

Sabit mıknatıslı senkron generatörlü değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dayanıklı hibrit sensörsüz denetimi

Robust hybrid sensorless control of variable speed wind turbine with permanent magnet synchronous generator

Murat KARABACAK^{1*}, Fuat KILIÇ²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
muratkarabacak@sakarya.edu.tr

²Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye
fuatkilic1@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 13.07.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.98360
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG) sürücü sisteminin değişken hızlarda dinamik cevabını iyileştirmek ve hız (mekanik) sensörsüz çalışma sağlamak için hibrit bir gözlemleyici ile birlikte ikinci dereceden kayan kipli hız denetimi beraber önerilmektedir. Önerilen denetim sisteminde, anlık hız değişimi ve parametre değişimleri gibi bozucu etkilerin var olduğu durumlarda, sürücü sisteminde mekanik sensör kullanılmadan dış bozucu etkilere karşı dayanıklı hız cevabının elde edilmesi amaçlanmaktadır. SMSG'ün denetiminde, gözlemleyici-denetleyici yapısının basit ve uygulanabilirliğinin kolay olması amacıyla ikinci dereceden kayan kipli gözlemleyici (üstün burulma algoritması) ve basit bir Kalman Filtresi yapısı kullanılmaktadır. Bu sayede, klasik kayan kip gözlemleyici-denetimi yapısının önemli dezavantajlarından biri olan çatırdama etkisi azaltılmakta ve hız referansı değişimlerine karşı iyi bir dinamik hız cevabı elde edilmektedir. Sonuçlar, klasik kayan kip gözlemleyici yapısı ile karşılaştırılmakta ve aralarındaki farklar gösterilmektedir.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr türbini, SMSG, Hibrit gözlemleyici, Üstün burulma gözlemleyicisi, Çatırdama

Abstract

In this study, in order to improve dynamic performance of variable speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) drive system and obtain a speed (mechanic) sensorless operation, a second order sliding mode controller together with a hybrid observer are proposed. In the presence of instantaneous speed change and disturbance effects such as parameter and load torque deviations, it is aimed at developing a robust speed response against all uncertainties without using a mechanical sensor in the drive system. In controlling PMSG, a second order sliding mode observer and a simple Kalman Filter, hybrid structure, are utilized in view of their simple observer-controller structure. Thanks to this the structure, chattering effect, one of the important disadvantages of classical sliding mode observer-controller structure, is reduced and a good dynamic speed response is yielded in variable speed operation. Results are compared to classical sliding mode and differences between the hybrid observer-controller and the classical system are revealed.

Keywords: Wind turbine, PMSG, Hybrid Observer, Supertwisting observer, Chattering

1 Giriş

Sabit mıknatıslı senkron generatörler (SMSG) elektrik enerjisi üretimi için küçük ve orta ölçekli güçlerde imal edilirler. SMSG'ler, asenkron generatörleri de içeren rüzgâr türbinleriyle karşılaştırıldıklarında pek çok önemli avantajlara sahiptirler. Örneğin, rotor devresinde ilave uyarıya ihtiyaç duymadıklarından dolayı bakır kayıpları oluşturmazlar, yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler dolayısı ile boyut olarak daha küçük yapıda imal edilmeleri mümkün hale gelir ve üretim maliyetleri de azalır. SMSG'ler, redüktör sistemine sahip olmadıklarından daha az bakım ihtiyacı ortaya çıkar ve yüksek verime sahiptirler [1].

SMSG'lü değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan enkoderlerin (mekanik sensörlerin) doğrudan ve dolaylı olarak neden olduğu arıza durumlarına ait bazı istatistiksel bilgiler şu şekildedir: Enkoderlerin doğrudan neden olduğu arıza oranı %14 civarındadır. Dolaylı olarak neden oldukları arıza oranları %40 civarındadır. Enkoder bileşenlerinin arızaları maliyete, zaman kaybına ve elektrik üretiminde kesintiye yol açtılarından dolayı sensörsüz denetim alternatif denetim şekli olarak ortaya çıkar [2]. SMSG'lerin hız denetiminde sensörsüz denetim tekniği, tek başına kullanılabileceği gibi enkoder bileşeninin yedeği olarak ta kullanılabilir. Bu sebeple,

enkoderlerden dolayı oluşan problemler çeşitli sensörsüz denetim algoritmaları ile çözülmeye çalışılmaktadır.

Bu denetim algoritmalarından literatürde kabul görmüş olanları; kayan kipli gözlemleyici tabanlı, model referans adaptif sistemler tabanlı, Luenberger gözlemleyicisi tabanlı, zıt-EMK gözlemleyicisi tabanlı ve Kalman filtresi tabanlı hız denetimi ve diğerleridir. Bahsi geçen sensörsüz denetim algoritmalarında kayan kip gözlemleyicisi dışındaki diğer algoritmalar, parametre değişimleri, anlık referans girişi değişimleri ve bozucu etkilere karşı daha hassastırlar. Sıcaklık ve diğer etkiler yoluyla sistem parametreleri değiştiğinde, sistemin denetim yöntemi bu değişimlere karşı dayanıklı olmak zorundadır.

Model tabanlı kestirim gözleme yöntemleri tam dereceli ve indirgenmiş dereceli olabilirler ve sürekli/süresiz geri beslemeye ihtiyaç duyarlar. Model tabanlı gözlemleyiciler adaptif, dayanıklı ve zıt-EMK gözlemleyicileri gibi sınıflara ayrılırlar. Bu tip gözlemleyici yapıları kullanımında, parametre değişimlerine karşı adaptasyon yapılmak zorundadır. Luenberger ve zıt-EMK tabanlı gözlemleyici teknikleri, basit olmalarına rağmen model bilgisi gerektirirler, sonuç olarak parametre değişimlerinde adaptasyon algoritmaları kullanılmak zorundadır.

