

# SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR SANTRALİ BENZETİMİ

Soner ÇELİKDEMİR<sup>1</sup>

Mehmet ÖZDEMİR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Fırat Üniversitesi

sonercelikdemir@firat.edu.tr

mozdemir@firat.edu.tr

## Özet

Günümüz dünyasının çevreyi kirleten fosil kökenli yakıtların azalması, buna ilaveten artan enerji ihtiyacını karşılamak açısından yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep günden güne artmaktadır. Bunlara teknolojik gelişmeler ve artan devlet destekleri eklenerek devam etmektedir. Bu çalışmada düşük güçlü rüzgar türbin modeli oluşturularak sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) kullanılmış, farklı rüzgar hızlarından en verimli şekilde faydalanılarak rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesi amaçlanmıştır. Üç kanatlı, yatay eksenli, sürekli (neodyum) mıknatıslı ve çıkışta doğrultucu devresi olan bir sistem oluşturularak, inverter beslenmiş ve yüke sinüs çıkışlı harmoniksiz bir gerilim sağlanmıştır. Tüm bunlar yapılırken öncelikli hedef; verimi ve çıkış geriliminin kalitesini artırmak, aynı zamanda istenilen genlik ve frekansta çalışabilme imkânı sağlamak ve bu sistemlerin yaygınlaştırılmasına katkı sağlamaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Santrali, Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG)

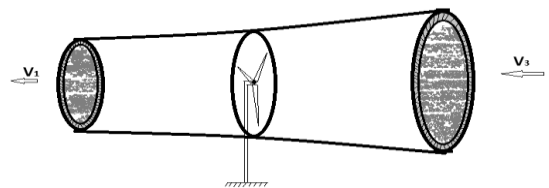
## 1. Giriş

Fosil kaynakların sonsuz kullanım ömürlerinin olmadıkları bilindiğinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına önem verilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde de rüzgar enerjisinin doğal, coğrafik şartlara bağlı olarak sürekli ve düşük hızlarda bile enerji üretimine elverişli olmasından dolayı ayrıca bir öneme sahiptir. Çalışmalar itibarıyla fosil kaynaklardan bağımsız, tamamen doğal ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum seviyede yararlanma yoluna gidilmiştir. Ayrıca dünyanın yaşanabilirlik ortamının korunması ve gelecek nesillere aktarılabilmesi amacıyla yapılan ulusal ve uluslararası hukuki düzenlemeler ve enerji üretim, iletim ve tüketiminden kaynaklanan çevresel etki ve sorunlarda enerji üretim sistemleri ve kaynak seçiminde çevresel etkilerin de dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır.

İlk Millî Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi (MİLRES) projesi bu araştırmaların ilk adımını oluşturmaktadır [1]. Yatay eksenli rüzgar türbini, SMSG ve güç elektroniği devrelerinin matematiksel modelleri eğitim amaçlı benzetimleri yapılarak tüm boyutlarıyla incelenmiş [2]. SMSG ile değişken hızlı rüzgar türbin modeli oluşturulmuş [3] ve rüzgar türbini ve güç kontrol sisteminin dinamik modellenmesi ve benzetimi yapılmış [4] ve SMSG ile değişken hızlı rüzgar türbini için kontrol stratejileri geliştirilmiştir [5]. SMSG ile tek başına çalışan rüzgar enerji dönüşüm sistemleri tanımlanmış [6] ve doğrudan sürürlü SMSG'lerin şebekeye bağlantıları verilmiştir [7]. Rüzgar türbinlerinde kullanılan farklı generatör tipleri incelenerek birbirleri ile karşılaştırılmış [8]. Eşit güçlü sistemlerde kanat sayısı veya uzunluğu arttıkça atalet momentinin artması nedeni ile türbin devir sayısı düşmektedir [2]. Bu nedenle de yapılan çalışmada üç kanatlı, yatay eksenli rüzgar türbini ve SMSG kullanılarak rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisi ve sistemin Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Rüzgar türbinleri teknolojisi aerodinamik, mekanik, meteoroloji, elektrik gibi birçok disiplini içinde barındıran bir konudur [8].

## 2. Rüzgar Enerjisinden Elde Edilecek Mekanik Güç Hesabı

Rüzgar türbinin rotoru, hava akımındaki enerjinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür ve bu da rüzgarın hızına bir etkide bulunur. Rüzgar, pervanelere temas ettikten sonra hızı azalarak devam eder. Rüzgarın pervanelere temas ettiği anda ki enerjisi ile pervaneleri terk ettiği enerjisi arasındaki fark, rüzgar enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürüldüğü miktara eşittir. Bu gücün hesabında kinetik enerji formülü temel alınır.



