



## Küçük Güçlü Rüzgar Enerji Dönüşüm Sisteminin Benzetimi, Modellemesi ve Uygulaması

*Simulation, Modelling and Application of a Small Power Wind Energy Conversion System*

Abulhakim Karakaya\*, Ercüment Karakaş

Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, küçük güçlü (1 Kw) bir Rüzgar Enerji Dönüşüm Sisteminin (REDS) benzetimi, modellemesi ve uygulaması yapılmaktadır. Enerji dönüştürücü olarak kullanılan Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörden (DMSG) maksimum güçler elde edilmektedir. Maksimum güçlerin elde edilebilmesi için Arama Çizelgesi (Lookup Table) denetleyicisi kullanılmıştır. Belirtilen REDS için tüm uygulamalar, modeller verilmekte, benzetim ve uygulamalardan elde edilen sonuçlar irdelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Benzetim, Modelleme, Rüzgar enerji dönüşüm sistemi

### Abstract

In this study, simulation, modeling and application of a small power (1 kW) of a Wind Energy Conversion Systems (WECS) is carried out. To obtain maximum power point, the Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is used as an energy converter. In order to obtain the maximum power point the Lookup Table controller is used. All applications and models are given for mentioned WECS and the results are examined from simulation and application.

**Keywords:** Simulation, Modelling, Wind energy conversion system

### 1. Giriş

Günümüzde ilerleyen teknolojiye bağlı olarak ülkelerin elektrik enerjisine olan ihtiyaçları da artış göstermektedir. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıtların sınırlı olması ve gün geçtikçe azalmaları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretilmesi üzerinde çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bu kapsamda yürütülen çalışmalardan bir tanesi de REDS'lerden elektrik enerjisi üretilmesidir. Bu bağlamda REDS'in benzetimi, modellenmesi, denetimi ve elde edilen enerjinin optimizasyonu konularında çalışmalar yapılmaktadır.

REDS'in modellenmesi, kontrolü ve optimizasyonu ile ilgili güncel çalışmaları inceleyecek olursak, (Fan vd. 2010) rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde oldukça yaygın kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Generatörün (ÇBAG) modellemesi ve kayma denetimini gerçekleştirmişlerdir.

Gerçekleştirilen modeli laboratuvar ortamında ve benzetim ile doğrulamışlardır. (Junyent-Ferré vd. 2010) ÇBAG'ın modellemesini ve değişik seviyelerde denetim stratejilerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarla benzetim sonuçlarını karşılaştırılmıştır. (Chang ve Lin 2015), rüzgar, fotovoltaik panel ve dizel generatörden oluşan melez yenilenebilir enerji sisteminin optimizasyonunu benzetim tekniğini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. (Economou vd. 2012), rüzgar çiftliklerinde kullanılacak rüzgar türbin sayısını ve üretilebilecek gücün tahmini için yapay sinir ağı modelini oluşturmuşlardır. (Tapia ve Medina 2015), bond graph metodunu kullanarak bir çift beslemeli rüzgar türbinini modellemişler ve denetimini yapmışlardır. (Jaramillo-Lopez vd. 2016), DMSG tabanlı rüzgar türbininden maksimum güç eldesi için denetim algoritması, rüzgar hızı tahmini için de yapay sinir ağı algoritması kullanmışlardır. Gerçekleştirilen sistem eğitilmiştir. (Pelletier vd. 2016) yapay sinir ağı kullanarak rüzgar türbinin güç eğrisi modellemişlerdir. (Sanchez vd. 2012), DMSG-tabanlı değişken hızlı bir rüzgar türbininin dinamik modelini elde etmişlerdir. Fazör benzetim metodu ile rüzgar çiftliklerinin güç sistem işletimine etkilerini araştırmışlardır. (Alizadeh ve

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [abdulkarakaya@hotmail.com](mailto:abdulkarakaya@hotmail.com)

Kojori 2015), bir DMSG-tabanlı rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin uyarlamalı PI denetleyici ile efektif olarak kontrol etmişlerdir. (Urtasun vd. 2013), DMSG tabanlı küçük güçlü bir rüzgar türbinin sensörsüz kontrolünü modellemişlerdir. (Ajami vd. 2016), DMSG tabanlı rüzgar türbininin maksimum güç noktasının tespitini gerçekleştirmişler. Dönüştürücü tasarımını uygulamışlar ve benzetim sonuçları ile karşılaştırmışlardır. (Ringwooda ve Simanib 2015), rüzgar türbinleri ve dalga enerjisi cihazları için modelleme ve kontrol stratejilerini incelemişlerdir. (Behjat ve Hamrahi 2014), eksenel akıllı DMSG tabanlı rüzgar türbininin dinamik modelini çıkarmışlar ve performans değerlendirmesi yapmışlardır. (Gupta vd. 2015), değişken hızlı DMSG tabanlı rüzgar türbininin MATLAB simülasyonları kullanılarak incelemişlerdir. (Thongam vd. 2014), değişken hızlı DMSG rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için optimum hız maksimum güç noktası takip denetleyicisi tasarlamışlardır. (Kuschke ve Strunz 2014), DMSG ile rüzgar gücü dönüşüm sisteminin modellemesi ve transfer fonksiyonu uygulaması gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, küçük güçlü bir rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin (1 kW) modellemesi, benzetimi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daimi Miknatıslı Senkron Generatörden (DMSG) maksimum güçler elde edilmiştir. Elde edilen benzetim ve modellerden yararlanarak dSPACE kartında uygulamalar yapılmıştır. Deney setinin oluşturulması esnasında gerçekleştirilen uygulamalar sunulmuştur.

## 2. Rüzgârdan Mekanik Güç Çıkarımı

Hava akımından dolayı rüzgâr türbin kanatlarında enerji elde edilmektedir. Bu enerji, kanatlar aracılığı ile dönme hareketine dönüşerek generatör milini döndürmektedir. Havadaki kinetik enerji Denklem (1)'deki gibidir:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Rüzgâr hızı sabit kabul edilirse, rüzgâr gücü Denklem (2)'deki gibi elde edilir:

$$P_w = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (2)$$

Burada, birim zamandaki kütle değişimidir. Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı  $A$  [ $m^2$ ] olan bir rüzgâr türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, rüzgâr gücü Denklem (3)'deki gibi elde edilir:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

Burada “p” hava yoğunluğudur [ $kg/m^3$ ]. Hava yoğunluğu,

atmosfer basıncı ve sıcaklığa göre değişmektedir.  $P_w$ , rüzgâr gücüdür [W].