Kayan kipli sensörsüz denetim şemaları diğer denetim şemaları ile karşılaştırıldığında parametre değişimlerine ve dış bozucu etkilere karşı oldukça dayanıklıdır ayrıca hesaplama kolaylıklarından dolayı işlemcilerle yük getirmezler. Düşük hızlı çalışmalarda, denetim kararlılığını kaybetmeden diğer şemalara göre daha güvenli çalışma sağlarlar [3]. Kayan kipli denetimde en büyük dezavantaj, içinde yüksek frekans ve genlik bileşenleri içeren istenmeyen dalgalanma ve titreşimler olarak tanımlanan çatırdama etkisidir. Çatırdama etkisini gidermek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlardan en önemli olanları sınır bölgesi yöntemi, değişken kazanç yöntemi ve yüksek dereceli kayan kip yöntemleridir. Bunların dışında, doyma fonksiyonu, sigmoid fonksiyonu kullanımı ve yardımcı gözlemleyici yapısı diğer çatırtı azaltma yöntemleri olarak literatürdeki yerlerini almışlardır ancak dayanıklılık özelliği zayıflamaktadır.

Çalışmanın birinci bölümü girişe, ikinci bölümü rüzgâr türbini matematiksel modeline, üçüncü bölüm SMSG matematiksel modeli, dördüncü bölüm denetimci ve gözlemleyiciye, beşinci bölüm grafiksel sonuçlara ve son bölüm sonuçlara ayrılmıştır.

2 Rüzgâr türbini matematiksel modeli

Şekil 1’de mekanik sensörsüz denetimi yapılan değişken hızlı rüzgâr türbini şeması verilmektedir. Generatör tarafında 2 veya 3 kanattan oluşan sabit kanat açılı çok kutuplu rüzgâr türbini ele alınmıştır. Generatör çıkış gerilimi, çıkıştaki doğrultucuda doğrultularak şebeke tarafı eviricisi için referans gerilimi elde edilmektedir. Generatörden elde edilebilecek aktif güç, rüzgâr gücünün etkili olduğu türbin kanadı süpürme alanı A , hava yoğunluğu ρ (kgm^{-3}) ve rüzgâr hızı (ms^{-1}) bileşenlerinden oluşur. Aktif güç, rüzgâr gücünden elde edilip çıkışa aktarılan aktif güç sabiti C_p kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho A v_r^3 \quad (1)$$

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

Burada, v_r rüzgâr hızıdır. Güç sabiti, kanat ucu hız oranının λ doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Kanat ucu hız oranı generatör mili açısal hızı ω_r (rad/s) ve rüzgâr hızına bağlıdır.

$$\lambda = \frac{r \omega_r}{v_r} \quad (3)$$

Burada r (m) kanat yarıçapını ifade eder. Güç sabiti deneysel olarak veya yazılım tabanlı olarak elde edilebilir. Her iki durumda da polinom yaklaşımı ile aşağıdaki ifade kullanılır [4].

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 5 \right) \exp \left(\frac{21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (4)$$

3 Sabit mıknatıslı senkron generatörün matematiksel modeli

Sabit mıknatıslı senkron generatörün yüzey mıknatıslı olduğu kabul edilerek senkron referans çatıda yüzey mıknatıslı SMSG’nin matematiksel modeli;

$$V_q = R i_q + L \frac{d i_q}{dt} + \omega_e L_d i_d - \omega_e \lambda_m \quad (5)$$

$$V_d = R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - \omega_e L_d i_q \quad (6)$$

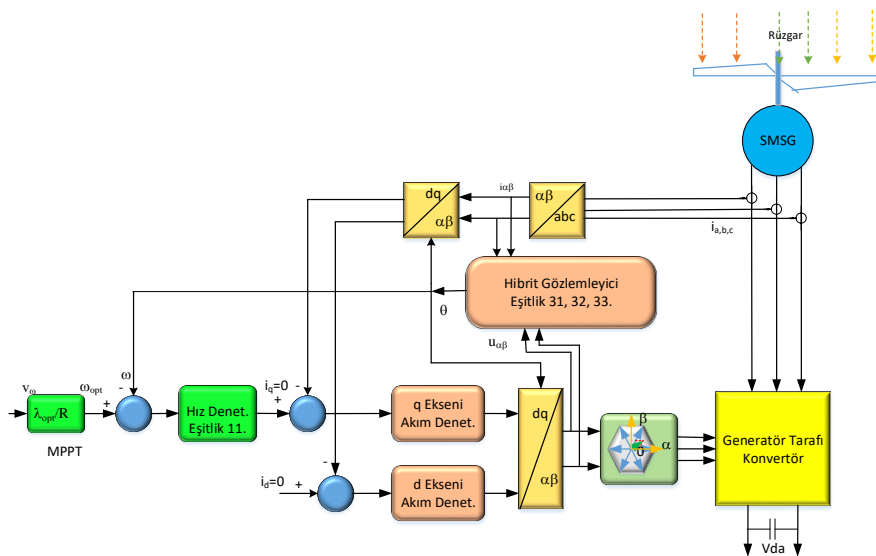
$$T_g = J \frac{d \omega_r}{dt} + B \omega_r + T_m \quad (7)$$

$$T_g = \frac{3 P_p \lambda_m}{2} i_q \quad (8)$$

$$\theta_e = P_p \theta_r \quad (9)$$

denklemleri ile verilir.

Burada, θ_r rotor konumu, ω_r rotor açısal hızı, V_d, V_q, i_d, i_q d ve q eksenli gerilimleri ve akımları, T_g, T_m, θ_e generatör moment, mekanik moment ve elektriksel konum, λ_m, P_p, J, B sırası ile mıknatıs akısı, kutup çifti, atalet moment ve sürtünme sabitidir.



