Rüzgar Türbini Uygulamaları için 500 kW Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı

Design of 500 kW Doubly Fed Induction Generator For Wind Turbine Applications

Cenk ULU[1], Güven KÖMÜRGÖZ[2]

[1]TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
Enerji Enstitüsü
Cenk.Ulu@tubitak.gov.tr

[2]Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
komurgoz@itu.edu.tr

Özet

Çift beslemeli asenkron generatörler rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada rüzgar türbini uygulamaları için 500 kW gücünde bir çift beslemeli asenkron generatör tasarımı gösterilmiştir. Öncelikle tanımlanan tasarım kriterleri ve performans değerlerine bağlı olarak generatörün analitik hesaplarla ana boyutları ve sargı yapıları hesaplanmıştır. Ardından, analitik olarak belirlenen tasarım üzerinde manyetik analizler gerçekleştirilerek iyileştirmeler yapılmıştır. Analiz sonuçları tasarlanan generatörün istenen güç değerlerini ve tasarım performans kriterlerini sağladığını göstermiştir.

Abstract

Doubly fed induction generators are widely used in wind turbines. In this study, design of doubly fed induction generator with 500 kW power for wind turbine applications is presented. Firstly, the main dimensions and the winding structure of the generator are calculated analytically depending on predefined design criteria and performance values. Then, the improvements are performed on the analytical design by performing magnetic analysis. The analysis results have shown that the designed generator satisfies the desired power specifications and design performance criteria.

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisinin önemi günümüzde giderek artmaktadır. Rüzgar türbinleri rüzgardan elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bu enerji dönüşümünü gerçekleştirmek için elektrik generatörleri kullanılmaktadır.

Günümüzde kullanılan rüzgar türbinlerinde iki tür generatör tahrik yöntemi hakimdir [1]. Bunlar doğrudan sürüş teknolojisi ve dişli kutulu sistemlerdir. Doğrudan sürüş teknolojisinde senkron generatörler kullanılmaktadır. Bu yöntemde düşük devirde dönen rüzgar türbini pervanesi doğrudan senkron generatörü tahrik etmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı herhangi bir dişli sistemine ihtiyaç duymamasıdır. Dişli kutusu rüzgar türbin sistemlerinde en çok arıza çıkaran parçalardan biridir. Belirgin bir dezavantajı ise generatörün ürettiği güç değerini şebekeye uygun şekilde aktarmaya yarayan güç elektroniği devreleri ile ilgilidir. Senkron generatörün statoru bir güç elektroniği devresi üzerinden şebekeye bağlıdır. Bu yüzden generatörün toplam gücü doğrudan güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Bu durum özellikle yüksek güçlerde güç elektroniği devreleri tasarımını zorlaştırmakta ve maliyeti arttırmaktadır [2].

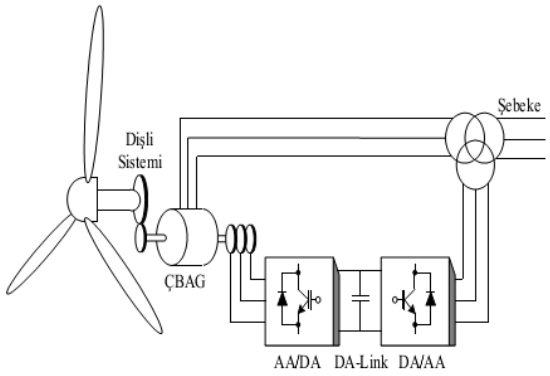
Dişli kutulu rüzgar türbinlerinde ise asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu sistemlerde düşük devirli türbin pervanesi bir dişli kutusu yardımı ile yüksek devirlere çıkarılarak asenkron generatör tahrik edilmektedir. Bu tip uygulamalarda çoğunlukla çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG) kullanılmaktadır. ÇBAG' ün statoru şebekeye doğrudan bağlıdır. Üretilen güç rotor sargıları üzerinden güç elektroniği devlereleri ile kontrol edilir. Bu yöntemin en önemli avantajı ÇBAG' ün rotoru üzerindeki güç akışı generatör toplam gücünün yaklaşık %30 - %40' ı kadar olduğundan güç elektroniği devrelerinin tasarımının kolaylaşması, boyutları ve maliyetinin azalmasıdır. Önemli bir dezavantajı ise sahip olduğu dişli sisteminin arızalara neden olmasıdır [3].

