



Rüzgâr Türbin Sisteminde İki ve Üç Seviyeli Dönüştürücü Tasarımı ve Güç Analizinin Yapılması

Yunus ÇITAK*

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye.

Anahtar Kelimeler:

Rüzgâr enerjisi,
Çift beslemeli
asenكرون generatör,
Üç seviyeli
dönüştürücü

Özet

Günümüzde artarak devam enerji ihtiyacı ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjilere yönlendirmiştir. Bu çalışmada, büyük güç gereksinimi duyulan rüzgâr türbinlerine uygun, çift beslemeli asenكرون generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgâr türbin sistemi incelenmiş ve benzetimi yapılmıştır. Bu türbin sistemi 6 adet 1,5 MW toplam 9 MW gücünde 25 kV'luk dağıtım sistemine entegre, 30 km'lik bir hat uzunluğuna sahip, 25 kV'luk transformatör ile 120 kV'luk şebekeye güç üretmektedir. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sistemi çift yönlü enerji akışına uygun olmasından dolayı arka arkaya bağlı iki adet dönüştürücüden oluşmaktadır. Matlab/Simulink programında üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü ve üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün tasarımı yapılmış ve sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği ile anahtarlar sinyalleri üretilmiştir. Bu dönüştürücüleri tasarladığımız ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinini modellemesinde kullanarak ve 15 m/s rüzgar hızında toplam güç, reaktif güç ve sistemin çıkış gerilimleri değerleri kıyas edilmiştir. Benzetimi yapılan sistem için üç seviyeli dönüştürücü ile daha kararlı ve stabil sonuçlar alınmıştır.

*e-posta: yunuscitak1@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için:

Yunus ÇITAK, "Rüzgâr Türbin Sisteminde İki ve Üç Seviyeli Dönüştürücü Tasarımı ve Güç Analizinin Yapılması", Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 5, s 1, ss. 81-90

How to cite this article:

Yunus ÇITAK, "Two and Three Level Converter Design and Power Analysis in Wind Turbine System", Bayburt University Journal of Science, vol. 5, no 1, pp. 81-90

Two and Three Level Converter Design and Power Analysis in Wind Turbine System

Keywords:

Wind power,
Doubly-fed
induction
generator,
Three level
converter

Abstract

Today, the increasing need for energy has led countries to energies produced from renewable energy sources. In this study, doubly fed asynchronous generator (DFIG) based wind turbine system suitable for wind turbines with a high power requirement has been examined and simulated. This turbine system generates power to the 120 kV grid with 6 units of 1.5 MW, a total of 9MW power, integrated into the 25 kV distribution system, with a line length of 30 km, and a 25 kV transformer. Due to the fact that the DFIG based wind turbine system is suitable for bidirectional energy flow, it consists of two converters connected one after the other. Three-phase two-level converter and three-phase three-level converter were designed in Matlab/Simulink program and switching signals were produced with sinusoidal pulse width modulation technique. Total power, reactive power and output voltages of the system values were compared by using these converters and on 15 m/s wind speed in the DFIG-based wind turbine modeling we designed. For the simulated system, more stable and stable results were obtained with the three-level converter.

1 GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan talep artan nüfus ve endüstrinin gelişmesi nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin sınırlı olması, insanlığı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir [1]. Artan sanayileşme oranı fosil enerji kaynakları tüketimini artırmaktadır. Kullanım miktarı artan fosil yakıtlar çevre kirliliği ve atmosferde oluşan çeşitli gazlar sebebiyle insan sağlığını olumsuz etkilemektedir [2]. Ayrıca fosil yakıtlar, dışa bağımlılığa ve yüksek maliyetlere sebep olduğundan dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hızlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları: rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerjisi olarak sıralanır. Teknolojik ilerleme ile çevreye zarar vermeyen ve son yıllarda maliyetlerin düşmesi sebebiyle rüzgâr enerjisine yönelim artmaktadır. Türkiye de rüzgâr enerjisi kurulu gücünü her yıl artırmakta olup, yıllara göre değişimi Tablo 1’de verilmiştir. [3].

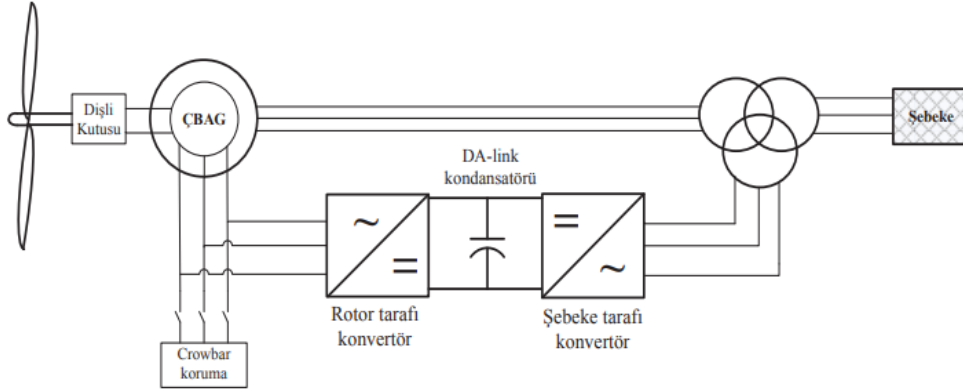
Tablo 1. Türkiye’nin yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü [3]

Yıllar	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Kurulu Güç (MW)	2.760	3.630	4.503	5.751	6.516	7.005	7.591	8.832	10.750

Rüzgâr türbinlerinin kuruldukları alanın %1’ini kaplaması sebebiyle boş alanlarda tarımın yapılabilmesi, rüzgâr enerjisinden elektrik üretmenin atmosfere zararlı gaz salınımına neden olmaması ve türbinlerin bakımı için harcanan zamanın az olması rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir enerji çeşitlerine nazaran avantajlarındandır. Kurulum sonrası herhangi bir hammadde ihtiyacının olmaması maliyet açısından öne çıkmaktadır.