Bir rüzgâr türbininin uç hız oranı, Denklem (4)'deki gibidir:

$$\lambda = \frac{\omega_{rm} \cdot R}{V_w} \quad (4)$$

Burada, R: kanatların yarıçapı,  $V_w$ : rüzgâr hızı [ $m/s$ ] ve  $\omega_{rm}$ : rotorun açılal hızıdır [ $rad/s$ ]. Şekil 1'de deneylerde kullanılan DMSG için üretici firma tarafından tasarlanmış rüzgâr türbininin  $C_p$ - $\lambda$  eğrisi görülmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi  $\lambda_{opt}$ 'da,  $C_p$  değeri optimum nokta olan  $C_{pmax}$  değerine sahiptir.  $C_{pmax}$  değeri türbin üretici firmanın vermiş olduğu rüzgâr hızına göre mekanik güç değişimi verileri kullanılarak Denklem (5)'den elde edilmiştir.

$$P_{mr} = C_p \cdot P_w = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (5)$$

Burada,  $P_{mr}$ : rotordaki mekanik güç,  $\rho$ : hava yoğunluğu [ $kg/m^3$ ],  $A$ : pervanenin süpürme alanı [ $m^2$ ],  $C_p$ : güç katsayısı ve  $V_w$ : rüzgâr hızı [ $m/s$ ]’ni ifade etmektedir.

## 3. DMSG Modeli

DMSG modelinde kullanılan gerilim ve akım denklemlerini ifade edecek olursak;

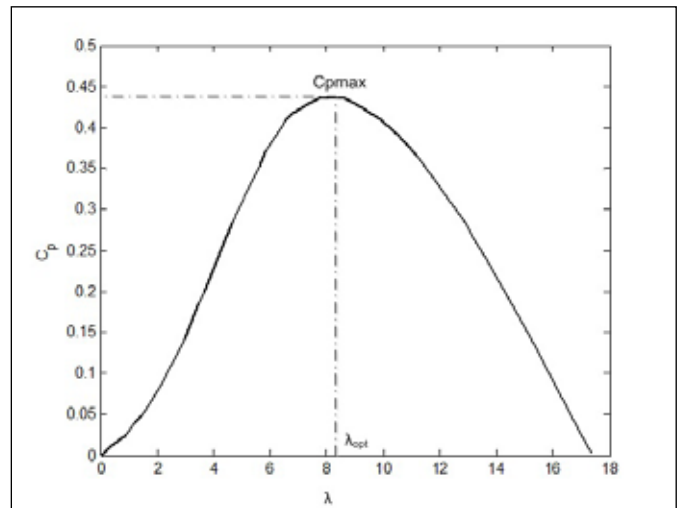
$$v_q = -r_s \cdot i_q + \frac{d(\lambda_q)}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_d \quad (6)$$

$$v_d = -r_s \cdot i_d + \frac{d(\lambda_d)}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_q \quad (7)$$

Denklem (6) ve (7)'de,  $\lambda_d$  ve  $\lambda_q$ :

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + \lambda_m \quad (8)$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q \quad (9)$$



Şekil 1. Rüzgâr türbininin  $C_p$ - $\lambda$  karakteristiği.

olarak alınmaktadır. Burada,  $v_d$  ve  $v_q$ ; d-q eksenli stator gerilimlerini,  $i_d$  ve  $i_q$ ; d-q eksenli stator akımlarını temsil etmektedir.  $L_d$  ve  $L_q$ ; d-q eksenli endüktanslarını ve  $r_s$ ; faz başına stator direncini göstermektedir.  $\lambda_m$ ; mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısını ifade etmektedir.

DMSG'nin mekanik enerji eşitliği Denklem (10)'de görülmektedir:

$$P_{em} = \omega_{rm} \cdot T_e = \frac{3}{2} \cdot \omega_r \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (10)$$

burada,  $P_{em}$ ; elektromekanik gücü [W], rotorun mekaniksel hızını [rad/s] ve  $T_e$ ; elektromanyetik momenti ifade etmektedir [Nm].  $\omega_r$  ve  $\omega_{rm}$  arasındaki bağıntı Denklem (11)'de görülmektedir:

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_{rm} \quad (11)$$

olmaktadır. P; kutup sayısıdır. d-q değişkenlerine göre DMSG için elektromanyetik moment  $T_e$  Denklem (12)'de verilmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (12)$$

ile ifade edilmektedir. Denklem (8) ve (9) kullanılarak, Denklem (12) yeniden düzenlenecek olursa, elektriksel büyüklükler ile tanımlanan elektromanyetik moment eşitliği Denklem (13)'deki gibi elde edilir:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \lambda_m \cdot i_q] \quad (13)$$

DMSG'nin mekanik açısal hız (rad/s) eşitliği Denklem (14)'daki gibidir:

$$\frac{d(\omega_{rm})}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_m - T_e) \quad (14)$$

olarak yazılabilmektedir.  $T_m$ ; mekanik momenti [Nm] ve J; eylemsizlik momentini [kg m<sup>2</sup>] ifade etmektedir.

