



Şebeke Bağlantılı Üç Fazlı Sincap Kafesli Asenkron Generatörün Değişken Rüzgâr Hızlarındaki Dinamik Cevabı

Mustafa DURSUN*, M. Kenan DÖŞOĞLU, Uğur GÜVENÇ

*Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce

(Alınış Tarihi/Received: 07.05.2019, Kabul Tarihi/Accepted: 24.06.2019)

*İlgili yazar/Corresponding Author: mustafadursun@duzce.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Şebeke tarafı kontrol
Generatör tarafı kontrol
SPWM
HPWM
LCL

Özet: Bu makalede şebeke bağlantılı üç fazlı sincap kafesli bir asenkron generatörün değişken hızlara karşı tepkisi incelenmiştir. Generatör tarafı ve şebeke tarafı iki adet sırt sırta bağlı evirici kullanılarak bir birine bağlanmıştır. Generatör tarafı kontrolde (GTK) dolaylı vektör kontrol tekniği ile moment kontrolü, şebeke tarafı kontrolde (ŞTK) ise doğrudan vektör kontrol tekniği ile DC bara gerilimi ve reaktif güç kontrol edilmiştir. Uygulama kolaylığı ve hızlı dinamik tepki vermesi açısından, generatör tarafındaki eviricide histerisiz bant kontrollü bir modülasyon tekniği (HPWM), şebeke tarafında ise yine uygulama kolaylığı açısından kolay olan bir diğer modülasyon tekniği sinüs darbe genişlik modülasyonu (SPWM) tercih edilmiştir. Bir filtre olmadan şebekeye güç aktarımı yapmanın güç olmasından dolayı şebeke tarafında da bir LCL filtre kullanılmıştır. Bütün bu kontrol stratejileri MATLAB/Simulink ortamında oluşturularak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sistemin, değişken rüzgâr hızlarına olan dinamik tepkisinin hızlı olduğu ve doğru akım bara geriliminin kararlı davranışı gözlenmiştir.

Dynamic Response At Variable Wind Speeds Of Grid Connected Three-Phase Squirrel Cage Induction Generetor

Keywords

Grid side control
Generator side control
SPWM
HPWM
LCL

Abstract: In this paper, the response of variable speeds with grid connected three-phase squirrel cage asynchronous generator is investigated. The generator side and the grid side are connected to each other using back-to-back inverters. In the generator side control (GSC), torque control was performed with the indirect vector control technique, in grid side control (GSC) with direct vector control technique were performed DC bus voltage and reactive power control. In terms of application simplicity and fast dynamic response, hysteresis band controlled modulation technique (HPWM) was used on the generator side converter. Another modulation technique, sinus pulse width modulation (SPWM) was preferred on the grid side converter. An LCL filter is also used on the grid side because it is difficult to transfer power to the grid without a filter. All these control strategies were obtained by performing MATLAB / Simulink environment. From the results obtained, it was observed that the dynamic response of the system to the variable wind speeds was fast and the steady-state behavior of the DC bus voltage was observed.

1. Giriş

Bugün dünyanın karşılaştığı ana zorluklardan biri de enerjiye olan talebin gün geçtikçe artmasıdır. Bu enerji talebindeki artış, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimini kritik bir araştırma konusu haline getirmiştir (J.

Dong, vd., 2016, S. Das, vd., 2018, X. Chen, vd., 2018). Rüzgardan gelen kümülatif küresel elektrik enerjisi üretimi belirgin bir şekilde artmıştır ve 2017 sonunda 539 GW'ye ulaşmıştır (GWEC 2018), böylece en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için ihtiyaç duyulan temel bileşenler rüzgâr türbini (RT), elektrik generatörü ve güç dönüştürücülerdir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde (REDS) kullanılan güç elektroniği dönüştürücülerinin detaylı bir incelemesi (F. Blaabjerg vd. 2013) 'de verilmiştir. Yaygın olarak kullanılan iki RT tipinden (sabit hızlı RT ve değişken hızlı RT), değişken hızlı rüzgâr türbini (DHRT), arttırılmış enerji dönüşüm verimliliği, iyileştirilmiş güç kalitesi ve düşük mekanik stres nedeniyle daha avantajlıdır (T. Ackermann, vd., 2012).

REDS'de yaygın olarak kullanılan generatörler, kalıcı mıknatıslı senkron generatörler (KMSG'ler), çift beslemeli asenkron generatörleri (ÇBAG'lar) ve sincap kafesli asenkron generatörlerdir (SKAG) (S. Das, vd., 2018, S. Saha, vd., 2018, E. Ebrahimzadeh vd., 2018, N. K. S. Naidu, vd., 2017, C. Zhang, vd., 2018, H. Zhao vd., 2014). Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) ve değişken hız üretimi için kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron generatörler (KMSG) doğrudan şebekeye bağlı değildir; generatör ve şebeke arasında bir elektronik güç dönüştürücü yerleştirilmiştir. Bir çalışmada, sabit hız üretimi için bir sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) kullanılmış ve generatör ile aynı kapasiteye sahip tam ölçekli bir güç dönüştürücü eklenerek, KMSG'de olduğu gibi değişken hızlarda tepkisi incelenmiştir (Bouaziz, B., vd., 2012). SKAG'lı değişken hız rüzgâr türbini, KMSG'ye kıyasla daha düşük maliyetle değişken hız üretimi gerçekleştirebilir ve mevcut sabit hız üretiminde kullanılan dar üretim alanı problemini çözebilir. Bu nedenle, değişken hızlı RT'ler ekonomik olarak önemlidir. Güç kalitesini standartlar tarafından önerilen sınırlar altında tutmak için, bunu kontrol amaçlarına dâhil etmek gereklidir.

Enerji dönüşüm sistemlerinde özellikle değişken hızlı sistemlerde sıklıkla tercih edilen generatör tipi SKAG'dır. Sincap kafesli asenkron generatörler, düşük maliyeti, sağlamlığı ve bakım gerektirmeyen çalışması nedeniyle yüksek performanslı, yüksek verimli endüstriyel uygulamalar için en çok tercih edilen elektrikli makinelerdir (P.N. Enjeti vd., 1990). Bu avantajlar, endüksiyon makinesini rüzgâr enerjisi uygulamaları için uygun kılar.

Rüzgâr enerjisinin olağanüstü büyümesine rağmen, araştırmacılar için şebeke entegrasyonu, rüzgârın tahmin edilemez doğası ve rüzgâr türbininin konumu gibi birçok zorluk vardır (Z. Alnasir vd., 2016). Rüzgâr türbinini elektrik şebekesine entegre etmek için daha gelişmiş modern jeneratörler, güç dönüştürücüleri ve kontrolörleri geliştirilmelidir (M. Seixas, vd., 2016).

Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sisteminden (REDS) üretilen güç doğrudan rüzgâr hızıyla orantılıdır. Bu nedenle, rüzgâr hızındaki küçük değişikliklerin çıkarılan güç üzerinde yüksek bir etkisi vardır. Şebeke voltajının sabit genlik ve frekansta olması gerektiğinden, bu güç şebekeyle bağdaşmaz. Bu nedenle, REDS'de maksimum güç ve sabit voltaj elde etmek için bazı kontrol stratejilerinin uygulanması gerekir (A.M. Howlader, vd., 2016). Bu nedenle maksimum güç noktası takibi algoritmaları kullanılmaktadır (M.A. Abdullah , vd., 2012, D. Kumar, vd., 2016, S.M. Tripathi, vd., 2015, B. Jain, vd., 2015).

Bu makalede de sıklıkla tercih edilen kanat uç hız oranı ile MPPT kontrol tekniği kullanılmıştır. Bu sayede sistemin şebeke ile entegrasyonu için gerekli olan güç akışı en verimli şekilde sağlanmıştır. Ayrıca sabit hızlı rüzgâr türbini sistemlerindeki eksikliği gidermek için sırt sırta bağlı dönüştürücü tarafından bir DA-bara kapasitörüyle birbirine bağlanmış iki gerilim kaynağı dönüştürücüsünden oluşan bir kontrol yöntemi kullanılmıştır. İlk dönüştürücü, SKAG ile generatör tarafı kontrol (GTK) adı verilen DA bara kapasitörü arasında kalır. GTK'nın işlevi, SKAG için makine akısını üretmek ve rüzgardan elde edilen enerjiyi optimum hale getirmektir. İkinci dönüştürücü, DA bara kapasitörüyle şebeke tarafı kontrol (ŞTK) denilen şebeke arasında kalır. Bu dönüştürücünün işlevi, DA-bara gerilimini ve aktif ve reaktif güç akışlarını düzenlemektir. Düzeltme ve ters çevirme modu olmak üzere iki çalışma modu vardır. DA-bara gerilimi düşürüldüğünde, ŞTK doğrultma modunda çalışır ve dc-bara gerilimini düzenlemek için kapasitör şarjı yapar. Rüzgârdan enerji geldiğinde, DA bara gerilimi artar ve ŞTK, DA baradan elektrik şebekesine enerji sağlamak ve DA bağlantı gerilimi ve güç akışını düzenlemek için ters çevirme modunda çalışır.

Ayrıca şebeke bağlantılı eviricilerde şebekeye aktarılan akımların toplam harmonik bozunumunun %5'in altında olması gerekmektedir. Bir filtre olmadan şebekeye güç aktarımı yapmak mümkün değildir. Bu nedenle filtre üzerindeki düşen gerilimin az olması ve evirici çıkışındaki enerji kalitesinin yüksek olması gibi nedenlerden ötürü sistemde LCL filtre kullanılmıştır.

2. Rüzgâr Türbin Modeli

Bir rüzgâr türbini rüzgâr enerjisini tam olarak yakalayamaz. Bu yüzden değişken hızlı rüzgâr türbininden elde edilen güç şöyle ifade edilir (Chen, J., vd., 2014):

$$P_{\text{Türbin}} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Burada ρ hava yoğunluğudur (tipik olarak 1.225 kg / m^3), A , rotor kanatlarının süpürdüğü alandır (m^2 olarak), C_p , güç dönüşüm katsayısıdır ve v , rüzgâr hızıdır (m/s olarak). Sonuç olarak, eğer süpürülmüş alan, hava yoğunluğu ve rüzgâr hızı sabitse, çıkış aerodinamik gücü rüzgâr türbini sisteminin güç katsayısı tarafından belirlenir.

Güç katsayısı, rüzgâr türbininin dönüşüm verimliliğini ifade eder. Aşağıdaki gibi tanımlanan uç hızı oranından etkilenir:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (2)$$

Burada sırasıyla ω_m ve R , rotor açısal hızı (rad / s cinsinden) ve rotor yarıçapıdır (m cinsinden). Ayrıca, güç katsayısı uç hızı oranı λ 'nın ve kanat eğim açısının (β derece cinsinden) doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Belirli bir λ_{opt} değerinde maksimum olur:

$$P_{\text{Türbin}} = \frac{1}{2} \rho A C_{p\text{maks}} v^3 \quad (3)$$

Rüzgâr türbini mekanik moment çıkışı T_m şöyle ifade edilir:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \frac{1}{\omega_m} \quad (4)$$

Güç katsayısını modellemek için genel bir denklem kullanılır. Modelleme türbin sistemi özelliklerine dayalı $C_p(\lambda, \beta)$ şöyle tarif edilmiştir (Abdullah, M.A., vd., 2011):

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)} \quad (5)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

C_p 'nin maksimum değeri $C_{p\text{max}} = 0.41$, $\beta = 0$ ve $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ değerlerinde elde edilmiştir.

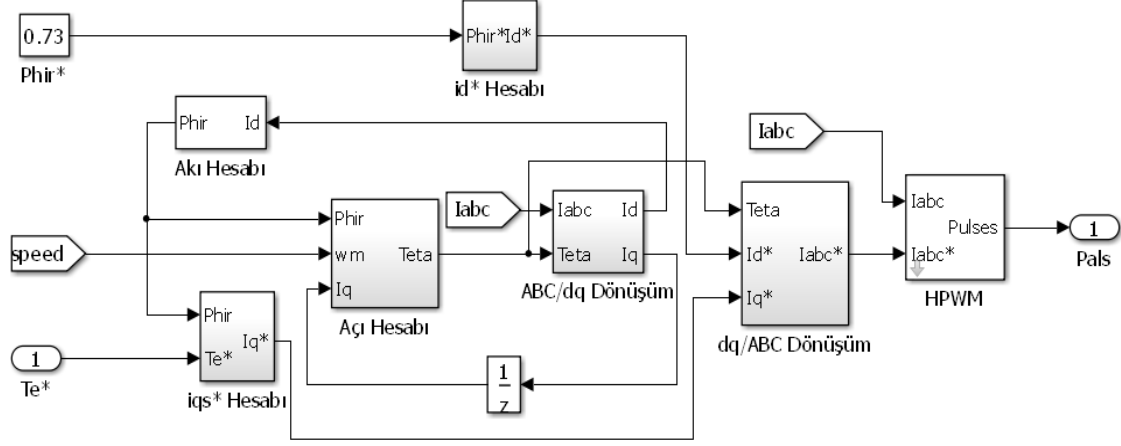
Kanat uç hız oranının belirli bir değeri için λ_{opt} , C_p rüzgâr türbini tarafından rüzgârdan maksimum gücün yakalandığı özgün bir maksimum değere sahiptir. Sonuç olarak, güç verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, türbin uç hız oranı, rüzgâr değişimlerine rağmen optimum değerinde kalmalıdır. Ayrıca, belirli bir rüzgar hızı için, rüzgar tarafından sağlanan gücü maksimize eden rotor hızı için optimum bir değer vardır. Aynı şekilde, türbin sisteminin MGNT işlevini gerçekleştirdiğini de söyleyebiliriz. Sonuç olarak, sistem $P(\omega_m)$ eğrisinin zirvesinde çalışabilir ve maksimum güç rüzgârdan sürekli olarak çıkarılır.

