

Düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımı

Oktay KARAKAYA^{1,2,*}, Batın DEMİRCAN², Murat Erhan BALCI^{2,3}

¹Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Bigadiç, Balıkesir

²İŞBİR Elektrik San. A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Bölümü, Altıeylül, Balıkesir

³Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 08.07.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2021

Öz

Bu makalede, küçük güçlü düşük hızlı rüzgar türbinleri için radyal akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin (KMSG'lerin) tasarımı ile Ansys Maxwell yazılım ortamında modellenmesi ve performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Bu örnek çalışmada, öncelikle analitik ifadeler kullanılarak; hedeflenen anma değerlerine sahip bir KMSG tasarımı yapılmıştır. Devamında, Ansys Maxwell yazılım ortamında iki boyutlu modelleme yaklaşımıyla, tasarımın, yüklenme oranı değişimine bağlı olarak gerilim etkin değeri, gerilim toplam harmonik bozulma değeri, akım etkin değeri ve verim performans parametrelerinin değişimi, ayrıca milin dönme hızının değişimine bağlı olarak bu dört performans parametresinin yanı sıra üretilen azami aktif güç değerinin değişimi analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kalıcı mıknatıslı senkron generatör, rüzgar türbini, tasarım, SEY analizi.

Design of permanent magnet synchronous generator for low speed and small power wind turbines

Abstract

In this paper, an exemplary study on the design of radial flux permanent magnet synchronous generators (PMSGs) for small power-low speed wind turbines and its

*Oktay KARAKAYA, karakaya@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3871-1724>

Batın DEMİRCAN, batindemircan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0765-458X>

Murat Erhan BALCI, mbalci@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8418-8917>

modelling and performance analysis in Ansys Maxwell software is presented. In this exemplary study, firstly, the design is obtained by using analytical expressions. Subsequently, the two-dimensional model of the design is provided in Ansys Maxwell software. Thus, the variation of the voltage effective value, voltage total harmonic distortion value, current effective value and efficiency parameters of the same design depending on the loading ratio, and the variation of these four parameters and maximum output active power depending on the speed are evaluated.

Keywords: *Permanent magnet synchronous generator, wind turbine, design, FEM analysis.*

1. Giriş

Günümüzde, yenilenebilir enerji temelli elektrik üretim birimleri, şebeke besleme noktasına uzak tüketicilerin elektrik ihtiyacının çevreci ve maliyet verimli bir şekilde karşılanması bakımından önemli bir seçenek haline gelmiştir [1-3]. Bununla birlikte, şebeke bağlantı noktasından uzak yerlerdeki küçük tüketicilerin beslenmesi amacıyla kurulan yenilenebilir enerji üretim birimleri; genellikle rüzgar türbinleri, fotovoltaik enerji üretim birimleri ve küçük su türbinleri olarak planlanmaktadır [4-7]. Ayrıca, bu yenilenebilir enerji temelli üretim birimlerinin, yine aynı amaçla; melez [8, 9] ve dizel generatör destekli [10, 11] kullanımına ilişkin sistemler literatürde çalışılmıştır.

Rüzgar türbini topolojileri, sabit hızlı, sınırlı değişken hızlı ve değişken hızlı olmak üzere üç ana sınıfa ayrılabilir [12-14]. Değişken hızlı rüzgar türbinleri, generatör milinin türbine bağlantı tipine göre; çok kademeli dişli kutulu, tek kademeli dişli kutulu ve dişli kutusuz (doğrudan sürüşlü) olmak üzere üç alt sınıfa sahiptir [12, 13]. Ayrıca, değişken hızlı rüzgar türbinleri, sahip oldukları güç dönüştürücünün boyutuna göre kısmi ve tam boyutlandırılmış güç dönüştürücülü rüzgar türbinleri olarak literatürde anılmaktadır [14].

Rüzgar türbinlerinde (RT) yaygın olarak kullanılan generatör tipleri: (i) sabit hızlı RT'ler için sincap kafesli asenkron generatör (SKAG), (ii) sınırlı değişken hızlı RT'ler için bilezikli asenkron generatör (BAG), (iii) çok kademeli dişli kutulu değişken hızlı RT'ler için SKAG, çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG), geleneksel elektriksel uyartımlı senkron generatör (ESG) ve kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG), (iv) tek kademeli dişli kutulu değişken hızlı RT'ler için ÇBAG ve KMSG ile (v) doğrudan sürüşlü değişken hızlı RT'ler için ESG ve KMSG'dir. Sınırlı değişken hızlı RT'lerde; BAG'ların rotor sargı uçlarına bağlı güç elektroniği devresiyle rotor direnç ayarı yapılarak senkron hızın azami $\pm\%10$ 'u kadar değişim aralığında hız ayarlanabilirken, ÇBAG bulunan değişken hızlı RT'lerde; generatörün rotor sargı uçlarıyla şebeke arasına bağlı kısmi (türbin gücünün $\%30$ 'u kadar anma güçte) boyutlandırılmış güç dönüştürücü devresiyle senkron hızın $\pm\%30$ 'u kadar aralıkta hız ayarı yapılabilir. SKAG, ESG ve KMSG bulunan değişken hızlı RT'lerde ise; generatörün terminalleri ile şebeke arasına bağlı tam boyutlandırılmış güç dönüştürücüyle tam hız ayarı gerçekleştirilebilir [12, 13].

Doğrudan sürüşlü değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan ESG ve KMSG arasında yapılan karşılaştırmadan, aynı güç değeri için KMSG'nin daha hafif, daha küçük hacimde, daha düşük maliyetli ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu ifade edilebilir. Tek kademeli dişli kutulu değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan ÇBAG ve KMSG arasında yapılan karşılaştırma ise; aynı güç değeri için yine KMSG'nin daha

hafif, daha küçük hacimli ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip seçenek olmakla birlikte maliyetinin de daha yüksek olduğunu göstermektedir [12].

Bütün bu avantajlar neticesinde, KMSG'ler, literatürde yapılan çalışmalarda, küçük güçlü tüketiciler ve mikro şebekelerin ihtiyacını karşılamak için tasarlanan düşük hızlı doğrudan sürürlü rüzgar türbinlerinde yaygın olarak tercih edilmiştir [15-19].

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makineler (KMSM'ler) üretilen akının doğrultusuna göre radyal, aksel ve çapraz akılı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bununla birlikte, diğer iki tipe göre daha basit yapıda, daha güvenilir ve üretimleri daha pratik olması sebebiyle radyal akılı KMSM'ler, gerek motor gerekse generatör olarak daha fazla tercih edilmektedir [20-22]. Ayrıca, KMSM'lerin, mıknatısın rotor yüzeyindeki konumuna göre yüzeye montajlı ve rotor içine yerleştirilmiş mıknatıslı tipleri [22], rotorun statorun içinde veya dışında konumlandırılması bakımından iç rotorlu ve dış rotorlu tipleri [23] mevcuttur.

Elektrik makine tasarımındaki genel durumda olduğu gibi KMSG tasarımı için de hassasiyeti sebebiyle, literatürde en önde gelen tasarım aracı, sonlu elemanlar yöntemi veya sonlu elemanlar yöntemi temelli çözüm yapan paket yazılımlardır. Ancak, aşırı hesap yüküne sahip olması ve dolayısıyla uzun analiz süreleri gerektirmesi, sonlu elemanlar yönteminin (SEY) önemli bir dezavantajıdır [24, 25]. Bu dezavantaj sebebiyle, literatürdeki çalışmalarda, genellikle, tasarımın tümüyle SEY temelli analizlerle gerçekleştirilmesinden kaçınılmıştır. Manyetik eşdeğer devre [26, 27] veya kapalı form analitik ifadelerle [25, 28, 29] tasarımların ön boyutlandırılmaları yapılmış, devamında ise; bu boyutlandırılmaların teyit edilmesi ve iyileştirilmesi SEY analizleriyle gerçekleştirilmiştir.

Bu makalede, düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için radyal akılı KMSG tasarımı ve Ansys Maxwell yazılım ortamında tasarımın doğrulanması ile performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Bu örnek çalışmada, öncelikle analitik ifadeler kullanılarak; hedeflenen anma değerlerine sahip bir KMSG tasarımı yapılmıştır. Devamında, bu tasarımın iki boyutlu modeli Ansys Maxwell [30] yazılımında oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak, tasarımın; yüklenme oranı değişimine bağlı olarak gerilim etkin değeri, gerilim toplam harmonik bozulma değeri, akım etkin değeri ile verim performans parametrelerinin değişimi, ayrıca hız değişimine bağlı olarak bir önceki analizde dikkate alınan dört performans parametresinin yanı sıra üretilen azami aktif güç değerinin değişimi analiz edilmiştir.

2. Tasarım ve modelleme

Bu kısımda, tasarımın elde edilmesinde kullanılan analitik ifadeler sunulmuş ve tasarımın Ansys Maxwell yazılım ortamında oluşturulan 2 boyutlu modeli tanıtılmıştır. Çalışma kapsamında anma (plaka) değerleri; 5 kW, 200 devir/dakika (dev./dak.), 400 V ve $\eta = 91\%$ olan bir KMSG'nin tasarımı hedeflenmiştir.