Şekil 1. Havanın rotor çevresindeki akışı

$$W_w = V_a \frac{\beta}{2} (V_1^2 - V_3^2) \quad (1)$$

Burada;

$\beta$  = Birim hacim için havanın yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

$V_1$  = Türbine giren rüzgarın hızı (m/sn)

$V_3$  = Türbinden çıkan rüzgarın hızı (m/sn)

$V_a$  = Hava hacmi elemanı

Rüzgar türbininin gücü şu şekilde ifade edilir;

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = \left( \frac{d(V_a \frac{\beta}{2} (V_1^2 - V_3^2))}{dt} \right) \quad (2)$$

Türbin rotorundan geçen hava hacminin akışı ise;

$$\frac{dV_a}{dt} = A_R V_2 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Yarı kararlı halde güç

$$P_w = A_R \frac{\beta}{2} (V_1^2 - V_3^2) V_2 \quad (4)$$

Burada  $A_R$ , güç absorpsiyonu ve türbin işletme koşullarını gösterir. Rüzgar türbininden elde edilecek maksimum güç Betz tarafından aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir [3].

$$P_{wmax} = \frac{16}{27} A_R \frac{\beta}{2} V_1^3 \quad (5)$$

Rotordan geçen havanın ortalama hızının, türbine giren rüzgarın hızı ile türbinden çıkan rüzgarın hızının ortalaması olduğu varsayılırsa bu durumda rotordan geçen havanın kütlesi;

$$m = \beta A \frac{(V_1 + V_3)}{2} \quad (6)$$

olarak elde edilir. Newton'un ikinci kanuna göre rotor tarafından elde edilen güç;

$$P = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (7)$$

Rotordan geçen havanın kütlesi, elde edilen güç denkleminde yerine yazılırsa;

$$P = \frac{\beta}{4} (V_1^2 - V_3^2) (V_1 + V_3) A \quad (8)$$

Rotorun rüzgarı engellemediği kabul edilerek aynı alandan geçen havanın gücü;

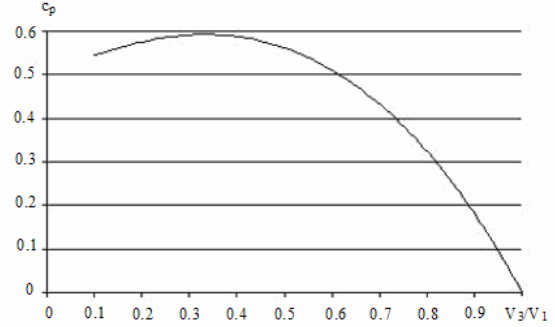
$$P_0 = \frac{\beta}{2} V_1^3 A \quad (9)$$

$C_p$ ; P ile  $P_0$  arasındaki orana verim katsayısı denir.

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{\beta}{4} (V_1^2 - V_3^2) (V_1 + V_3) A}{\frac{\beta}{2} V_1^3 A} \quad (10)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right) \left( 1 + \frac{V_3}{V_1} \right) \quad (11)$$

$C_p$ 'nin  $\frac{V_3}{V_1}$ 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi şekil 2'de verilmiştir. Eğriden de görülebileceği gibi fonksiyon maksimuma  $\frac{V_3}{V_1} = \frac{1}{3}$  değerinde ulaşmaktadır. Elde edilecek maksimum güç ise toplam rüzgar gücünün 0.593'ü veya  $\frac{16}{27}$ 'sidir. Yani bir rüzgar türbininde verim katsayısının alabileceği maksimum değer 0.593'tür. Verim katsayısının pratikte alabileceği değerler ise 0.1 ile 0.45 arasındadır.



Şekil 2.  $C_p$ 'nin  $\frac{V_3}{V_1}$ 'in fonksiyonu olarak çizilmiş

eğrisi

Rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilecek mekanik enerji dönüşümünde; kanatlar, rotor ve mil görev almaktadır. Görüldüğü gibi rüzgardan elde edilen kinetik enerji;

$R$  = Kanat çapı (m)

$A$  = Süpürme alanı (m<sup>2</sup>)

$\delta$  = Tepe uç hız oranı (m/sn)

$\beta$  = Kanat açısı

$V$  = rüzgar hızı (m/sn)

parametrelerine bağlıdır.

