

Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan ÇBAG Vektör Kontrolü ve Gerilim Düşümü Durumunun İncelenmesi

Vector Control of DFIG in Wind Power Applications and Analysis for Voltage Drop Condition

Eray Aydın, Abdullah Polat, Lale T. Ergene

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
aydinera@itu.edu.tr, polata@itu.edu.tr, ergenel@itu.edu.tr

Özet

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan sistemlerin verimli bir şekilde çalışması günden güne artan ihtiyaca daha düşük maliyetle cevap verilebilmesi adına oldukça önemlidir. Yeni santraller kurmak veya mevcut santrallerin üretim kapasitesini artırmaktansa mevcut sistemlerinin verimliliğinin artırılması üreticiler tarafından tercih edilmektedir. Bunun yolu ise en uygun enerji dönüşüm ve kontrol sistemlerinin kullanılmasından geçmektedir. Rüzgar enerjisi gibi değişken-hızlı uygulamalar için Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) en etkin çözümlerden biri olsa da karmaşık bir kontrol sistemi gerektirir. ÇBAG için vektör kontrolünün analizi bu makalenin ana konusudur. MATLAB/Simulink programı kullanılarak ÇBAG modellenmiş ve vektör kontrol yöntemi benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçları test edilen kontrol algoritmasının aktif güç, reaktif güç ve konvertörler arasındaki DA gerilim kontrolü için uygun olduğunu kanıtlamıştır.

Abstract

As a result of increasing energy demand, effective generation – with high efficiency and low generation costs- of energy is very important. Today, power suppliers are looking for options that might increase the efficiency of the existing systems rather than installing new power stations or adding extra capacity. Maximum utilization of power sources can be achieved with the selection of the most appropriate conversion and control systems. Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) which appears to be one of the most effective solutions for variable speed applications requires a complicated control system. In this paper, Field Oriented Control (FOC) method for DFIG is presented. DFIG has been modeled in MATLAB/Simulink program and the use of FOC simulated. Simulation results show that the control algorithm is suitable for controlling active power, reactive power and DC link voltage.

1. Giriş

Günümüzde; önemli küresel sorunlar arasında yer alan nüfus artışı, nükleer enerji sistemleri ve fosil yakıtların beraberinde getirdiği sürdürülebilirlik konusundaki endişeler enerji sektörünü de yakından ilgilendirmektedir. Artan ihtiyaca sürdürülebilir çözümler sunabilmek adına birlikte enerji üreticileri kaynaklarını artırmak ve çeşitlendirmek istemektedir. Bu sebeple yenilenebilir enerji sistemleri her

geçen gün daha önemli hale gelmektedir.

Rüzgar enerjisi git gide daha yaygın hale gelse de rüzgar enerji sistemlerinin toplam verimi ile ilgili sıkıntılar bulunmaktadır. Rüzgar sürekli bir kaynak olmadığından sıradan bir rüzgar türbininin ortalama kapasite faktörü %33 civarındadır ve bu değer bazı aylarda %22.5' a kadar düşebilmektedir. Bu yüzden mevcut rüzgar enerjisinin maksimum verimle elektrik enerjisine dönüştürülmesi çok önemlidir [1]. Diğer bir mesele ise güç kalitesinin sürdürülebilmesi adına üretilen ve tüketilen reaktif gücün belli bir seviyede tutulmasıdır.

Çift Beslemeli Asenkron Generatörler (ÇBAG) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörler (KMSG) rüzgar uygulamalarında en çok tercih edilen generatörlerdir. KMSG'ler daha çok açık-deniz uygulamalarında kullanılmaktadır. Bunun sebebi bu türbinlerin dışı kutusuna sahip olmadan türbine direkt olarak bağlanmasıdır, dışı kutusunun bakımı açık-deniz uygulamalarında çok zor ve maliyetli olabilmektedir. ÇBAG'ler daha çok yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunun sebebi yazının sonraki bölümlerinde detaylı olarak açıklanacaktır. Rüzgar hızı her zaman istenilen seviyede olamayacağı için ve makinenin rüzgar hızındaki değişimlere hızlı bir şekilde tepki verebilmesi için ÇBAG'nin doğru şekilde kontrol edilmesi oldukça önemlidir.

Rüzgardan generatör miline aktarılan enerjinin artırılması için türbinin kanat açısı kontrol edilir. Bununla birlikte skaler kontrol, Doğrudan Moment Kontrolü (DTC) gibi yöntemler de bulunmaktadır. Ancak vektör kontrolü yöntemi moment ve akının (dolaylı olarak aktif ve reaktif gücün) ayrı ayrı kontrol edilebilmesini sağladığından en uygun çözüm olarak değerlendirilebilir.