2.1. Analitik ifadelerle tasarımın elde edilmesi

KMSG'nin tasarımında, literatürde yaygın olarak bilinen analitik ifadelerle dayalı boyutlandırma yöntemlerinden biri olan ve kaynak [31]'de sunulan yöntem dikkate alınmıştır. Bu yöntemle göre sırasıyla; (i) rotor boyutları ve stator-rotor arası hava aralığı,

(ii) stator sargılarına ilişkin parametreler, (iii) stator oyuğunun boyutları ile (iv) stator/rotor boyunduruk genişliği, mıknatısın boyutları ve stator boyutları hesaplanır.

Bu sıralamaya göre; ilk olarak rotor boyutları ve stator-rotor arası hava aralığının belirlenmesi safhasında;

- Hedeflenen generatör tasarımının nominal güç değeri (P), verim (η) ve saniye başına ölçülen nominal devir (n) parametreleri dikkate alınarak, generatör şaftına uygulanacak nominal tork değeri (T);

$$T = \frac{P/\eta}{2.\pi.n} \quad (1)$$

- Tasarımda izin verilen teğetsel gerilme değeri (σ_{Ftan}) ve T parametrelerine göre, rotorun hacmi (V_r);

$$V_r = \frac{T}{2.\sigma_{Ftan}} \quad (2)$$

- Nominal frekans (f) ve n cinsinden, kutup çifti sayısı (p);

$$p = \frac{f}{n} \quad (3)$$

- p 'ye bağlı olarak χ boyutsal oranı;

$$\chi = \frac{\pi.\sqrt{p}}{4.p} \quad (4)$$

- χ ve V_r 'ye bağlı olarak rotor çapı (D_r);

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4.V_r}{\pi.\chi}} \quad (5)$$

- χ ve D_r cinsinden çekirdeğin eşdeğer uzunluğu (l');

$$l' = \chi.D_r \quad (6)$$

- p 'nin bir fonksiyonu olan stator ile rotor arasındaki hava aralığının uzunluğu (δ);

$$\delta = \frac{0,18+0,006.P^{0,4}}{1000} \quad (7)$$

- D_r ve δ cinsinden, stator iç çapı (D_s);

$$D_s = D_r + 2.\delta \quad (8)$$

- l ve δ değerlerinden, rotor nüvesinin net uzunluğu (l);

$$l = l' - 2.\delta \quad (9)$$

hesaplanır.

İkinci tasarım adımı olarak, stator sargılarına ilişkin parametrelerin belirlenmesi safhasında;

- Generatör faz sayısı (m) ile seçilen kutup- faz başına oyuk sayısı ($q \geq 1$) dikkate alınarak, stator oyuk sayısı (Q);

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot q \quad (10)$$

- D_s ve Q parametrelerine göre, stator oyuk adımı (τ_u) ve stator kutup adımı (τ_p);

$$\tau_u = \pi \frac{D_s}{Q} \quad (11)$$

$$\tau_p = \pi \frac{D_s}{2 \cdot p} \quad (12)$$

- Tipik olarak 0.8 ile 1.05 Tesla aralığında seçilen, hava boşluğundaki temel frekans akı yoğunluğunun tepe değeri (B_{1peak}) ve mıknatısların rotor yüzeyinde kapladığı alanın rotor yüzey alanına oranı (α_{PM}) cinsinden, mıknatıslar tarafından üretilen akı yoğunluğunun maksimum değeri (B_{max});

$$B_{max} = \frac{\pi \cdot B_{1peak}}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \alpha_{PM}}{2}\right)} \quad (13)$$

- m , Q , p ve sarım adımına ($w_{\tau p}$) bağlı olarak, sargı faktörü (k_w);

$$k_w = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot w_{\tau p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{m \cdot z}\right)}{\frac{Q}{m \cdot p} \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q}\right)} \quad (14)$$

- B_{max} , τ_p , l' , α_{PM} , makinanın nominal açısal hızı (ω), stator faz sargı uçlarında boşta çalışma şartlarında indüklenmesi istenen gerilim değeri (E_{PM}) ve sargı faktörü (k_w) parametrelerine bağlı olarak, faz başına sarım sayısı (N);

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{PM}}{\omega \cdot B_{max} \cdot k_w \cdot l' \cdot \tau_p \cdot \alpha_{PM}} \quad (15)$$

- N , m , Q ve sarımdaki paralel kol sayısına (a) göre oyuk başına sarım sayısı (z_Q);

$$z_Q = 2 \cdot a \cdot m \frac{N}{Q} \quad (16)$$

hesaplanır.

Bu tasarım safhasının sonunda, iki katmanlı sarımlarda oyuktaki iletken sayısının çift sayı olması gerekliliğine dikkat edilmelidir. Buna göre, revize edilmiş iletken sayısına (z_{Qs}) göre B_{max} Denklem (17) ile yeniden hesaplanmalıdır:

$$B_{max} = \frac{z_Q}{z_{Qs}} B_{max} \quad (17)$$

Üçüncü tasarım adımı olarak, stator oyuklarının boyutlandırılması safhasında;

- Tipik olarak 1.6 ile 2 Tesla arasında seçilen statordaki dış akı yoğunluğu (B_{dapp}), nüve paketleme faktörü (k_{Fe}) ve daha önceki adımlarda belirlenen diğer tasarım parametreleri (τ_u , l' , l , B_{max}) cinsinden, stator dış genişliği (b_d);

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u \cdot B_{max}}{k_{Fe} \cdot l \cdot B_{dapp}} \quad (18)$$

- m , P , generatörün hedeflenen güç faktörü ($\cos\varphi$) ve faz-nötr anma gerilimi (U_{sph}) değerlerine göre, anma akımı (I_s);

$$I_s = \frac{P}{m \cdot U_{sph} \cdot \cos\varphi} \quad (19)$$

- Tipik olarak 4 ile 8 A / mm² arasında seçilen sargı iletkeni akım yoğunluğu (J_s), I_s ve a' ya bağlı olarak, bir iletkenin oyukta kapladığı alan (S_{cs}) ve çapı (D_{cs});

$$S_{cs} = \frac{I_s}{a \cdot J_s} \quad (20)$$

$$D_{cs} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cs}}{\pi}} \quad (21)$$

- z_Q , S_{cs} ve stator yuvasına ait doldurma faktörü (k_{cus}) parametrelerinden, oyuktaki iletkenlerin kapladığı toplam alan (S_{cus});

$$S_{cus} = \frac{z_Q \cdot S_{cs}}{k_{cus}} \quad (22)$$

- Şekil 1'de verilen oyuk yapısı için, tasarımcı tarafından seçilen; oyuk açıklığı (b_1), oyuk izolasyon malzemesinin kalınlığı (h_3 , h_6), oyuk kama kalınlığı (h_2) sargı katmanları arasındaki yalıtkanın kalınlığı (h), oyuk ağzı dış kalınlığı (h_1) ve oyuk yapı yüksekliği (h_5) parametreleri yanı sıra b_d , Q ve D_s parametrelerine bağlı olarak, b_4 , b_{4c} , b_{5c} ve b_5 boyutları;

$$b_4 = \frac{\pi[D_s + 2(h_1 + h_2)]}{Q} - b_d \quad (23)$$

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_3}{Q} - 2h_6 \quad (24)$$

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q} \quad (25)$$

$$b_5 = b_{5c} + 2 \cdot h_6 \quad (26)$$

hesaplanır.

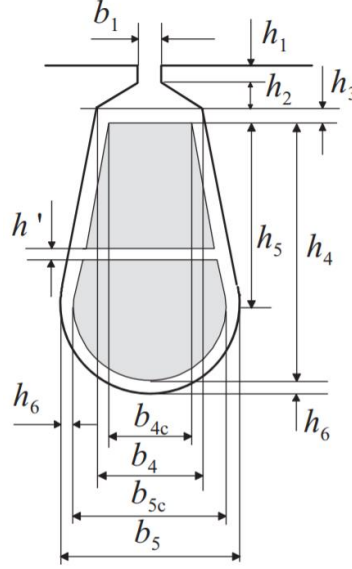
Stator oyuk boyutlandırma adımında, Denklem (22) ve (27)'den hesaplanan S_{cus} değerleri eşit olana kadar h_5 parametresi güncellenir;

$$S_{cus} = \left(\frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \right) h_5 + \frac{\pi}{8} b_{5c}^2 \quad (27)$$

Bu adımda, son olarak; h_4 değeri ve toplam stator oyuk alanı (S_{slot}) bulunur:

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2} \quad (28)$$

$$S_{slot} = b_1 \cdot h_1 + h_2 \left(\frac{b_4}{2} + \frac{b_1}{2} \right) + h_3 \left(b_4 + \frac{\pi \cdot h_3}{Q} \right) + h_5 \left(\frac{b_4 + b_5}{2} \right) + \frac{\pi}{8} b_{5c}^2 \quad (29)$$



Şekil 1. Oyuk boyutlandırılması [31].