Rüzgârdan enerji üretme rüzgâr türbinleri vasıtasıyla gerçekleşir. Rüzgâr türbinleri genel anlamda türbin gövdesi, pervane ve kuleden oluşmaktadır. Rüzgâr türbinde rüzgâra karşı gelen yüzey sayesinde dönme hareketi meydana gelir. Rüzgârın belirli bir açıyla yüzeye etki etmesiyle oluşan dönme hareketi elektrik enerjisi üretmesine sebep olur. Rüzgâr türbinleri kurulum konumlarına, eksen durumlarına, dişli özelliklerine, güçlerine, devirlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, göre gruplandırılırlar [4]. Rüzgârın etkisiyle meydana gelen ve rüzgâr sebebiyle ortaya çıkan kinetik enerji, ilk etapta mekanik enerjiye ardından kullanılan sistemler sayesinde elektrik enerjisine çevrilir. Mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren sisteme generatör denir. Rüzgâr türbinlerinde türbin rotoru ve generatör birbirinden bağımsız değildir. Çıkış geriliminin kontrol edilmesi generatör sayesinde olur [5]. Rüzgâr santrallerinde kullanılan generatör çeşitleri asenkron generatör, senkron generatör ve doğru akım(DA) generatörleri olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada rüzgâr türbinleri için kullanılan asenkron generatörlerden çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) kullanılmıştır. Çift beslemeli diye isimlendirilmesi statordaki gerilimin şebekeden gelmesi aynı zamanda rotordaki gerilimin güç konverteri tarafından indüklenmesi sebebiyle olmuştur [6]. Bu tip generatörler, büyük güçlü sistemlerde tercih edilirler. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Dönüştürücü, değişken frekanslı bir rotor akımı uygulayarak mekanik ve elektriksel frekans arasındaki farkı kompanze eder [7]. Şekil 2’de çift beslemeli asenkron generatörün rüzgâr türbini modeli verilmiştir [8].



Şekil 2. ÇBAG Rüzgâr Türbini modeli

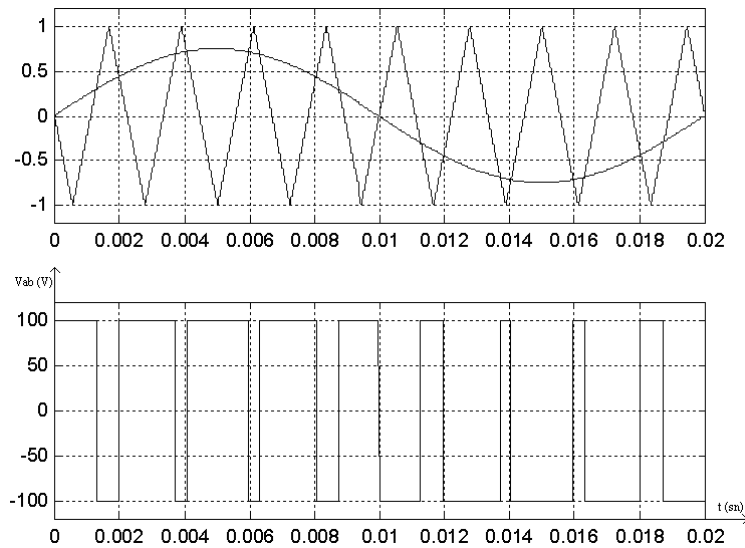
Rotor tarafı dönüştürücü ve şebeke tarafı dönüştürücü ardışık olarak bir kondansatör ile bağlanmıştır. Sistemdeki bu iki dönüştürücünün kontrol edilmesi bağımsız ve ayrı ayrı olmaktadır. Aktif ve reaktif gücü, rotor tarafındaki dönüştürücüyü kontrol ederek, DA bara gerilimini ise şebeke tarafı dönüştürücü kontrol ederek çalışma yapılır [9]. Bu çalışmada dönüştürücü olarak üç fazlı iki seviyeli ve üç fazlı üç seviyeli dönüştürücüler kullanıp rüzgâr türbini benzetimi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın önemi sisteme dahil olan dönüştürücü seviyelerinin, kullanılan sistemin çıktılarına (güç, gerilim vb.) olan etkisini göstermede yardımcı olmaktadır.

2 MATERYAL VE METOD

2.1 Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği

Dönüştürücülerde, DA kaynaktan sağlanan voltajın AA çıkış gerilimine en az kayıpla dönüşmesi, anahtarlar bileşenlerinin iyi kontrol edilmesine bağlıdır [10]. Darbe genişlik modülasyon(DGM) tekniklerinin gelişmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Dönüştürücü çıkışında oluşan harmoniklerin azaltılması ve anahtarlar kayıplarını minimuma indirmek için DGM teknikleri uygulanır [11]. Çok seviyeli dönüştürücülerde darbe genişlik modülasyon teknikleri anahtarlar frekanslarına bağlı olarak gruplandırılır. Bu çalışmada dönüştürücüler için sinüzoidal darbe genişlik modülasyon (SDGM) tekniği ile anahtarlar sinyalleri üretilmiştir.

