

# 20 kW OTONOM RÜZGÂR TÜRBİNİNDE KULLANILAN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Sinan GÜNGÖR<sup>1</sup> ve Numan S. ÇETİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi  
Bornova, İzmir. e-posta: [sinan.gungor@ege.edu.tr](mailto:sinan.gungor@ege.edu.tr)

<sup>2</sup>Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi  
Bornova, İzmir. e-posta: [numan.sabit.cetin@ege.edu.tr](mailto:numan.sabit.cetin@ege.edu.tr)

## ABSTRACT

*In this paper an application of Finite Element Method (FEM) for the magnetic field calculation of a permanent magnet synchronous generator which used in small power wind turbines is introduced and result presented. Design parameters of the generator can be optimized by using results of magnetic field analysis.*

**Anahtar sözcükler:** Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Türbini Senkron Generatör, Sonlu Eleman Yöntemi

## 1. GİRİŞ

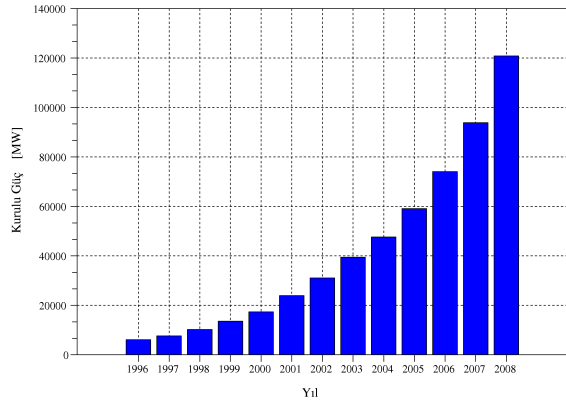
Fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması, küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi hayati nedenlerle; yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda çok fazla önem kazanmıştır. Gelişmiş ülkeler, bu kaynakların kullanılabilmesi için yapılan Ar-Ge çalışmalarına büyük destekler sağlamaktadır. Bu sistemlerin maliyet ve güvenilirlik problemleri yapılan araştırmalar sonucunda, her geçen gün daha aza indirgenmektedir. Rüzgâr enerjisi çevrim sistemleri, yıllık rüzgâr hızı ortalamasının 5m/s'nin üzerinde olduğu yerlerde, kurulum maliyeti açısından rakipleri ile rekabet edebilecek düzeydedir[1].

Rüzgâr enerjisi, özellikle ülkemiz için en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir [2]. Rüzgâr türbin teknolojisindeki gelişmeler, elektrik enerjisi üretimi amaçlı rüzgâr türbinlerinin birim enerji maliyetinin düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak dünyada, rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır Şek. 1 son yıllardaki bu artışı göstermektedir.

## 2. KÜÇÜK GÜÇLÜ OTONOM RÜZGÂR TÜRBİNİ UYGULAMALARI

Elektrik enerjisi üretimi amaçlı rüzgâr türbinlerini; şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız (Otonom) sistemler olmak üzere iki ana başlık altında toplayabiliriz. Küçük güçlü rüzgâr enerjisi çevrim sistemleri, genellikle karşımıza otonom sistem olarak

çıkılmaktadır. Bu çalışmada; enterkonnekte sistemin ulaşamadığı, uzak kırsal bölgelerde, ada veya deniz alanlarında kullanılmakta olan şebeke bağlantısız rüzgâr türbinleri üzerinde durulmaktadır. Bu tür sistem uygulamalarında kullanılan elektrik makinesi, genellikle sürekli mıknatıslı senkron generatördür Sisteme ait bir uygulama örneği Şek. 2'de görülmektedir.



Şekil 1. 1996-2008 yılları arasında dünya kurulu rüzgâr türbini gücü değişimi

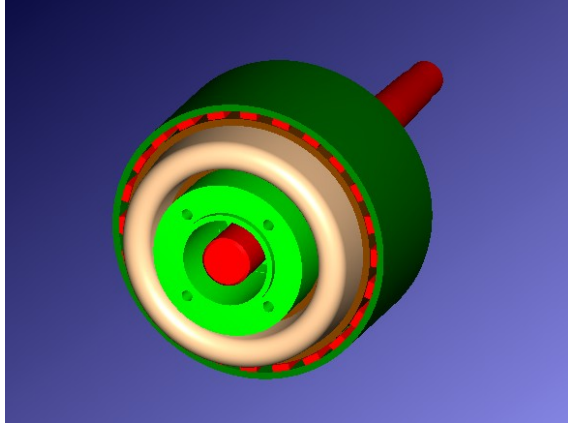


Şekil 2. Tipik bir otonom rüzgâr türbini örneği: Baz istasyonu uygulaması (Datça / İzmir)