Bu çalışmada rüzgar türbini uygulamaları için 500 kW gücünde bir ÇBAG tasarımı gösterilmiştir. Belirlenen tasarım kriterlerine ve performans değerlerine bağlı olarak analitik tasarımı gerçekleştirilen generatör modelinde manyetik analizler sonucu iyileştirmeler yapılmıştır. Analizler sonucu tasarlanan generatörün istenen güç değerlerini ve tasarım performans kriterlerini sağladığı görülmüştür.

2. Genel Kavramlar

2.1. ÇBAG Kullanan Rüzgar Türbini Yapısı

ÇBAG kullanan rüzgar türbinlerinin genel şeması Şekil 1' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi türbin pervanesinin düşük devirdeki dönüş hızı bir dişli sistemi ile yükseltilerek ÇBAG rotor mili tahrik edilmektedir. ÇBAG' ün statoru doğrudan şebekeye bağlı iken rotoru çift yönlü bir dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlıdır. Generatörün güç ve frekans kontrolü bu dönüştürücü üzerinden yapılmaktadır. Böylece üretilen elektrik enerjisi stator ve rotor üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. ÇBAG' ün rotoru üzerinde çift yönlü bir güç akışı söz konusudur. Generatör senkronaltı çalışma durumunda rotor üzerinden şebekeden güç çekerken senkronüstü çalışma durumunda rotor üzerinden şebekeye güç aktarmaktadır. Bu güç akışı generatör toplam gücünün yaklaşık %30-%40 kadarı olduğundan burada kullanılan güç elektroniği elemanlarının da boyutları aynı oranda küçük olmaktadır. Bu durum yüksek güçlerde bile güç elektroniği elemanlarının tasarımında kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 1. ÇBAG kullanan rüzgar türbini yapısı

2.2. Elektrik Makinası Tasarımını Etkileyen Faktörler

Makine genel tasarımını etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [4].

- *Ekonomik faktörler*: Piyasa koşulları ve rekabet göz önünde bulundurulduğunda tasarlanacak elektrik makinesinin maliyetinin düşük olması istenir. Elektrik makinesinin performansının maliyetle orantılı olarak arttırılabilir olmasına karşın piyasada genellikle öncelikli tercih elektrik makinesinin performansından çok fiyatıdır.
- *Kullanılan malzemelere bağlı olan limitler*: Elektrik makinesinde kullanılacak çelik laminasyon, bakır iletken gibi malzemelere ve izolasyonda kullanılacak yalıtkan malzemelere bağlı olan teknik ve ekonomik limitler elektrik makinasının boyutlarını ve performansını doğrudan etkilemektedir.
- *Standartlara bağlı isterler*: Bu faktörler elektrik makineleri tasarımı, üretimi ve testleri konusunda IEEE [5], IEC[6], NEMA [7] gibi uluslararası standartların getirdiği limitleri içermektedir.
- *Tasarımı etkileyen diğer özel faktörler*: Bu faktörler standartların dışında ortaya çıkan isterlerin kısıtlarıyla ilgilidir. Örneğin tasarlanacak elektrik makinası yüksek ya da çok düşük sıcaklık değerine sahip ortamlarda çalışacaksa tasarımda bu isterlere özel olarak dikkat etmek gerekmektedir.

2.3. Elektrik Makinası Tasarım Adımları

Elektrik makinesi tasarımına başlamadan önce makinenin gücü, faz sayısı, besleme gerilimi, frekansı, istenen verim, güç faktörü, iletken akım yoğunluğu, hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu gibi değerlerin seçilmesi gerekmektedir. Bu değerler tasarım girdileridir. Belirlenen bu ön değerlere bağlı olarak tasarım süreci başlatılır ve gerekli durumlarda parametreler güncellenerek tasarımda revizyonlar gerçekleştirilir. Bu revizyonlar tasarım isterleri sağlanana kadar devam edilir.

Genel makine tasarımında izlenen adımlar aşağıda kısaca özetlenmiştir [4].