SDGM tekniğinde taşıyıcı sinyaller ile modülasyon sinyali karşılaştırılarak dönüştürücü devresindeki anahtarlar sinyalleri üretilir [12]. SDGM tekniğinde Çok seviyeli dönüştürücüler için modülasyon sinyalleri aynı kalırken, dönüştürücü seviyesine göre taşıyıcı sinyallerin sayısı değişir. Referans ve taşıyıcı dalgalar karşılaştırarak anahtarlar zamanları için keşişme noktaları belirlenir. Referans işareti, tepe farkları ve frekansı olan bir sinüs dalgadır [13]. Taşıyıcı işaret olarak genellikle üçgen dalga şekli kullanılır [14]. Referans işareti sinüs dalgası dönüştürücünün çıkış frekansı, f_m taşıyıcı işareti üçgen dalgadır [15]. Bu sinyaller dönüştürücünün anahtarlar frekansını oluşturur. Şekil 3’de referans tek faz sinüs dalgası ile taşıyıcı üçgen sinyallerinin karşılaştırılması ve sonucunda oluşan gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Sinüzoidal DGM için dalga şekilleri

Bu teknikte modülasyon indeksi (M_a) modülasyon dalgasının genliğinin (V_p) taşıyıcı dalganın genliğine (V_{tri}) oranlanmasıyla bulunur. Modülasyon indeksi denklem 1’de verilmiştir.

$$M_a = \frac{\hat{V}_p}{\hat{V}_{tri}} \quad (1)$$

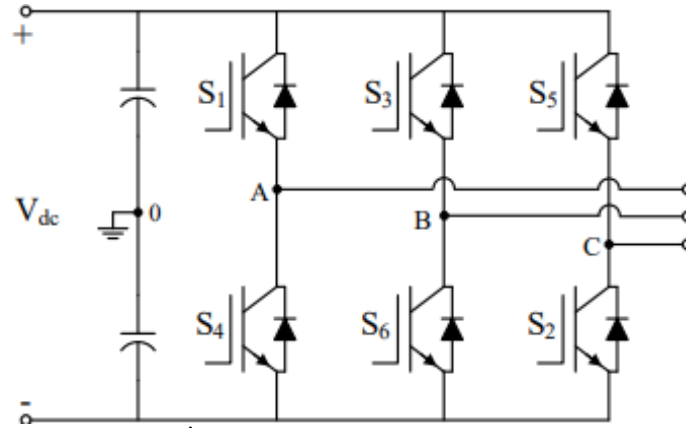
M_a değerinin 1’e eşit olması durumunda ana harmoniğin en üst tepe noktası değeri $V_d/2$ ’dir. Bunun anlamı kare dalga çalışmadaki tepe geriliminin %78,55’ine karşılık gelir [16]. M_a değerinin 0’a eşitse, anahtarlar frekansın kare dalga olur. M_a değeri 1’den ise aşırı modülasyon bölgesidir.

SDGM tekniği çok seviyeli dönüştürücülere uygulanması daha gelişmiş haldedir. Referans işaretini taşıyıcı işaretin sayısı gerilimin seviyesine göre değiştirir [15]. Seviye sayısı belirli bir dönüştürücü için seviye sayısının bir eksiği kadar taşıyıcı işaret kullanılır. Kullanılan işaretlerin genlikleri ile frekansları aynıdır. Denklem 2’de modülasyon indeksi verilmiştir.

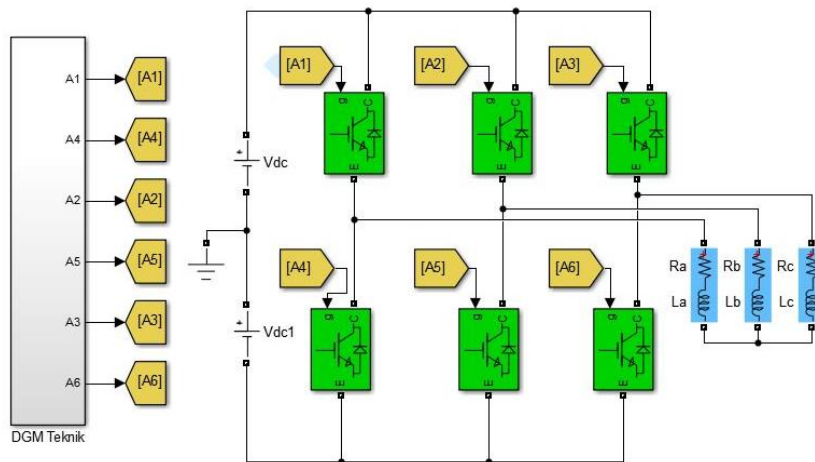
$$M_a = \frac{\hat{V}_p}{(m-1)\hat{V}_{tri}} \quad (2)$$

2.2 İki Seviyeli Dönüştürücü

İki seviyeli dönüştürücünün her bir faz kolunda iki adet yarıiletken anahtar vardır. Anahtarlar sistem çalışma süresince sırayla iletim veya kesim görevi görmektedir. Bu işlem nedeniyle eviricideki anahtarlama kayıpları artmaktadır. Çıkış gerilimleri iki seviyeden oluşmaktadır. Bu gerilim seviyeleri $\frac{V_{dc}}{2}$ ve $-\frac{V_{dc}}{2}$ ’dir [17]. Şekil 4’de iki seviyeli dönüştürücü topolojisi ve Şekil 5’de MATLAB/Simulink’te tasarlanan modeli verilmiştir.