DMSG'nin aktif-reaktif-görünür gücü "power variant" dönüşümü ile yapıldı. Aktif-reaktif-görünür gücü eşitlikleri sırasıyla Denklem (15), (16) ve (17)'de görülmektedir.  $f_{abc}$  gerilim ve akım değişkenleri  $f_{dq0}$  eksen takımına göre Denklem (18)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (15)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q) \quad (16)$$

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

#### 4. Rüzgar Enerji Dönüşüm Sisteminin Dinamik Modeli ve Benzetimi

İstenilen rüzgâr hızlarında REDS'i döndürmek için bir DC motor kullanılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi DC motorla DMSG akuple bağlanmaktadır ve DC motor aracılığıyla DMSG tahrik edilmektedir. DMSG'den elde edilen gerilim, tristörlü dönüştürücü ile doğrultulmaktadır. Doğrultulan gerilim filtrelenerek DC bir yük beslenmektedir. dsPIC sürücü kartının kontrolü için MathWorks şirketinin ürettiği MATLAB/Simulink/Real-Time Workshop ve dSPACE kartının Real-Time Interface (RTI) ve ControlDesk yazılımları kullanılmaktadır. Uygulamaların yapılmasında ve verilerin gerçek zamanda toplanmasında kullanılan, dSPACE'in sunduğu RTI ve ControlDesk programlarından yararlanılmaktadır. RTI herhangi bir programlamaya gerek kalmadan Simulink modellerini gerçek zamanlı donanım üzerinde çalıştırmak için kullanılan bir gerçekleştirme yazılımıdır. Deneysel sonuçların bilgisayar ortamına alınıp incelenmesi, analizi ve kaydedilmesi için dSPACE kartının ControlDesk yazılımı kullanılmaktadır.

##### 4.1. Benzetim, Modelleme ve Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde DMSG'nin benzetim ve uygulama sonuçları irdelenmektedir. Öncelikle uygulama setinin MATLAB/Simulink® modeli anlatılmaktadır. PC ile uygulama setinin kontrolü ve dSPACE kartı aracılığı ile istenilen ölçümlerin yapılabilmesi için MATLAB/Simulink® model anlatılmaktadır. Son olarak benzetim ve uygulama sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Şekil 3'de uygulama sisteminin MATLAB/Simulink® modeli görülmektedir. Tasarlanan model dört üniteden oluşmaktadır. Oluşturulan model, MATLAB/Simulink® blokları kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca burada maksimum güç noktalarının tespiti için Arama Çizelgesi (Lookup Table) denetleyici kullanılmıştır. Bu üniteler detaylı olarak aşağıda anlatılmaktadır.

Şekil 4'de DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. DC motor hız kontrolü PID denetleyici ile gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr türbini üreticisi firmanın vermiş olduğu katalog verilerine göre Denklem (4) kullanılarak optimum uç hız oranı ( $\lambda_{opt} = 8,14$ ) tespit edilmiştir. Bu değer

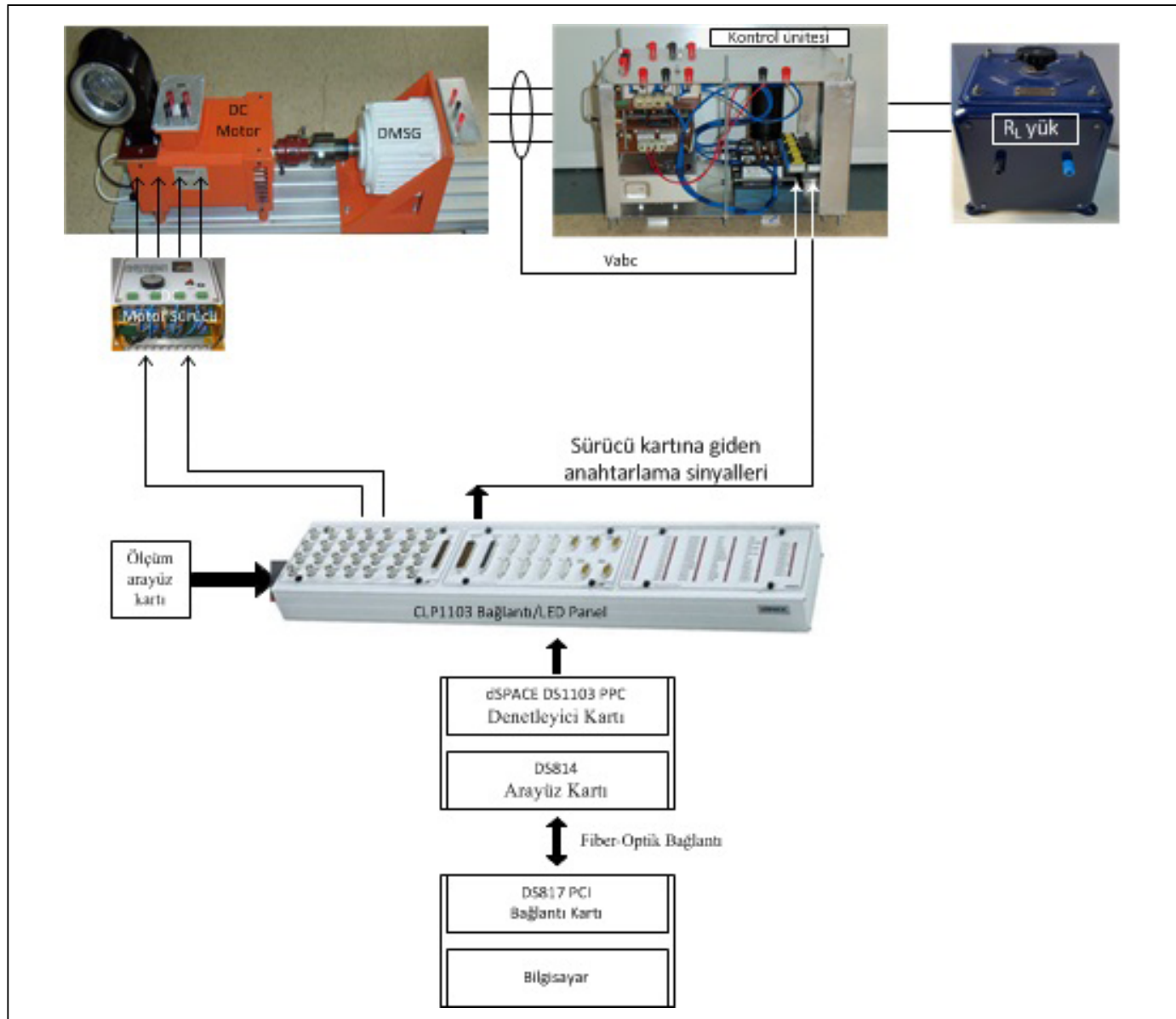
kullanılarak Denklem (19)'dan referans  $\omega_{rm}^*$  değeri üretilerek generatör hız ayarı DC motor aracılığı ile bu değere set edildi. Herhangi bir rüzgâr hızına göre elde edilen referans  $\omega_{rm}^*$  değerinde generatör mili döndürülerek ve uygun açılarda dönüştürücü anahtarlanarak maksimum güç takibi gerçekleştirilmektedir. DMSG'nin B [Nm/(rad/s)] ve J [kgm<sup>2</sup>] parametreleri ihmal edildiği için DC motor elektromanyetik moment ( $T_e$ ) kadar yüklenmektedir.