Kütle ve hıza bağlı kinetik enerji denklemi;

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (12)$$

Burada  $m$ , kütleyi sembolize etmektedir. Akışkan yoğunluğuna bağlı olarak kinetik enerji denklemi ise;

$$E_k = \frac{1}{2} \beta V^2 \quad (13)$$

Akışkanların belirli hız ile belirli bir alan içerisinde geçerken oluşturdukları enerji akış oranı ( $A.V$ ) ile doğru orantılıdır. Bu yüzden bir alan içerisinde geçen belirli bir  $V$  hızındaki rüzgarın güç denklemi;

$$P_r = \frac{1}{2} \beta A V^3 \quad (14)$$

Türbin performansı  $C_p$ 'ye bağlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinden elde edilen mekanik güç denklemi;

$$P_m = C_p (\delta, \beta) \frac{\rho A}{2} V^3 \quad (15)$$

Kanatların süpürme alanı ise;

$$A = \pi R^2 \quad (16)$$

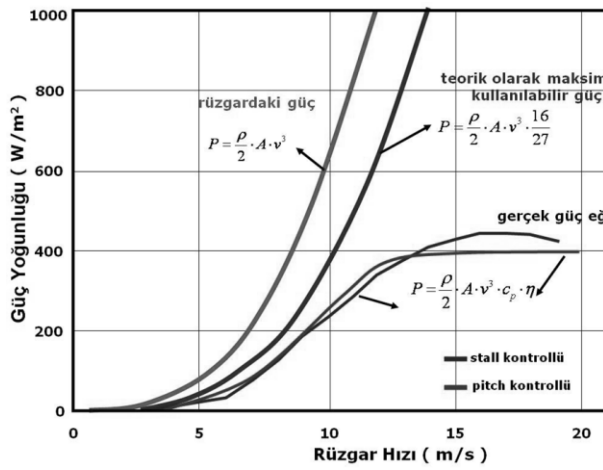
Yukarıda denklemler dahilinde genel denklem;

$$C_p (\delta, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\delta_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-(C_5/\delta_i)} + C_6 \delta \quad (17)$$

Gerekli olan uç hız oran denklemi;

$$\delta_i = \frac{1}{\delta + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (18)$$

Burada;  $C_1 = 0.5176$  ;  $C_2 = 116$  ;  $C_3 = 0.4$  ;  $C_4 = 5$  ;  $C_5 = 21$  ;  $C_6 = 0.0068$  olarak alınır [2].



Şekil 3. Rüzgar türbinlerinde güç yoğunluğu - rüzgar hızı değişim grafiği

SMSG'lerin pervaneye dişli kutusu olmaksızın doğrudan bağlandığından düşük hızlı nominal devir sayısı elde etmek için yüksek kutup sayısına sahip olmaları gerekmektedir [1].

### 3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Yapısı ve Matematiksel Modeli

Senkron makinanın rotorunda bulunan doğru akım uyarım sargısı sürekli mıknatısla yer değiştirilerek rotorda meydana gelen manyetik akı mıknatıs tarafından sağlanırsa sürekli mıknatıslı senkron makina (SMSM) elde edilmiş olur.

Mıknatısların kullanılması, çalışma prensibi ve tasarım açısından senkron makinalar için çok elverişlidir. Rotoru sargılı senkron makinaya göre dinamik performansı daha da artmış olur. SMSM'lerin statorunda indüksiyon makinalarındaki gibi üç fazlı sargı bulunur. Rotorda sargı yerine sürekli mıknatısların kullanılmasıyla fırça ve kollektörden kaynaklanan sakıncalar da giderilmiş

olur. Bunun yanı sıra, uyarım kayıpları ortadan kalktığı için termik sınırlar genişlemekte ve aynı hacimli bir makinadan daha büyük güçler alınabilmektedir. Rotorda Sm2Co17 veya Nd-Fe-B gibi yüksek enerjili sürekli mıknatıs kullanılması, hava aralığı indüksiyonunu sargılı makinelerden daha yüksek değerlerde tutar ve rotor sargılarında meydana gelen bakır kayıplarını ortadan kaldırarak verimin aynı güçteki senkron makinadan daha yüksek olmasını sağlar. Ayrıca makina boyutları da oldukça küçülür.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün 3 fazlı stator gerilim eşitliği;

$$U_{abc} = -R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (19)$$

şeklinde dir.