- *Elektriksel tasarım*: İlk olarak şebekeye uyumluluk açısından elektrik makinesinin besleme gerilimi, frekansı ve faz sayısı belirlenir. Bunun yanında nominal yük durumundaki istenen minimum güç faktörü ve verimin de belirlenmesi gerekir. Bu değerlere bağlı olarak elektrik makinesinin bağlantısı (üçgen, yıldız), sargı yapısı (bir ya da iki tabakalı, bükümlü, dalgalı sargı, tam ya da eksik adım), buna bağlı sargı faktörleri ve iletken akım yoğunluğu belirlenir.
- *Manyetik tasarım*: Burada belirlenen hava aralığı akı yoğunluğu ve malzeme doyma akı yoğunluğuna bağlı olarak stator ve rotor dişleri ve boyunduruğu doymaya gitmeyecek şekilde oluk şekilleri belirlenir. Ayrıca manyetizasyon ve kaçak endüktanslar, demir kayıpları ve harmonik etkileri hesaplanarak gerekli revizyonlar yapılır.
- *İzolasyon tasarımı*: İzalasyon tasarımı elektrik makinelerinin hem güvenliği hem de tasarımı açısından önem arzetmektedir. Yalıtımın gerekli ölçüde yapılmaması kısa devre arızalarına neden olmaktadır. Bunun yanında iletkenler üzerine uygulanacak yalıtkan maddenin kalınlığı oluk içindeki etkin olarak kullanılacak bakır alanını kısıtladığı için tasarımı olumsuz yönde etkilemektedir.
- *Termal tasarım*: Termal tasarımı iyi yapılmamış bir elektrik makinesinin verimi düşük olmaktadır. Bunun yanında yeterince soğutulmayan elektrik motorlarında iletkenler üzerindeki izolasyon malzemeleri etkisini yitirerek elektrik makinesinin arızalanmasına yol açmaktadır. Bu yüzden elektrik makinesinin ısıl analizleri yapılarak gerekli soğutma tibi (hava, su soğutmalı), vantilasyon kanalları sayısı, soğutma debisi gibi değerlerin belirlenmesi gerekmektedir.
- *Mekanik tasarım*: Bu tasarım adımında elektrik makinesinin kritik çalışma hızı, gürültü ve titreşimi, normal ve ekstrem çalışma durumlarında mile etki eden gerilme kuvveti, eylemsizlik momenti ve sargı başlarında oluşan kuvvetler hesaplanır. Böylece uygun mil seçimi ve yataklama elemanları belirlenir.

2.4. ÇBAG Nominal Çalışma Hızı ve Güç Değerlerinin Belirlenmesi

Bir ÇBAG' ün senkron devri

$$n_s = \frac{60 f_1}{2 p_1} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanır. Generatörün belirlenen çalışma kayma aralığı $s = \pm s_{max}$ değerine karşılık gelen minimum ve maksimum hız değerleri ise

$$n_{min} = n_s(1 - s_{max}) \quad (2)$$

ve

$$n_{max} = n_s(1 + s_{max}) \quad (3)$$

şeklinde elde edilir. Bu hız değerleri generatörün tam yüklü durumda güvenli çalışabileceği maksimum ve minimum hız değerleridir.

Generatörün nominal çalışma hızı belirlenirken ilk dikkat edilecek nokta seçilecek nominal hız değerinin senkron devir sayısının üstünde olmalısıdır. Böylece generatör nominal gücü rotor üzerinden güç tüketmeden sağlayabilir. Fakat diğer taraftan nominal çalışma hızı maksimum çalışma hızına yakın seçilmemelidir. Nominal çalışma hızı maksimum hız sınırına yakın olursa, beklenmedik rüzgar yüklenmeleri ortaya çıktığı durumlarda generatör devri maksimum çalışma hız değerini aşabilir ve fazla akım çekerek sargılar zarar görebilir. Ya da akımın sınırlandırıldığı durumda ise artan rüzgar gücüne rağmen generatör sınırlı değerde güç üretebildiği için generatör devri kontrolsüz şekilde artabilir.