3. Rüzgâr Enerjisi Denetim Sistemi

Rüzgâr türbininin ayrıntılı bir modeli, Şekil 1'de gösterilmektedir. Rüzgâr türbininin bileşenleri, üç kanatlı bir rotor, tam ölçekli sırt sirta dönüştürücüye sahip bir sincap kafesli asenkron motor (SCAG), DA bara kondansatörü ve hat filtresi (LCL filtre) ile dönüştürücü kontrolörlerinden (GTK ve ŞTK) oluşmaktadır. Rüzgâr türbininin mekanik momenti, SKAG'ın statorunda elektrik gücüne dönüştürülür. Rüzgâr türbininin değişken hızda çalışması bir dönüştürücü kullanarak mümkündür ve bu dönüştürücü elektromanyetik momenti kontrol eder. Şebekeye bağlı dönüştürücü, bir filtre üzerinden harici güç şebekesine bağlanır ve DA bara gerilimini izin verilen aralıkta tutarken maksimum çıkış gücünü ayarlar.

3.2. Generatör Tarafı Kontrol (GTK) Modeli

Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG), üç fazlı sinüzoidal akım kaynağı olarak çalışan, akım kontrollü bir histerisiz darbe genişlik modülasyon (HPWM) evirici ile beslenir. MGNT kontrolünde, motor hızı ω_r , referans ω_r^* ile karşılaştırılır ve hata, bir moment komutu (T_e^*) üretmek için PI döngüsü ile işlenir. GTK algoritmasına ait temel blok şeması Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Generatör tarafı kontrol blok diyagramı

Temel denklemleri yazarsak, stator q-ekseni akım referansı i_{qs}^* moment referansı T_e^* den elde edilir;

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\psi_r|_{hesap.}} \quad (10)$$

Burada L_r rotor indüktansdır, L_m ortak indüktans ve $|\psi_r|_{hesap.}$ hesaplanan rotor akı bağıntısıdır;

$$|\psi_r|_{hesap.} = \frac{L_m \cdot i_{ds}^*}{1 + \tau_r \cdot s} \quad (11)$$

Burada $\tau_r = L_r / R_r$ rotor zaman sabitidir.

Stator d-ekseni akım referansı i_{ds}^* rotor akı referansından elde edilir ($|\psi_r|^*$)

$$i_{ds}^* = \frac{|\psi_r|^*}{L_m} \quad (12)$$

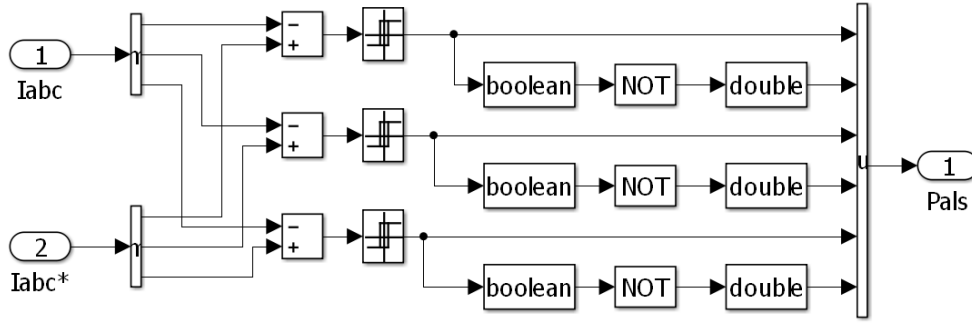
Rotor akı konumu θ_e koordinat dönüşümü için gereklidir ve rotor hızı ile kayma frekansından elde edilir;

$$\theta_e = \int (\omega_m + \omega_{sl}) dt \quad (13)$$

Kayma frekansı stator referans akımı i_{qs}^* ve motor parametrelerinden hesaplanır;

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{|\psi_r|_{hesap.}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}^* \quad (14)$$

i_{qs}^* ve i_{ds}^* akım referansları, histerisiz darbe genişlik modülasyonu (HPWM) için i_a^* , i_b^* , i_c^* faz akım referanslarına dönüştürülür. HPWM, ölçülen ve referans akımları karşılaştırarak gerekli olan evirici anahtar sinyallerini üretir (Bose, B.K., 1986). Burada histerisiz bant aralığı 0.0001 olarak girilmiştir. HPWM'e ait blok diyagramı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. HPWM blok diyagramı

3.3. Şebeke Tarafı Kontrol (ŞTK) Modeli

Şebeke tarafı kontrol modeli faz kilitleme döngüsü (PLL), dq ekseninde ölçülen akımlar, gerilim akım döngüsü ve kuplajlama (alan etkili kontrol) ve sinüs darbe genişlik modülasyonu gibi kısımlardan oluşmaktadır. Ayrıca sistemde şebekeye bağlı bir LCL filtre kullanılmıştır. Şebeke tarafı kontrol diyagramını şekil 5'te, LCL filtreli modeli şekil 6'da gösterilmiştir.

ŞTK dönüştürücünün amacı, dc-bara gerilimini ayarlamak ve dc-bara gücü ile şebekeye sağlanan güçler arasındaki dengeyi korumaktır. Bu iş, hat tarafının akım eksen bileşeninin kontrol edilmesiyle yapılır. Aktif ve reaktif güç denklemleri;

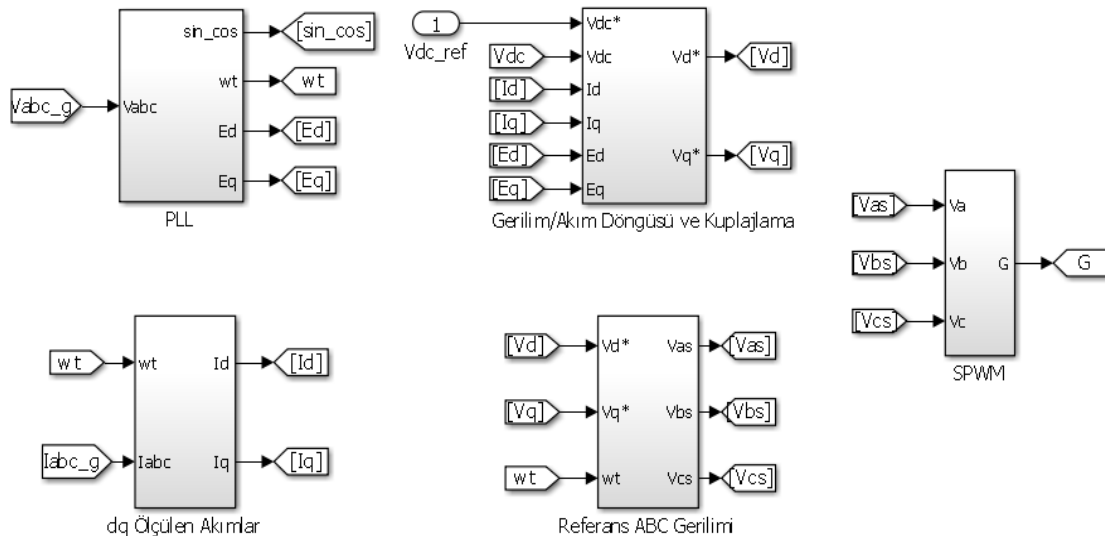
$$P_g = \frac{3}{2} (u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq}) \quad (15)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (u_{gq}i_{gd} - u_{gd}i_{gq}) \quad (16)$$