3 Faz eksen sisteminden 2 faz eksen sistemine dönüşüm dikkate alınarak stator akısı bileşenleri, endüktanslar ve mıknatıs akısı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d + L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_d + L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_d + L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{ma} \\ \psi_{mb} \\ \psi_{mc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Burada;

$$L_{aa}=L_{bb}=L_{cc}=3 \text{ Faza ait stator öz endüktansları} \quad (21)$$

$$L_{ba}=L_{ca}=L_{bc}=3 \text{ Faza ait stator ortak endüktansları} \quad (22)$$

$$\psi_{ma} = \psi_{mb} = \psi_{mc} = \text{Rotor mıknatıs akıları} \quad (23)$$

Statorun öz ve ortak endüktansları sadece dağıtılmış sargılı içe gömülü mıknatıslarda  $\theta$  açısına sinüzoidal bağlı olarak değişir. Rotor yüzeyine monte edilmiş SMSM'lerde stator endüktansları  $\theta$  açısından bağımsızdır. Dağıtılmamış sargılar için, stator öz endüktansı ve ortak endüktanslar benzer şekilde elde edilebilir. Fakat değerleri, dağıtılmış sargılı eşdeğer makinadan daha büyük olur. Yukarıda denklemlere Park dönüşümü uygulanırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir;

$$-i_d r_s - u_d = -L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \quad (24)$$

$$-i_q r_s - u_q = -L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \psi_m) \quad (25)$$

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2} L_m \quad (26)$$

$$L_q = L_{ls} + \frac{3}{2} L_m \quad (27)$$

$$\overline{\psi}_s = \psi_d + j \psi_q \quad (28)$$

$$\psi_d = \psi_m + L_d i_d \quad (29)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (30)$$

olduğuna göre; denklem 24 ve denklem 25 düzenlenecek olursa;

$$\frac{d i_d}{dt} = - \frac{R_s + R_l}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} i_d + \frac{P}{2} i_q \omega_r \quad (31)$$

$$\frac{d i_q}{dt} = - \frac{R_s + R_l}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} i_q + \frac{\psi_m}{L_{ls} + \left(\frac{3}{2}\right) L_m} \frac{P}{2} \omega_r - \frac{P}{2} i_d \omega_r \quad (32)$$

olarak elde edilir. Burada;

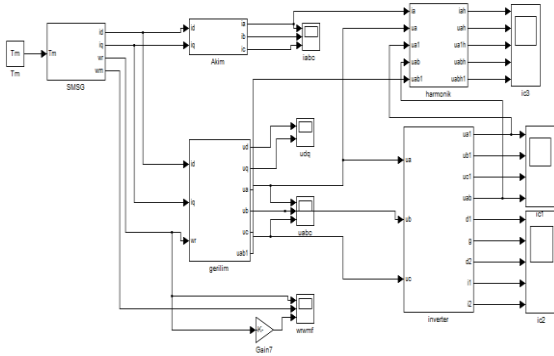
$R_y$  = Faz yükü direnci

$L_m$  = Manyetik endüktansların toplamı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün hareket denklemleri ise;

$$\frac{d \omega_r}{dt} = - \frac{T_e}{J} i_q - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{T_m}{J} \quad (33)$$

#### 4. Sistemin Matlab/Simulink Modeli

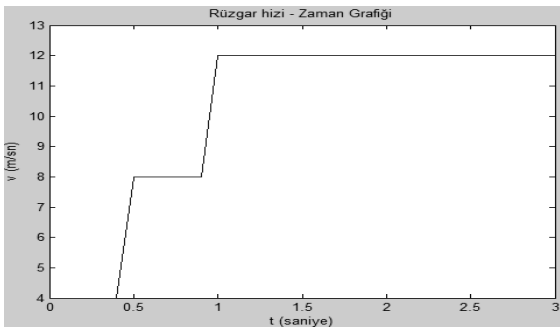


Şekil 4. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün dq0 modeli

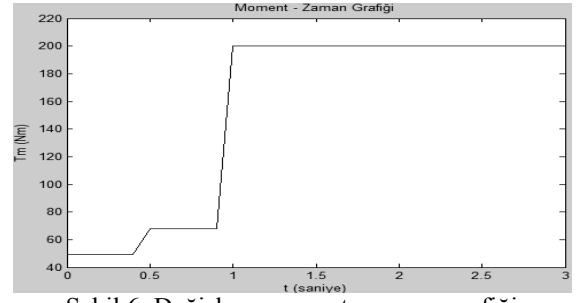
Tablo 1. Sürekli mıknatıslı senkron generatör ve rüzgar türbin parametreleri