$$\omega_{rm}^* = \frac{V_w \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (19)$$

Şekil 5'de DMSG, tristör, kondansatör C ve yük direnci  $R_L$  ünitesi görülmektedir. DMSG mili, DC motor mekanik

hızı  $\omega_{rm}$  ile dönmektedir. Maksimum güç takip kontrol ünitesinden elde edilen anahtarlama sinyallerine göre tristörler sürülmektedir. Elde edilen DC gerilim kondansatörle (1500  $\mu$ F) filtrelenerek,  $R_L$  yükünde harcanmaktadır.  $V_{abc}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$  ve  $I_{dq}$  ölçüm bloğu ile DMSG'nin üç faz gerilimi, aktif gücü, reaktif gücü, görünür gücü ve dq eksenli akımlarının değişimleri ölçülmektedir.

Şekil 6'da  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$  ve  $I_{dq}$  değişim ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Bu ünite ile DMSG'nin üç faz gerilim  $V_{abc}$  ve akım  $I_{abc}$  değişimi, DC baranın gerilim  $V_{dc}$ , akım  $I_{dc}$ ,  $R_L$  yükünde harcanan güç,  $P_e$ - $Q$ - $S$  ve  $I_{dq}$  değişimleri incelenebilmektedir.



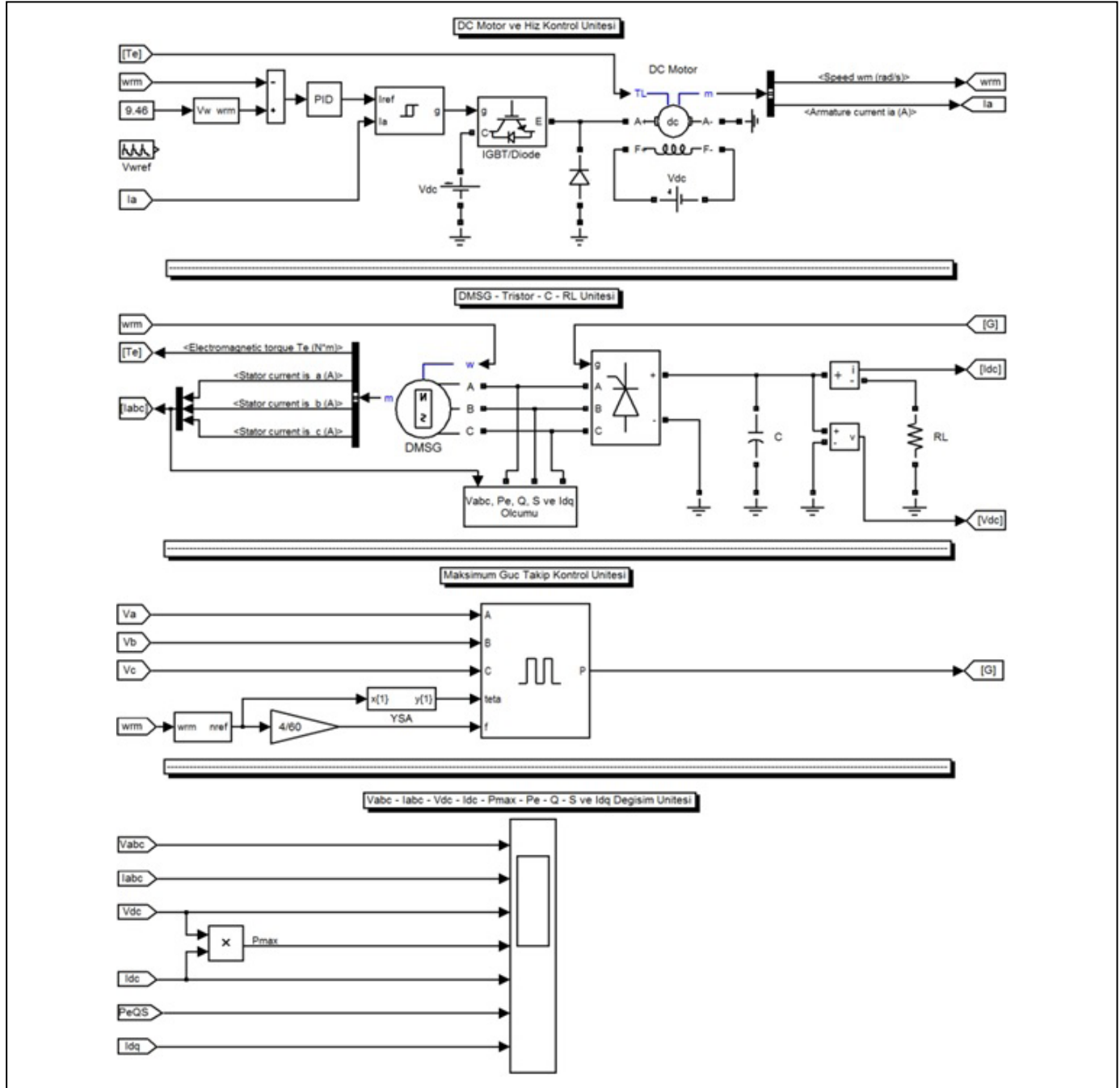
Şekil 2. Uygulama setinin blok diyagramı.

