

# KÜÇÜK GÜÇLÜ BİR RÜZGAR JENERATÖRÜNDE KULLANIM İÇİN EKSENEL AKILI BİR SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORUN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

**Emin YILDIRIZ ve M. Timur AYDEMİR\***

Sivas Meslek Yüksekokulu, Cumhuriyet Üniversitesi, 58140, Sivas

\*Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi - Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06750, Ankara  
[evildiriz@cumhuriyet.edu.tr](mailto:evildiriz@cumhuriyet.edu.tr), [aydemirt@gazi.edu.tr](mailto:aydemirt@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 17.11.2008 ; Kabul/Accepted: 03.04.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, küçük güçlü bir rüzgar türbininde kullanılmak üzere geliştirilen çekirdeksiz statorlu, sürekli mıknatıslı, çift rotorlu, eksenel akılı bir jeneratörün sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Prototipi hazırlanan rüzgar jeneratörünün gerçek ölçülerinde bir modeli, sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansoft Maxwell paket programında modellenmiş ve elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz ile model üzerinde manyetik akıların dağılımı ve rotor çiftinin açıl konumuna bağlı olarak çekirdeksiz statorda bulunan sargılar üzerinde indüklenen gerilimler, farklı hız değerleri için, yüksüz ve omik yüklü durumda hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ile prototip makinede yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Eksenel akılı jeneratör, rüzgar türbini, sürekli mıknatıslı makine, sonlu elemanlarla analiz yöntemi, elektromanyetik analiz.

## ANALYSIS, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AXIAL FLUX, PERMANENT MAGNET MACHINE TO BE USED IN A LOW POWER WIND GENERATOR

### ABSTRACT

Finite element analysis of an axial flux, permanent magnet, coreless stator, double rotor machine designed for a low power wind turbine application is presented. A real size model of the machine has been prepared by using Ansoft Maxwell, and electromagnetic analysis has been conducted. Induced stator voltages depending on the magnetic flux distribution and angular position of the rotors have been obtained for different operation speed and load conditions. Results have been compared with the experimental results obtained from the prototype machine.

**Keywords:** Axial flux generator, wind turbine, permanent magnet machine, finite element analysis method (FEA), electromagnetic analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ihtiyacının giderek arttığı dünyamızda yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilgi her geçen gün artmaktadır. Rüzgar enerjisi, bu kaynaklar içerisinde, güneş enerjisi ile birlikte en çok ilgiyi çekmektedir. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan türbinler, dişli sistemli ya da doğrudan bağlantılı olarak üretilebilmektedir. Dişli sistemli rüzgar türbinleri ile düşük hızlarda bile enerji üretimi söz konusu olmasına rağmen bu sistemler, daha

fazla bakıma ihtiyaç duyması, ek maliyet getirmesi ve gürültü oluşturması gibi dezavantajlara sahiptir [1].

1980'li yıllarda NdFeB mıknatısların ortaya çıkmasıyla sürekli mıknatıslı makine teknolojisi büyük bir ivme kazanmıştır. Günümüzde elektrikli araçlardan uzay sanayine kadar pek çok alanda sürekli mıknatıslı makineler kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri de rüzgar enerjisi sistemleridir. Uyarım için mıknatısların kullanılmasıyla kayıplar azalmakta ve sistemin verimi artmaktadır.

Eksenel akılı makineler, değişik konfigürasyonlarda üretilebilir [2-4]. Tek taraflı-iki taraflı, rotor içte-stator içte, iki stator tek rotor, iki rotor tek stator, nüveli stator-nüvesiz stator bu konfigürasyonlardan bazılarıdır. Bu çalışmada, yüzey yerleştirmeli iki rotor ve nüvesiz tek statorlu, 12 kutuplu bir eksenel akılı makine incelenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektromanyetik sistemlerin analizinde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Bu yöntemle 2 boyutlu analiz yapılacağı gibi, gerçeğe daha yakın değerler isteniyorsa 3 boyutlu analiz de gerekli olabilir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir çok paket program mevcuttur. Tercih edilen programda analiz yapılırken, malzemelerin özellikleri ve sınır şartları doğru olarak girildiğinde sistemin çeşitli durumlardaki tepkileri önceden belirlenebilir.