Dördüncü ve son tasarım adımında, stator ve rotor boyunduruğunun genişliği, mıknatısın boyutları ve stator boyutlarının belirlenmesi için;

- B_{max} , α_{PM} , τ_p .ve l' parametrelerinin bir fonksiyonu olan hava boşluğunun manyetik akısının maksimum değeri (Φ_{max});

$$\Phi_{max} = \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l' \quad (30)$$

- Tasarımda kullanılan çekirdek malzemesinin B-H eğrisi dikkate alınarak stator ve rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunlukları (B_{ys}, B_{yr}), k_{Fe} ve l parametrelerinden, stator ve rotor boyunduruğlarının yükseklikleri (h_{ys}, h_{yr});

$$h_{ys} = \frac{\Phi_{max}}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{ys}} \quad (31)$$

$$h_{yr} = \frac{\Phi_{max}}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{yr}} \quad (32)$$

- Eşdeğer hava aralığı (δ_e);

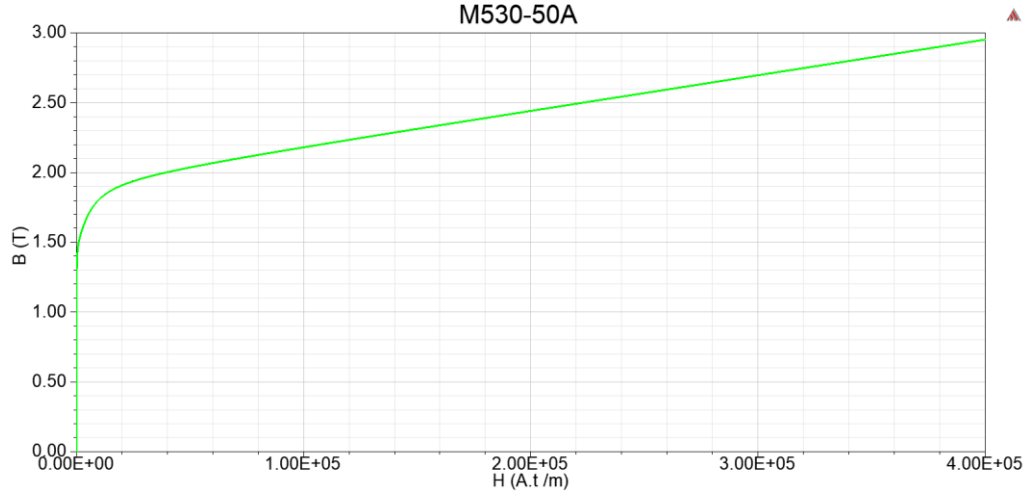
$$\delta_e = \left[\frac{\tau_u}{\tau_u - \left[\frac{2}{\pi} \left[\text{atan} \left[\frac{b_1}{2\delta} \right] - \frac{2\delta}{b_1} \ln \left[\sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2\delta} \right)^2} \right] \right] \right]} \right] \delta \quad (33)$$

- B_{max} , δ_e ve havanın manyetik geçirgenliği ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$) değerlerinden, hava boşluğunun manyetik gerilimi ($U_{m\delta e}$);

$$U_{m\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \delta_e \quad (34)$$

- Nüve malzemesinin B-H eğrisinde (Şekil 2) maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen manyetik alan şiddeti (H_d), h_3 ve h_5 parametreleri cinsinden, stator dışındaki manyetik gerilimi (U_{mds});

$$U_{mds} = H_d(h_3 + h_5) \quad (35)$$



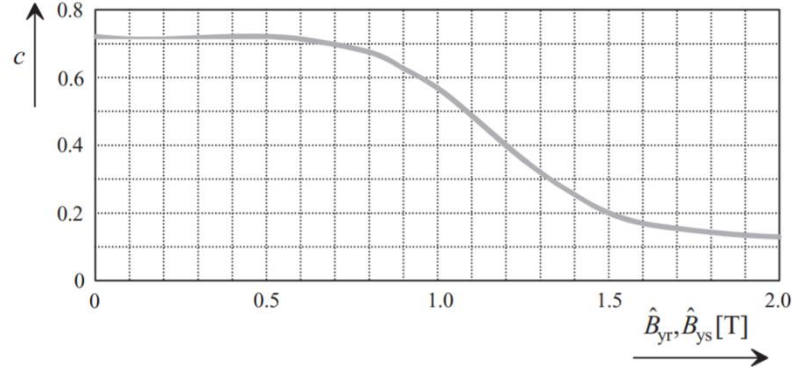
Şekil 2. Stator ve rotor sac malzemesinin BH eğrisi

- Ortalama stator boyunduruk çapı (D_{ys});

$$D_{ys} = D_s + 2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6) + h_{ys} \quad (36)$$

- D_{ys} , p , çekirdek malzemesinin B-H eğrisinden stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna (1.5 ile 1.7 T) karşılık gelen manyetik alan şiddeti değeri (H_{ymaxs}) ve Şekil 3'de verilen c - B_y eğrisinden stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen katsayıya (c_s) bağlı olarak, stator boyunduruğundaki manyetik gerilim (U_{mys});

$$U_{mys} = c_s \cdot H_{ymaxs} \frac{\pi \cdot D_{ys}}{2p} \quad (37)$$



Şekil 3. Boyunduruk manyetik gerilimini belirlemek için kullanılan c katsayısı ile boyunduruk maksimum akı yoğunluğu arasındaki ilişki [31].

- $U_{m\delta e}$, U_{mds} , U_{mys} , D_r , h_{yr} , p , mıknatısın akı yoğunluğu (B_{PM}), çekirdek malzemesinin B-H eğrisinden rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna (1.5 ile 1.7 T) karşılık gelen manyetik alan şiddeti değeri (H_{ymaxr}), mıknatısın manyetik alan şiddeti (H_c) ve Şekil 3'deki eğride rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen katsayı (c_r) değerlerinden, mıknatısın kalınlığı (h_{PM});

$$h_{PM} = \frac{U_{m\delta e} + U_{mds} + \frac{U_{mys} + \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{ymaxr} (D_r - h_{yr})}{4p}}{2}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} B_{PM} + \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{ymaxr}}{2p}} \quad (38)$$

- α_{PM} ve τ_p 'nin çarpımından, mıknatısın genişliği (w_{PM});

$$w_{PM} = \alpha_{PM} \cdot \tau_p \quad (39)$$

- D_r , h_{PM} ve h_{yr} değerlerinden, rotor boyunduruğunun ortalama çapı (D_{yr});

$$D_{yr} = D_r + 2 \cdot h_{PM} - h_{yr} \quad (40)$$

- D_{ys} ve h_{ys} parametrelerinin toplamından, stator dış çapı (D_{se});

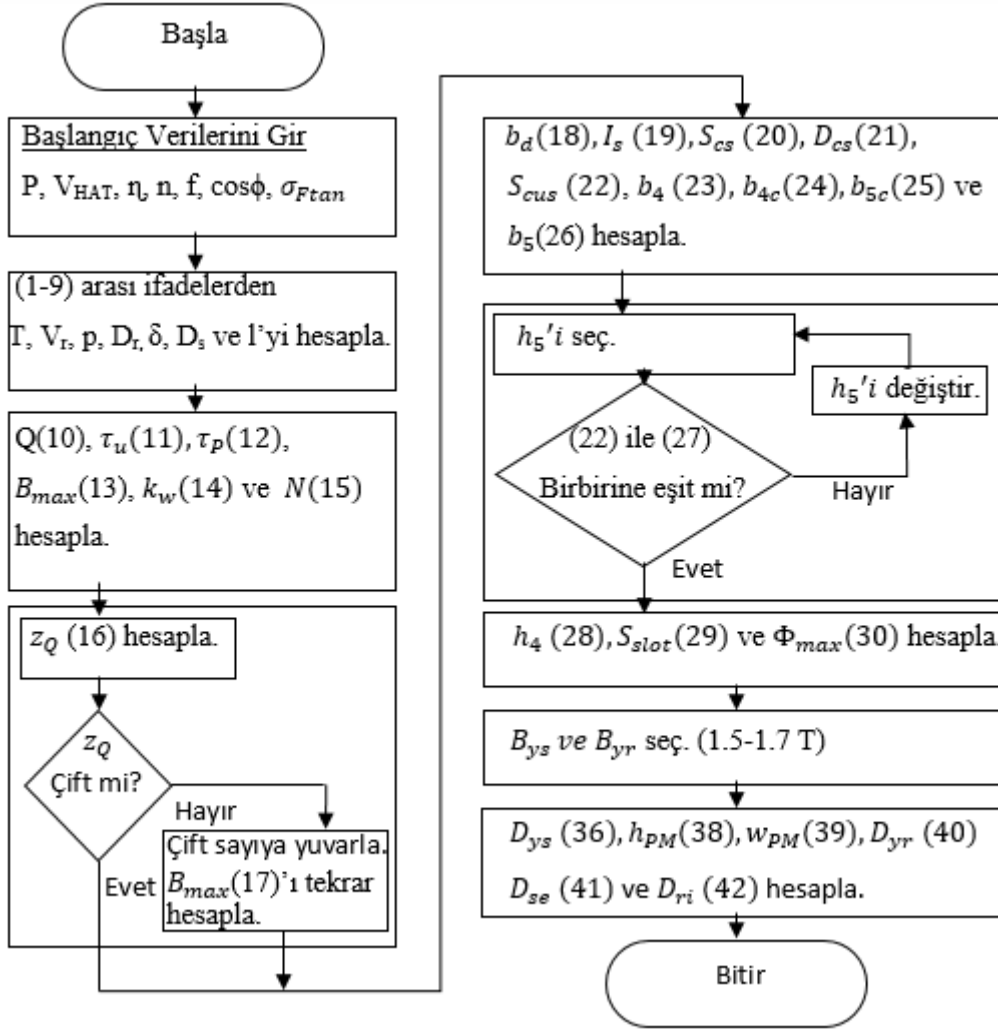
$$D_{se} = D_{ys} + h_{ys} \quad (41)$$

- D_{yr} ve h_{yr} parametrelerinin farkından, rotor iç çapı (D_{ri});