$r$	2.3 m	$V_{min}$	3 m/sn
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>	$V_{max}$	20 m/sn
$B_m$	0 Nm.s	$R_s$	0.3 $\Omega$
$J$	40 kg.m <sup>2</sup>	$L_d$	2.9 mH
$T_N$	200 Nm	$L_q$	2.9 mH
$\omega_N$	240 rpm	$\psi$	0.23 Wb
$P_N$	5 kW	2P	30

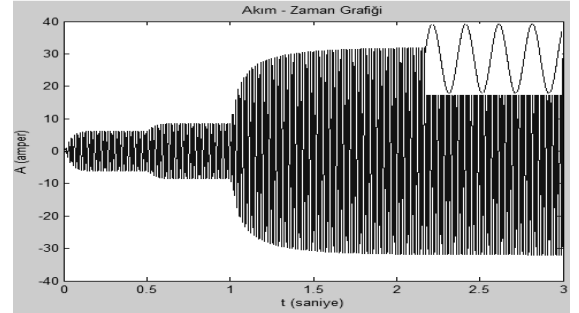
Rüzgar hızının sürekli değiştiği ve dişli kutusu kullanılmadığı durumdaki simülasyon sonuçları;



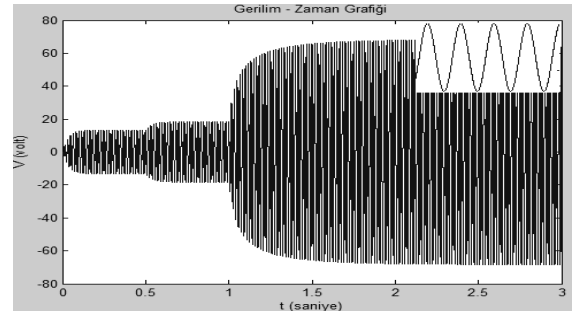
Şekil 5. Değişken rüzgar hızı - zaman grafiği



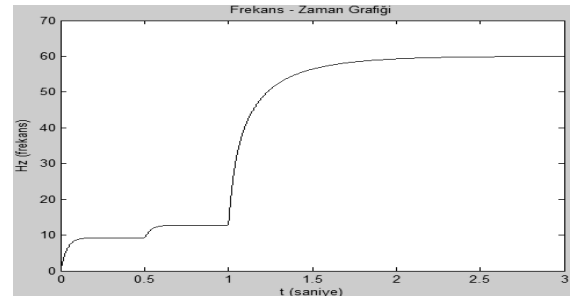
Şekil 6. Değişken moment - zaman grafiği



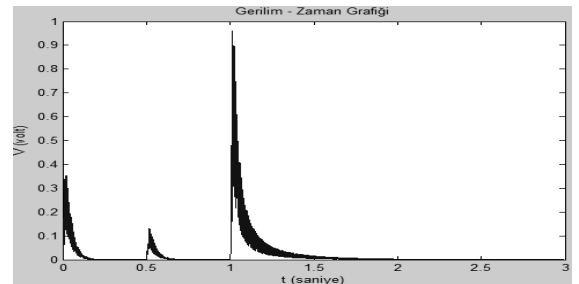
Şekil 7. Generatör çıkışının a-fazı akım - zaman grafiği



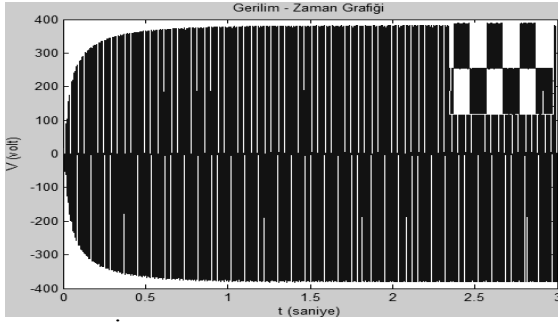
Şekil 8. Generatör çıkışının a-fazı gerilim - zaman grafiği