Şekil 1: SMSG generatör tarafı denetimine ait blok şema.

4 Sabit mıknatıslı senkron generatörün sensörsüz denetimi

Kapalı çevrim denetim sistemlerinde klasik PI denetimci endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Denetimci katsayıları, zaman domeninde veya frekans domeninde gerçekleştirilen tasarım durumuna göre belirlenir. Zaman domeni cevaplarında yükselme zamanı, oturma zamanı, frekans bandı ve sönümlenme faktörü, denetimci parametre seçimi için önemli büyüklüklerdir. Açık çevrim ve kapalı çevrim Bode eğrileri ise frekans cevabı için kullanılan tasarım yöntemleridir. Kapalı çevrim denetimde sistemdeki parametrelerin değişimi durumunda, PI denetimci performansında kötüleşme meydana gelir. Ayrıca referans set değeri aşımı ve yük momenti bozucu etkisine karşı geç tepki gibi bazı dezavantajlar mevcuttur.

4.1 Hız denetim döngüsü için ikinci dereceden kayan kip yöntemi

Kapalı çevrim denetim performansını geliştirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlilerinden biri kayan kip denetimcisidir. Kayan kip denetimciler, parametre değişimleri ve bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve hızlı cevap süresi avantajlarına sahiptirler. Çatırdama etkisini gidermek ve mevcut dayanıklılık özelliğinden ödün vermeden denetim işlemini gerçekleştirmek için bu çalışmada ikinci dereceden kayan kip yöntemi kullanılmıştır.

Literatürde verilen yüksek dereceli kayan kip denetim yöntemleri (YDKK), klasik kayan kip (KKK) yöntemlerine göre üstünlük sağlarlar. Bundan dolayı YDKK yöntemleri, yalnızca çatırdamayı azaltmakla kalmaz aynı zamanda tüm belirsizliklere ve bozucu etkilere karşı dayanıklılık özelliğinden ödün vermeden denetim sağlarlar.

Bazı YDKK yöntemleri parametrelerden bağımsız olarak sistemlerin denetim işlemini gerçekleştirme yeteneğine sahiptirler.

Kayan kip denetimde, kayan kip değişkeni $s(t, x)$ olarak ifade edilir. Kayan kip değişkeni, durum değişkenlerini içerir [5],[6]. Kayan kip değişkeninin değeri, signum fonksiyonunun kullanılması ile [+1, -1] aralığında değişen değer olarak karşımıza çıkar. Kazanç katsayısı ile çarpılarak denetimde dayanıklılık sağlanması için genliği değiştirilir. KKK yönteminde, amaç değişkeninin $s(t, x) = 0$ yapılmasıdır başka bir deyişle değişkenin denge noktasına (sıfır) ulaşması sağlanır. Bu temel kanun Filippov yaklaşımı olarak bilinir. Bu yaklaşım, çatırdama etkisinin fazla olmasından dolayı denetim sistemlerinde tercih edilmez. Utkin tarafından eşdeğer denetim kavramı ortaya atılmıştır. Eşdeğer denetimin elde edilmesi için kayan kip değişkeninin türevi alınır ve temel değişkene eklenir. Kayan kip değişkeni ve eşdeğer denetim değişkeninin $\dot{s}(t, x) = 0$ yapılması, çatırtı etkisinin azaltılması bakımından çok önemlidir.

Diğer önemli bir kavram ise görece derecedir. Basit olarak görece derece kavramı, denetim girişinin denetim değişkeni türevinde görülmesi durumu için kullanılır. Görece derece r ile temsil edilirse, n . dereceden kayan kip denetim aşağıdaki şartlara bağlıdır [7].

$$s(t, x) = \dot{s}(t, x) = \dots = s^{r-1}(t, x) = 0 \quad (10)$$

Denklemden anlaşılacağı üzere, görece derece kavramına göre kayan kip değişkeni ve türevlerinin değerlerinin sıfıra

götürülmesi gerektiği anlaşılır. Buna göre, kaskad bağlı denetimci yapıları diğer deyimle iç içe döngülü denetim yapıları için değişik YDKK yöntemleri önerilmiştir. Bunlardan bazıları, görece derece kavramına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir. Görece derece $r = 1$ için üstün burulma (supertwisting) algoritması (ÜBA),

$$u = \lambda |s|^{1/2} \text{sign}(s) + W \int_0^t \text{sign}(s) dt \quad (11)$$

şeklinde verilmektedir. Üstün burulma algoritması iki terimli denetim çıkışı içermektedir. Bu algortmada, her hangi bir kayan kip değişkenin türevine ihtiyaç yoktur. Süreksiz terim ve integral teriminden oluşan sürekli terim sayesinde denetim çıkışında sürekli durumlu denetim işareti elde edilir [8]-[10]. Bu durum KKK yöntemlerine göre zararlı çatırdama etkisinin azaltılması için sürekli denetim işareti elde edilmesi açısından çok önemlidir. Denklem (10)'daki λ ve W denetim katsayılarıdır. Denetimde, Denklem (9)'daki sistemin ikinci dereceden denetime ait olduğunu ispat etmek için, kayan kip değişkeninin durum değişkenlerine bağlı birinci dereceden türevi alınır.

$$\dot{s}(t, x) = \phi(t, x) + \gamma(t, x)u \quad (12)$$

Ortaya çıkan iki parçalı fonksiyon zamana ve durum değişkenlerine bağlıdır ve sınırlı düzgün fonksiyondur. Bu sınırlar aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$0 < \Gamma_{min} \leq \frac{\partial \dot{s}(t, x, u)}{\partial u} \leq \Gamma_{max} \quad (13)$$
$$|\phi(t, x)| \leq \Phi$$