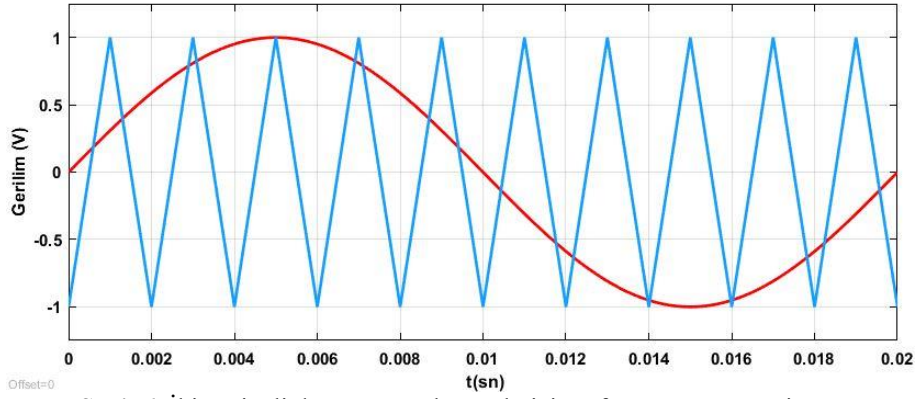


Şekil 4. İki Seviyeli Dönüştürücü Topolojisi [18]



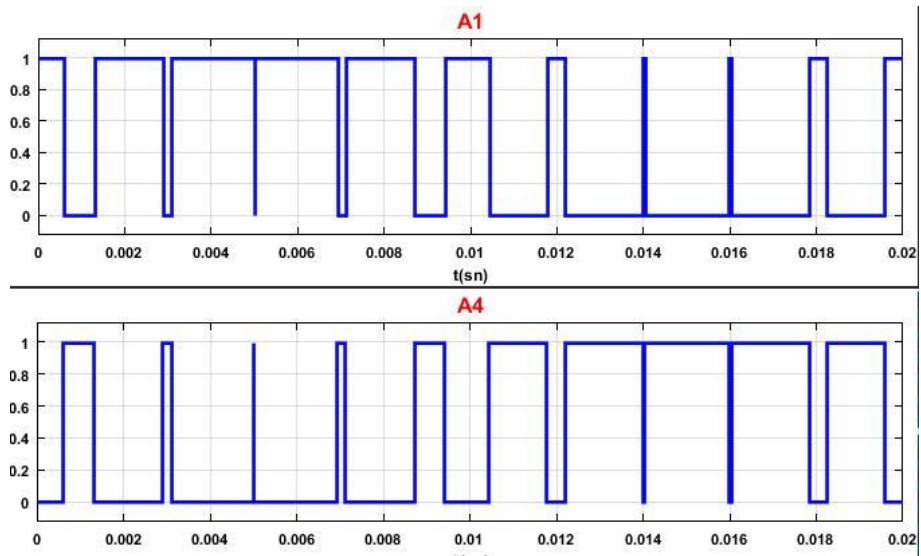
Şekil 5. Üç fazlı iki seviyeli dönüştürücünün MATLAB/Simulink Modeli

MATLAB/Simulink’te tasarlanan üç fazlı iki seviyeli dönüştürücünün anahtarlama sinyallerini oluşturmak için kullanılan referans ve taşıyıcı işaret Şekil 6’de verilmiştir.



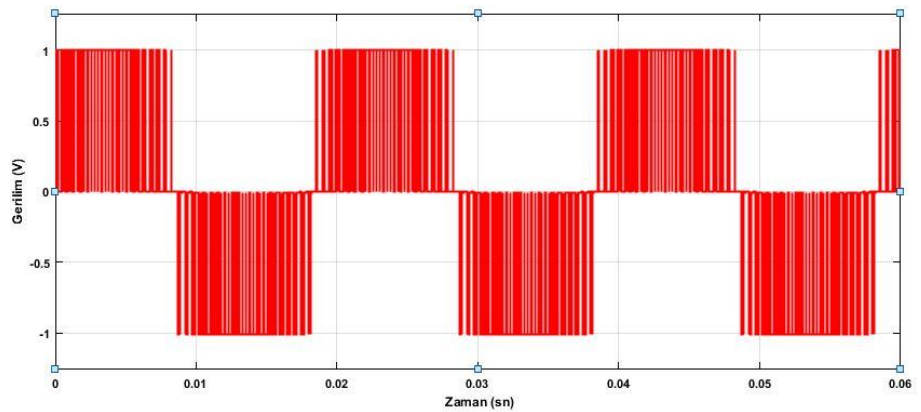
Şekil 6. İki seviyeli dönüştürücü kontrolü için referans ve taşıyıcı işaret

SDGM tekniği ile üretilen anahtarlama sinyalleri tek faz için Şekil 7’de verilmiştir. Grafik sinyalleri incelendiğinde A1 anahtarı iletimde iken A4 anahtarının iletimi yoktur.



Şekil 7. İki seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri

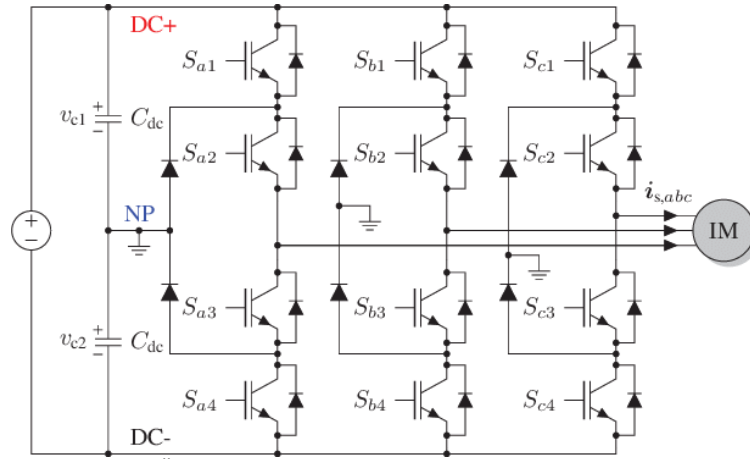
Şekil 8’de üç fazlı iki seviyeli dönüştürücünün tek fazına ait gerilim gösterilmiştir.