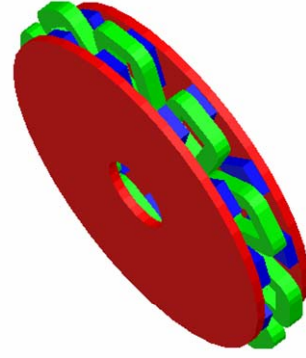
Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, yüklü ve yüksüz durumlardaki jeneratörün sargılarında indüklenen gerilim değerleri farklı hızlar için hesaplanmıştır. Küçük güçlü bir rüzgar türbininde kullanılmak üzere hazırlanan eksenel akılı jeneratör, hazırlanan test düzeneği ile farklı hızlarda çalıştırılmış ve analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 2. EKSENEL AKILI MAKİNE VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ (AXIAL FLUX MACHINE AND ITS ANALYSIS WITH FINITE ELEMENTS METHOD)

Sürekli mıknatıslı makineler, manyetik uyarıyı mıknatısın yaptığı tüm enerji dönüşümü yapan aygıtlar için kullanılan bir tabirdir [5]. Artık üretimi yaygınlaşan yüksek yoğunluklu mıknatıslar, gerek motor uygulamalarında gerekse jeneratör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürekli mıknatıslı makineler, oluşan manyetik akının durumuna göre, radyal ve eksenel olmak üzere iki temel bölümde incelenirler. Rüzgar türbini uygulamalarında her iki yapının, rotorun konumuna göre farklı versiyonları kullanılabilir [6]. Disk tipi olarak da anılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makine, yapısal özelliğinden dolayı rüzgar türbini için daha uygundur.

Rüzgar jeneratörü uygulamalarında, statorunda oluklu nüve bulunan eksenel akılı sürekli mıknatıslı jeneratörler de kullanılabilir [7]. Ancak nüvesiz statorlu, yüzey yerleştirmeli, eksenel akılı bir makinede, girdap ve histerezis akım kayıpları yok edildiğinden, verim oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır.

Şekil 1'de Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı (EASM) makine modeli görülmektedir. Makinedeki disk tipi rotorlar, çelik üzerine yerleştirilmiş sürekli mıknatıslardan oluşmaktadır. Her iki rotorda da eşit sayıda bulunan sürekli mıknatıslar, aynı konumda bulunan karşısındaki rotor çeliğinin üzerine yerleştirilmiş mıknatısla ve aynı çelik üzerinde yanında bulunan mıknatısla ters kutuplamaya sahip olmalıdır. Böylece, mıknatıslar, hava aralığı, stator sargıları ve rotor

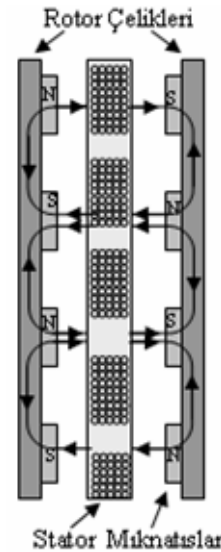


Şekil 1. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı jeneratör modeli (Axial Flux Permanent Magnet Generator Model)

çelikleri üzerinden kapanan bir manyetik devre elde edilir.

Şekil 2'de eksenel akılı bir makinede, manyetik alanların dağılımı görülmektedir. Manyetik alan analizinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) Maxwell eşitliklerinden yararlanır [8]. Sonlu elemanlar yönteminin elektrik makinelerinin tasarımına uygulanması, akı bağı, indüklenen gerilimler, çekirdek kayıpları, sargı indüktansları ve manyetik moment gibi önemli tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesine imkan tanır [9,10].

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken 2 boyutlu ya da 3 boyutlu analiz tercih edilebilir. 2 boyutlu analizde, yaklaşık sonuca daha kısa sürede ulaşmak mümkündür ancak; 2 boyutlu analiz, radyal ve eksenel geometrinin tamamını işleme katmaz ve bu nedenle yapı üzerindeki akı dağılımlarını doğru olarak hesaplayamaz. 3 boyutlu analizde ise neredeyse tam doğru sonuca, biraz daha uzun zamanda ulaşılır. Bu çalışmada modelin sadeliği nedeniyle, 3 boyutlu analiz kullanılmıştır.



Şekil 2. EASM makinede manyetik alanın dağılımı (Magnetic field distribution in the Axial Flux PM Machine)

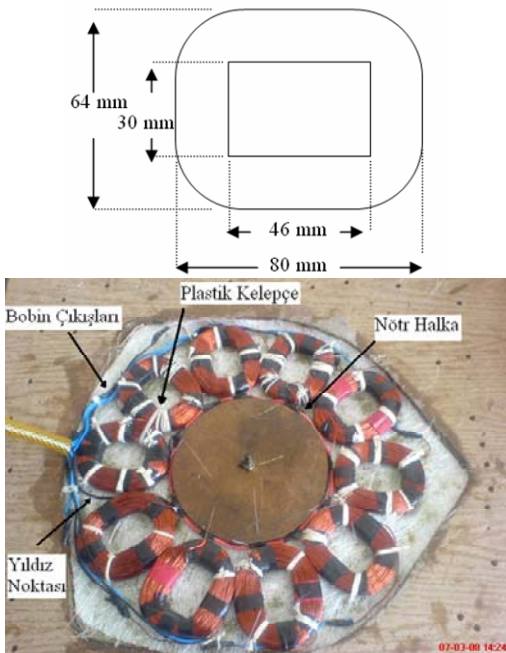
### 3. KURULAN SİSTEMİN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF THE INVESTIGATED SYSTEM)