$\Gamma_{min}, \Gamma_{max}, \Phi$ sabit belirli üst ve alt sınırlardır. Bu sınırlar denetimde dayanıklılık özelliğinin kaybedilmemesi için yeterince büyük seçilmelidir. KKK yöntemlerinde kayan kip değişkeni ve türevlerinin sıfır değerine ulaşması için ulaşma zamanı kavramı mevcuttur. Yakınsama zamanı, kayan kip değişkeni olarak seçilen denetim hatasının değerinin sıfıra eşitlendiği süredir ve yaklaşık olarak hesaplanır. Bu hesaplama sayesinde sistem modeline göre dinamik cevap hızı hakkında yorum yapılır. YDKK yöntemlerinde ise yakınsama zamanı kavramı yerine sınırlı zaman yakınsaması kavramı kullanılır. Aynı şekilde, hata değişkeninin sıfır değerine eşit olduğu zaman aralığı bu kavramı açıklar. Sınırlı zaman yakınsamasında çeşitli yöntemlerle elde edilir. Literatürde en çok kabul gören yöntemler diferansiyel geometri yöntemi ve Lyapunov fonksiyonu tabanlı yöntemlerdir. Diferansiyel geometri yöntemlerine göre denetim kazançları, sınırlı zaman yakınsama süresinin kestirilmesi için,

$$W = \Phi / \Gamma_{min} \quad \lambda^2 \geq \frac{4\Phi\Gamma_{max}(W+\Phi)}{\Gamma_{min}^2\Gamma_{max}(W-\Phi)} \quad (14)$$

şeklinde elde edilir. Bu şartlar altında kayan kip değişkeninin türevinin $\dot{s}(t, x)$, sınırlı zaman süresi içerisinde sıfıra yakınsaması gerekir. t_r sınırlı zaman yakınsama süresi,

$$t_r = \frac{7.6s(0)}{W - C} \quad (15)$$

ifadesi ile verilir. Burada $s(0)$ kayan kip değişkenin başlangıç anındaki değeridir. C değeri ise bozucu etkilerin var olduğu durumda, bozucu etkilere bağlı katsayıdır.

Literatürde farklı ikinci dereceden kayan kip yöntemleri önerilmektedir. Bu yöntemler, burulma, optimal-altı ve terminal kayan kip yöntemleri olarak sayılabilir. Ancak bu yöntemlerin dezavantajları da, klasik kayan kip yöntemleri gibi çatırdama etkilerini içermeleridir. Bu denetimci tipleri çıkış değişkeninin birinci ve ikinci türevini kullanırlar. Bu yöntemlere alternatif olarak ÜBA yöntemi ortaya atılmıştır. Sürekli çıkış işaretine sahip ÜBA yöntemi, dayanıklı tam türevleyici ve durum gözlemleyici gibi algoritmalarda da uygulamada başarı ile gerçekleştirilmişlerdir. Hız döngüsü için kayan kip değişkeni veya anahtarlama yüzeyi olarak tanımlanan hata ve hatanın birinci dereceden türevi bulunursa,

$$s = \omega_{ref} - \omega \quad (16)$$

$$\dot{s} = \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega} \quad (17)$$

denklemleri elde edilir.

$$\dot{s} = \dot{\omega}_{ref} - a i_q - c \omega_r - b T_m \quad (18)$$

$$\ddot{s} = \ddot{\omega}_{ref} - a \dot{i}_q - c \dot{\omega}_r \quad (19)$$

Burada $a = 3P_p \lambda_m / 2J$, $b = 1/J$, $c = B/J$ kayan kip değişkeninin birinci dereceden türevinin Denklem (20)'de verilen ÜBA karakteristik denklemini gerçeklediği görülür.

$$\dot{s} = \phi(t, x, u) + \gamma(t, x, u)\dot{u} \quad (20)$$

Akım denetimi için referans oluşturan q eksenli akım denklemi ile karakteristik denklem karşılaştırıldığında, istenen eşleşmenin elde edildiği görülmektedir. Seçilen katsayılar, denklem (12)'deki sınırlarına uygun olarak,

$$0 < \Gamma_{min} \leq a \leq \Gamma_{max} \\ |\dot{\omega}_{ref} - c \omega_r - b T_m| \leq \Phi \quad (21)$$

elde edilir [11]. ÜBA algoritmalarının görünen dezavantajlarından bir tanesi ise kararlılık analizlerinin geometrik yöntemlere dayanmasıdır. Çünkü yüksek dereceli kayan kip yöntemlerinde kararlılık analizi için Lyapunov fonksiyonları önermenin zorlukları vardır. Karesel Lyapunov benzeri fonksiyonlar ile bu kusurların ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Lyapunov fonksiyonu tabanlı kararlılık analizi yapılması için doğrusal olmayan bir fonksiyon aşağıdaki biçimde yazılabilir [7].

$$\dot{s} = f(t, s) + u \quad (22)$$

Burada, $f(t, s)$ bilinmeyen sınırlı dış bozucu etkilerdir. Genel olarak sınırlar $|f(t, s)| \leq \delta |s|^{1/2}$ ve $\delta > 0$ olduğu kabul edilerek, diferansiyel denklem sistemi halinde yazılmak istenirse,

$$\dot{x}_1 = k_1 |x_1|^{1/2} \text{sign}(x_1) + x_2 + \zeta_1(t, x) \\ \dot{x}_2 = k_2 \text{sign}(x_1) + \zeta_2(t, x) \quad (23)$$

sistemi oluşturulur. Burada, $\zeta_1(t, x)$ ve $\zeta_2(t, x)$ dış bozucu etkilerdir ve kararlılık analizinde sıfır olarak kabul edilirler. Önerilen Lyapunov tabanlı doğrusal karesel fonksiyonu aşağıdaki denklemlerdeki gibidir.