Vektör odaklı kontrol yönteminin temel prensibi anlık aktif ve reaktif şebeke akımlarını ve sonuç olarak aktif ve reaktif gücü ayrı kontrolörler tarafından kontrol etmektir. Şebeke gerilimleri ve akımları ilk önce algılanır. Faz kilitleme döngüsü (PLL) vasıtasıyla, şebekeye bağlı dönüştürücünün gerilim çıkışını şebekeyle senkronize etmek için şebeke açısı ve frekansı algılanır. Talep edilen güç miktarı önce şebekeden istenen güç faktöründe tahmin edilir, sonuç olarak şebeke gerilimi ile senkronize edilmiş bir senkronize referans çerçevesindeki akımların set değerleri hesaplanır. Sonuç olarak, mevcut kontrolörler gerçek akımları referanslarına getirmeye çalışır. Mevcut referanslar şöyledir:

$$i_{gd} = \frac{2 P_g}{3 u_{gd}} \quad (17)$$

$$i_{gq} = 0 \quad (18)$$



Şekil 5. Şebeke tarafı kontrol modeli blok diyagramı

Şebeke tarafı dönüştürücü ile şebeke arasındaki gerilim denklemleri, sabit abc referans çerçevesinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Hadjina, T., vd., 2013).

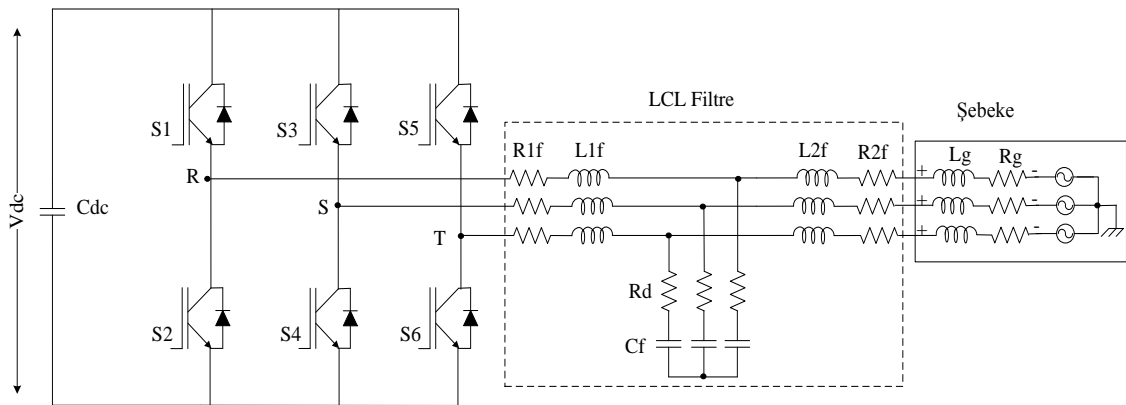
$$L_{1f} \frac{di_{1k}}{dt} = u_k - i_k R_{1f} - u_{ck} \quad (19)$$

$$C_f \frac{du_{ck}}{dt} = i_k - i_{gk} \quad (20)$$

$$L_{2f} \frac{di_{gk}}{dt} = u_{ck} - i_{gk} R_{2f} - u_{gk} \quad (21)$$

$$k = a, b, c \quad (22)$$

Burada u_k , şebeke tarafı dönüştürücü gerilimi, i_k şebeke tarafı dönüştürücü akımıdır, u_{ck} , filtre kondansatöründeki gerilimdir, i_{gk} şebeke akımıdır, u_{gk} şebeke gerilimidir, L_{1f} ve L_{2f} filtre indüktanslarıdır, R_{1f} ve R_{2f} filtre parazit dirençleri, R_d bastırma direnci ve C_f filtre kapasitördür.



Şekil 6. LCL Filtre ile Şebeke tarafı dönüştürücü

Rezonans frekansının yarısından daha düşük frekanslarda, LCL filtresi L filtresi olarak modellenebilir (Hadjina, T., vd., 2013). LCL filtresinin basitleştirilmiş modelinin direnci ve endüktansı şu şekilde ifade edilebilir:

$$R_f = R_{1f} + R_{2f} + R_g \quad (23)$$

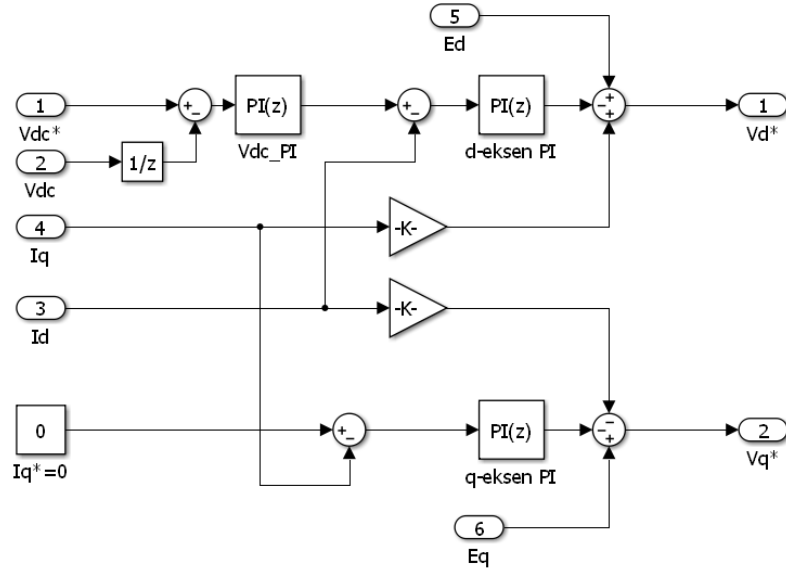
$$L_f = L_{1f} + L_{2f} + L_g \quad (24)$$