Bu makalede, [11] numaralı kaynakta sunulan ve elektrik enerjisinin ulaşmadığı uzak kırsal yörelerde bir çözüm seçeneği oluşturabilecek, elle üretilmesi olası, küçük güçlü bir rüzgar türbininin üretimi ve analizi hedeflenmiştir. Kurulan sistemde stator sargıları istenilen sarım ve boyutlarda oluşturulduktan sonra, birbirlerine tutturularak sabitlenir ve epoksi reçine, talkum tozu ve sertleştirici karışımıyla oluşturulan malzemeye gömülür. Rotor yapıları da mıknatısların doğru polarizasyonda çeliğin yüzeyine yerleştirilmesinden sonra aynı karışıma gömülür. Böylece mıknatısların yapısal zorlanmalara ve korozyona karşı korunması sağlanmış olunur. İzleyen bölümde, sistemin bileşenleri tanıtılmaktadır.

#### 3.1. Stator Sargıları (Stator Windings)

Statorda bulunan sargıların her biri, 1.15 mm emaye bakır telden 150 sarım olarak sarılmıştır. SEY ile analiz yapılırken programda bakırın bağıl geçirgenliği  $\mu_r=0.999991$  ve iletkenliği  $5.8 \times 10^7$  olarak girilmiştir.

Sargıların elektriksel özellikleri,  $R_{DD}=0.69 \Omega$ ,  $R_{AA}=0.75 \Omega$  ve  $L=1.425$  mH olarak ölçülmüştür. Sargıların, mıknatısların oluşturacağı manyetik alandan en iyi şekilde yararlanması, indüklenen sargı gerilimlerinin sinüzoidal olması ve sargı gerilimleri arasındaki faz farkının aynı olması için sargıların düzgün şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Şekil 3'de, sargı şeması ve sargıların konumlandırılmış durumu görülmektedir. Oluşturulan 10 sargının birer uçları yıldız olarak bağlanmış ve diğer uçlar dışarıya çıkartılmıştır.



Şekil 3. (Üst) Sargı şeması ve (Alt) Sargıların stator üzerindeki konumları (Top) Winding Scheme and (Bottom) Winding placement on the stator

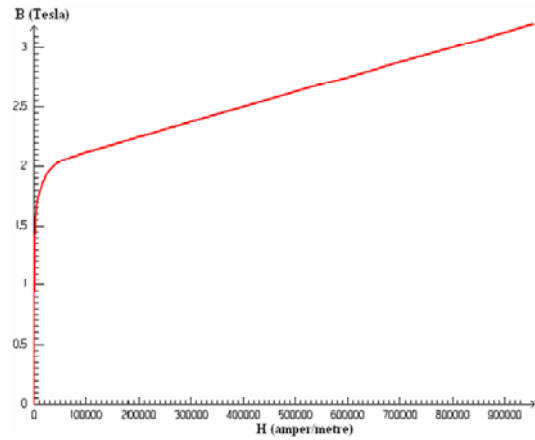
#### 3.2. Rotor Çeliği (Rotor Steel)

Bir malzemenin manyetik özelliği kolaylıkla bozulabiliyorsa bu tür malzemelere yumuşak manyetik malzeme denir [3]. Analiz yapılırken yumuşak manyetik bir malzeme olan çeliğin BH eğrisi belirtilmelidir. Çalışmamızda, elektrik makine analizlerinde yaygın olarak kullanılan SA1010 çeliği seçilmiştir. Bu malzemenin BH eğrisi, Şekil 4'de görülmektedir.

#### 3.3. Mıknatıslar (Magnets)

Sert manyetik malzemelerin yüksek koersivite ve düşük geçirgenlik özellikleri, onların magnetize ve demagnetize olmalarını zorlaştırır. Bu tür malzemeler, bir kez mıknatıslanıp ondan sonra uzun süre bu mıknatıslanmalarını korumalarından dolayı sürekli mıknatıslar olarak adlandırılırlar [3]. Günümüzde sürekli mıknatıslı makinelerde en yaygın olarak kullanılan mıknatıs NdFeB mıknatıstır. Üretilen eksenel akılı makinede bir rotor çeliği üzerinde bulunan 12 adet mıknatıs, eşit aralıklarla düzgün şekilde yerleştirilmiştir. Mıknatıslar, çelik üzerine monte edilirken bir yanında bulunan mıknatıs ile ters polarizasyonda olacak şekilde yerleştirildiğine dikkat edilmelidir. Şekil 5'de, oluşturulan rotor disklerinden biri görülmektedir.