$$A^T P + P A + Q = 0 \\ V(x) = \xi^T P \xi \quad (24)$$

Burada $A, P, Q \in R^{n \times n}$ ve P, Q simetrik matrislerdir. Doğrusal bir sistem için Lyapunov eşitliği tekrar yazılırsa,

$$V(z) = z^T P z \quad (25)$$

ve karesel denklemin türevi alınır,

$$\dot{V}(z) = (Az)^T P z + z^T P (Az) = -z^T Q z \quad (26)$$

denklemi elde edilir. Denklemden anlaşılacağı üzere Lyapunov aday fonksiyonunun türevi negatif işaretlidir. Bundan sonraki aşama Q matrisi ile birlikte P karakteristik Hurwitz polinomunun negatif işareti sağlanması için uygun olarak seçilmesidir. Detaylı kararlılık analizi [12] numaralı kaynakta verilmektedir.

4.2 Hibrit ikinci dereceden kayan kip-kalman filtresi gözlemleyicisi

Enkoder bilgisinin kullanıldığı uygulamalarda, arıza sonucu hatalı ölçüm, tamamen çıkış bilgisi kaybına neden olurlar. Ayrıca enkoder maliyetinin fazla olduğu durumlarda sensörsüz denetim metodları önemli bir çözüm yolu haline gelir. Sensörsüz denetim yöntemleri matematiksel temellere dayanmaktadır. İşlemci hızlarının artması ile birlikte bu yöntemler günümüzde hızla gelişmektedirler. Bu noktadan hareketle SMSG' nin sensörsüz denetimi için ikinci dereceden kayan kipli gözlemleyici (üstün burulma gözlemleyicisi) yapısı Kalman filtresi yapısı ile birleştirilerek hibrit gözlemleyici yapısı elde edilmektedir. Bu sayede, hız denetimci amaçları ile paralel olarak ve klasik kayan kipli gözlemleyicinin üstün yanları korunarak bozucu etkilere karşı dayanıklı aynı zamanda çatırtı etkisinin en az düzeye indirildiği sensörsüz denetim yapısı elde edilmektedir.

SMSG'nin sensörsüz denetiminde temel amaç, θ_r rotor konum bilgisi ve ω_r mil hız bilgisine ulaşmaktır. Bu amaç için durağan referans çatıda tanımlanan makine denklemlerinden akı tabanlı zıt EMK bilgilerinin gözlenmesi gerekmektedir. Zıt EMK bilgilerine ulaşmak için durağan referans çatıda yüzey mknatıslı makine denklemleri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\frac{di_\alpha}{dt} = \frac{1}{L} u_\alpha - \frac{R_s}{L} i_\alpha - \frac{1}{L} e_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} = \frac{1}{L} u_\beta - \frac{R_s}{L} i_\beta - \frac{1}{L} e_\beta \quad (27)$$

Burada, $i_\alpha, i_\beta, u_\alpha, u_\beta, e_\alpha, e_\beta$ sırası ile α, β eksenleri stator akımları, stator gerilimleri ve stator zıt EMK bileşenleridir. i_α, i_β stator akımları, stator faz akımlarından Clarke dönüşümleri kullanılarak elde edilir. Gerilimler ise darbe genişlik modülasyonu işaretlerinin alçak geçiren filtreden geçirilmesi ile elde edilirler. Zıt EMK bileşenleri, aşağıdaki akı denklemlerine dayalı olarak elde edilirler.

$$\psi_\alpha = \lambda_m \cos(\theta_r) \\ \psi_\beta = \lambda_m \sin(\theta_r) \quad (28)$$

Akı türevleri ile ilgili gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra,

$$e_\alpha = -\omega_r \lambda_m \sin(\theta_r) \\ e_\beta = \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r) \quad (29)$$

zıt EMK bileşenlerinin açık şekli elde edilir.

Durum değişkenlerine göre ikinci dereceden kayan kipli gözlemleyici yapısı genel yapıda,

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}_1 &= \tilde{x}_2 + \lambda_1 |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) \\ \hat{\dot{x}}_2 &= W_1 \text{sign}(e_1)\end{aligned}\quad (30)$$

denklemleri ile verilir. Burada x_1 ve x_2 gözlemlenen değişkenlerdir. e_1 sistem durum değişkenleri arasındaki farktan kaynaklanan hatayı temsil eder. Tilda ve şapka işaretleri sırasıyla gözlemlene hatasını ve gözlemlene değeri temsil eder.

$$\begin{aligned}\tilde{i}_\alpha &= \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \tilde{i}_\beta &= \hat{i}_\beta - i_\beta\end{aligned}\quad (31)$$

Karakteristik denkleme göre durağan eksende SMSG'ye ait gözlemleyici yapısı,

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} &= \frac{1}{L} u_\alpha - \frac{R_s}{L} \hat{i}_\alpha - \frac{1}{L} \hat{e}_\alpha - \lambda_1 |\tilde{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\tilde{i}_\alpha) \\ \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} &= W_1 \text{sign}(\tilde{i}_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} &= \frac{1}{L} u_\beta - \frac{R_s}{L} \hat{i}_\beta - \frac{1}{L} \hat{e}_\beta - \lambda_2 |\tilde{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\tilde{i}_\beta) \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} &= W_2 \text{sign}(\tilde{i}_\beta)\end{aligned}\quad (32)$$