Diğer taraftan nominal çalışma hızı senkron devir hızına da yakın değerde seçilmemelidir. Yakın seçilmesi durumunda rüzgar hızındaki değişmelere bağlı olarak generatör senkronaltı ve senkronüstü çalışma durumları arasında geçişler yapacak şekilde çalışabilir. Böylece generatör nominal gücü sağlarken sürekli rotordan güç çekip tekrar rotordan şebekeye güç verecektir. Senkron hıza yakın değerler bu tip generatörler için istenmeyen bir durumdur [8] .

Ayrıca nominal hız değeri belirlenirken rüzgar türbin devrinde rüzgar yüklenmelerine bağlı genellikle ±1 d/d değerinde bir değişme töleransı göz önüne alınmalıdır. Bu değişime bağlı olarak redüktör dönüştürme oranından sonra elde edilen nominal çalışma hızından sapan generatör hızı senkron üstünde kalmalıdır.

Yukarıda belirtilen değerlendirmeler göz önünde bulundurularak generatörün nominal çalışma hızı (n_n) senkron devir (n_s) ile maksimum çalışma hızı (n_{max}) arasında uygun bir değer seçilmelidir.

Belirlenen nominal çalışma hızındaki kayma değeri

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (4)$$

şeklinde olur. Bu kayma değerinde rotor gücü

$$P_r = |s_n|P_s \quad (5)$$

şeklinde stator gücü ve kayma değeriyle orantılıdır. Stator ve rotor güçlerine bağlı olarak generatör toplam gücü

$$P_T = P_s + P_r = P_s(1 + |s|) \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece nominal güç değerine bağlı stator güç değeri

$$P_s = \frac{P_T}{(1 + |s|)} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir.

Maksimum kayma sınırı göz önünde bulundurulduğunda rotordan sağlanabilecek maksimum güç değeri

$$P_{rmax} = |s_{max}|P_s \quad (8)$$

olarak hesaplanır. Bu değer generatörün rotor tasarımında kullanılacak maksimum güç değeridir.

Generatörün çalışma hızı aralığı maksimum ve mininmum çalışma hız aralığında olmasına karşın işletme koşulları göz önünde bulundurulduğunda (ani rüzgar yüklenmeleri, pitch motoru arızaları,..) generatörün bu sınır değerlerde çalıştırılması çeşitli riskler doğurabilmektedir. Bu yüzden generatörün çalışma aralığının bir güvenlik hız değeri ile sınırlandırılması uygun olacaktır.

3. 500 kW ÇBAG Tasarımı

Generatör tasarımında bölüm 2.2' de bahsedilen tasarımı etkileyen faktörler dikkate alınarak tasarım adımları uygulanmıştır. 500 kW ÇBAG için tasarım başlangıç verileri Tablo 1' de belirtilmiştir.

Tablo 1. 500 kW ÇBAG için belirlenen tasarım verileri

Stator Hat gerilimi (V_{SN})	690V (Y)
Stator Frekansı (f_1)	50 Hz
Stator Güç Faktörü ($\cos\varphi$)	1
Senkron devir sayısı (n_s)	750 d/d
Maksimum kayma değeri (S_{max})	±0,25
Generatörün nominal devirdeki gücü (P_{TN})	500kW
Verim (%)	%94
Stator Akım Yoğunluğu	4.5 A/mm2
Rotor Akım Yoğunluğu	6.5 A/mm2
Çalışma Sıcaklığı	85 C°

Tasarım başlangıç değerleri belirlendikten sonra generatörün nominal çalışma hızının yani diğer bir deyişle 500 kW nominal gücü hangi hızda üreteceğinin belirlenmesi gerekir. Böylece nominal hız ve bu hızdaki kayma değerine bağlı olarak stator ve rotor güç değerleri belli olmuş olacaktır. Bunun yanında maksimum kayma değerine bağlı olarak rotordan çekilecek maksimum güç değeri hesaplanır. Böylece rotor ve stator tasarımında kullanılacak güç değerleri belli olmuş olur. Bölüm 2.4' deki hız belirleme kriterleri göz önünde bulundurularak ÇBAG' ün nominal hızı ve minimum-maksimum çalışma sınır hız değerleri Tablo 2' deki gibi seçilmiştir.

