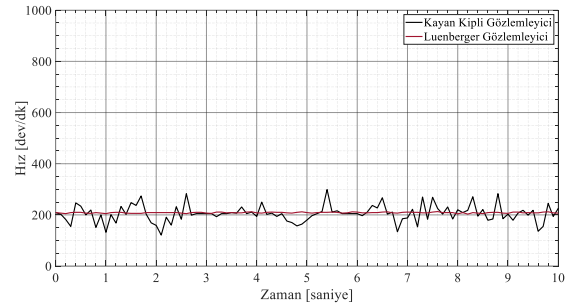
Şekil 6: KKG sürekli hal performansı.



Şekil 7: GLG sürekli hal performansı.

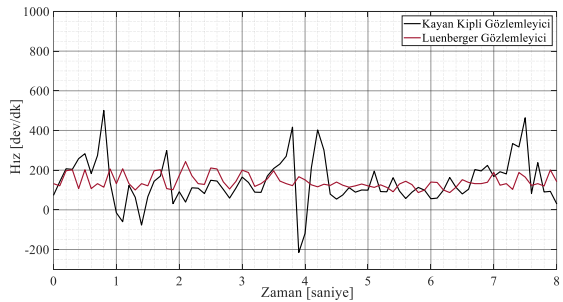
Sensörsüz motor kontrolünde önemli bir kriter olan düşük hız performansı her iki metot içinde detaylıca incelenmiştir. Literatürde çoğunlukla nominal hızın %10'unu ve altı düşük hız bölgesi olarak ifade edilmektedir [26]. Bilindiği gibi model

tabanlı metotlarda düşük hız performansı oldukça kötüdür. Motorlar bu bölgede salınmaya ve stabil olma halini kaybetmektedir. Bunun sebebi hız ve gerilimin oransal olarak değişmesi sebebiyle zıt-EMK tahminin zorlaşmasıdır. Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla 210 dev/dk ve 150 dev/dk hız referansları için her iki kontrol metodunun performansı incelenmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi KKG düşük hız bölgesine yakın olan bölgede hız kontrolünü sürdürmekte ancak sürekli hal hatası  $\pm 60$  dev/dk'lara erişmektedir. Buna karşılık GLG tabanlı yaklaşımda hız hatası  $\pm 10$  dev/dk'dır. Şekil 9'da ise nominal hızın %10'una denk gelen 150 dev/dk için testler yapılmıştır. 150 dev/dk hızda KKG hız kontrol stabilitesini yitirmektedir. Diğer taraftan GLG'de sürekli hal hatası  $\pm 60$  dev/dk'lara erişse de motorun kontrolünü kaybetmemektedir. Şekil 10'da motor yüksüzken her iki metot test edilmiştir. Her iki metodun performansı benzer sonuçlar göstermekte olup  $\pm 20$  dev/dk'lık hatalar görülmüştür. Yapılan hız kontrol testleri sonucunda GLG'ye dayalı metodun KKG'ye göre düşük hız bölgesinde ve nominal devrinde daha iyi hız kontrolü sağladığı görülmüştür.

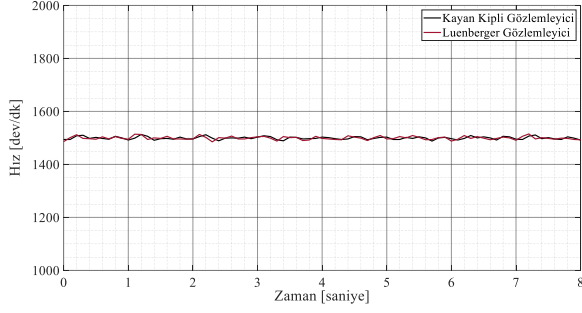


Şekil 8: 12 Nm yük altında 210 dev/dk hız referansı için KKG ve GLG performansı.