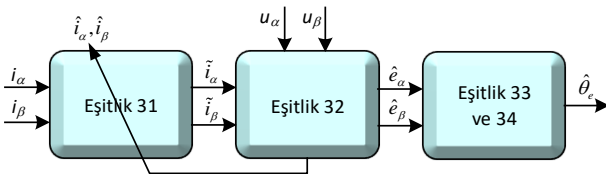
denklemleri ile bulunur. İkinci olarak basit bir Kalman filtresi yapısı kayan kip gözlemleyici yapısına eklenerek hibrit yapı elde edilir. Kalman filtresinin kullanılma amacı çatırtı etkisinin en az düzeye indirilmesi ayrıca zıt EMK işaretlerinde oluşabilecek doğrusal bileşenli ofset değerinden kurtulmaktır. İntegral işleminin kullanılması ile çatırdama etkisi Kalman filtresi çıkışında dayanıklılık özelliğinden ödün verilmeden önemli anlamda azaltılmış olur. Basit Kalman filtresine ait yapı,

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{E}_\alpha}{dt} &= -\hat{\omega}_e \hat{E}_\beta - k_1 (\hat{E}_\alpha - \hat{e}_\alpha) \\ \frac{d\hat{E}_\beta}{dt} &= \hat{\omega}_e \hat{E}_\alpha - k_1 (\hat{E}_\beta - \hat{e}_\beta) \\ \frac{d\hat{\omega}_e}{dt} &= (\hat{E}_\alpha - \hat{e}_\alpha) \hat{E}_\beta - (\hat{E}_\beta - \hat{e}_\beta) \hat{E}_\alpha\end{aligned}\quad (33)$$

denklemleri ile verilir. Burada, $\hat{E}_\alpha, \hat{E}_\beta$ Kalman filtresi çıkışında elde edilen zıt EMK bilgileridir. $\hat{\omega}_e$ elektriksel hız ise elde edilen bilgilerden çıkarılır. Elektriksel konum bilgisi,

$$\hat{\theta}_e = -\tan^{-1} \left(\frac{\hat{E}_\alpha}{\hat{E}_\beta} \right)\quad (34)$$

fonksiyonu yardımıyla elde edilir.



Şekil 2: Hibrit gözlemleyici blok şeması

Şekil 2'de hibrit gözlemleyici şeması verilmektedir.

Elektriksel konum bilgisine faz kilitlemeli döngü ile de ulaşılabılır. Bu çalışmada faz kilitlemeli döngü ele alınmamıştır. Hibrit gözlemleyiciye ait şema aşağıda verilmiştir.

5 Simülasyon sonuçları

Simülasyonu yapılan SMSG'nin sensörsüz denetiminde makine parametreleri; stator direnci $R_s = 2.35 \Omega$, stator endüktansı $L_s = 6.5 mH$, mıknatıslanma akısı $\lambda_m = 0.094 Wb$, gücü $P = 400 W$, anma momenti $T_L = 2.7 Nm$, atalet momenti $J = 0.31e - 4 kgm^2$, sürtünme katsayısı $B = 3e - 5 Nms$, gerilim $V = 200 V$ şeklindedir. Hız denetimcisi için katsayılar $\lambda = 12, W = 50$, gözlemleyici katsayıları ise $\lambda_1 = 5, W_1 = 1000$ $\lambda_2 = 5, W_2 = 1000$ olarak seçilmiştir.

Klasik kayan kipli gözlemleyici ve hibrit gözlemleyici için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hız, akımlar, konum ve generatör çıkış gerilimleri değerleri için her iki yöntem arasında birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 3a ve b'de klasik kayan kipli gözlemleyiciye ait grafiklere yer verilmiştir. Buna göre rastgele üretilen rüzgar profiline göre değişken hız durumunda, generatör gerçek rotor hızı ve gözlemleyici tarafından kestirilen hız grafikleri Şekil 3a'da görülmektedir. Şekil 3a'da görülen grafiklerin 0.5 ve 0.7 saniye arasındaki görüntüleri büyütülerek verilmektedir. Referans hız değerine, rotor hızı ve gözlemleyici tarafından kestirilen hızın aynı değere ulaştığı ve tahmin hatasının az olduğu görülmektedir. Şekil 3b'de ise akım kontrolcülerine geri besleme olarak girilen d ve q eksenine ait akımlar yer almaktadır. d eksen akı eksen olduğundan referansın sıfır olarak alındığı düşünülerek geri besleme akımının sıfır değeri etrafında küçük salınımlar yaptığı görülmektedir.

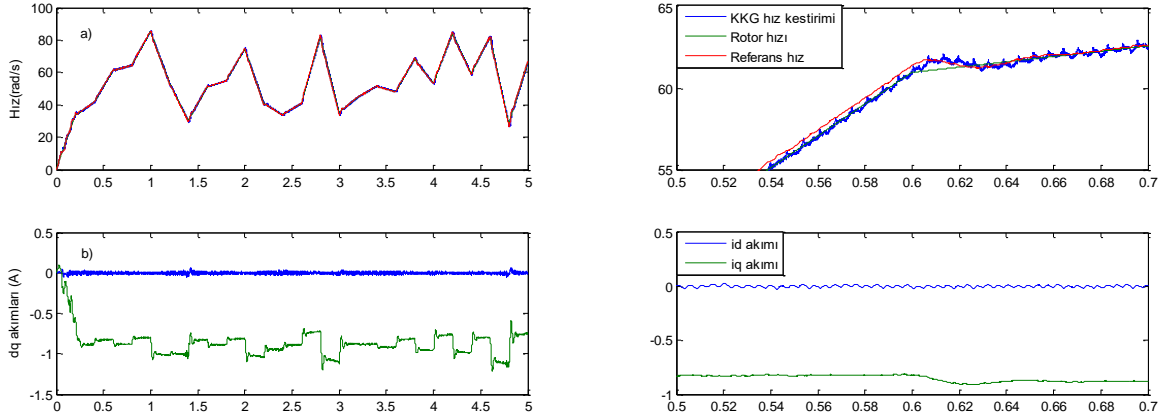
q eksen akımı incelendiğinde ise makine miline uygulanan tahrik momenti için generatör modunda negatif akım değerinin 1 A değerinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4a ve b'de rotor konumu ve buna karşılık klasik kayan kip gözlemleyici tarafından kestirilen konum grafikleri ve generatör çıkış gerilimleri görülmektedir. Kestirilen konum değeri ile rotor konumunun birbirini takip ettiği görülmektedir. Bunun yanında konum ve çıkış gerilimi grafiklerinde çatırtı etkisi gerçek sinyal etrafında küçük dalgalanmalarla izlenmektedir. Şekil 4a ve b'deki grafikler 0.5 ve 0.7 saniye aralığında ölçekli olarak verilmektedir.