## 3. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ

Sonlu eleman yöntemi (SEY) bir çok mühendislik alanında kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için

kullanılan bir sayısal yöntemdir. Bu yöntem elektrik makinalarının tasarımında magnetik alan dağılımının ya da ısı dağılımının bulunması gibi problemlerin çözümünde kullanılabilir [3, 4]. Bu çalışmada sonlu eleman yönteminden sürekli mıknatıslı senkron generatörün magnetik alan dağılımını belirlemek için yararlanılmış, generatörün sargı akıları ve demir kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplamaları yapılan dış rotorlu, 24 kutuplu generatörün katı modeli Şek.3'de verilmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçların doğrulanması için 20 kW güç için imal edilmiş generatörün gerekli deneyleri yapılmıştır.

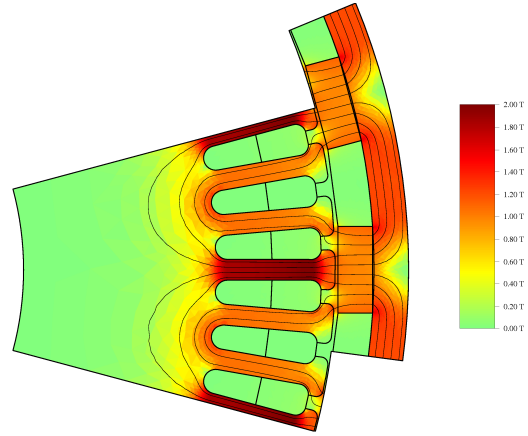


Şekil 3. Sonlu eleman yöntemi ile magnetik alan hesaplamaları yapılan senkron generatör.

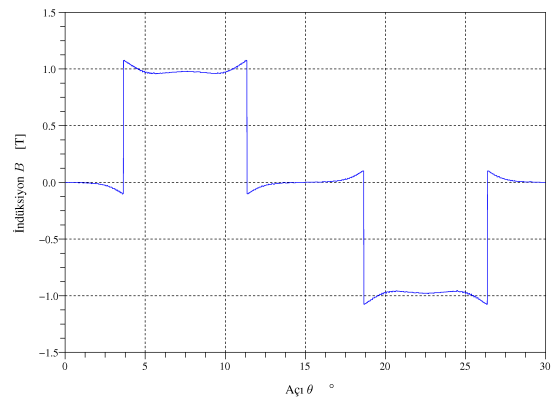
Magnetik alan bir vektör potansiyelden  $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$  biçiminde türetilmektedir. Bu çalışmada iki boyutlu bir sonlu eleman analizi kullanılmıştır. Bu durumda magnetik vektör potansiyel ve akım yoğunluğu vektörleri sırasıyla  $\vec{A} = A(x, y) \vec{e}_z$  ve  $\vec{J} = J(x, y) \vec{e}_z$  biçimde yazılabilir. Bu büyüklükler Poisson denklemini sağlamaktadırlar

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = J \quad (1)$$

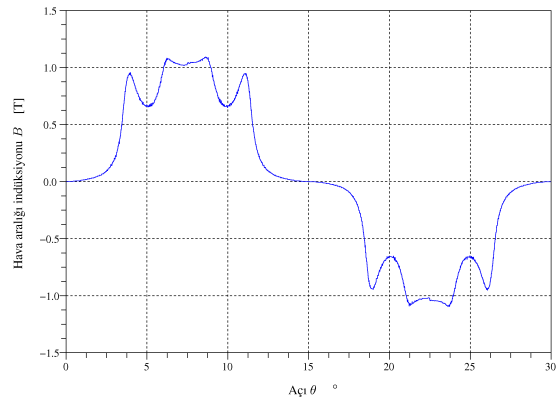
Bu denklem uygun sınır koşulları ile sonlu eleman yöntemi ile çözülmektedir. Açısal yinelenen yapısı nedeniyle generatörün yalnızca bir kutup çifti için olan bölümünün hesaplanması yeterlidir. Periyodluk özelliği sınır koşulu olarak göz önüne alınmıştır. Mil yüzeyi ve rotor dış yüzeyi için Dirichlet sınır koşulu uygulanmıştır. Generatörde kullanılan sürekli mıknatıslar NdFeB (Neodimyum Demir Bor) türü mıknatıslar olup, sonlu eleman modelinde  $H_c$  değerinde yüzeyel akımlar ile modellenmiştir. Şek. 4 generatörün bir kutup çifti için hesaplanan indüksiyon dağılımı görülmektedir. Aynı rotor konumunu için magnetik indüksiyonun farklı yaylar boyunca değişimi Şek. 5, 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 4. Generatördeki magnetik indüksiyon dağılımı.