$$D_{ri} = D_{yr} - h_{yr} \quad (42)$$

bulunur.

Buraya kadar özetlenen, tasarıma ilişkin hesaplamaların akış diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur.



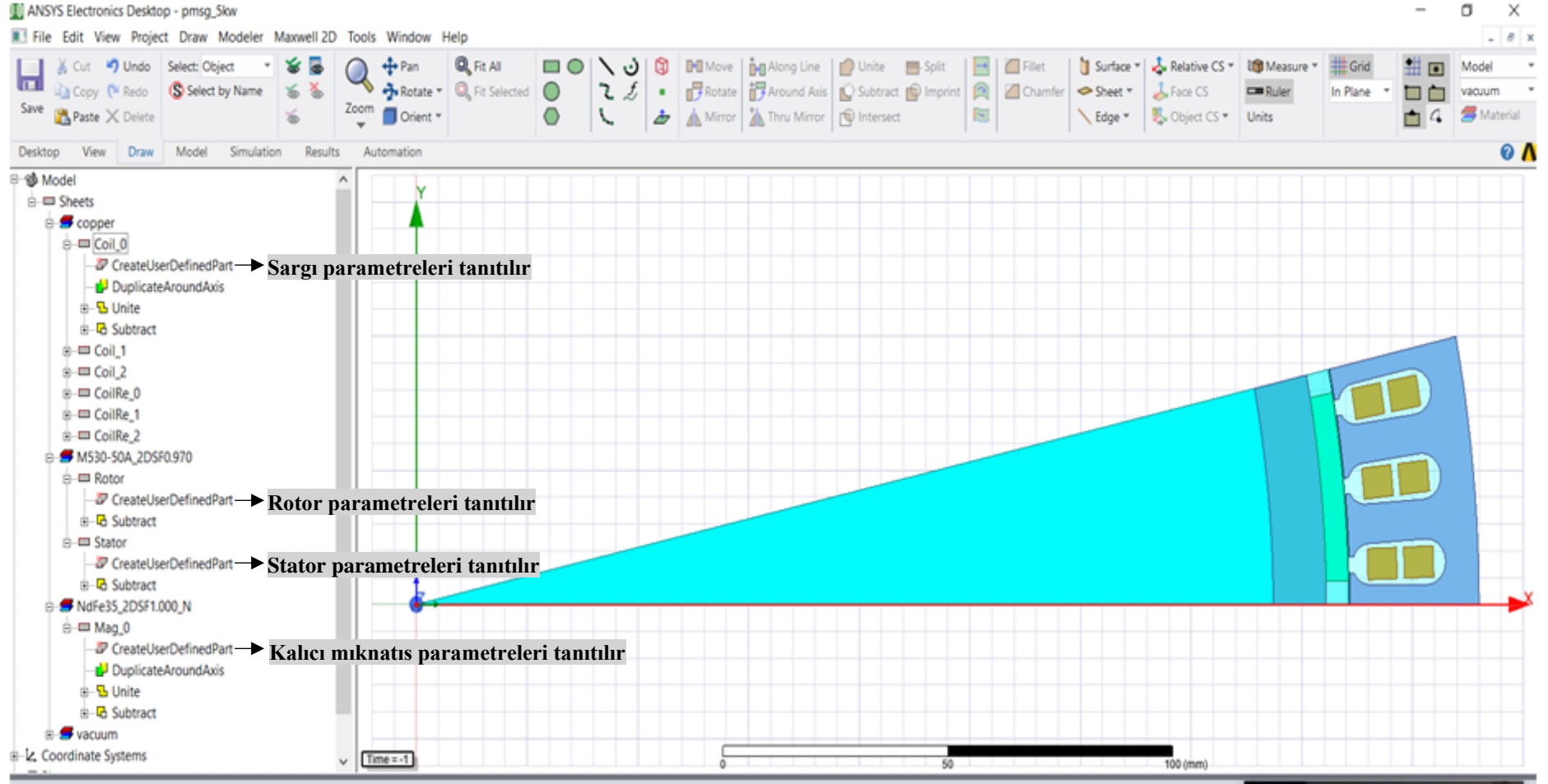
Şekil 4. Analitik hesaplamalar için akış şeması.

2.2. Tasarımın Ansys Maxwell ortamında 2 boyutlu modellenmesi

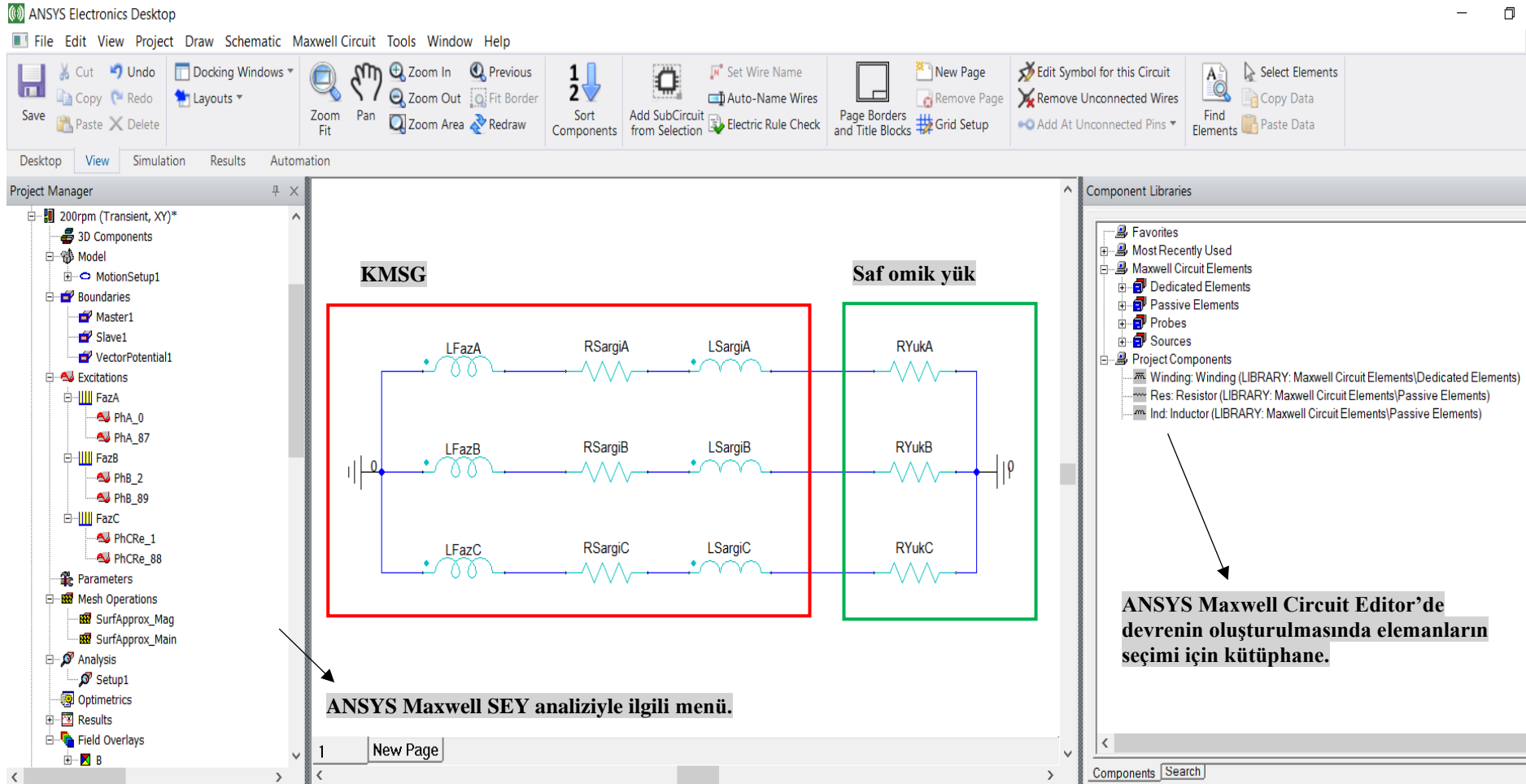
Çalışmanın bu aşamasında, “Ansys Maxwell” yazılımına, sırasıyla;

- Stator ile rotorun dış çapı, iç çapı ve uzunluğu,
- Stator oyuk boyutları, sargı ile ilgili parametreler ve malzemeler (stator nüvesi (M530-50A), sargı (bakır)),
- Rotor bünyesinde bulunan mıknatıs boyutları ile malzemeler (rotor nüvesi (M530-50A), mıknatıs (NdFe35)),
- Anma gücü, anma gerilimi, anma hızı ve çalışma sıcaklığı gibi, makine parametreleri girilerek, tasarım yazılıma tanıtılmıştır (Şekil 5).