SEY'de kullanılan 46mm x 30mm x 10mm boyut-



Şekil 4. Sistemde kullanılan rotor çeliğinin B-H eğrisi (B-H curve of the rotor steel used in the set-up)



Şekil 5. Epoksiye gömülmüş mıknatıslarla bir rotor diskinin görünümü (View of a rotor disc with magnets buried in the epoxy)

larındaki dikdörtgen prizması biçimindeki NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Statorda çekirdek olmadığından ve dolayısıyla hava boşluğunun fazla olmasından dolayı mıknatısların boyutları, çekirdekli eksenel akılı jeneratörlere göre daha büyüktür. Düşük güçlü uygulamalarda bu bir sorun olmasa da, büyük güçlü sistem tasarımlarında mıknatıs boyutlarının büyümesi maliyeti arttıracığından, bu tercih edilmeyebilir.

**Tablo 1.** NdFeB mıknatısın manyetik özellikleri (Magnetic Properties of NdFeB)

Bağıl Geçirgenlik ( $\mu_r$ )	1.0997785406
İletkenlik	6.25e+005 Siemens/m
Manyetik Koersivite ( $H_c$ )	-9.75e+005 A/m
Artık mıknatıslık ( $B_r$ )	1.34747191166 Tesla
Mıknatıslanma ( $M_p$ )	1072284.07709 A/m

### 3.4. Epoksi Tabaka (Epoxy Layer)

Statorda sargılar birbirlerine tutturulduktan sonra sargıların, mıknatıslar çeliklere konumlandırıldıktan sonra da mıknatısların gömüldüğü epoksi reçinenin manyetik geçirgenliği hava boşluğuna yakın olduğu için, epoksi tabakanın analiz esnasında sonuca çok fazla etki etmeyeceği düşünülmüş ve işleme konulmamıştır.

### 3.5. Deney Düzenegi (Experimental Set-up)

Elde edilen rotor diskleri hareketli flanş üzerine monte edilirken stator kalıbı ise jeneratör gövdesine sabitlenmiştir. Stator ile bir rotor diski arasında 1 mm hava boşluğu bırakılmıştır. Statorun 10 sargı çıkışı, 5 fazlı doğrultucuya bağlanmıştır.

Hazırlanan test düzenegi, Şekil 6’da görülmektedir. Jeneratör, bir AA hız kontrol sürücüsü ile hızı kontrol edilebilen bir asenkron motor tarafından sürülmüştür. Jeneratör, test yüzeyine dik olacak şekilde sabitlen-

miştir. Böylece deney süresince jeneratör, kasnak sistemi ile istenilen hızda döndürülmüştür.

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu bölümde, tasarlanan sistem üzerinde SEY ile yapılan analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar sunmakta, sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Tasarlanan eksenel akılı makinenin gerçek boyutlarında oluşturulan modeli kullanılarak, malzeme özellikleri girildikten sonra SEY ile benzetim yapılmıştır. Şekil 7’de, jeneratör üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi manyetik akı yoğunluğu mıknatısların merkezinde maksimum değerini almıştır.

Rotor diskleri birlikte hareket ettiklerinde, sabit olarak duran stator sargılarını keserek bir gerilim indükleyeceklerdir. Sargılar üzerinde indüklenen gerilimleri hesaplayabilmek için, sargı yüzeyinden geçen akının rotor disklerinin açılal konum ile nasıl değiştiğini tespit etmek gerekir. Bir sargı için manyetik akı (1) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Phi = \int_s B \cdot dS \quad (1)$$