Tablo 2. Generatör çalışma hız değerleri

Nominal çalışma hızı	850 rpm
Minimum çalışma hızı	600 rpm
Maksimum çalışma hızı	910 rpm

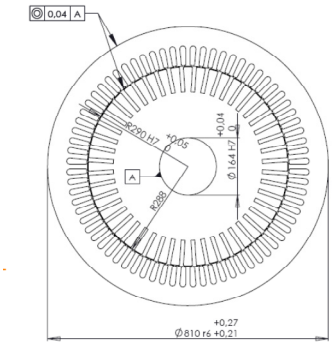
Maksimum kayma değerine bağlı olarak ortaya çıkan güç değerleri de Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Generatör çalışma güç (kW) değerleri

	Stator	Rotor	Toplam
Nominal çalışma gücü	441.2	58.8	500
Minimum çalışma gücü	441.2	-110.3	330.9
Maksimum çalışma gücü	441.2	110.3	551.5

Görüldüğü gibi nominal çalışma hızında 500 kW gücün 441.2 kW kadarı statordan sağlanan güç, kalan 58.8 kW değeri ise rotordan sağlanan güç şeklindedir. Maksimum kayma sınırı göz önünde bulundurulduğunda rotordan sağlanabilecek maksimum güç değeri 110.3 kW şeklindedir.

Generatörün boyutlandırılması yapılırken çıkış katsayısı yöntemi kullanılmıştır [9]. Generatör parametreleri birbirlerine çok bağlı olduğundan hava aralığı ortalama akı yoğunluğu, sargı faktörü, akım yoğunluğu, generatörün verimi gibi tasarım parametreleri için bir başlangıç değeri belirlenerek tasarıma başlanmıştır. Analitik ve manyetik analiz sonuçlarına bağlı olarak tasarım şekillendikçe bu değerler yeni verilere göre tekrar hesaplanarak son değerleri belirlenmiştir. Tasarımda rotor ve stator laminasyonlarında manyetik doyma değeri 1.8 T olan M400-50A sac malzeme kullanılmıştır. Bunun sonucunda tasarlanan 500 kW ÇBAG' ün geometrisi ve geometriye ilişkin parametreler sırasıyla Şekil 2 ve Tablo 4' de gösterilmiştir.



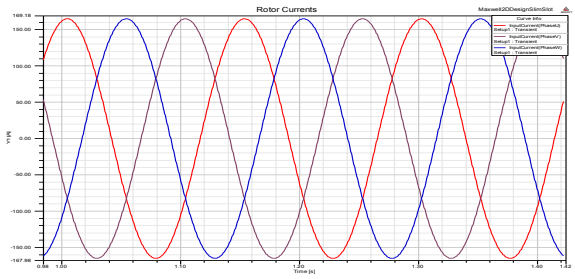
Şekil 2. 500 kW ÇBAG stator ve rotor geometrisi

Tablo 4. 500kW ÇBAG geometrisine ilişkin parametreler

Parametre	Stator	Rotor
Oluk sayısı	72	48
Nüve dış çapı	810mm	576mm
Nüve iç çapı	580mm	164mm
Paket boyu	355 mm	

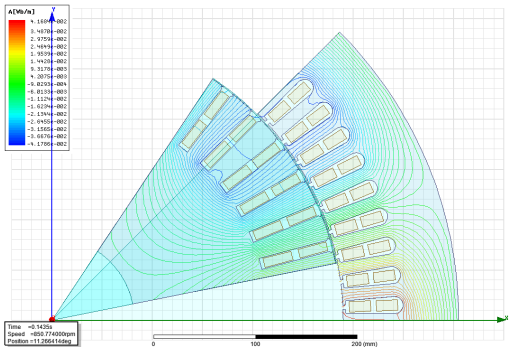
Generatörün manyetik olarak tasarımında "Sonlu Elemanlar Yöntemi" (SEY) kullanılmıştır. Bunun için analitik tasarım sonucu belirlenen boyutlar, sargı tipi ve seçilen malzemeye bağlı olarak generatörün bir modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model SEY' in gerçekleştirileceği benzetim ortamına aktarılarak generatörün manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında tasarım adımlarında gerekli güncellemeler yapılmıştır.