Tasarlanan KMSG'nin kutup sayısı 30, stator oluk sayısı 90 ve mıknatıs kalınlığı 5 mm olup ürünün ticarileşmesi sebebiyle, diğer tasarım parametreleri bu çalışmada verilmeyecektir. Daha sonra, ANSYS Maxwell Circuit Editor aracılığıyla, KMSG'nin 2 boyutlu (2B) modeline harici devre olarak dengeli saf omik yük bağlanarak yükte test gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Yük değeri yaklaşık 24 Ω 'dur.



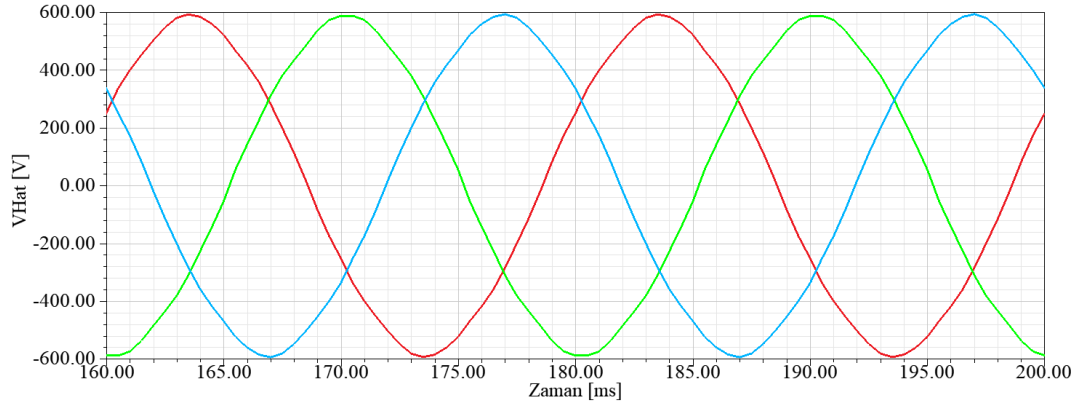
Şekil 5. Ansys Maxwell yazılımı 2 boyutlu model.



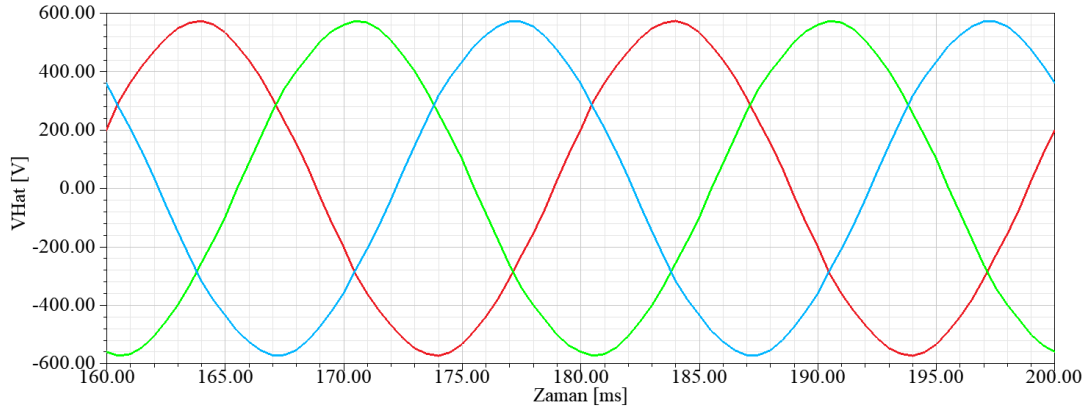
Şekil 6. ANSYS Maxwell Circuit Editor'de yüklenme testi için oluşturulan devre.

3. Analiz sonuçları

KMSG tasarımı Ansys Maxwell yazılımıyla, anma hızı (200 dev./dak.) boşa ve anma yükte (5000 W) çalışma durumları için benzetim yapılmış ve generatör terminalinde gözlemlenen hat gerilimlerine ait dalga şekilleri sırasıyla Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



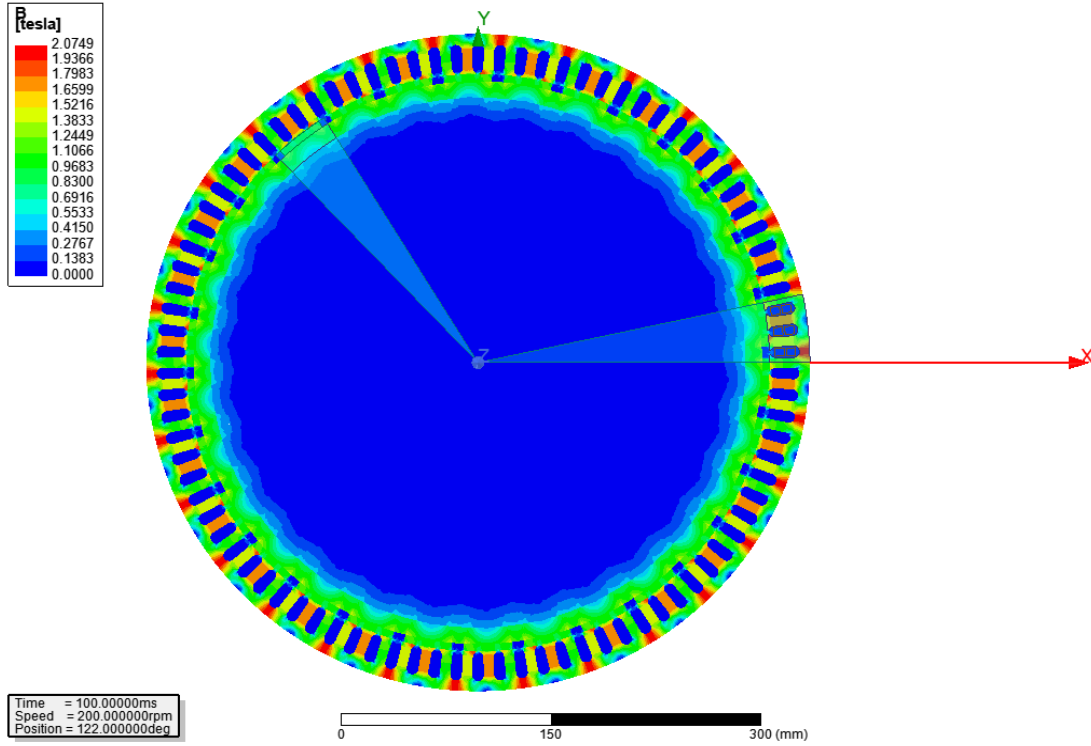
Şekil 7. Anma hızı ve boşa çalışma durumunda hat gerilimlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 8. Anma hızı ve anma yüklenme çalışma durumunda hat gerilimlerinin zamana göre değişimi.

Bu şekillerden, tasarlanan generatörün her iki çalışma durumunda, terminal hat gerilimlerinin dengeli ve sinüzoidal dalga formlarına sahip olduğu, ayrıca gerilimlerin tepe değerlerinin yaklaşık olarak; boşa çalışma durumunda 583 V ve anma yükte çalışma durumunda 568 V olduğu görülmektedir.

Tasarımda anma yüklenme şartlarında, $t=100\text{ms}$ anında manyetik akı yoğunluğunun dağılımı Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekilden, anlık manyetik akı yoğunluğunun; hava boşluğunda 1 Tesla, mıknatlara karşılık gelen stator dişlerinde 1.75 Tesla ve stator boyunduruğunda 2.07 Tesla civarlarında olduğu ifade edilebilir.