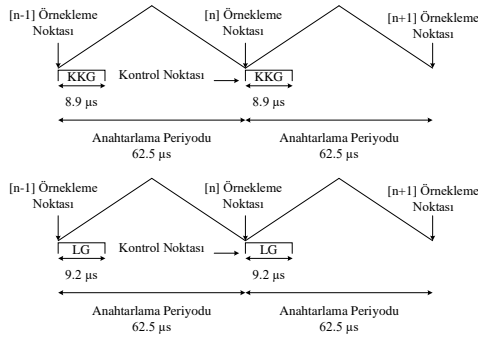
Sensörsüz motor kontrolünde bir diğer performans kriteri ise işlemcinin bir kontrol çevrimini tamamlamak için harcadığı süredir [2]. Model tabanlı metotların endüstride yaygın kullanılmasının ana gerekçelerinden birisi de sinyal enjeksiyonlu metotlara göre daha az kompleks işlemler ve dönüşümler içermesidir. Yapılan çalışmalarda işlemci görev süresi ölçülerek iki endüstriyel sensörsüz kontrol metodu için değerlendirilmiştir. İşlemcinin bir kontrol döngüsü 16 kHz (62.5  $\mu$ s) olarak ayarlanmıştır. Şekil 11'de görüldüğü gibi KKG algoritması yaklaşık 8.9  $\mu$ s sürerken, GLG algoritması 9.2  $\mu$ s sürmektedir. Özellikle pompa, fan ve iklimlendirme uygulamalarında paralel çalışma, PLC haberleşmesi ve harici kontrol algoritmaları sebebiyle ek zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple kompleks uygulamalarda zaman ihtiyacının karşılanması amacıyla KKG'nin tercih edilmesi uygun olacaktır.



Şekil 9: 12 Nm yük altında 150 dev/dk hız referansı için KKG ve GLG performansı.



Şekil 10: Yüksüz 1500 dev/dk hız referansı için KKG ve GLG performansı.



Şekil 11: İşlemci zaman diyagramları.

#### 4. Sonuçlar

Kayan Kipli Gözlemleyici ve Genişletilmiş Luenberger Gözlemleyici sürekli mıknatıslı senkron motorların sensörsüz kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Model tabanlı sensörsüz kontrol metodlarının başında gelen iki metod uygulama alan ve koşullarına göre farklı avantajlar sunmaktadır. Yapılan çalışmada bir fan motoru için her iki metod test edilerek performans karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda KKG'nin sürekli hal hız hatasının GLG'ye daha yüksek olduğu, düşük hız bölgesinde GLG'nin KKG'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık KKG faz akım formları GLG'ye göre daha sinüzoidal olup, işlem süresi GLG'den 0.3 µs daha kısadır. Sonuç olarak fan uygulamaları için gereken özelliklerin GLG'de daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna erişilmiştir.

#### Kaynakça

- [1] S. Sirimanna ve ark., "A trade study on motor types for large hvac systems with integrated motor-compressors," IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, s: 1869-1874, 2019.
- [2] O.C. Kivanc ve S.B. Ozturk, "Low-Cost Position Sensorless Speed Control of PMSM Drive Using Four-Switch Inverter," *Energies*, Cilt: 12, No: 741, 2019.
- [3] J. Sorge, X. Liu, M. Hofmann ve B. Eckardt, "High Performance GaN Inverter for High-Speed Application," International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, s: 1-9, 2023.
- [4] R. Krishnan ve A. S. Bharadwaj, "A review of parameter sensitivity and adaptation in indirect vector controlled

induction motor drive systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt: 6, No: 4, s: 695-703, 1991.