Buradaki L_f ve R_f , sırasıyla eşdeğer L filtresinin endüktansı ve direncidir. Basitleştirilmiş filtre modeli ve (16) - (19) gerilim denklemleri kullanılarak şebeke tarafı konvertörü ile şebeke arasındaki gerilim denklemleri, şebeke gerilimi açılmalı hızı ile dq referans düzlemde ifade edilebilir (Hadjina, T., vd., 2013). Bu çalışmada gerilim ayrıştırma kontrolü yöntemi kullanılmıştır. d-q eksen arasındaki gerilim çapraz bağlantı terimlerimiz şu denklemler ile ifade edilir.

$$v_d^* = L_f \frac{di_d}{dt} + E_d + R_f i_d + \omega L_f i_q \quad (25)$$

$$v_q^* = L_f \frac{di_q}{dt} + E_q + R_f i_q - \omega L_f i_d \quad (26)$$

Burada v_d ve v_q d- ve q eksen şebeke tarafı dönüştürücü gerilimleri ise, E_d ve E_q d- ve q eksen şebeke gerilimleri, i_d ve i_q d- ve q eksen şebeke akımlarıdır, ω şebeke gerilimi açılmalı hızı ise, L_f ve R_f sırasıyla filtrenin endüktansı ve direncidir. Denklemlere ait simülasyon blok diyagramı şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Alan etkili kontrol simulink blok diyagramı

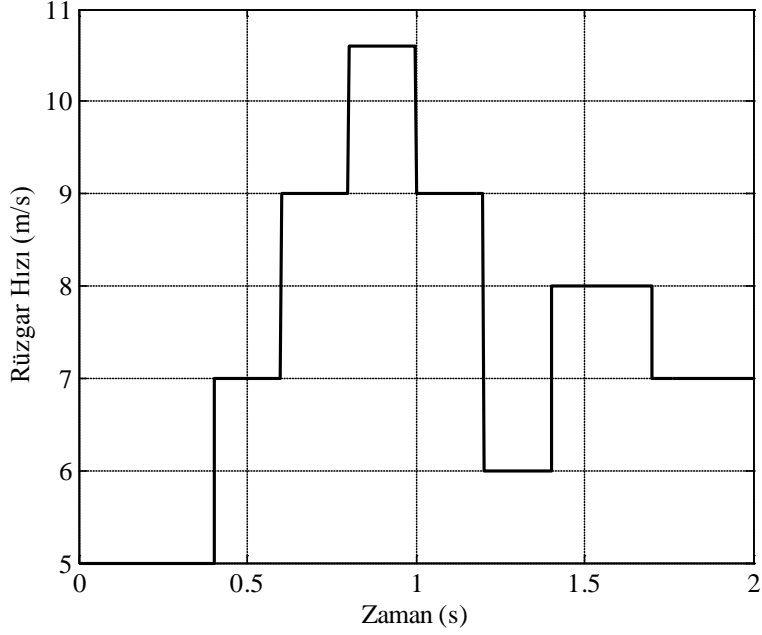
4. Benzetim Çalışmaları ve Sonuçlar

Şekil 1'deki SKAG tabanlı değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin modeli MATLAB / SIMULINK simülasyon yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan türbin ve SKAG'ün parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Güç dönüştürücü ve kontrol algoritması da uygulanmış ve modele dahil edilmiştir. DGM invertör 10 kHz'de çalıştırılır. Simülasyon için kullanılan örnekleme süresi 2us'dir.

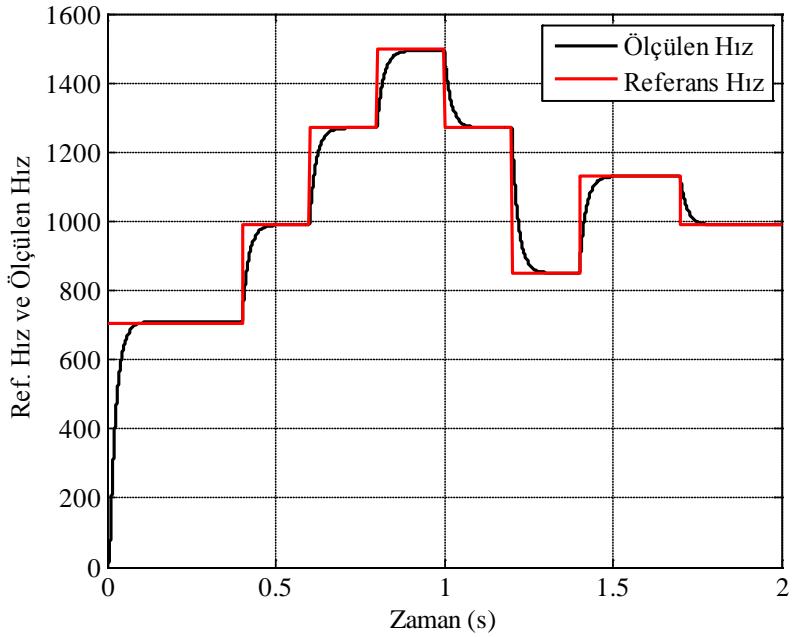
Tablo 1. Benzetim parametreleri

Sistem	Parametre
Türbin	$P_n=4000W$, $R=1.65$ m, $V_{tn}= 12m/sn$, $C_p = 0.48$, $\lambda_{opt} = 8.1$
SKAG	$P_n(VA)=4000VA$, $V_n(RMS) = 400$ V, $f = 50Hz.$, $R_s = 1.115 \Omega$, $L_{ls} = 5.974$ mH, $R_r = 1.083 \Omega$, $L_{lr} = 5.974$ mH, $J = 0.0131$ kg.m ² , $B = 0.002985$ N.m.s, $P = 4$.
DC Bara	$C_{dc} = 1100$ uF, $V_{dc} = 700$ V
LCL Filtre	$L_{1f} = 10.8$ mH, $L_{2f} = 0.276$ mH, $R_{1f} = 0.1 \Omega$, $R_{2f} = 0.2 \Omega$, $C_f = 5.5$ uF, $R_d = 2.33 \Omega$
Şebeke	$V_g = 311V$ (tepe), $f_g = 50$ Hz.
MGNT PI	$K_p = 0.4$, $K_i = 0.2$
Vdc_PI	$K_p = 0.2$, $K_i = 2$
d-eksen PI	$K_p = 100$, $K_i = 50$
q-eksen PI	$K_p = 100$, $K_i = 50$
Örnekleme zamanı	2e-6

Şekil 8 ve 9, 5 m / s'den 7 m / s'den 9 m / s'den 10.6 ms'ye kadar olan bir hızda rüzgâr değişikliği için sistemin cevabını ve daha sonra 7 m / s'ye geri döndüğündeki cevabını göstermektedir. Rüzgar türbini nominal rüzgar hızı olarak 10.6 m/s'ye göre boyutlandırılmıştır. 10.6 m/s'lik nominal hızda SKAG 1500 d/dk hızla çıkmaktadır. Şekil 8'de farklı zamanlarda değişiklik gösteren referans rüzgâr hız profili görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi referans rüzgâr girişi kademe kademe değişime tabi tutulmuştur. Şekil 9'da ise bu referans rüzgâr hızına karşılık generatör hız grafiği görülmektedir. Şekil 9'dan da görüleceği üzere generatör hızı referans hızı herhangi bir aşım olmadan kararlı bir şekilde takip etmektedir.