Şekil 9. $t=100$ ms anında gözlemlenen manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

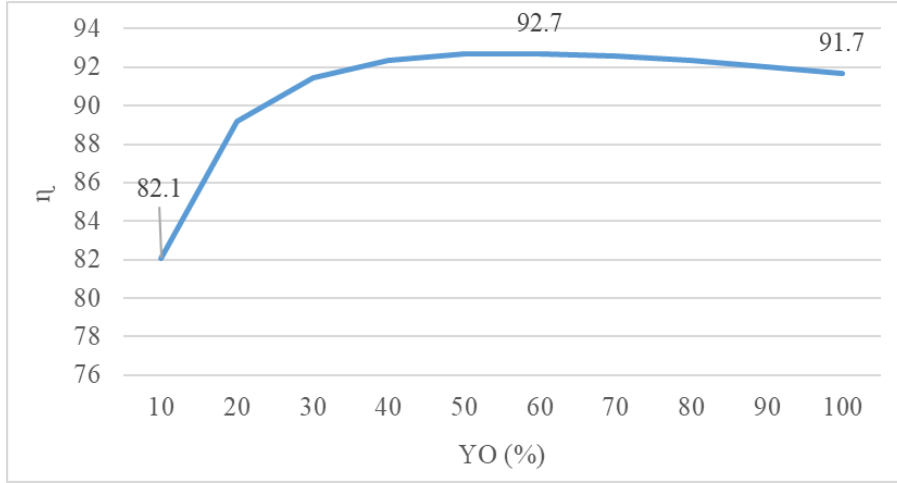
Yüklenme oranının, KMSG'nin performansına etkisini incelemek amacıyla; %10 ile %100 arasında %10'luk artışlarla yüklenme oranlarında (YO); verim (η), hat gerilimi etkin değeri (V_{Hat}), toplam gerilim harmonik bozulma değeri (THD_v) ve akım etkin değeri (I_{Faz}) hesaplanmıştır. Elde edilen η - YO , V_{Hat} - YO , THD_v - YO ve I_{Faz} - YO eğrileri sırasıyla Şekil 10, 11, 12 ve 13'de sunulmuştur.

Şekil 10'dan η 'nin; YO 'nun %10 değeri için %82.1 olduğu, %10-%60 YO aralığında artış gösterdiği ve maksimum değeri olan %92.7'ye ulaştığı, son olarak %60-%100 YO aralığında azaldığı ve generatörün anma yükünde (YO =%100) %91.7 değerini aldığı görülmektedir.

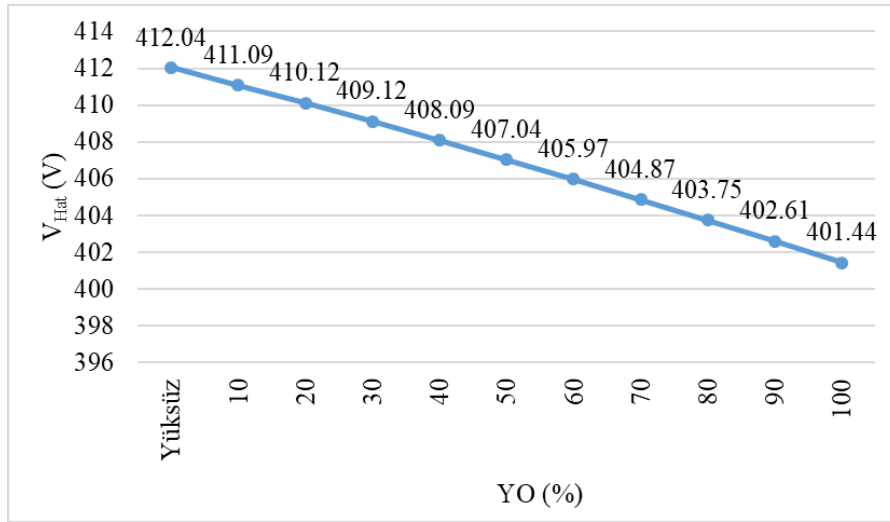
Şekil 11'den generatörün boşa çalışma (YO =%0), yarı yüklenme (YO =%50) ve anma yüklenme (YO =%100) durumlarında, V_{Hat} değerlerinin sırasıyla 412.04 V, 407.04 V ve 401.44 V olduğu, V_{Hat} 'ın YO ile doğrusal olarak azaldığı ve generatörün gerilim regülasyon oranının %2.6 civarında olduğu ifade edilebilir.

Şekil 12 generatörün boşa çalışma durumunda THD_v 'nin en yüksek değerde (%1.79) olduğunu, ayrıca YO artışıyla bu indisin azaldığını göstermektedir. Bu şekil, tasarlanan KMSG'nin terminal geriliminin IEEE Standard 519-2014 [32]'de tanımlanan sınır değer olan %8'in altında THD_v 'ye sahip olduğunu açıkça işaret etmektedir.

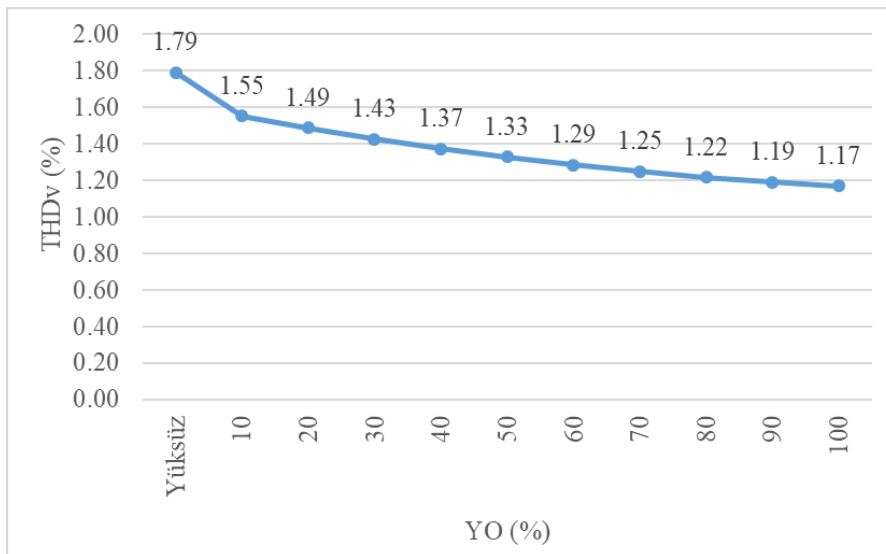
Şekil 13'den YO artışı ile I_{Faz} 'ın doğrusal olarak arttığı, I_{Faz} değerinin yarı ve anma yüklenme durumlarında sırasıyla; 4.1 A ve 8.2 A olduğu görülmektedir.



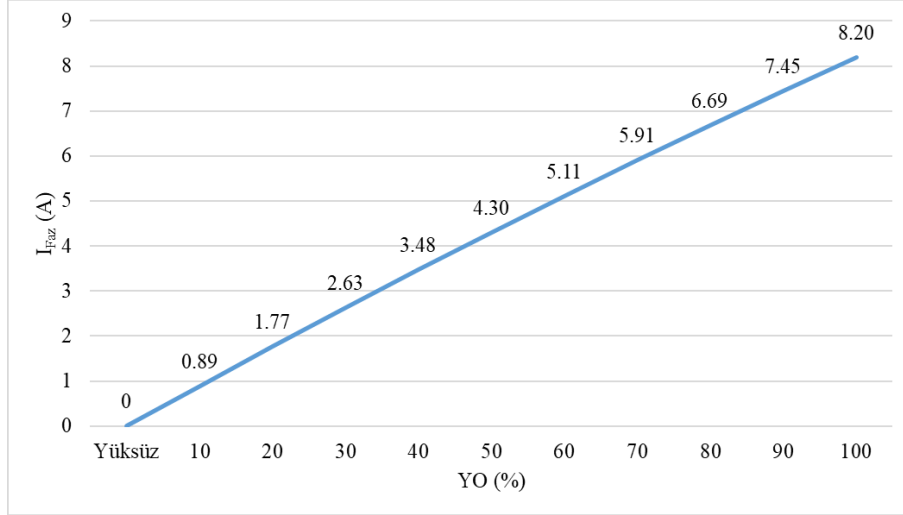
Şekil 10. η -YO eğrisi.



Şekil 11. V_{Hat} -YO eğrisi.