Gerçek zamanlı uygulamanın yapılması için MATLAB/Simulink® modeli tasarlanmıştır. Bu model, dSPACE'in ControlDesk yazılımına aktarılarak Maksimum Güç Notkası Takibi (MGNT) gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan bu model dört üniteden oluşmaktadır. Bu ünitelerin işlevleri aşağıdaki gibidir.

Şekil 7'de konum ve hız algılama ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Bu ünite ile DMSG hızı ve konumu

rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Konum algılamak için kullanılan artımlı enkoderin çözünürlüğü 2048'dir.

Şekil 8'de DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Rüzgâr hızına göre referans hız  $n_{ref}$  [rpm] Denklem (20)'deki gibi elde edilmektedir. Elde edilen referans hıza göre DC motor hız kontrolü PID denetleyicisi ile yapılmaktadır.

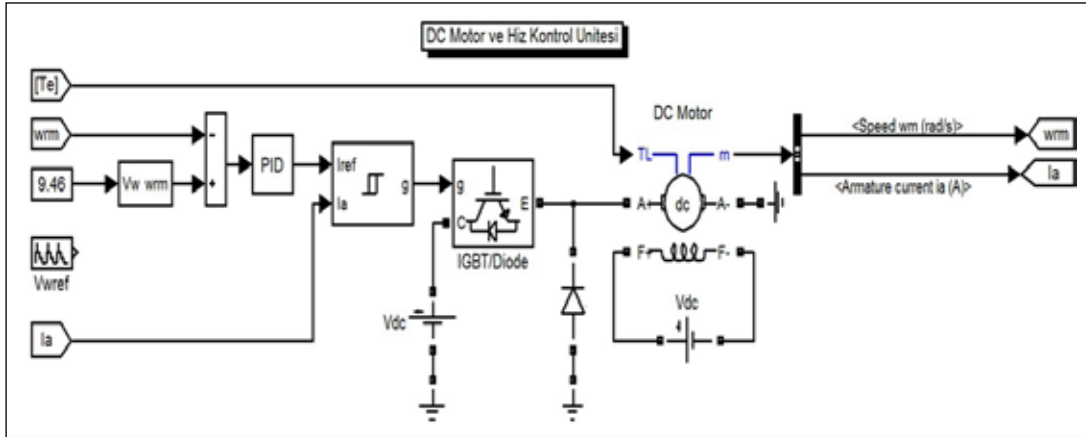


Şekil 3. Uygulama sisteminin MATLAB/Simulink® modeli.

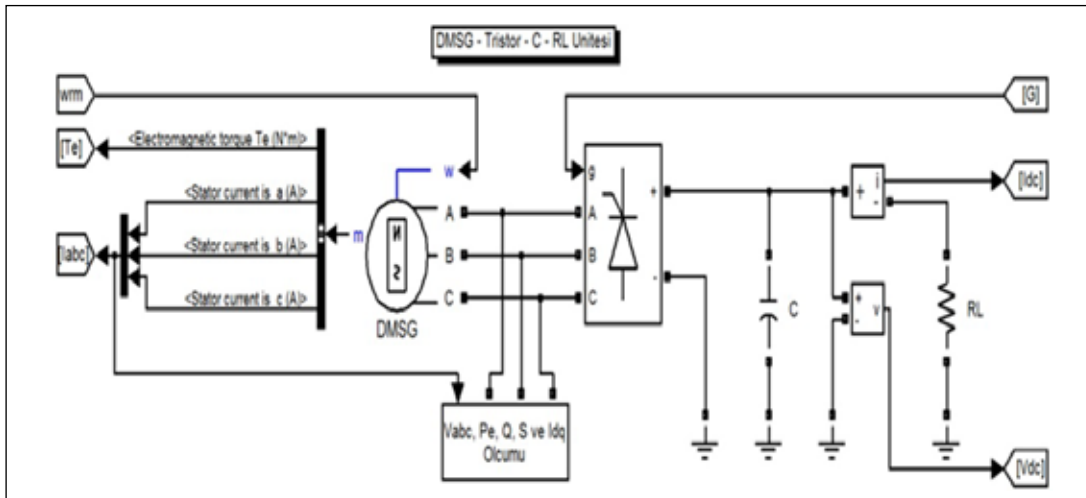
$$n_{ref} = \frac{60 \cdot \lambda_{opt} \cdot V_w}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (20)$$

Şekil 9'da DMSG'nin üç faz akım  $I_{abc}$ , gerilim  $V_{abc}$ , aktif güç  $P_e$ , reaktif güç  $Q$ , görünür güç  $S$  ve dq eksenli akım  $I_{dq}$

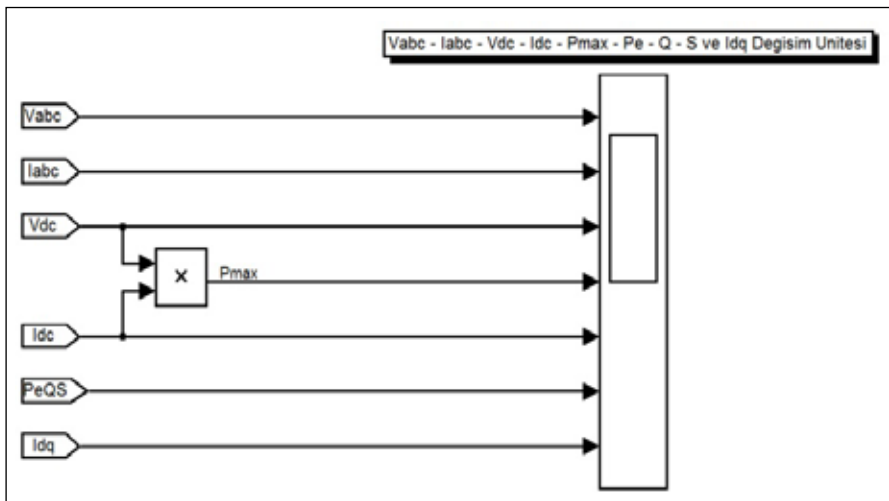
değişimleri, DC bara akım  $I_{dc}$ , gerilim  $V_{dc}$  ve güç  $P_{max}$  ölçümü ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. dSPACE'in ADC dönüştürücü kartı aracılığı ile bu değerler ölçülmektedir. Ölçülen değerler dSPACE'in ControlDesk yazılımı ile



Şekil 4. DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı.