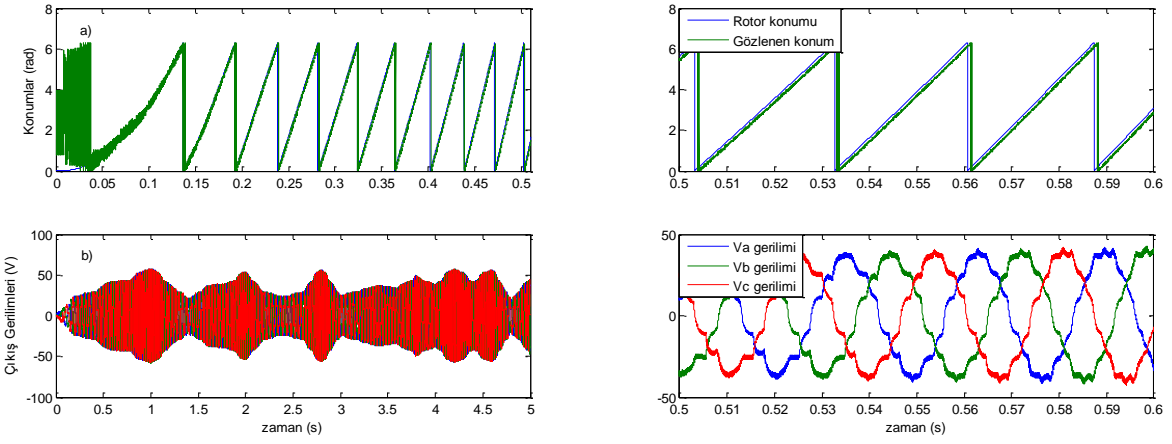
Şekil 5a ve b'de hibrit gözlemleyiciye ait hız ve d-q eksen akım bileşenleri grafikleri verilmektedir. Şekil 3a ve 3b'deki klasik kayan kip gözlemleyici sonuçları ile karşılaştırıldığında çatırtı etkisinin oldukça azaltıldığı görülmektedir. Şekil 5a ve b'deki 0.5 ve 0.7 saniye aralığında ölçekli olarak verilmektedir.

Şekil 6a ve b'de ise hibrit gözlemleyiciye ait konum grafikleri ve çıkış gerilimi grafikleri yer almaktadır. Şekil 4a ve 4b'deki grafiklerle karşılaştırıldıklarında tahmin edilen konum ve çıkış gerilimi grafiklerinin çatırtı etkisinden kurtuldukları görülmektedir. Şekil 6a ve b'deki 0.5 ve 0.7 saniye aralığında ölçekli olarak verilmektedir.

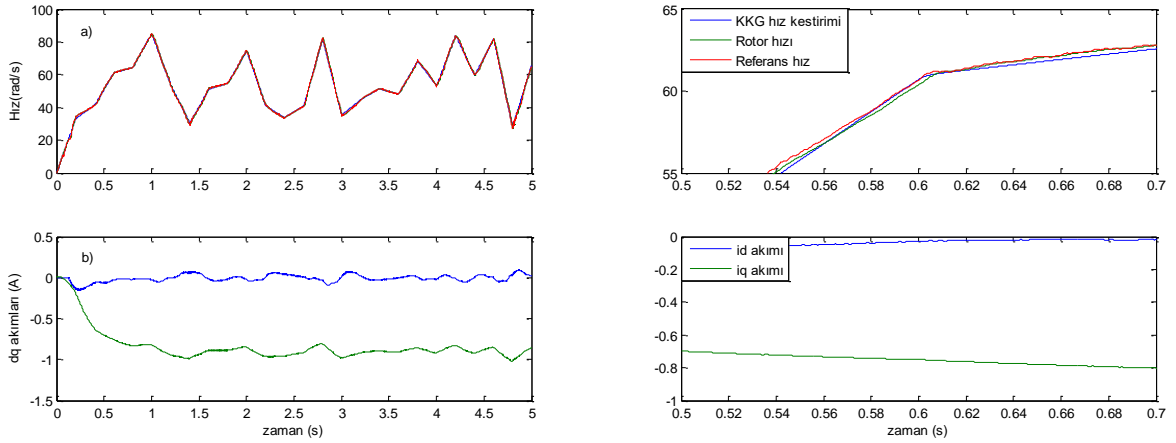
Şekil 7a ve b'de her iki yöntem için faz akımları grafikleri sunulmaktadır. Şekil 7c ve 7d'de karşılaştırma amacıyla grafikler aynı eksende çizdirilmektedir. Diğer durum değişkenleri gibi faz akımlarında da çatırdama etkisi azaltılmaktadır. Ayrıca sistem denetiminde dayanıklılık özelliğini test etmek için faz direnci ve endüktansı %50 oranında değiştirilmektedir. Bu durumda faz akımlarında büyük bir değişim gözlenmemektedir.