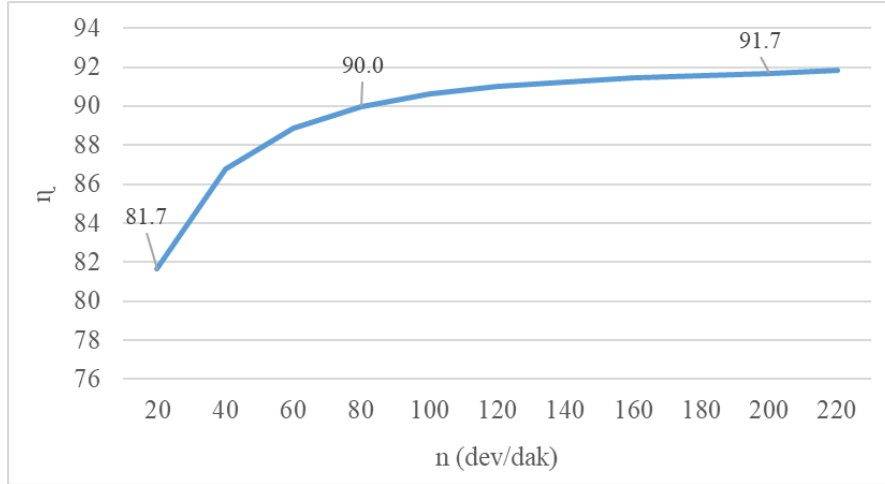


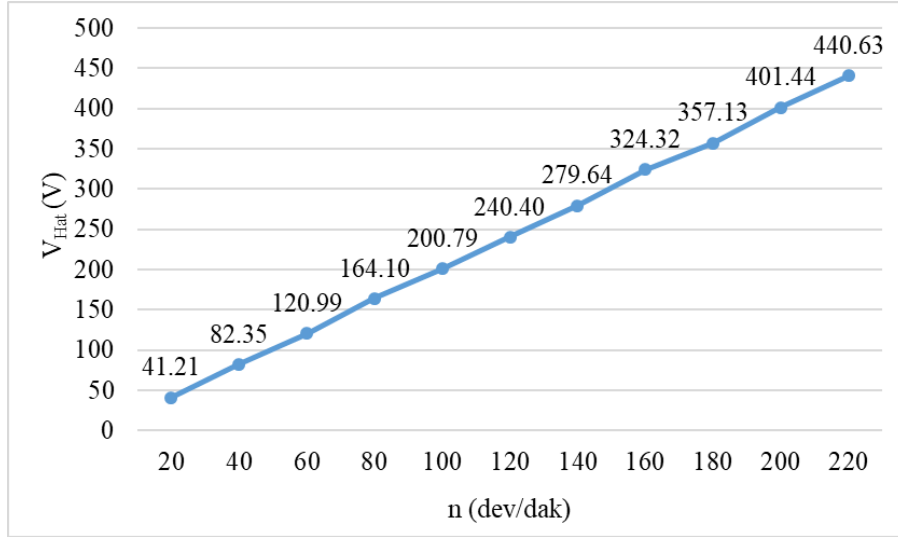
Şekil 12. THD_v -YO eğrisi.

Şekil 13. I_{Faz} -YO eğrisi.

Dakikadaki devir sayısı cinsinden milin dönme hızının (n) KMSG'nin performansına etkisini incelemek amacıyla; n ; 20 dev./dak. ile 220 dev./dak. arasında 20 dev./dak.'lık adımlarla arttırılmış ve η - n , V_{Hat} - n , THD_V - n , I_{Faz} - n ve aktif güç (P)- n eğrileri sırasıyla Şekil 14, 15, 16, 17 ve 18'de sunulmuştur.

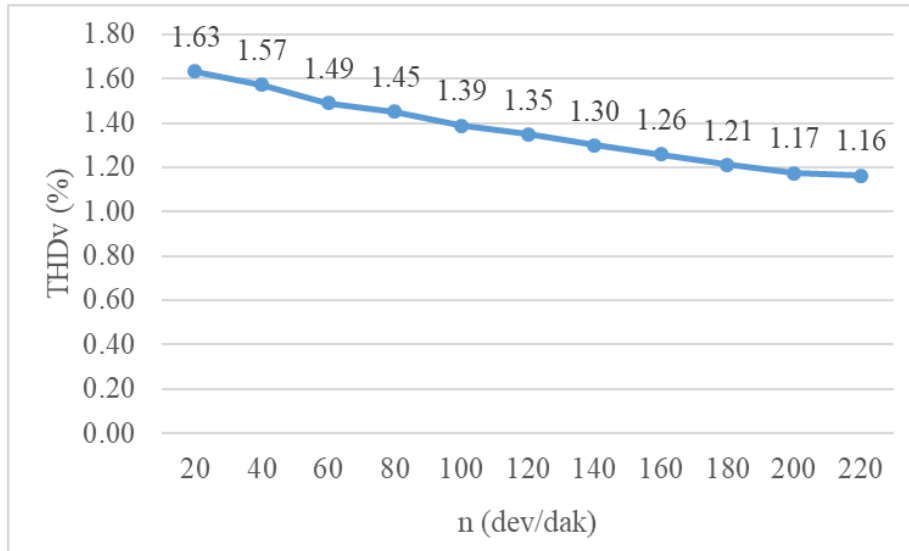
Şekil 14'den η 'nin; 20 dev./dak. ile 80 dev./dak. hız aralığında dikkate değer bir artış göstererek %81.7'den %90'a yükseldiği, geri kalan hız aralığında ise daha küçük bir artışla yaklaşık olarak %91.7'ye ulaştığı ifade edilebilir.

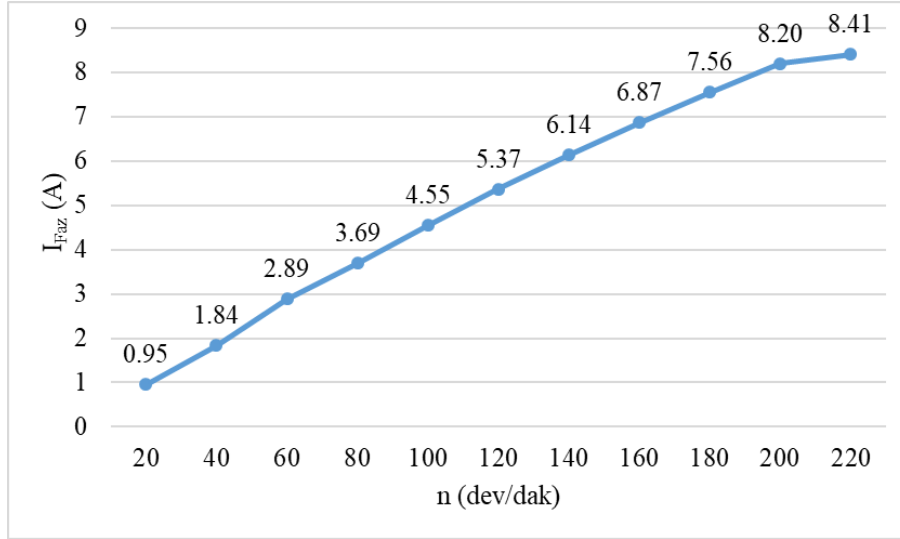
Şekil 14. η - n eğrisi.

Şekil 15. $V_{\text{Hat}}-n$ eğrisi.

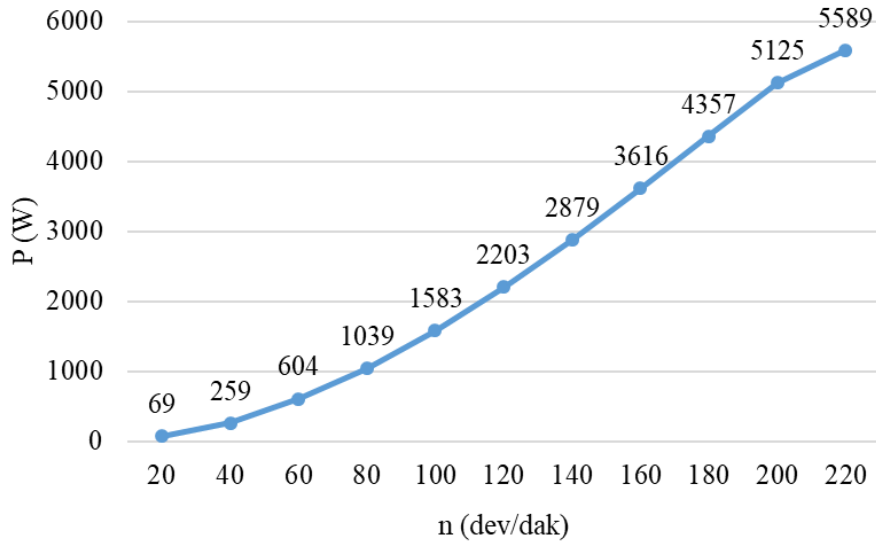
Şekil 15 ise V_{Hat} 'ın n ile doğrusal olarak artarak; çok düşük hız ($n=20$ dev./dak.) için 41.21 V, anma hızın yarısı ($n=100$ dev./dak.) için 200.79 V, anma hız ($n=200$ dev./dak.) için 401.44 V ve $n=220$ dev./dak. için 440.63 V değerlerini aldığı göstermektedir.

Şekil 16'dan generatör 20 dev./dak. hızla döndürüldüğünde THD_V 'nin en yüksek değere (%1.63) sahip olduğu ve hızın artışıyla THD_V 'nin eksponansiyel şekilde azaldığı görülmektedir. Anma hızında ise THD_V %1.17 değerindedir. Bu eğriden, tasarlanan KMSG'nin terminal geriliminin tüm hız değerlerinde, IEEE Standard 519-2014'de tanımlanan sınır değerinin altında THD_V 'ye sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 16: THD_V-n eğrisi.

Şekil 17: I_{Faz} - n eğrisi.

Şekil 17 ise I_{Faz} 'ın n ile doğrusal olarak artarak; çok düşük hız ($n=20$ dev./dak.) için 0.95 A, anma hızın yarısı ($n=100$ dev./dak.) için 4.55 A, anma hızı ($n=200$ dev./dak) için 8.20 A ve $n=220$ dev./dak. için 8.41 A değerlerini aldığı göstermektedir.