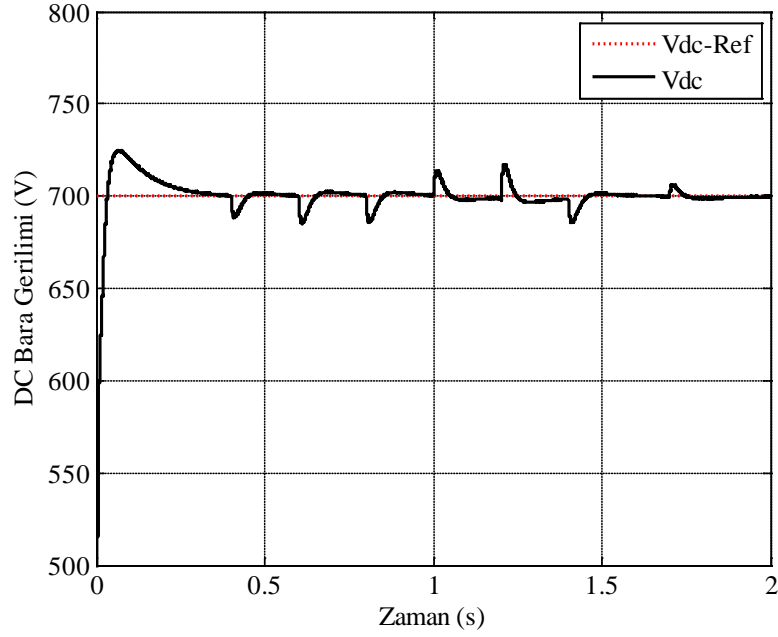


Şekil 8. Referans rüzgâr hızı



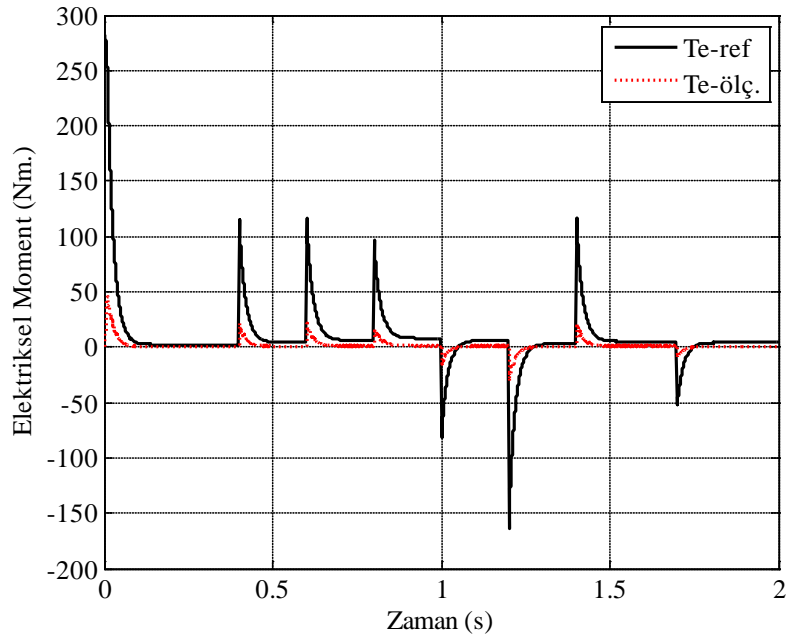
Şekil 9. Generatör referans hızı karşılık ölçülen hız

Şekil 10'da DC bara geriliminin değişim eğrisi görülmektedir. V_{dc}^* ile gösterilen DC bara geriliminin referansı 700V olarak ayarlanmıştır. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrol stratejisinin amaçlarından biri, DC bağlantı voltajını güç değişimi anlarında sabit tutmaktır. Şekil 10, ölçülen dc voltajın referansı iyi bir şekilde izlenmesini sağlayan DC-link voltaj kontrol algoritmasının doğruluğunu kanıtlamaktadır. Aynı zamanda rüzgâr hızı değişirken, DC gerilimin de değiştiği fark edilebilir. Ancak DC denetleyicisi hatayı çok hızlı azaltıyor ve DC bağlantısını her zaman aynı sabit değerde tutuyor.



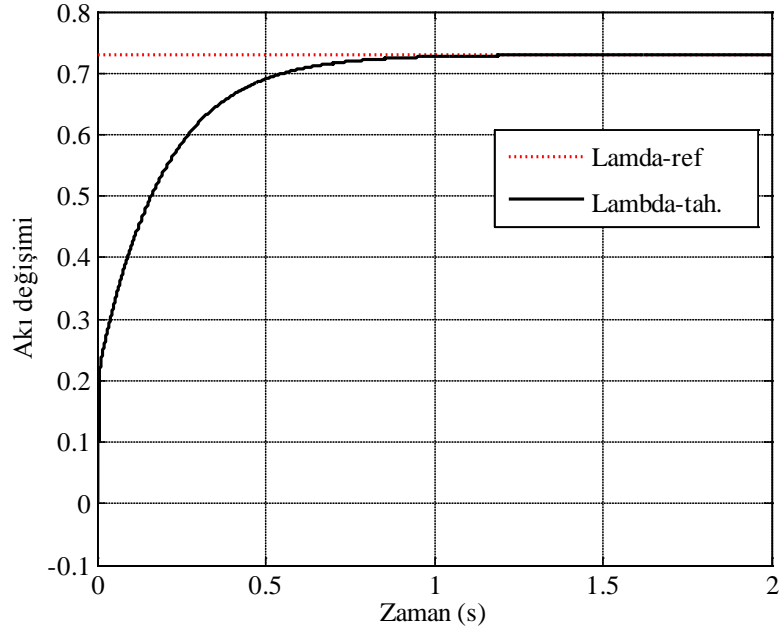
Şekil 10. DC bara gerilimi değişim eğrisi

Şekil 11’de SKAG’ın elektriksel moment değişim eğrisi görülmektedir. Referans rüzgâr hızına bağlı olarak referans moment ve ölçülen moment değerlerinin bir birini yakaladığı açıkça görülmektedir. Generatör momenti gücün maksimize olduğu optimal türbin moment değeri tüm çalışma boyunca izlemiştir. Şekil 11 gerilim kaynaklı kontrollü vektör kontrol stratejisinin elektromanyetik tork için çok etkili olduğunu göstermektedir.