Şekil 5. DMSG, tristör, kondansatör ve RL ünitesinin blok diyagramı.



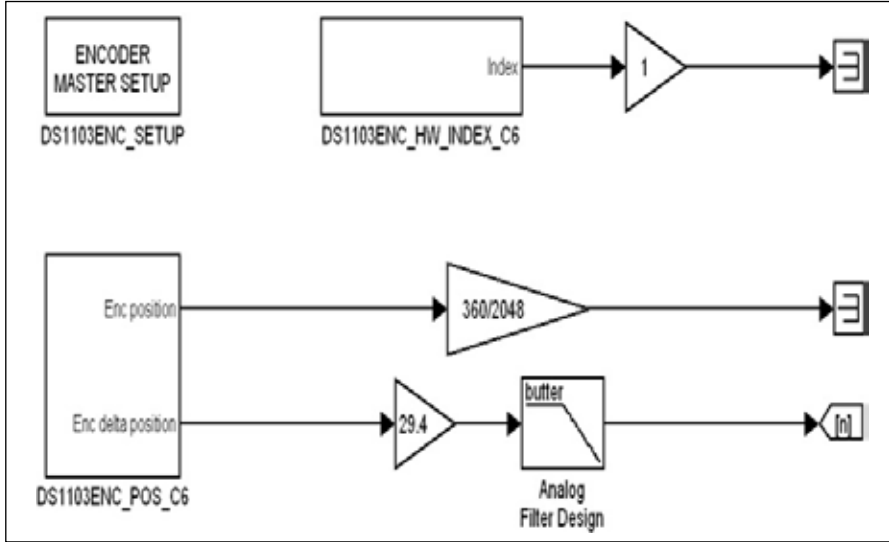
Şekil 6.  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$  ve  $I_{dq}$  değişim ünitesinin blok diyagramı.

kaydedilerek Matlab ortamında analiz edilmiştir. Şekil 10'da akım-gerilim ölçüm bloğu ve güç hesabı modeli görülmektedir.

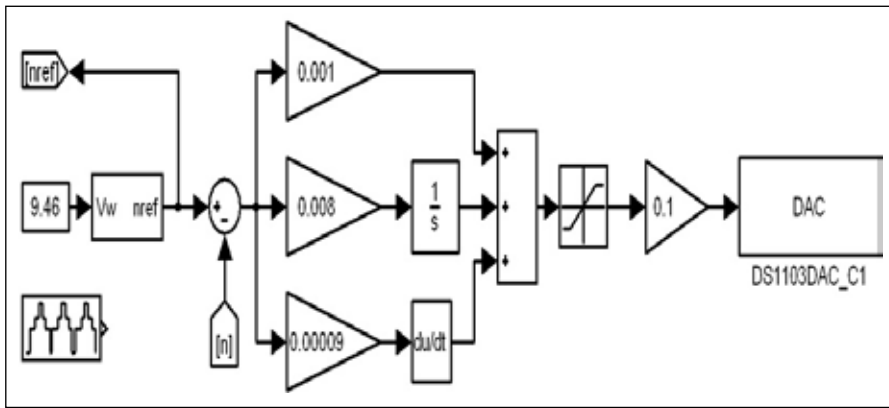
## 5. Sonuçlar

Sabit rüzgâr hızında yapılan uygulama ve benzetim sonuçları

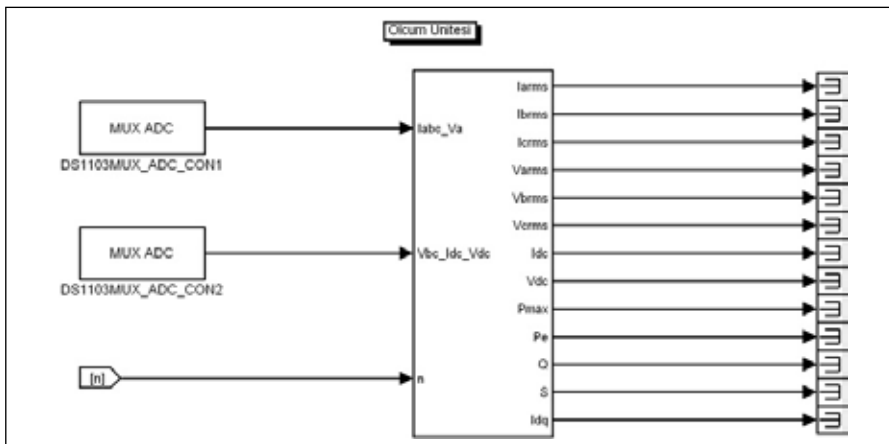
incelendiğinde, DC bara gücü, gerilimi ve akımı değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, DMSG tarafındaki akım, gerilim ve THD değişimleri Çizelge 1'deki gibidir. Çizelge 1 incelendiğinde uygulama ve benzetim sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Konum ve hız algulama ünitesinin blok diyagramı.



Şekil 8. DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı.



Şekil 9.  $I_{abc}$ ,  $V_{abc}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $I_{dq}$ ,  $I_{dc}$  ve  $V_{dc}$  ölçüm ünitesinin blok diyagramı.