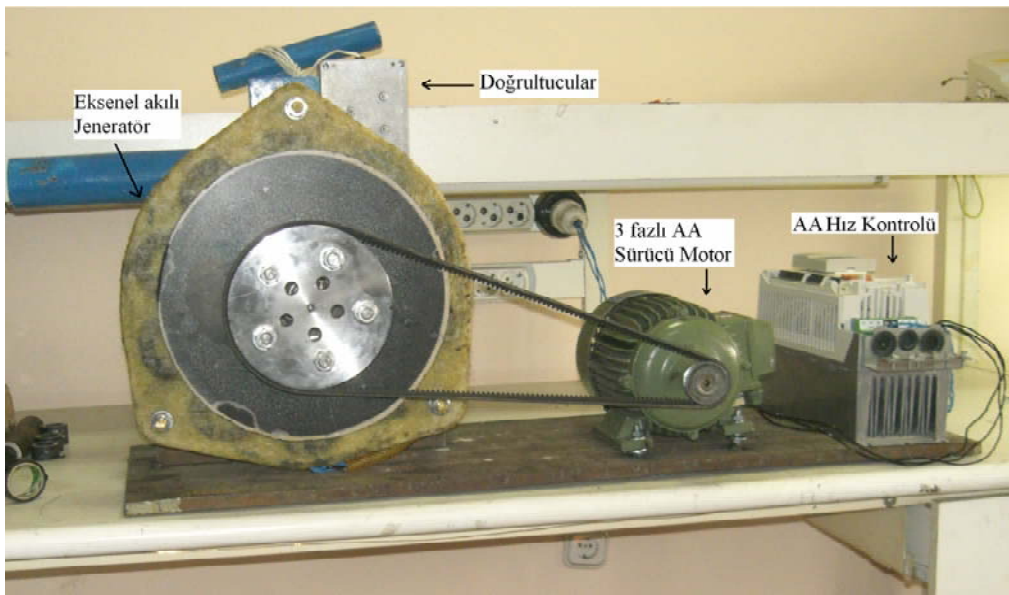
Sargıda indüklenen gerilim;

$$e(t) = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

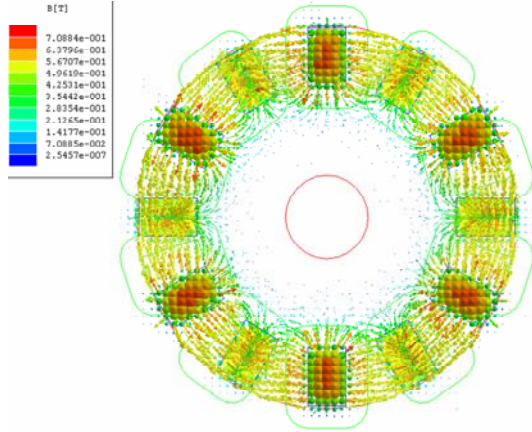
ya da

$$e(t) = N \cdot \frac{d\Phi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

eşitliklerinden bulunabilir. Rotor konumunun zamanla



**Şekil 6.** Deneysel çalışma düzenegi (Experimental Set-up)



Şekil 7. Manyetik akı yoğunluğunun dağılımı (Magnetic flux density distribution)

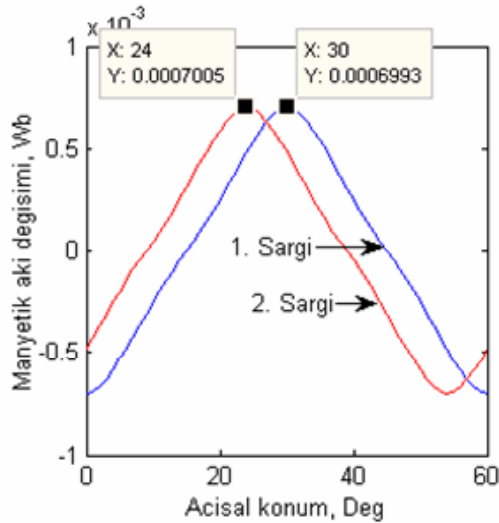
değişimi, açısal hızı vereceğinden gerilim;

$$e(t) = N \cdot \omega \cdot \frac{d\Phi_g}{d\theta} \quad (4)$$

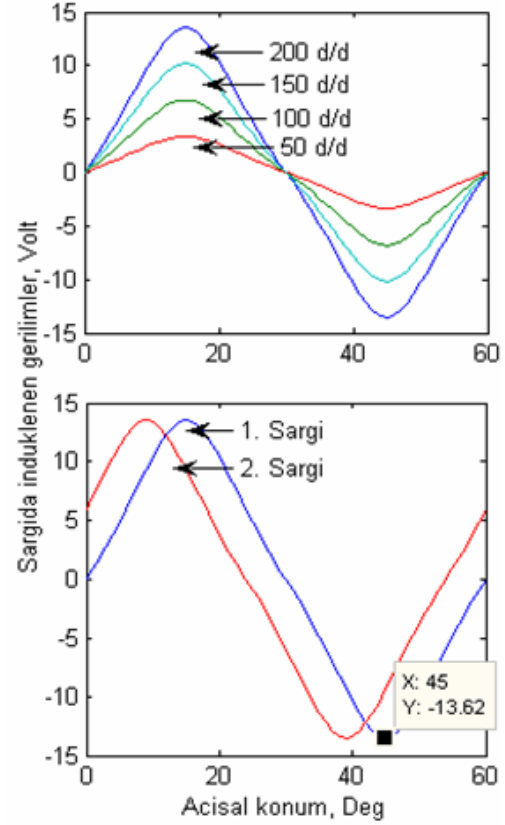
olarak yazılabilir.