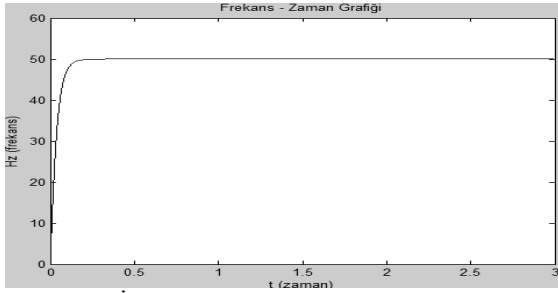
Şekil 9. Generatör çıkışının frekans - zaman grafiği



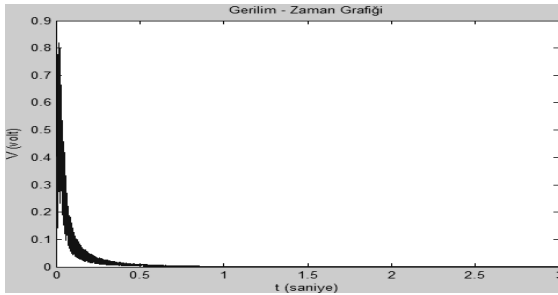
Şekil 10. Generatör çıkışının a-fazının 3. harmonik - zaman grafiği



Şekil 11. İnverter çıkışının gerilim - zaman grafiği



Şekil 12. İnverter çıkışının frekans-zaman grafiği



Şekil 13. İnverter a-fazının 3. harmonik-zaman grafiği

## 5. Sonuçlar

Yapılan benzetim çalışmasında; rüzgar türbinine şekil 5'de görüldüğü gibi üç farklı rüzgar hız değeri uygulanmıştır. Bu rüzgar hızlarının oluşturduğu mekanik güç hesaplanmış olup şekil 6'da gösterilmiş ve SMSG'ye giriş olarak uygulanmıştır. Mekanik gücün değişmesine bağlı olarak da generatörün stator sargı uçlarında endüklenen gerilimin de değiştiği şekil 8'de verilmiş, generatör çıkış geriliminin 3. harmonik analizi de yapılarak şekil 10' da gösterilmiştir. Generatör çıkış frekansı ise elektriksel açısal hıza bağlı olarak değiştiği şekil 9'da verilmiştir. Bu gerilim ve frekans değişimlerini önlemek için SMSG'nin çıkışı doğrultulup filitre edildikten sonra bir invertere bağlanarak şekil 11 ve şekil 12'de görüldüğü gibi gerilim ve frekans istenilen değerlere getirilmiştir. İnverter çıkışının 3. harmonik analizi de yapılmış olup şekil 13'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada benzetim sonuçlarından da görüldüğü gibi SMSG'nin uyarma akımı olmadığı için generatör çıkış gerilimi kontrol edilememektedir.

Bu yüzden farklı rüzgar hızlarında farklı çıkış gerilimleri ürettiği görülmektedir. İnverter kullanılarak bu farklılığın giderildiği ve çıkışının daha kaliteli olduğu harmonik analizlerinden görülmüştür.

## 6. Kaynaklar

- [1] Engin, N., 2011, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Çalışma Alanları ve Milres Projesi, İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, İzmir. 23-24 Aralık.
- [2] İşcan, S. ve Demirbaş, Ş., 2001. Rüzgar Türbin Laboratuvarı: Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modellenmesi ve Simulasyonu, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) 16-18 May, Elazığ.
- [3] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G. and Azevedo, G., 2009. Modeling Of a Variable Speed Wind Turbine With a Permanent Magnet Synchronous Generator, IEEE International Symposium On Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, 5-8 July.
- [4] Tafticht, T., Agbossou, K., Cheriti, A. and Doumbia M. L., 2006. Output Power Maximization Of a Permanent Magnet Synchronous Generator, Based Stand-alone Wind Turbine, IEEE ISIE, 9-12 July, Montreal, Quebec, Canada.
- [5] Haque, E., Negnevitsky, M. and M., Muttaqi., 2010. A Novel Control Strategy For a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol 46, No.1, January/February.
- [6] Bhim, S., Sheeja, V., Uma, R. and Jayaprakash, P., 2009. Voltage-Frequency Controller For Stand Alone WECS Employing Permanent Magnet Synchronous Generator, Third International Conference On Power Systems, Kharagpur, India, 27-29 December.
- [7] Huang, H., Mao, C., Lu, J. and Wang, D., 2010. Small-signal Modelling And Analysis Of Wind Turbine With Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Connected to Power Grid, Published in IET Renewable Power Generation Received, China, on 23rd November
- [8] Dursun, E. ve Binark, A., 2008. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES 17-19 Aralık, İstanbul.