Şekil 8. İki seviyeli dönüştürücü çıkışındaki tek faza ait gerilim

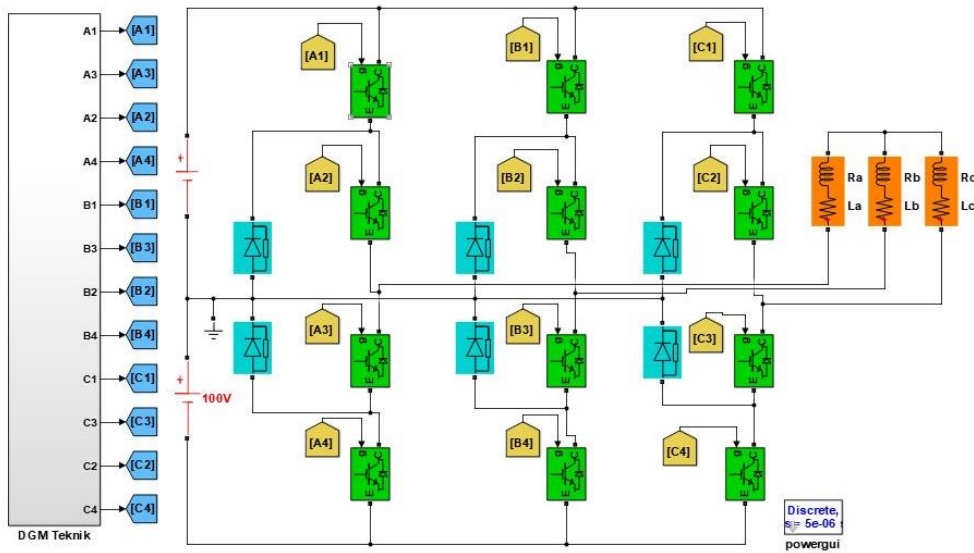
2.3 Üç Seviyeli Dönüştürücü

Yüksek güç gerektiren çalışmalarda üç seviyeli dönüştürücüler iki seviyeli dönüştürücülere göre daha avantajlıdır. Düşük anahtarlama frekanslarında toplam harmonik değişimin az olması daha kararlı çıkış dalgasını ortaya çıkarmaktadır [19]. Şekil 9’de üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün genel topolojisi verilmiştir.



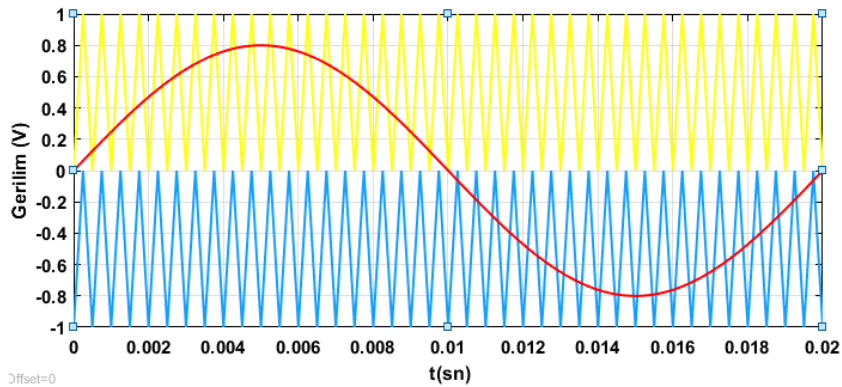
Şekil 9. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü topolojisi

Şekil 10'de üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün MATLAB/Simulink'te tasarlanan modeli verilmiştir. Her fazda 4 adet IGBT kullanılmıştır. IGBT'lerin iletimde veya kesimde olması SPWM ile üretilen anahtarlama sinyalleri ile olmaktadır.

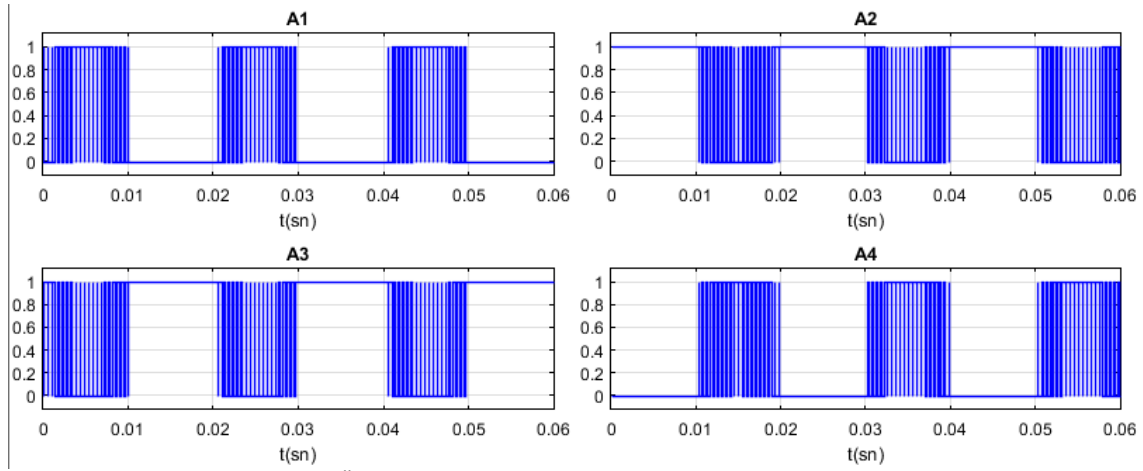


Şekil 10. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün MATLAB/Simulink Modeli

Şekil 11'de üç seviyeli dönüştürücü için referans ve taşıyıcı sinyaller gösterilmiştir. Her faz için 120 derece kaydırmalı sinus dalgası referans olarak kullanılmıştır.