Şekil 5. Mıknatıs yüksekliği ortasından geçen bir yay boyunca magnetik indüksiyonun değişimi



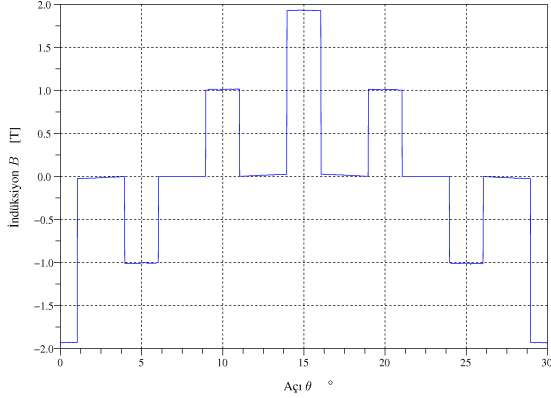
Şekil 6. Hava aralığı ortasından geçen bir yay boyunca magnetik indüksiyonun değişimi (Şek. 4'deki rotor konumu için)

#### 4. SENKRON GENERATÖR TASARIM PARAMETRELERİ ve OPTİMİZASYONU

##### Hava Aralığı

Generatörün hava aralığı mıknatısların çalışma noktası en uygun olacak biçimde seçilmelidir. Gerektiğinde başlangıç tasarımındaki hava aralığı mıknatısın mag-

netik alan şiddeti ve indüksiyon çarpımı  $(HB)_{maks}$  olacak biçimde düzeltilmelidir.



**Şekil 7.** Stator dış yüksekliği ortasından geçen bir yay boyunca magnetik indüksiyonun değişimi (Şek. 4'deki rotor konumu için)

### Sargılar

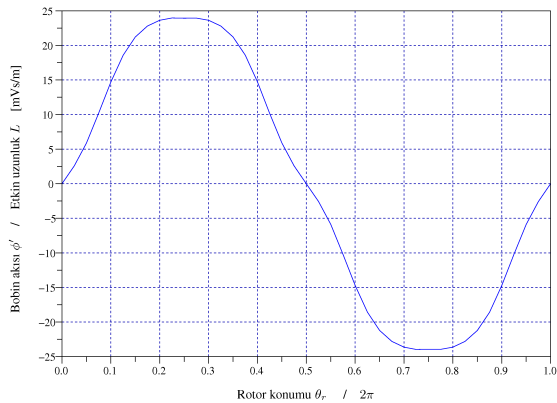
Bir sargı bobinin halkalama akısı

$$\psi_b = N_b L (\underline{A}_p - \underline{A}_n) \quad (2)$$

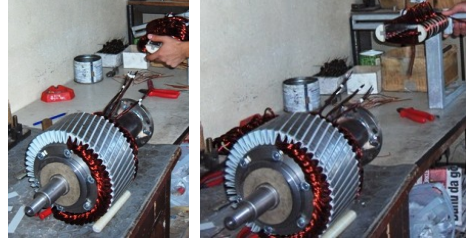
bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada  $\underline{A}_p$  ve  $\underline{A}_n$  bobin yanı yüzeyindeki ortalama vektör potansiyeller