Jeneratörün yüksüz çalıştığı durumda, rotor disklerinin 60° açısal hareketi sonucunda yan yana bulunan iki sargıdaki manyetik akının değişimleri Şekil 8'deki gibi olur. Şekilde görüldüğü gibi, iki sargıdaki akı değişimleri arasında 36° faz farkı bulunmaktadır.

Şekil 9'da farklı hızlarda, B1 sargısında indüklenen gerilim değişimleri ve 200 d/d hızda B1 ve B2 sargılarında indüklenen gerilimler görülmektedir. İndüklenen gerilimlerin tepe değeri,  $E_{\max} = 13.62$  V olarak bulunmuştur. Dişli kutusu olmayan aksel akılı sürekli mıknatıslı jeneratörlerde doğrudan bağlantı olduğundan, rüzgar hızı değiştiğinde indüklenen gerilimlerde dalgalanmalar olacaktır. Bu nedenle sargılarda indüklenen gerilimler, çıkışta doğrultularak kullanılabilir bir gerilim elde edilir.



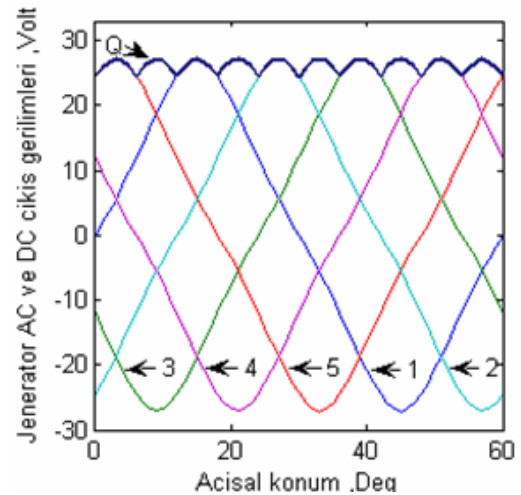
Şekil 8. B1 ve B2 sargıları için akı değişimleri (Flux variation for windings B1 and B2)



Şekil 9. (Üst) B1 sargısında farklı hızlardaki indüklenen gerilim ve (Alt) B1 ile B2 sargı gerilimleri. ((Top) B1 winding induced voltage at various speeds, (Bottom) B1 and B2 voltages)

Sargılar kendi aralarında yıldız bağlanıp dış devreye alınan sargı uçları 5 fazlı köprü tipi doğrultucuya bağlanır. 200 d/d jeneratör hızında çıkıştaki 5 faz gerilimleri ve köprü tipi doğrultucuların çıkışındaki DA gerilim, Şekil 10'da görüldüğü gibidir.

DeneySEL çalışmalarda öncelikle, jeneratör boşta çalışırken, çıkış gerilim değerinin jeneratör hızıyla değişimi incelenmiştir. AA hız kontrol cihazı ile jeneratör,

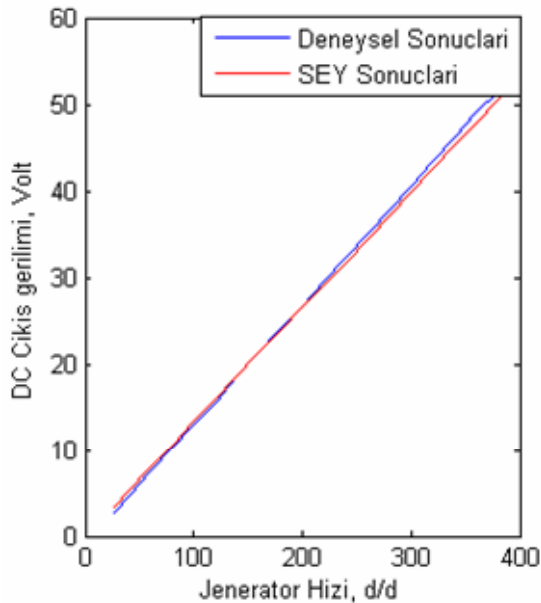


Şekil 10. Jeneratör 5 faz çıkışı ve doğrultucu çıkışı (5-phase output voltage and rectified voltage)