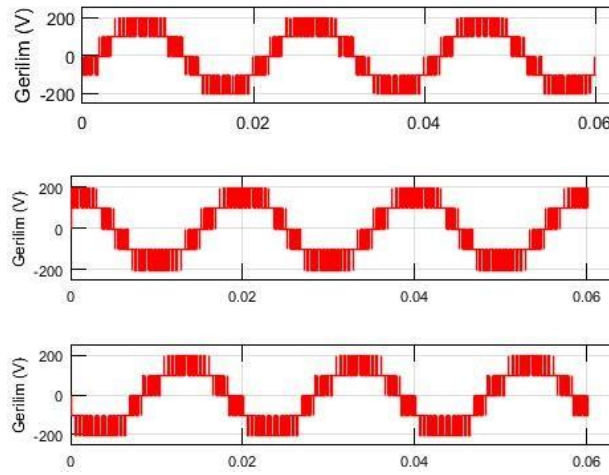
Şekil 11. Üç seviyeli dönüştürücü kontrolü için referans ve taşıyıcı işaretler ($M_i= 0.8$)

Şekil 12'de SDGM ile üretilen anahtarlama sinyalleri tek faz için gösterilmiştir. A1, A2, A3, A4 anahtarlama sinyalleri incelendiğinde; A1 iletimde iken A2, A3 anahtarı iletimde iken A4 anahtarı iletimde değildir.



Şekil 12. Üç seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri

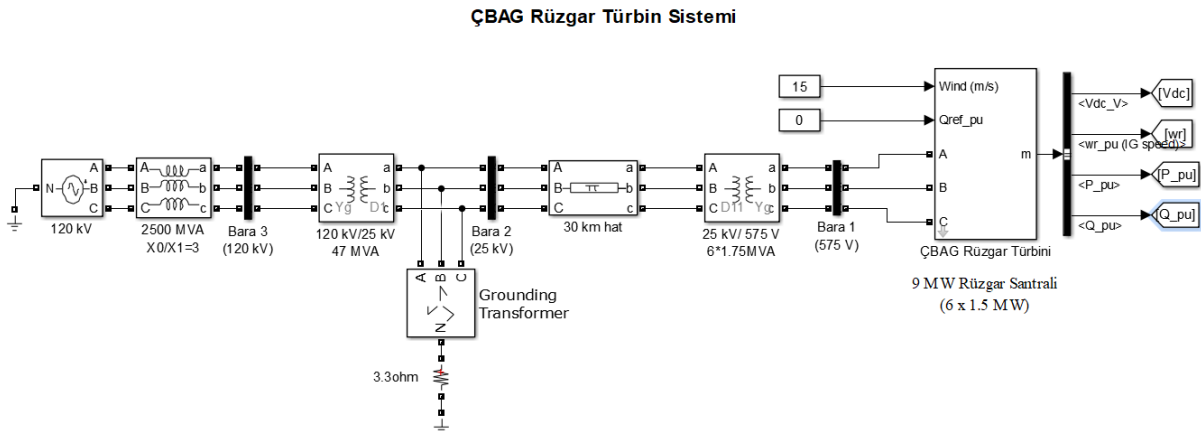
Şekil 13'de MATLAB/Simulinkte tasarlanan üç fazlı üç seviyeli dönüştürüğe ait fazlar arası gerilimler verilmiştir.



Şekil 13. Dönüştürücü çıkışındaki fazlar arası gerilimler

3 BULGULAR

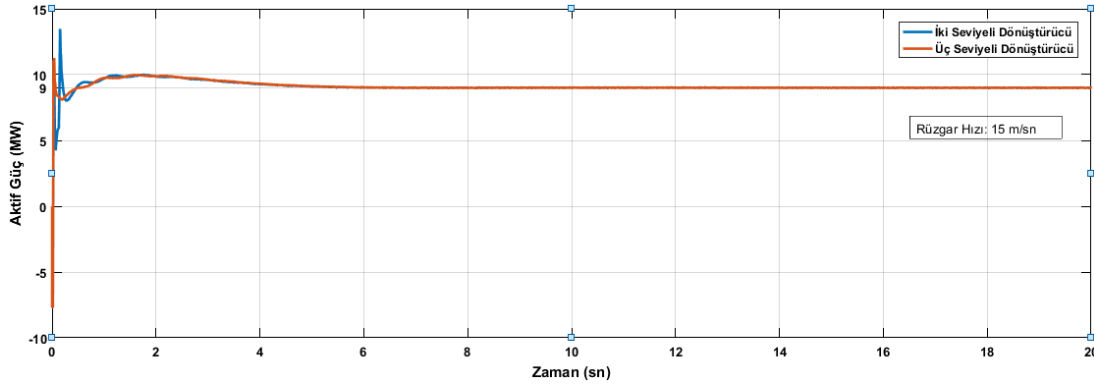
Bu çalışmada MATLAB/Simulink programı kullanılarak, Şekil 14'te verilen çift beslemeli asenkron generatör tabanlı, 6 adet 1,5 MW rüzgâr türbininden oluşan, 25 kV'lık dağıtım sistemine entegre edilmiş, 30 km'lik hat ile 120 kV'lık bir şebekeyi besleyen rüzgâr santrali tasarlanmıştır. Rüzgâr hızı 15 m/s olarak seçilmiştir.