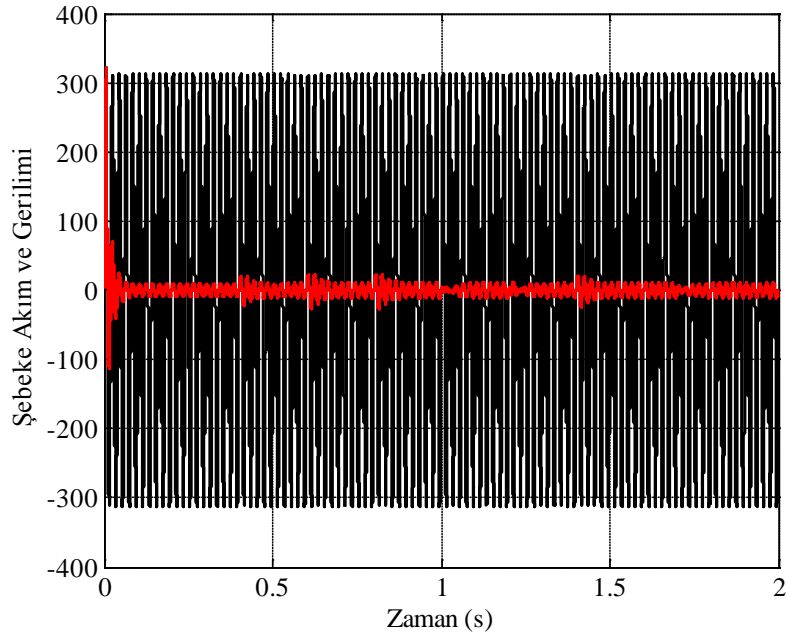
Şekil 11. Elektriksel moment tepkisi

Şekil 12’de d eksen rotor akısının değişim eğrisi görülmektedir. Seçilen PI parametrelerine bağlı olarak d-ekseni rotor akısının verilen referans değere 1.2. saniyede kararlı bir şekilde oturduğu görülmektedir.



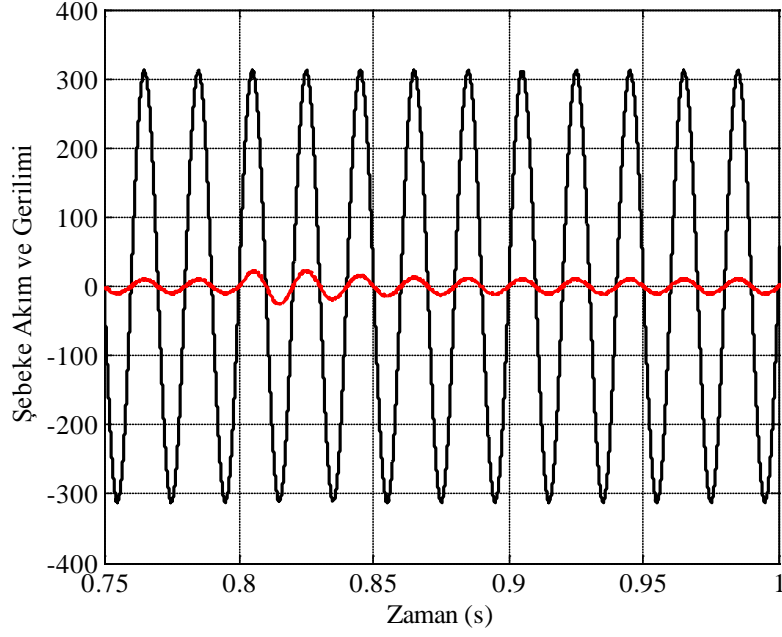
Şekil 12. Akıdaki değişim eğrisi

Şekil 13'de şebeke gerilim ve akımı gösteren grafik yer almaktadır. Burada gerilim ve akım eğrilerine dikkat ettiğimizde her hangi bir faz farkı olmadan kesişme noktalarının aynı olduğu görülmektedir.



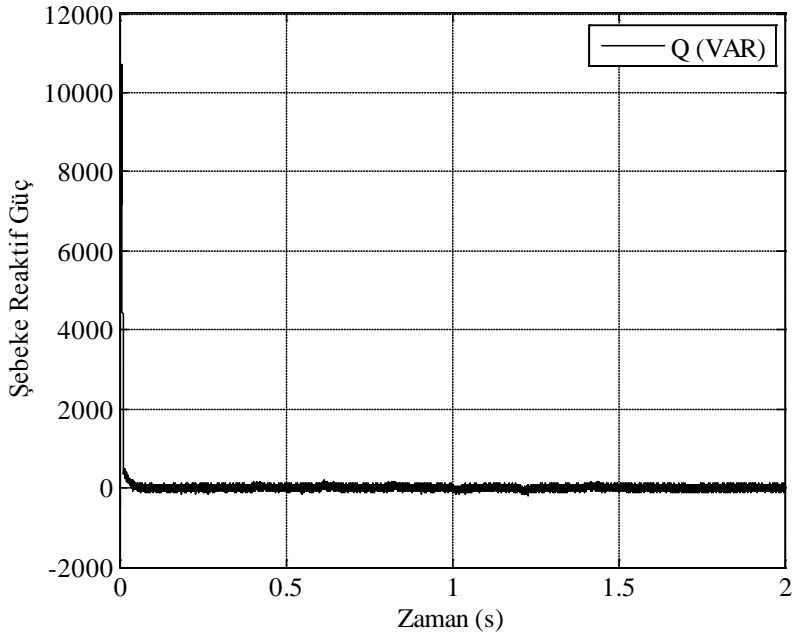
Şekil 13. Şebeke gerilimi ve akım eğrisi

Giriş gerilimi ve akımı sinüzoidal formdadır ve akım giriş gerilimi ile aynı fazdadır. Birim güç faktörü 1'e çok yakındır. Rüzgâr hızının değişim noktalarında ise akımdaki dalgalanmalar Şekil 14'de yakınlaştırılmış grafikte açıkça görülmektedir.



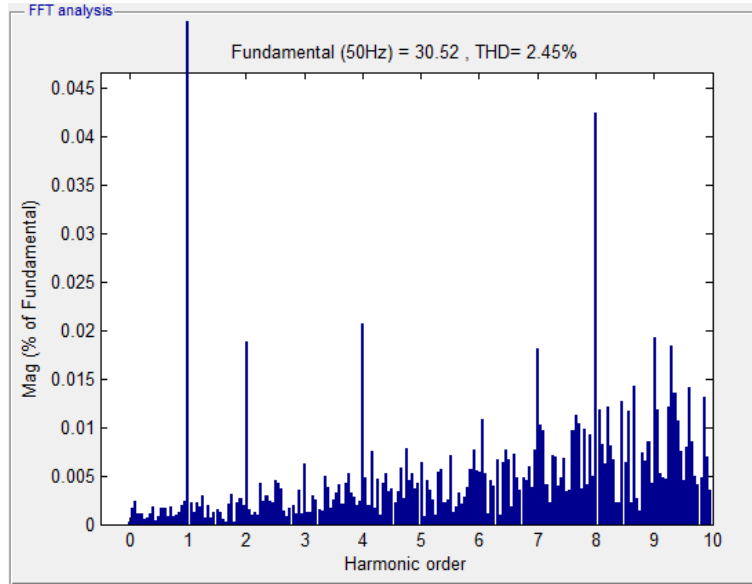
Şekil 14. Şebeke gerilimi ve akım(x5) yakınlaştırılmış eğrisi

Şekil 15, şebekeye enjekte edilen reaktif gücü göstermektedir. Reaktif gücün referans değeri d eksenine akımının 0 olarak girilmesi ile ayarlanmıştır. Reaktif güç şebeke tarafında kararlı bir şekilde sıfırda tutulmuştur.