$$\underline{A}_{p,n} = \frac{1}{S} \iint_{S_{p,n}} A dx dy \quad (3)$$

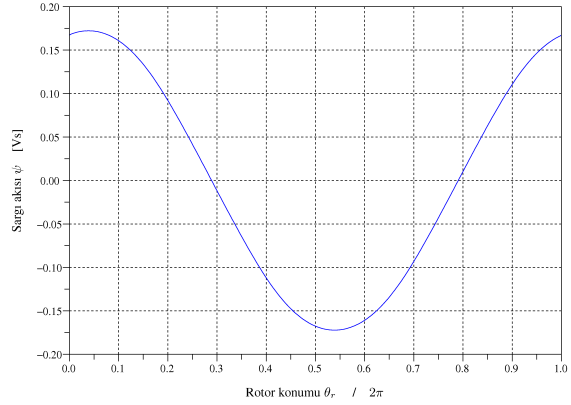
$N_b$  bobin sarım sayısı ve  $L$  etkin generatör uzunluğudur. Şek. 8 bir bobin sarımı akısının rotor konumuna göre değişimini göstermektedir. İki boyutlu bir sonlu eleman yöntemi iki kullanıldığı için burada sargıların çaprazlanması göz önüne alınmamıştır. Sargıların yerleştirildiği olukların mil eksenine çapraz düzenlenmesiyle yapılan çaprazlama ile sargı akısı sinüs biçimine yaklaştırılabilir. Bu ayrıca makinanın mekanik titreşimlerinin önlenmesi içinde de gereklidir. Şek.8'deki stator sargılarının çaprazlanmamış olması durumundaki bobin akısının rotor konumuna göre değişiminden yararlanarak çaprazlanmış bobinleri akısı hesap edilebilir. Şek.9 Çaprazlanmış stator sargılarının yerleşimini göstermektedir.



**Şekil 8.** Birim generatör uzunluğu başına sargı bobini akısının rotor konumuna göre değişimi



**Şekil 9.** Stator sargı bobinlerinin çaprazlanması



**Şekil 10.** Sargı sargısı halkalama akısının rotor konumuna göre değişimi

Sonlu eleman analizi sonuçları kullanılarak en uygun çaprazlama açısı seçilebilir.

### İndüktanslar

Rotor yapısının çıkıntılı olması nedeniyle incelenen generatörün sargılarının mıknatıslar doğrultusundaki boyuna indüktansı  $L_d$  ve mıknatıslar arası doğrultu-daki enine indüktansı  $L_q$  rotorun bu konumları için yapılan sonlu eleman yöntemi ile hesaplanan halkalama akıları  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  akıları yardımıyla belirlenebilir.

### Demir kayıpları

Stator sac paketindeki demir kayıplarının hesaplanması farklı bölgelerdeki indüksiyon değerlerinin bilinmesini gerektirir. Özellikle stator dışlarındaki indüksiyon büyük değerler alabilmektedir (Şek. 4 ve 7). Demir kayıpları ile ilgili görgül formüller zamanla sinüs değişimli indüksiyon için geçerlidir. Bu formüller birim hacim ya da ağırlıktaki demir kayıplarını indüksiyon tepe değeri ve frekansın fonksiyonu olarak verirler. Bir elektrik sacının birim kütle başına kayıpları

$$p_{Fe} = p_h + p_e = k_h f B_m^\alpha + k_e f^2 B_m^2 \quad (4)$$

bağıntısı ile verilebilir. Burada  $k_h$ ,  $\alpha$  ve  $k_e$  Epstein sına aygıtı ile yapılan deneylerden elde edilen ve sac üreticisi tarafından sağlanan sabitlerdir. Stator sac paketinin dışlar, dış uçları ve oluk dipleri gibi belirli bölgelerindeki ortalama indüksiyonun zamanla değişimi sonlu eleman yöntemi ile belirlenir

her bir har-monik için demir kayıpları tahmin edilebilir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılan, ülkemizde üretilen küçük güçlü sürekli mıknatıslı bir generatörün magnetik alanı sonlu eleman yöntemi ile analiz edilmiştir. Hava aralığı, oluk geometrisi ve çaprazlama açısı gibi tasarım parametrelerinin generatör üretilmeden önce optimize edilmesi mümkündür. Ayrıca generatörün demir kayıpları da sonlu eleman analizi sonuçları yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Generatörün farklı hızlarda yapılan boşta çalışma deneyi sonuçları hesaplanan ve ölçülen boşta gerilim değerlerin uyuştuğunu göstermektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Çetin, Numan S., “Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir-2006.
- [2] Çetin, Numan S., “Küçük Güçlü Bir Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Eldesi” VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu, s.83-93, İzmir-2001.
- [3] Salon, Sheppard J.: *Finite Element Analysis of Electrical Machines*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
- [4] Bastos, João Pedro A. and Sadowski, N. *Electromagnetic Modelling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker, Newyork, 2003.