Şekil 14. ÇBAG tabanlı 9MW'lık rüzgâr türbin sistemi

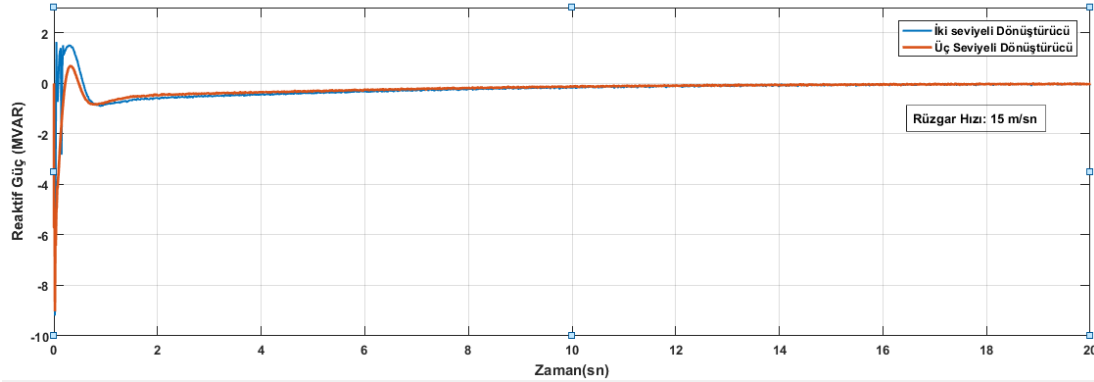
ÇBAG entegreli rüzgâr türbinlerinde generatörün statoru doğrudan hatta bağlı iken, rotor dönüştürücü üzerinden hatta bağlanmıştır. Yapılan çalışmada dönüştürücüler üç fazlı iki seviyeli ve üç fazlı üç seviyeli olarak seçilmiştir. Anahtarlama sinyalleri sinüzoidal DGM yöntemiyle oluşturulmuştur.

Yapılan benzetim çalışmasında iki seviyeli ve üç seviyeli dönüştürücüler kullanarak, generatörün ürettiği aktif gücün zamana göre değişimi Şekil 15'te verilmiş olup, iki dönüştürücü tipinde 9MW'lık güç elde edilmiştir. Aktif güç üretiminde üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün daha az salınım yaparak istenilen güce (9MW) daha kararlı şekilde ulaştığı görülmüştür.



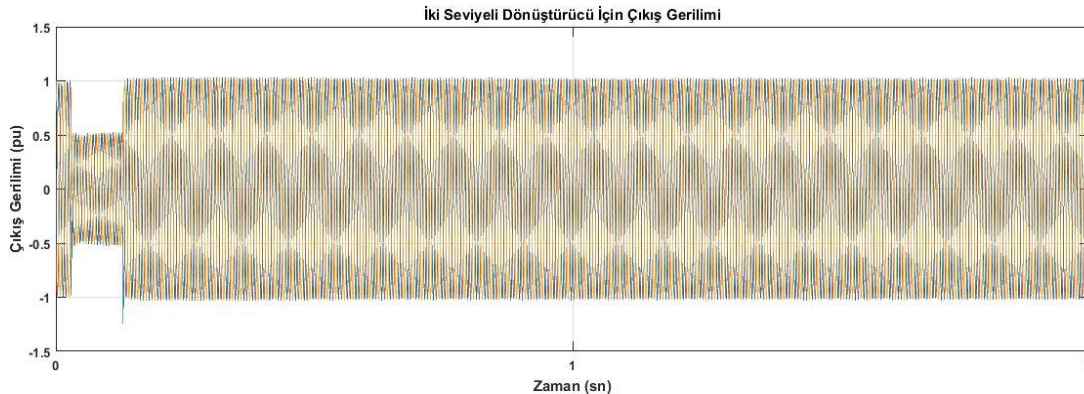
Şekil 15. İki seviyeli ve üç seviyeli dönüştürücüler için aktif güç değişimleri

Şekil 16'da generatör tarafından üretilen reaktif güç değişimleri verilmiştir. Benzetimi yapılan sistemde reaktif gücün 0 değerinde olması istenmektedir. Reaktif güç analizinde üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün daha kararlı şekilde 0'a ulaştığı görülmüştür.



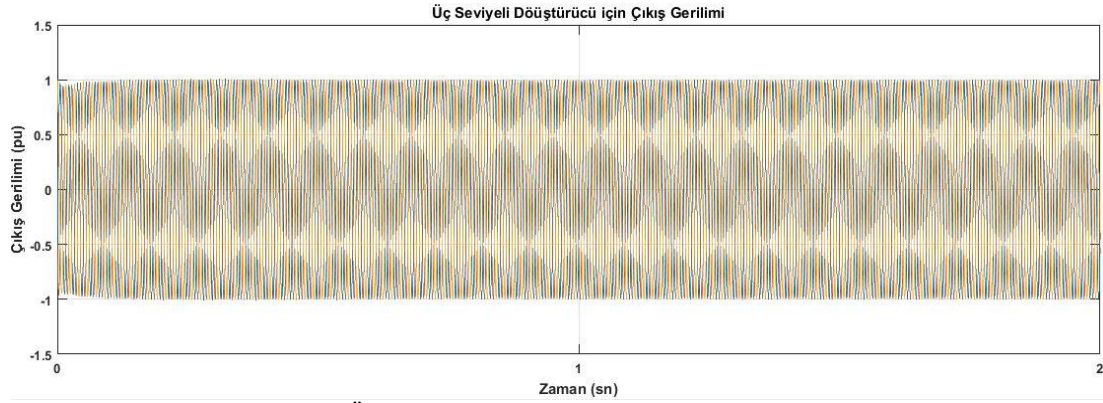
Şekil 16. İki seviyeli ve üç seviyeli dönüştürücüler için reaktif güç değişimi

Şekil 16'da üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistemin çıkış gerilim değeri 0-2 sn aralığında gösterilmiştir. Sistem başlangıç anından kısa bir süre sonra 0,5 pu değerine düşmüş ardından tekrar 1 pu değerine yükselmiştir.