Çizelge 2'de DMSG hızına göre aktif, reaktif, görünür güç ve güç katsayısı değerleri görülmektedir. Çizelge 2 incelendiğinde 275 rpm'nın altındaki hızlarda güç katsayısı 1'den küçük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, DC barada kullanılan kondansatördür. DMSG hızına göre uygun kondansatör kullanılarak bu kararsızlık giderilebilir. Şekil 11'de bu değerlerin grafiksel değişimi görülmektedir. Bu değişimler incelendiğinde aktif ve görünür gücün DMSG hızı ile orantılı bir şekilde arttığı ve reaktif güç ortalama 16,72 VAR güçte sabit kaldığı görülmektedir. Şekil

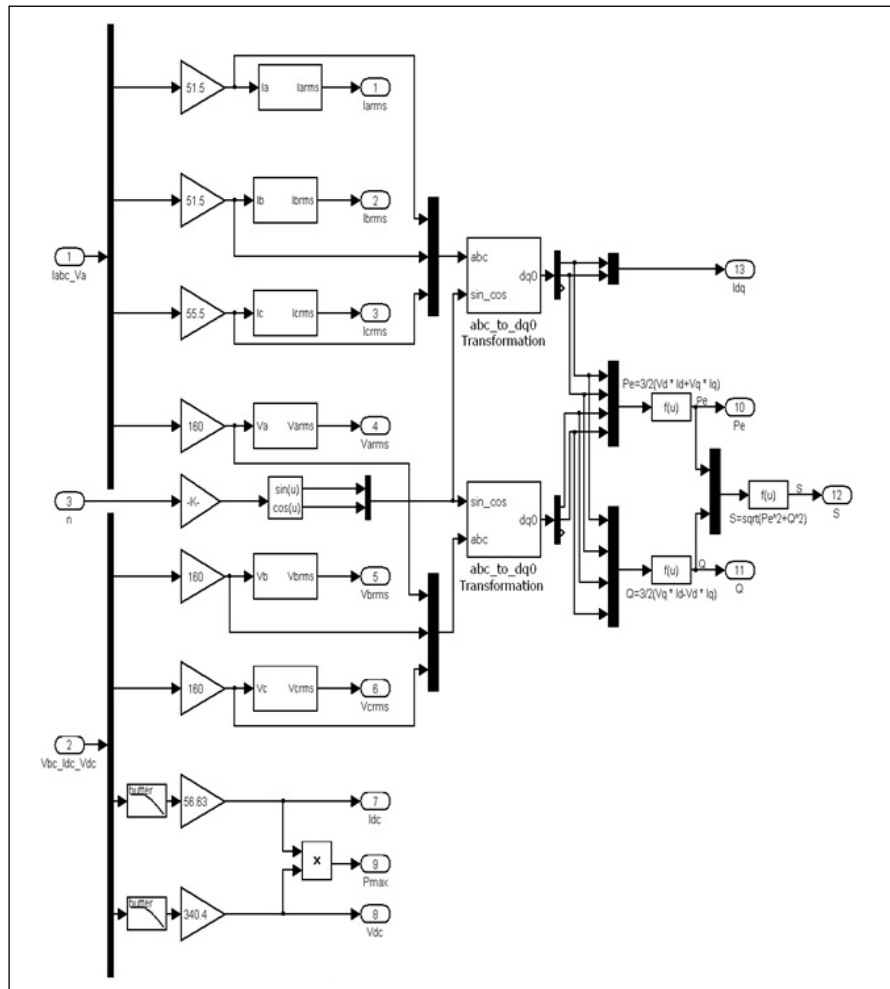
12'de ise DMSG 750 rpm ile tahrik edildiğinde elde edilen  $I_{dq}$  değişimi görülmektedir. Şekil 12 incelendiğinde  $I_q$  akımı 4,62 A ve  $I_d$  akımı ise yaklaşık 4,5 A değerine sahip olduğu görülmektedir.

## 6. Öneriler

Bu çalışmada küçük güçlü (1 kW) REDS sisteminin benzetimi, modellemesi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Enerji dönüştürücü olarak kullanılan DMSG'den maksimum güçler elde edilmiştir. Maksimum güçlerin elde

**Çizelge 1.** Farklı yüklerde DMSG tarafındaki akım, gerilim ve THD değişimlerinin değerleri.

Yük	Benzetim				Uygulama			
	$R_L$ [ $\Omega$ ]	$I_{arms}$ [A]	$V_{arms}$ [V]	THD [%]	$I_{arms}$ [A]	$V_{arms}$ [V]	THD [%]	
			Akım	Gerilim			Akım	Gerilim
43	1,872	52,02	27,93	10,21	1,874	52,13	27,05	9,49
21	3,487	49,8	21,9	15,8	3,508	49,95	21,28	15,51



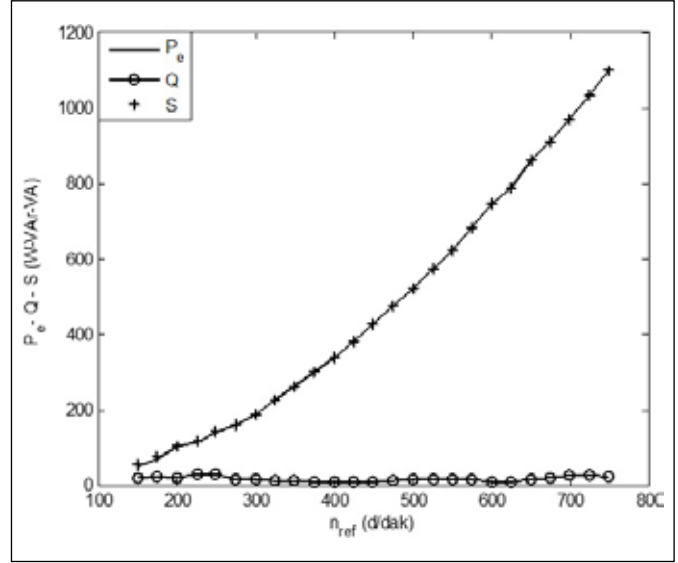
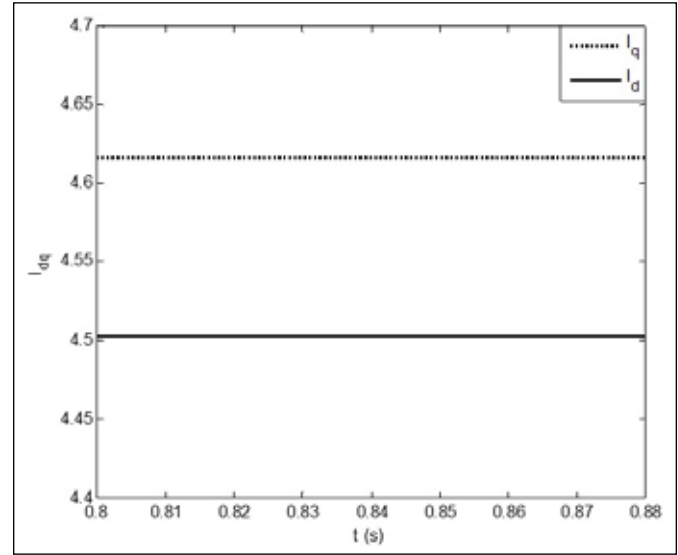
**Şekil 10.** Akım-gerilim ölçüm bloğu ve güç hesabı modeli.