- [5] J. Lara, J. Xu ve A. Chandra, "Effects of Rotor Position Error in the Performance of Field-Oriented-Controlled PMSM Drives for Electric Vehicle Traction Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 63, No: 8, s: 4738-4751, 2016.
- [6] B. Kerdsup ve S. Kreuawan, "Design of synchronous reluctance motors with IE4 energy efficiency standard competitive to BLDC motors used for blowers in air conditioners," IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, USA, s: 1-6, 2017.
- [7] F.J.T.E. Ferreira ve A.T. Almeida, "Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems - Part 1: System efficiency improvement," IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Detroit, USA, s: 1-8, 2016.
- [8] D. Xu, B. Wang, G. Zhang, G. Wang ve Y. Yu, "A review of sensorless control methods for AC motor drives," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, Cilt: 2, No: 1, s: 104-115, 2018.
- [9] M. Pacas, "Sensorless Drives in Industrial Applications," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Cilt: 5, No: 2, s: 16-23, 2011.
- [10] B. Bendjedja ve S. Chouireb, "Comparative Study Between Sensorless Vector Control of PMSM Drives based on MRAS, SMO and EKF Observers," International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAECSS), BLIDA, Algeria, 2023, s: 1-6.
- [11] S.C. Yang ve R.D. Lorenz, "Comparison of resistance-based and inductance-based self-sensing controls for surface permanent-magnet machines using high-frequency signal injection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Cilt: 48, No: 3, s: 977-986, 2012.
- [12] H. Jang, J.I. Ha, M. Ohto, K. Ide ve S.K. Sul, "Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Cilt: 40, No: 6, s: 1595-1604, 2004.
- [13] X. Zhang, G. Tian, Y. Huang ve Z. Lu, "A Comparative Study of PMSM Sensorless Control Algorithms: Model Based vs Luenberger Observer," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hangzhou, China, 2016, s: 1-6, 2016.
- [14] C.J.V. Filho, D. Xiao, R.P. Vieira ve A. Emadi, "Observers for High-Speed Sensorless PMSM Drives: Design Methods, Tuning Challenges and Future Trends," *IEEE Access*, Cilt: 9, s: 56397-56415, 2021.
- [15] Z. Zhang, L. Kong, Y. Wu, S. Zhang ve Z. Liu, "PMSM Sensorless Control based on Adaptive Luenberger Observer," 37th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Beijing, China, s: 398-403, 2022.
- [16] Q. Mi ve R. Ma, "A Novel Luenberger Observer for the Sensorless Speed Control of PMSM," International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Shenzhen, China, s: 1-7, 2021.
- [17] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada ve Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Cilt: 38, No: 4, s: 1054-1061, 2002.

- [18] G. Tian, Y. Yan, W. Jun, Z. Y. Ru ve Z. X. Peng, "Rotor Position Estimation of Sensorless PMSM Based on Extended Kalman Filter," IEEE International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA), Hefei, China, s: 12-16, 2018.
- [19] J.S. Kim ve S.K. Sul, "High performance PMSM drives without rotational position sensors using reduced order observer," IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando, USA, s: 75-82, 1995.
- [20] V.I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 40, No: 1, s: 23-36, 1993.
- [21] J. Sun, Y. Yang, M. Gu, M. Fan ve M. Xie, "An Improved Control Strategy Based On Sliding Mode Observer for Sensorless PMSM Drives," 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Nangjing, China, s: 137-142, 2022.
- [22] H.N. Tran ve J. W. Jeon, "Robust Speed Controller Using Dual Adaptive Sliding Mode Control (DA-SMC) Method for PMSM Drives," *IEEE Access*, Cilt: 11, s: 63261-63270, 2023.
- [23] B. Wang, Y. Shao, Y. Yu, Q. Dong, Z. Yun ve D. Xu, "High-Order Terminal Sliding-Mode Observer for Chattering Suppression and Finite-Time Convergence in Sensorless SPMSM Drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt: 36, No: 10, s: 11910-11920, 2021.
- [24] G.R. Gopinath ve S.P. Das, "An Extended Kalman Filter based Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Improved Dynamic Performance," IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, s: 1-6, 2018.
- [25] W. Li, X. Wen ve J. Zhang, "Comparison of MRAS and SMO method for sensorless PMSM drives," 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, s: 1-4, 2019.
- [26] O. C. Kivanc ve S. B. Ozturk, "Sensorless PMSM Drive Based on Stator Feedforward Voltage Estimation Improved With MRAS Multiparameter Estimation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Cilt: 23, No: 3, s: 1326-1337, 2018.
- [27] S. Bolognani, S. Calligaro ve R. Petrella, "Design Issues and Estimation Errors Analysis of Back-EMF-Based Position and Speed Observer for SPM Synchronous Motors," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Cilt: 2, No: 2, s: 159-170, 2014.
- [28] M.M.A. Avcı, "Wide Speed Sensorless Control of PMSM Drive With Smooth Transition Between HFSI and Extended Luenberger Observer," Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2023.