Şekil 17. İki seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış gerilimi

Şekil 17’de üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistemin çıkış gerilim değeri 0-2 sn aralığında gösterilmiştir. Çıkış gerilimi başlangıçtan itibaren kararlı şekilde oluşmuştur.



Şekil 18. Üç seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış gerilimi

4 SONUÇLAR

Güç elektroniği sisteminin gelişmesi ve değişken rüzgâr hızlarında kullanılması uygun olan çift beslemeli asenkron generatör, rüzgâr türbinlerinde sıkça kullanılmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörde bulunan arka arkaya iki adet dönüştürücünün tasarımı yapılmış, üç fazlı iki seviyeli ve üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü tasarlanarak sisteme uygulanmıştır. Üç fazlı iki seviyeli ve üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü için anahtarlama sinyalleri SPWM ile üretilmiştir. Benzetim çalışmasında rüzgâr hızı 15 m/s olarak belirlenmiştir. Bu verilerle MATLAB/Simulink’te sistemin ürettiği çıkış gerilimi, aktif güç ve reaktif güç sonuçları kıyaslanmıştır. Üç seviyeli dönüştürücüler, iki seviyeli dönüştürücülere göre daha fazla yarı iletken malzeme kullanması ve kontrolünün daha karmaşık yapıda olmasına rağmen, benzetimde daha kararlı sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kullanılan dönüştürücünün seviyelerinin artması daha kaliteli sonuçlar elde edilmesini ortaya çıkarmıştır. Yapılan bu çalışma, şebeke bağlantılı farklı generatör tabanlı rüzgâr türbinlerinde oluşabilecek güç kalitesi problemlerinin analiz edilmesine öncü olacak ve gelecek çalışmalar için yarar sağlayacak, sistemin farklı dönüştürücü tipleriyle de analiz yapılmasının önünü açacaktır.

Yazar Katkıları

Yunus ÇITAK: Kavramlaştırma, Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, Veri analizi, Araştırma, Materyaller / Kaynaklar, Veri İyileştirme, Yazım - Özgün Taslak, Yazım - Değerlendirme & Düzenleme, Görselleştirme, Süpervizyon, Proje yönetimi, Finansman temini
Yazar makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

- [1] V. Şimsek, “Rüzgâr Enerjisi Ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgâr Santrali Tasarımı”, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Sivas, 2007.
- [2] R. Köse, Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi, 3 e Dergisi, pp. 68-72, 1998.
- [3] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022. [Online]. Available: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>. [Erişim tarihi: 5 Mart 2022]
- [4] U. Elibüyük, İ. Üçgül, “Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Yekarum e-Dergi, 2014.
- [5] M. K. Döşoğlu, “Rüzgâr Santralinde Gerilim Ve Güç Kontrolünün Facts Cihazları İle İncelenmesi”, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Düzce, 2010.

- [6] F. Dumlu, "Rüzgâr Santrallerinin Güç Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi Ve Şebekeye Uyumluluk Analizi", İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, İSTANBUL, 2014.
- [7] S. Çelikdemir, "Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Santrali", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 115s, Elazığ, 2014.
- [8] H. B. Perçin, "Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Elazığ, 2021 .
- [9] T. Ackerman, "Güç Sistemlerinde Rüzgâr", TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 733s, Emo Yayın No: GY/2009/4.
- [10] E. Kabalcı, "Çok Seviyeli İnvörtörler İçin Yeni Bir SDGM Tekniğinin Geliştirilmesi", Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 188s, Ankara, 2010.
- [11] D. W. Kang, Y. H. Lee, B. S. Suh, C. H. Choi, D. S. Hyun, "An Improved Carrierwave-based SVPWM Method Using Phase Voltage Redundancies for Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology", Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 542-548, 2000.
- [12] S. Tuncer, "Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Beş Seviyeli İnvörter Tasarımı ve Uygulaması", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 2004.
- [13] A. Kocalmış, "Uzay Vektör Pwm Kontrollü Çok Seviyeli İnvörterin Modellenmesi ve Benzetimi" Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Elazığ, 2005.
- [14] L. M. Tolbert, T. G. Habetler, "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, pp. 1098-1107, 1999.
- [15] Yavuz, "Rüzgâr Türbini Dönüştürücülerinin Esnek Hesaplama Yöntemi İle Denetimi", Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 143s, Nevşehir, 2021.
- [16] B. Siğergök, "Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Denetimli Aktif Filtre Devrelerinin Modellenmesi ve Benzetimi", Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, s. 69, Elazığ, 2009.
- [17] S. Paçacı, "Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık ve Sinirsel Bulanık Denetleyiciler ile Asekron Motorların Hız Denetimi için Simülatör Tasarımı", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Isparta 2011.
- [18] A. Mat, "Bağlaşık İndüktörlü Üç-Seviyeli Evirici İle Asekron Motorların Hız Kontrolü İçin Genetik Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici Simülatör Tasarımı", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s, Isparta, 2013.
- [19] V. Şimsek, "Rüzgâr Enerjisi Ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgâr Santrali Tasarımı", Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Sivas, 2007.