**Çizelge 2.** DMSG hızına göre aktif, reaktif, görünür güç ve güç katsayısının değişimi.

$n_{ref}$ [rpm]	$P_e$ [W]	$Q$ [Var]	$S$ [VA]	$\cos(\theta)$
150	49,291	18,805	52,756	0,93
175	69,845	23,895	73,82	0,95
200	102,361	20,842	104,461	0,98
225	115,282	28,655	118,79	0,97
250	136,925	31,567	140,517	0,97
275	159,966	15,876	160,752	1
300	186,304	15,738	186,967	1
325	225,286	11,53	225,581	1
350	261,471	10,741	261,691	1
375	300,35	9,263	300,493	1
400	339,456	8,291	339,557	1
425	381,504	7,212	381,572	1
450	426,525	9,585	426,633	1
475	475,402	11,943	475,552	1
500	521,965	14,316	522,161	1
525	574,863	16,814	575,109	1
550	623,225	17,512	623,471	1
575	681,233	14,082	681,378	1
600	745,687	10,19	745,757	1
625	785,967	9,617	786,026	1
650	859,961	14,261	860,079	1
675	909,155	20,288	909,381	1
700	970,613	27,65	971,006	1
725	1033,639	24,911	1033,94	1
750	1099,59	24,452	1099,86	1

edilebilmesi için Arama Çizelgesi (Lookup Table) denetleyicisi kullanılmıştır. Yüksek dereceli matematiksel işlemlere gerek duyulmadan, basit bir denetim stratejisi ile MGNT minimum hata ile gerçekleştirilmiştir. Denetleyici performansı ve tasarlanan sistem modeli, uygulama sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan elde edilen veriler sonucunda, oluşturulan modelin geçerliliği ispatlanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışma, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili ulusal ve uluslararası çalışmalara önemli bir katkı sağlamaktadır.

**Şekil 11.** DMSG hızına göre aktif, reaktif ve görünür güç değişimleri.**Şekil 12.** DMSG'nin 750 rpm'deki  $I_{dq}$  değişimi.

## 7. Teşekkür

Bu araştırma projesinin (BAP Proje No: 2010/15) yapılmasında desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimine Teşekkür ederiz.

## 8. Kaynaklar

Ajami, A., Alizadeh, R., Elmi, M. 2016. Design and control of a grid tied 6-switch converter for two independent low power wind energy resources based on PMSGs with MPPT capability. *Renew. Energ.*, 87: 532–543.

- Alizadeh, M., Kojori, SS. 2015.** Augmenting effectiveness of control loops of a PMSG (permanent magnet synchronous generator) based wind energy conversion system by a virtually adaptive PI (proportional integral) controller. *Energy*, 91: 610–629.
- Behjat, V., Hamrahi, M. 2014.** Dynamic modeling and performance evaluation of axial flux PMSG based wind turbine system with MPPT control. *Ain Shams Eng J*, 5: 1157–1166.
- Chang, K., Lin, G. 2015.** Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization. *Simul. Model. Pract. Th.*, 52: 40–51.
- Ekonomou, L., Lazarou, S., Chatzarakis, GE., Vita, V. 2012.** Estimation of wind turbines optimal number and produced power in a wind farm using an artificial neural network model. *Simul. Model. Pract. Th.*, 21: 21–25.
- Fan, L., Miao Z., Yuvarajan, S., Kavasseri, R. 2010.** Hybrid modeling of DFIGs for wind energy conversion systems. *Simul. Model. Pract. Th.*, 18: 1032–1045.
- Gupta, RA., Singh, B., Jain, BB. 2015.** Wind energy conversion system using PMSG. In: Proceedings of the International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, Delhi, 199–203.
- Jaramillo-Lopez, F., Kenne G., Lamnabhi-Lagarrigue, F. 2016.** A novel online training neural network-based algorithm for wind speed estimation and adaptive control of PMSG wind turbine system for maximum power extraction. *Renew. Energ.*, 86: 38–48.
- Junyent-Ferré, A., Gomis-Bellmunt O., Sumper A., Sala M., Mata M. 2010.** Modeling and control of the doubly fed induction generator wind turbine. *Simul. Model. Pract. Th.*, 18: 1365–1381.
- Kuschke, M., Strunz, K. 2014.** Energy-efficient dynamic drive control for wind power conversion with PMSG: modeling and application of transfer function analysis. *IEEE J Emerg Select Top Power Electr*, 2: 35–46.
- Pelletier, F., Masson C., Tahan A. 2016.** Wind turbine power curve modelling using artificial neural network. *Renew. Energ.*, 89: 207–214.
- Ringwooda JV., Simanib S. 2015.** Overview of modeling and control strategies for wind turbines and wave energy devices: Comparisons and contrasts. *Annu. Rev. Control*, 40: 27–49.
- Sanchez, A.G., Molina M.G., Rizzato Lede A.M. 2012.** Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 37: 10064–10069.
- Tapia, R., Medina A. 2015.** Doubly-fed wind turbine generator control: A bond graph approach. *Simul. Model. Pract. Th.*, 53: 149–166.
- Thongam, JS., Tarbouchi, M., Beguenane, R., Okou, F., Merabet, A., Bouchard, P. 2012.** An optimum speed MPPT controller for variable speed PMSG wind energy conversion systems. In: Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Montreal, 4293–4297.
- Urtasun, A., Sanchis P., Martín IS., López J., Marroyo, L. 2013.** Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking. *Renew. Energ.*, 55: 138–149.