Şekil 18: P - n değişim eğrisi.

Şekil 18'den $n=20$ dev./dak. için 69 W, $n=100$ dev./dak. için 1583 W, $n=200$ dev./dak. için 5125 W ve $n=220$ dev./dak. için 5589 W değerlerinin gözlemlendiği dolayısıyla P 'nin anma hızın yarısından sonra kayda değer bir şekilde arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

4. Sonuçlar ve tartışma

Doğrudan sürürlü bir başka deyişle dişli kutusuz değişken hızlı rüzgar türbinleri, şebekeden uzakta küçük güçlü tüketicilerin, düşük rüzgar hızlarında, verimli ve mekanik

bakım gereksinimi düşük bir şekilde elektrik ihtiyacının karşılanması için yaygın olarak tercih edilen bir yenilenebilir enerji temelli üretim yöntemidir.

Bu makalede, düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için radyal akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin (KMSG'lerin) tasarımı ile Ansys Maxwell yazılım ortamında modellenmesi ve performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Çalışmanın KMSG tasarım kısmında, sonlu elemanlar yöntemi temelli analizlerin uzun sürmesi sebebiyle, analitik yöntemle makinenin boyutları ve parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, bu boyutlar ve parametreler, Ansys Maxwell yazılımına tanıtılarak 2 boyutlu model oluşturulmuştur. Son olarak; aynı yazılım kullanılarak, tasarlanan KMSG'nin performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Ansys Maxwell yazılımıyla yapılan performans analizlerinden, tasarımın analitik modelleme aşamasında hedeflenen makine anma değerlerine ulaştığı, ayrıca tasarımı gerçekleştirilen KMSG'nin; IEEE 519-2014 standardında tanımlı toplam gerilim harmonik bozulma sınırlamasına uyduğu, yüksek verim değerlerinde çalıştığı (%92), gerilim regülasyon değerinin düşük seviyede olduğu (%2.6) ve anma devrinin %50'sinden büyük devirlerde anma gücüyle kıyaslandığında kayda değer güçler üretmeye başladığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda, daha büyük güçler için çeşitli algoritmalar kullanılarak, optimal KMSG tasarımının yapılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, İŞBİR Elektrik San. A.Ş. Ar-Ge biriminde gerçekleştirilmiştir.

Kısaltmalar

<i>KMSG</i>	: Kalıcı mıknatıslı senkron generatör
<i>SEY</i>	: Sonlu elemanlar yöntemi
<i>KMSM</i>	: Kalıcı mıknatıslı senkron makine
<i>THD</i>	: Toplam harmonik distorsiyon
<i>RT</i>	: Rüzgar türbini
<i>YO</i>	: Yüklenme oranı
<i>SKAG</i>	: Sincap kafesli asenkron generatör
<i>BAG</i>	: Bilezikli asenkron generatör
<i>ÇBAG</i>	: Çift beslemeli asenkron generatör
<i>ESG</i>	: Elektriksel uyartımlı senkron generatör

Kaynaklar

- [1] Brent, A. C. ve Kruger, W. J., Systems analyses and the sustainable transfer of renewable energy technologies: A focus on remote areas of Africa, **Renewable Energy**, 34(7), 1774-1781, (2009).
- [2] Chauhan, A. ve Saini, R. P., Techno-economic optimization based approach for energy management of a stand-alone integrated renewable energy system for remote areas of India, **Energy**, 94, 138-156, (2016).

- [3] Boute, A., Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: An analysis of the Russian Far East, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 59, 1029-1037, (2016).
- [4] Izadyar, N., Ong, H. C., Chong, W. T. ve Leong, K. Y., Resource assessment of the renewable energy potential for a remote area: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 62, 908-923, (2016).
- [5] Shukla, R. D. ve Tripathi, R. K., Isolated wind power supply system using double-fed induction generator for remote areas, **Energy Conversion and Management**, 96, 473-489, (2015).
- [6] Nafeh, E. S. A., Design and economic analysis of a stand-alone PV system to electrify a remote area household in Egypt, **The Open Renewable Energy Journal**, 2, 33-37, (2009).
- [7] Ranjitkar, G., Huang, J. ve Tung, T., Application of micro-hydropower technology for remote regions, **2006 IEEE EIC Climate Change Conference**, IEEE, 1-10, (2006).
- [8] Bekele, G. ve Tadesse, G., Feasibility study of small hydro/PV/wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia, **Applied Energy**, 97, 5-15, (2012).
- [9] Khatib, T., Mohamed, A. ve Sopian, K., Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia, **Energy and Buildings**, 47, 321-331, (2012).
- [10] Lal, D. K., Dash, B. B. ve Akella, A. K., Optimization of PV/wind/micro-hydro/diesel hybrid power system in HOMER for the study area, **International Journal on Electrical Engineering and Informatics**, 3(3), 307, (2011).
- [11] Saheb-Koussa, D., Haddadi, M. ve Belhamel, M., Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria, **Applied Energy**, 86(7-8), 1024-1030, (2009).
- [12] Li, H. ve Chen, Z., Overview of different wind generator systems and their comparisons, **IET Renewable Power Generation**, 2(2), 123-138, (2008).
- [13] Cheng, M. ve Zhu, Y., The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review, **Energy Conversion and Management**, 88, 332-347, (2014).
- [14] Bhutto, D. K., Ansari, J. A., Bukhari, S. S. H. ve Chachar, F. A., Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review, **In 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies**, 1-6, Sukkur, Pakistan, (2019).
- [15] Bisenieks, L., Vinnikov, D. ve Galkin, I., New converter for interfacing PMSG based small-scale wind turbine with residential power network, **In 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE)**, IEEE, 354-359, (2011).
- [16] Madescu, G., Mot, M., Biriescu, M., Greconici, M. ve Koch, C., Low speed PM generator for direct-drive wind applications, **In 2011 IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool**, IEEE, 1-4, (2011).
- [17] Alam, H. S., Irasari, P. ve Dewi, D. K., Analytical and numerical deflection study on the structure of 10 kW low speed permanent magnet generator, **Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology**, 3(2), 87-94, (2012).

- [18] Orlando, N. A., Liserre, M., Mastromauro, R. A. ve Dell'Aquila, A., A Survey of control issues in PMSG-based small wind-turbine Systems, **IEEE transactions on Industrial Informatics**, 9(3), 1211-1221, (2013).
- [19] Tazi, K., Abbou, M.F. ve Abdi, F., Performance analysis of micro-grid designs with local PMSG wind turbines, **Energy Systems**, 1-33, (2019).
- [20] Chen, A., Nilssen, R. ve Nysveen, A., Performance comparisons among radial-flux, multistage axial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 46(2), 779-789, (2010).
- [21] Ahsanullah, K., Dutta, R. ve Rahman, M. F., Review of PM generator designs for direct-drive wind turbines, **In 2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, IEEE, 1-6, (2012).
- [22] Dorrell, D. G., Hsieh, M. F., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. A. ve Grout, V., A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent-magnet motors, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 58(9), 3741-3757, (2010).
- [23] Arafat, M. Y., Murshed, M., Hasan, M. M. ve Razzak, M. A., Design aspects and performance analysis of inner and outer rotor permanent magnet alternator for direct driven low-speed wind turbine, **In 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)**, IEEE, 604-609, (2016).
- [24] Yilmaz, M. ve Krein, P. T., Capabilities of finite element analysis and magnetic equivalent circuits for electrical machine analysis and design, **In 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**, IEEE, 4027-4033, (2008).
- [25] Kim, J. H. ve Sarlioglu, B., Closed-form method for multi-stage axial flux permanent magnet machine: design and analysis, **Electric Power Components and Systems**, 45(7), 785-797, (2017).
- [26] Elosegui, I., Martinez-Iturralde, M., Rico, A. G., Florez, J., Echeverría, J. M. ve Fontan, L., Analytical design of synchronous permanent magnet motor/generators, **In 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 1165-1170, (2007).
- [27] Amuhaya, L. L. ve Kamper, M. J., Design analysis of a hybrid-PM synchronous generator for wind energy applications, **In 2015 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)**, IEEE, 163-167, (2015).
- [28] Faqih, M. R., Sutedjo, S. ve Wahjono, E., Design and fabrication of a radial flux permanent magnet synchronous generator, **In 2019 International Electronics Symposium (IES)**, IEEE, 644-649, (2019).
- [29] Wang, T. ve Wang, Q., Optimization design of a permanent magnet synchronous generator for a potential energy recovery system, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 27(4), 856-863, (2012).
- [30] A. N. S. Y. S. Maxwell, Low frequency electromagnetic field simulation, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, (18.05.2020).
- [31] Pyrhonen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcova, V., **Design of rotating electrical machines**, John Wiley & Sons, (2013).
- [32] IEEE 519, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, **IEEE Standard**, (2014).