Şekil 15. Şebeke reaktif güç eğrisi

Şekil 16'da giriş akımına ait toplam harmonik bozulumu (THB) gösterilmektedir ve değeri 2.45 ve IEEE 519-1992 standartlarına göre izin verilen sınırlar içerisinde.



Şekil 16. Şebeke tarafı akım harmoniği

5. Sonuçlar

Bu makalede SKAG kullanarak bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi modellenmiştir. Bütün çalışma noktalarında MGNT algoritması kullanılarak iyi bir enerji üretimi sağlanmıştır. Ayrıca sırt sırta bağlı iki evirici ile şebeke bağlantılı olarak oluşturulan çalışmada DC-bara gerilim kontrolü ve moment kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bir filtre olmadan şebekeye güç aktarımı yapmanın güç olmasından dolayı şebeke tarafında da bir LCL filtre kullanılmıştır Şebeke tarafı akım harmoniği de incelenerek bu değerın IEEE 519-1992 standartlarına göre izin verilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Generator tarafı konverter ve şebeke tarafı konverter için MATLAB/Simulink ortamında vektör kontrol yöntemleri kullanılarak önerilen yöntemin güvenilirliği elde edilen grafiklerle ispatlanmıştır.

Gelecekte, bu çalışma genişletilebilir ve geçici kararlılığın geliştirilebilmesi için bazı uygun denetleyici teknikleri uygulanabilir. FACTS, BR ve DVR gibi cihazlar, şebekeye bağlı SKAG rüzgâr türbininin geçici kararlılığını iyileştirmek için uygun olabilir. Ancak bu cihazlar pahalıdır ve performansları karmaşıktır. Bulanık mantık denetleyici olarak bilinen teknikler, şebekeye bağlı SKAG'in geçici kararlılığını geliştirmek için uygundur ve daha iyi performans sağlayacaktır.

Kaynaklar

J. Dong, F. Gao, X. Guan, Q. Zhai, and J. Wu, "Storage-reserve sizing with qualified reliability for connected high renewable penetration micro-grid," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, no. 2, pp. 732–743, April 2016.

S. Das and B. Subudhi, "A H_{∞} robust active and reactive power control scheme for a PMSG-based wind energy conversion system," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 33, no. 3, pp. 980–990, Sep. 2018.

X. Chen, L. Yan, X. Zhou, and H. Sun, "A Novel DVR-ESS-Embedded Wind-Energy Conversion System," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 9, no. 3, pp. 1265–1274, Jul. 2018.

GWEC. (2018, Apr) Global status of wind power. [Online]. Available: <http://gwec.net>.

F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," IEEE J. of Emerging and Select. Topics in Power Electron., vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sept 2013.

T. Ackermann, Wind power in power systems, 2nd ed. Chichester, West Sussex ; Hoboken, N.J: Wiley, 2012.

Bouaziz, B., Bacha, F., & Gasmi, M. (2012). A Fuzzy Direct Power Control for a Variable Speed Wind Turbine. International Review of Automatic Control, 5(1), 56-65.

S. Saha, M. E. Haque, and M. A. Mahmud, "Diagnosis and mitigation of sensor malfunctioning in a permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 33, no. 3, pp. 938–948, Sep. 2018.

- E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, X. Wang, and C. L. Bak, "Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 12–23, Jan 2018.
- N. K. S. Naidu and B. Singh, "Grid-interfaced DFIG-based variable speed wind energy conversion system with power smoothing," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 51–58, Jan 2017.
- C. Zhang, D. Ke, Y. Sun, C. Y. Chung, J. Xu, and F. Shen, "Coordinated supplementary damping control of DFIG and PSS to suppress inter-area oscillations with optimally controlled plant dynamics," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 780–791, April 2018.
- H. Zhao, Q. Wu, C. N. Rasmussen, and M. Blanke, "L1 adaptive speed control of a small wind energy conversion system for maximum power point tracking," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 3, pp. 576–584, Sept 2014.
- P.N. Enjeti, P.D. Ziogas, J.F. Lindsay, M.H. Rashid, "A new pwm speed control system for high-performance ac motor drives", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 37 (2) (1990), pp. 143-151.
- Z. Alnasir, M. Kazerani, "A small-scale standalone wind energy conversion system featuring SCIG, CSI and a novel storage integration scheme", *Renew Energy*, 89 (2016), pp. 360-370.
- M. Seixas, R. Melfcio, V.M. Mendes, C. Couto, "Blade pitch control malfunction simulation in a wind energy conversion system with MPC five-level converter", *Renew Energy*, 89 (2016), pp. 339-350.
- A.M. Howlader, T. Senjyu, "A comprehensive review of low voltage ride through capability strategies for the wind energy conversion systems", *Renew Sustain Energy Rev*, 56 (2016), pp. 643-658
- M.A. Abdullah, A.H. Yatim, C.W. Tan, R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", *Renew Sustain Energy Rev*, 16 (2012), pp. 3220-3227.
- D. Kumar, K. Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems", *Renew Sustain Energy Rev*, 55 (2016), pp. 957-970.
- S.M. Tripathi, A.N. Tiwari, D. Singh, "Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: a technology review", *Renew Sustain Energy Rev*, 51 (2015), pp. 1288-1305.
- B. Jain, S. Jain, R.K. Nema, "Control strategies of grid interfaced wind energy conversion system: an overview", *Renew Sustain Energy Rev*, 47 (2015), pp. 983-996.
- Chen, J., Chen, J., & Gong, C. (2013). New overall power control strategy for variable-speed fixed-pitch wind turbines within the whole wind velocity range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7), 2652-2660.
- Chen, J., Chen, J., & Gong, C. (2014). On optimizing the aerodynamic load acting on the turbine shaft of PMSG-based direct-drive wind energy conversion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 4022-4031.
- Abdullah, M. A., Yatim, A. H. M., & Tan, C. W. (2011, June). A study of maximum power point tracking algorithms for wind energy system. In 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET) (pp. 321-326). IEEE.
- Bose, B. K., *Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1986.
- Hadjina, T., Baotić, M., & Perić, N. (2013, May). Control of the grid side converter in a wind turbine. In 2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) (pp. 925-930). IEEE.