Benzetim ortamı olarak Ansoft Maxwell 2D [10] manyetik analiz programı kullanılmıştır. Analizler sırasında dönüştürücüler göz önüne alınmamış ve doğrudan rotor sargılarına uygulanması gereken akımlar hesaplanmıştır. Rotor sargılarına uygulanan akımlar Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Nominal çalışma durumunda rotora uygulanan akımlar

Generatörün nominal çalışma durumunda akı çizgileri dağılımını gösterir grafik Şekil 4' de gösterilmiştir.



Şekil 4. Nominal çalışma durumunda akı çizgileri dağılımı

Görüldüğü gibi akı çizgileri düzgün bir şekilde dağılmakta ve istenen stator ve rotor kutupları oluşmaktadır.

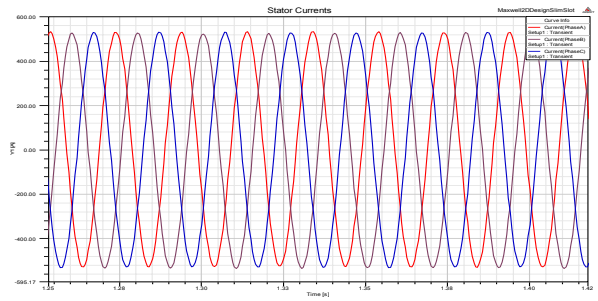
Generatörün manyetik verileri Tablo 5' de gösterilmiştir.

Tablo 5. Manyetik veriler

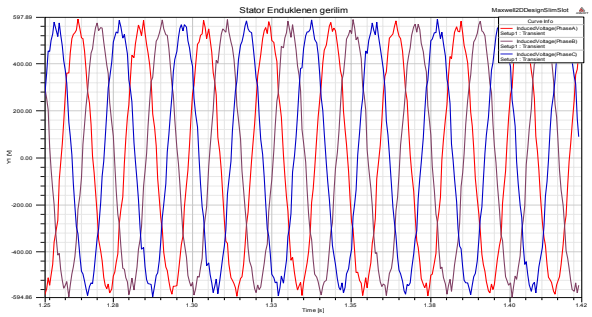
Parametre	Stator	Rotor
Hava aralığı akı yoğunluğu (boşta)	0.79 T	
Hava aralığı akı yoğunluğu (yükte)	0.83 T	
Dişteki akı yoğunluğu	1,69 T	1,58T
Boyunduruktaki akı yoğunlukları	1,13 T	0,48 T

Tablo 5' ten görüldüğü gibi nominal çalışma durumunda stator ve rotor dişlerinde manyetik akı yoğunlukları kullanılan malzemenin doyma değerlerinin altındadır.

Nominal çalışma durumunda generatörün stator akımları ve stator uçlarında endüklenen gerilimler sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6' de gösterilmiştir.

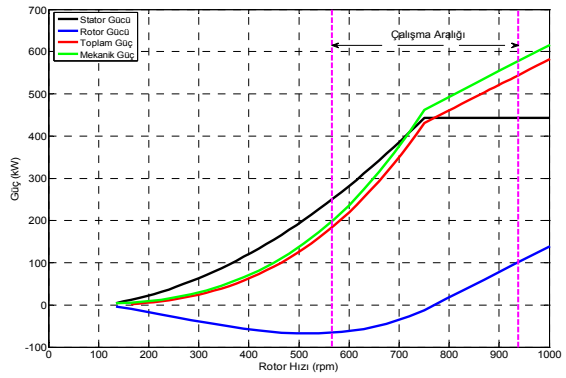


Şekil 5. Nominal çalışma durumunda stator akımları



Şekil 6. Stator uçlarında endüklenen gerilim

Görüldüğü gibi stator akımları oldukça düzgün ve genlikleri 541.4 A olmak üzere beklenen büyüklüktedir. Statorda endüklenen gerilimler beklenildiği gibi 50 Hz frekansında sinüsoidal ve istenilen genliktedir. Gerilim tepe değerlerindeki dalgalanmalar oluk ağızları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Fakat bu dalgalanmalar statorun bağlı olduğu şebekenin daha baskın olması dolayısıyla çalışma esnasında etkisini yitirmektedir. Şekil 7' da devir sayısına bağlı olarak generatörün güç eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 7. ÇBAG rotor hızına bağlı güç eğrisi