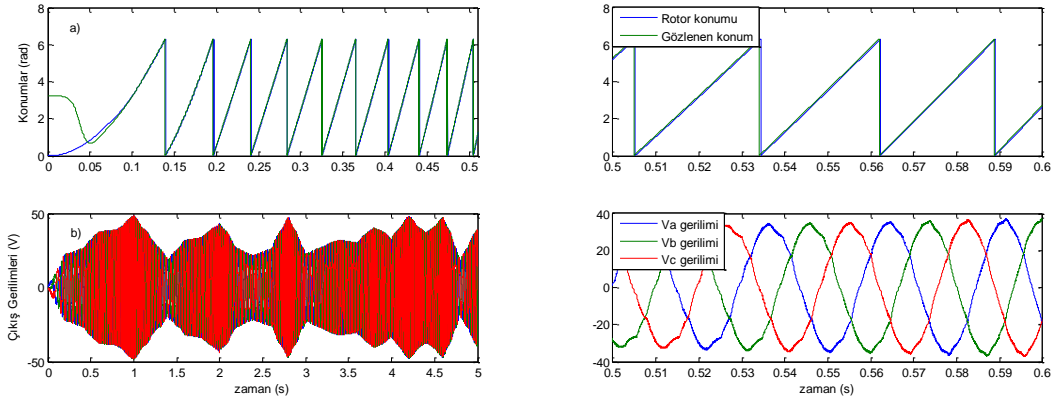
Şekil 3: (a): Klasik kayan kip gözlemleyici hız tahmini, rotor hızı ve türbin hız, (b): d-q eksenli akımları.



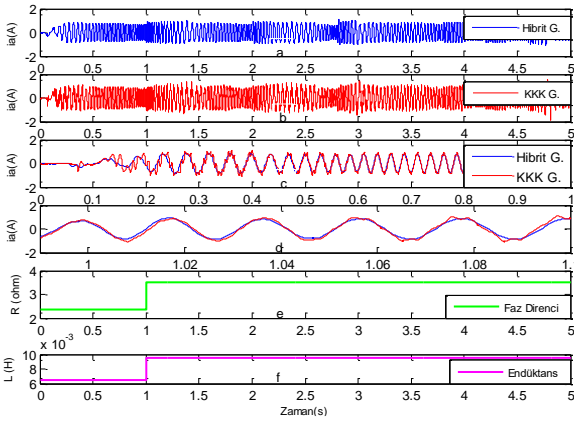
Şekil 4: (a): Klasik kayan kip gözlemleyici konum tahmini, (b): SMSG çıkış gerilimleri.



Şekil 5: (a): Hibrit gözlemleyici tahmin edilen hız, rotor hızı ve türbin hız, (b): d-q eksenleri akımları.



Şekil 6: (a): Hibrit gözlemleyici konum tahmini ve rotor konumu, (b): KMSG çıkış gerilimleri.



Şekil 7: (a): Hibrit gözlemleyici için faz akımı, (b): KKK gözlemleyici için faz akımı, (c): Her iki yöntem için faz akımları, (d): Parametre değişiminde her iki yöntem için faz akımları, (e): Faz direnci ve zaman içinde değişimi, (f): Endüktans ve zaman içinde değişimi.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, SMSG'ün hız ve konum tahmini için ikinci dereceden kayan kipli denetleyici ve basit bir Kalman filtresi tabanlı bir hibrit gözlemleyici gerçekleştirilmiştir. Denetim ise ikinci dereceden kayan kipli denetleyici kullanılmıştır. Sonuçlar klasik kayan kip gözlemleyici-denetimci yapısı ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, dayanıklı sensörsüz bir doğrusal olmayan denetim sistemi tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hız tahmininde ve denetim girişinde çaptırmanın az olması, basit bir yapıya sahip olması ve dış bozulmalara duyarsız olması sebebiyle ikinci dereceden kayan kip yapısının diğer gözlemleyici yöntemlerine göre üstün olduğunu göstermektedir.

7 Teşekkür

(Acknowledgement): Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 114E159).

8 Kaynaklar

[1] Huang N, He J, Demerdash N. "Sliding mode observer based position self-sensing control of a direct-drive PMSG wind turbine system Fed by NPC converters". *2013 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Chicago, USA, 12-15 May 2013.

- [2] Yang X, Gong X, Qiao W. "Mechanical sensorless maximum power tracking control for direct-drive PMSG wind turbines". *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, USA, 12-16 September 2010.
- [3] Huang K, Zheng L, Huang S, Xiao L, Li W. "Sensorless control for direct-drive PMSG wind turbines based on sliding mode observer". *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, China, 20-23 August 2011.
- [4] Rolán A, Luna Á, Rocabert J, Aguilar D, Vázquez G. "An approach to the performance-oriented model of variable-speed wind turbines". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Bari, Italy, 4-7 July 2010.
- [5] Utkin VI. *Sliding Modes in Control Optimization*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1992.
- [6] Erbatur K, Kaynak MO, Sabanovic A. "A study on robustness property of sliding-mode controllers: A novel design and experimental investigations". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(5), 1012-1018, 1999.
- [7] Hernández AG, Fridman L, Levant A, Shtessel Y, Leder R, Monsalve CR, Andrade SI. "High-Order sliding-mode control of blood glucose concentration via practical relative degree identification". *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Orlando, FL, USA, 12-15 December 2011.
- [8] Levant A, Alelishvili L. "Integral high-order sliding modes". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(7), 1-17, 2007.
- [9] Davila J, Fridman L, Levant A. "High-Order sliding observation and fault detection". *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, Korsika, 25-27 June 2008.
- [10] Liu J, Laghrouche S, Harmouche M, Wack M. "Adaptive-Gain second-order sliding mode observer design for switching power converters". *Control Engineering Practice*, 30, 124-131, 2014.
- [11] Fayez S, Salah L, El Bagdouri M. "An experimental comparative study of different second order sliding mode algorithms on mechatronic actuator". *American Control Conference*, San Francisco, CA, USA, 29 June-01 July 2011.
- [12] Moreno JA, Osorio M. "A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers". *47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 9-11 December 2008.