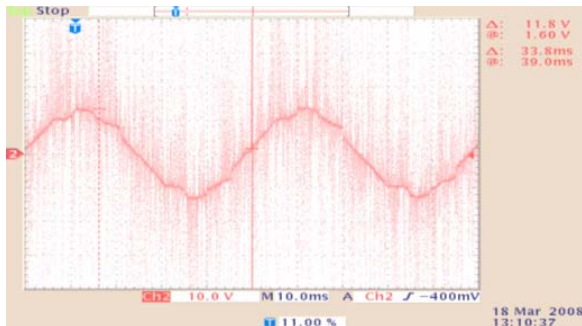
26 d/d ile 400 d/d arasında 20 farklı hız kademesinde çalıştırılmış ve her bir kademe de çıkış gerilimleri ölçülmüştür. Jeneratör çıkışına  $4\Omega$  omik bir yük bağlandığında, doğrultucu çıkışından ölçülen akım ve gerilim değerleri ile jeneratör çıkış gücü izlenmiştir. Ayrıca jeneratör yüklü iken yıldız noktası ile doğrultucunun bir alternatif akım girişi arasından osiloskop vasıtasıyla bir sargı gerilimin değişimi izlenebilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde; SEY' de, 200 d/d jeneratör hızında Şekil 10'da görülen çıkışın ortalama değeri alınarak çıkış geriliminin değeri 26.5 V olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda, prototip rüzgar jeneratöründen ölçülen gerilim ise 26.6 Volt olmuştur. Şekil 11'de yüksüz durumda farklı hızlarda, SEY ve deney sonuçları, Tablo 2'de ise SEY ve deneysel değerler görülmektedir.

Jeneratör yüklendiğinde ise sargıların üzerinden geçen akımın etkisiyle kutup akılarına zayıflamalar görülecektir. Hava aralığı manyetik akının zayıflaması da sargılarda indüklenen gerilimlerin azalmasına neden



Şekil 11. Yüksüz durumda jeneratör ile çıkış gerilimi değişimi SEY ve deney sonuçları (FEA and experimental results for the generator output voltage at no load)



Şekil 12. Omik yükte ölçülen bir sargı gerilimi (Winding voltage with ohmic load)

Tablo 2. Deneysel çalışma ve SEY sonuçları (Experimental and FEA Results)

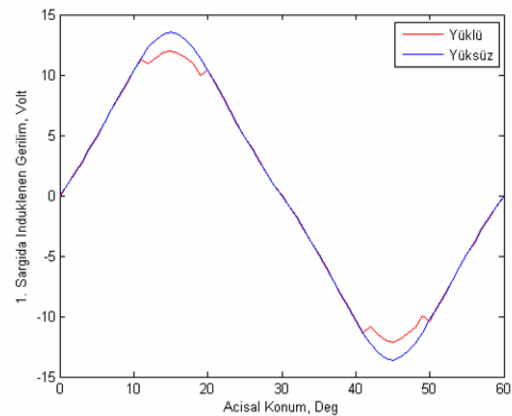
Jeneratör Hız (d/d)	Deneysel Sonuçlar (V)	SEY Sonuçları (V)
26	2,64	3,452
40	4,74	5,311
60	7,57	7,966
80	10,35	10,62
100	12,83	13,28
121	15,61	16,07
140	18,5	18,59
159	21,24	21,11
180	23,94	23,9
200	26,6	26,55
221	29,78	29,34
239	32,2	31,73
260	35,1	34,52
281	38	37,31
300	40,6	39,83
320	43,37	42,49
341	46,2	45,28
360	48,97	47,8
380	51,5	50,45
400	54,73	53,11

olur. Şekil 12'de jeneratörün çıkışına omik yük bağlı iken bir sargıda indüklenen gerilim ve Şekil 13'de SEY ile hesaplanan etki görülmektedir.

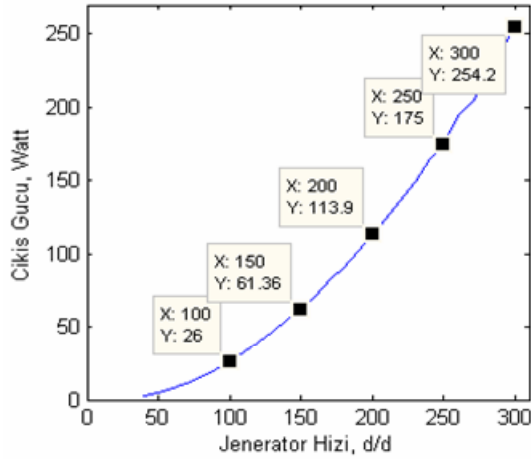
Rüzgar türbinlerinde üretilen güç, jeneratör dönüş hızıyla orantılıdır. Şekil 14'te  $4\Omega$  sabit omik yükte çıkış gücünün jeneratör hızıyla değişimi ve Tablo 3'te ise ölçüm değerleri görülmektedir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrik enerjisinin ulaşmadığı kırsal bölgelerde kullanılabilir, elle yapımı olası, küçük güçlü bir rüzgar türbini için sürekli mıknatıslı, aksel akılı, statoru çekirdeksiz, çift rotorlu bir senkron jeneratörün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi yapılmış ve elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda rotor çiftinin