Görüldüğü gibi generatör senkronaltı çalışma durumunda statordan şebekeye güç verirken rotor tarafından şebekeden güç çekmektedir. Generatör senkronüstü çalışma moduna geçtiğinde statordan şebekeye verilen güç belli bir değerde sabit kalmakta ve artan mekanik güç rotor üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Bu grafik generatörün yüklenme süresince elde edilen güç grafiğini ifade etmektedir. Bu yüzden maksimum kayma değerine bağlı olarak generatörün toplam gücü 551.4 kW değerine kadar çıkabilmektedir. Rüzgar türbinin güç değeri 500 kW ve nominal çalışma hızı 850 rpm olarak belirlendiğinden, artan rüzgar gücüne bağlı olarak generatör gücü gerek evirici üzerinden elektriksel olarak gerekse de türbin kanat açıları ve gerektiğinde fren sistemi üzerinden mekanik olarak kontrol edilmelidir.

Generatöre ilişkin genel analiz sonuçları Tablo 6' da verilmiştir. Tablo 6' dan görüldüğü gibi akım yoğunlukları tasarımda hedeflenen değerlerin altındadır. Elde edilen verim hedeflenen %94 değerine oldukça yakındır. Sonuç olarak bu isterlerin yanında generatörün manyetik analiz sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda istenen tüm tasarım kriterleri sağlanmış ve böylece tasarım başarıyla tamamlanmıştır.

Tablo 6. Genel analiz sonuçları

Parametre	Stator	Rotor
Mekanik Giriş Gücü (kW)	532.817	
Nominal Mil Momenti (Nm)	5986	
Elektriksel Çıkış Gücü (kW)	500	
Stator Güç Faktörü ($\cos\varphi$)	1	
Bakır Kayıpları (W)	8029	13607
Demir Kayıpları (W)	6093	
Mekanik Kayıplar (W)	5086	
Verim (%)	93.84	
Akım yoğunluğu (mm^2)	4.11	6.21
Toplam net ağırlık (kg)	677.821	654.972

4. Sonuçlar

Bu çalışmada rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere 500 kW ÇBAG tasarımı yapılarak analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Öncelikle generatörün tasarımında istenen performans kriterleri belirtilmiştir. Bunun yanında generatörün çalışma hız ve bu hızlara bağlı olarak elde edilen güç değerleri belirlenmiştir. Bu güç değerleri ve performans kriterlerine bağlı olarak generatörün analtik hesaplarla ana boyutları ve sargı yapıları hesaplanmıştır. Analitik olarak belirlenen tasarım üzerinde manyetik analizler gerçekleştirilerek iyileştirmeler yapılmıştır. Analizler sonucu tasarlanan generatörün istenen güç değerlerini ve tasarım performans kriterlerini sağladığı görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma "Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi - MİLRES" projesi kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

[1] Polinder, H.; , "Overview of and trends in wind turbine generator systems," Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE , vol., no., pp.1-8, 24-29 July 2011
[2] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha and J.A. Ferreira, "Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines", European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, March-April 2008
[3] Henk Polinder, Frank F. A. Van der Pijl, Gert-Jan de Vilder and Perter J. Tavner, "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 725-33, Sept. 2006.
[4] Lipo T. A., Introduction to AC Machine Design, Wisconsin Power Electronics Research Center, 2004
[5] IEEE Std 112-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators
[6] IEC 60034- 1 Rotating electrical machines − Part 1: Rating and performance
[7] NEMA MG 1-2011 Motors and Generators
[8] Çadırcı, İ., Ermiş, M., 1992, Double-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speeds: steady-state performance optimisation and wind-energy recovery, IEE PROCEEDINGS-B, Vol. 139, No. 5, pp 429-442
[9] Boldea I., and Nasar S. A., The Induction Machines Design Handbook, Taylor & Francis Group, 2010
[10] ANSYS Maxwell 2D v14, ANSYS, Inc.