Şekil 13. Omik yüklü ve yüksüz durumda SEY ile hesaplanan bir sargı gerilimi (Winding voltage computed with FEA for loaded and unloaded generator)



**Şekil 14.** 4 Ω omik yükte çıkış gücünün jeneratör hızıyla değişimi (Output power variation with respect to shaft speed at 4 Ω Load)

60° açısal hareketi sonucunda sargılardaki akı değişimleri incelenerek sargılarda indüklenen gerilimler farklı hızlarda yüklü ve yüksüz durum için hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$H_c$	Manyetik koersivite (A/m)
$B_r$	Atık mıknatıslık (Tesla)
$\mu_r$	Bağıl geçirgenlik
$R_{DD}$	Doğru akım direnci (Ω)
$R_{AA}$	Alternatif akım direnci (Ω)
$L$	İnduktans (H)
$M_p$	Mıknatıslanma (A/m)
$\Phi$	Manyetik akı (Wb)
$\Phi_g$	Hava aralığı manyetik akısı (Wb)
$B$	Manyetik alan şiddeti (Tesla)
$N$	Sarım sayısı
$\theta$	Rotor açısal konumu
$\omega$	Açısal hız (rad/s)
$E_{max}$	İndüklenen max. gerilim (V)

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 2221 - Konuk Bilim İnsanı Destekleme Programı ile desteklenerek Haziran-Ağustos 2006 tarihleri arasında Gazi Üniversitesi'nde konuk araştırmacı olarak bulunan Dr. Giri Venkataramanan'ın değerli çabalarıyla başlatılmıştır. Bu nedenle, Dr. Giri Venkataramanan'a, desteği sağlayan TÜBİTAK'a, ayrıca malzeme temininde ve deneysel çalışmalarda destek olan Uzun Mühendislik ve Nuriş Elektrik ve Kaynak Makineleri firmalarına teşekkür ederiz.

**Tablo 3.** 4 Ω omik yükte çıkış gücünün jeneratör hızıyla değişim değerleri (Output power variation with respect to shaft speed at 4 Ω Load)

Jeneratör Hızı (d/d)	Çıkış Gücü (W)	Jeneratör Hızı (d/d)	Çıkış Gücü (W)
40	2,8	180	90,65
50	5,016	190	102,18
60	7,84	200	113,905
70	11,458	210	123,861
80	15,64	220	136,86
90	20,309	230	149,31
100	26	240	164,67
110	32,306	250	175,032
120	39,04	260	194,32
130	46,55	270	203,67
140	54,53	280	220,4
150	61,36	290	239,2
160	70,95	300	254,2
170	82,72		

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Chalmers, B.J., Wu, W., Spooner, E., "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator For a Gearless Wind Energy System", **IEEE Trans. on Energy Conversion**, vol.14, 251-257, 1999.
- Aydin, M., Huang S., Lipo T. A., "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review", **SPEEDAM Conf.**, Capri-Italy, 61-71., May 2004.
- Gieras, F.J., Wang, R., Kamper M. J., **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine**, Kluwer Academic Publishers, USA, 2004.
- Aydin, M., **Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors for Smooth Torque Traction Drive Applications**, Doktora Tezi, University of Wisconsin-Madison, 2004.
- Rizk, J., Nagrial, M.H., "Permanent-magnet generators for wind turbines", **The Third International Power Electronics and Motion Control Conference**, vol.1, 208-212, 2000.
- Chen, Y., Pillay, P., Khan, A., "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", **IEEE 39th Industry Applications Conference**, vol.3, 1405- 1412, 2004.
- Chen, Y., Pillay, P., "Axial-Flux PM Wind Generator with A Soft Magnetic Composite Core", **IEEE 48th Industry Applications Conference**, vol.1, 231-237, 2005.
- Vyas, R., **Effect of Toothless Stator Design on the Dynamic Performance of Permanent Magnet Generators**, Doktora Tezi, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 1992.
- Gürdal, O., **Elektrik Makinelerinin Tasarımı**, Nobel Yayınevi, Eylül 2001.
- Kurt, U., **Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler İçin Yeni Tasarım Modeli Geliştirme**, Doktora tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2006.
- Piggot, H., **How to build a wind turbine**, Scoraig Wind Electric, Scotland, 2005.