2. Çift Beslemeli Asenkron Generatör

Asenkron generatörler farklı rüzgar hızlarında dahi maksimum güç üretebildikleri için rüzgar uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. ÇBAG bu grup içerisinde sağladığı birçok avantaj sebebiyle ilk akla gelen generatör tipidir [2, 3]. Anma güçten daha fazla enerji üretebilir ve bu sebeple yüksek güçlü uygulamalar için idealdir. Geniş bir hız aralığında (anma hız ve kesme hızı arasında) anma güçte üretim yapabilir. Ayrıca konvertörler stator sargılarına değil de rotor sargılarına bağlı olduğu ve dolayısıyla statora göre çok daha düşük güç değerlerini transfer ettiklerinden dolayı konvertör sisteminin

maliyeti oldukça düşüktür. ÇBAG, sistemin toplam verimliliğinin artırılmasında da önemli rol oynar.

ÇBAG birtakım dezavantajlara sahip olsa da yukarıda bahsi geçen birçok avantajı nedeniyle bunlar göz ardı edilebilir seviyededir. ÇBAG rüzgar türbinine bir dişli kutusu aracılığıyla bağlanır. Bu dişli kutusunun bakım ve onarımı boyutu ve bulunduğu konum (rüzgar türbininin nasek şeklinde tabir edilen en yüksek bölgesinde) nedeniyle kolay bir iş değildir ve bakım maliyeti oldukça yüksek olabilir. Ayrıca kontrol sisteminin birçok elemana sahip olması da toplam maliyeti artıran bir etkidir.

2.1. Matematiksel Model

Generatörün matematiksel olarak tam modeli [4, 5, 6] kaynaklarında verilmiştir. Ortak akı referans çerçevesinde aktif ve reaktif güç eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$P_r = 3/2 (V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr}) \quad (1)$$

$$Q_r = 3/2 (V_{qr}i_{dr} - V_{dr}i_{qr}) \quad (2)$$

P_r ve Q_r sırasıyla rotor aktif ve reaktif güç değerlerini, V_{dr} ve V_{qr} sırasıyla rotor geriliminin d-eksen ve q-eksen değerlerini, i_{dr} ve i_{qr} ise sırasıyla rotor akımının d-eksen ve q-eksen değerlerini temsil etmektedir.

Manyetik akı d-ekseni ile örtüştürüldüğünde, V_{qr} değeri sıfır olur ve aktif güç akımın q-eksen elemanı ile kontrol edilebilir. Akımın d-eksen elemanı ise reaktif gücü kontrol eder. Ayrıca, DA bara gerilimin matematiksel gösterimi [7] numaralı kaynaktaki gibidir:

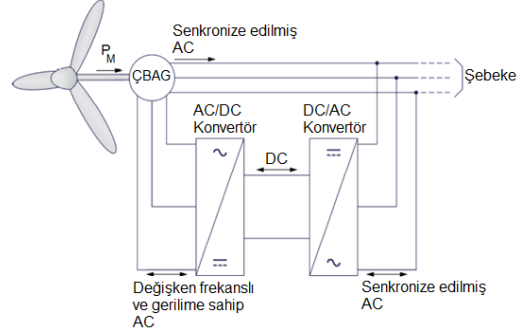
$$\frac{C}{V_{ds}} V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{ds} - \frac{P}{V_{ds}} \quad (3)$$

Burada, C konvertörler arasındaki kapasitörün değeri, V_{dc} DA gerilim değeri, i_{ds} ve V_{ds} sırasıyla d-eksen stator akım ve gerilim değeri ve P anlık güç değeridir. Generatörün stator sargıları direkt olarak şebekeye bağlı olduğu için V_{ds} sabittir. Bu nedenle DA gerilimdeki dalgalanmalar anlık güçteki değişime bağlıdır. Bu dalgalanmaların yok edilmesi için şebekeye bağlı olan konvertörden geçen akımın d-eksen bileşeni kontrol sistemi tarafından değiştirilir.

2.2. Çalışma Prensipleri

ÇBAG’de, rotor tarafından üretilen manyetik akı stator sargıları üzerinden de geçer. Rotor ve stator sargıları şebekeden beslenir. Stator ve rotor akımları PWM konvertörler tarafından kontrol edilir. ÇBAG’nin rotoru türbin tarafından senkron hızdan daha hızlı döndürüldüğünde makine elektrik üretmeye başlar. Statorda indüklenen gerilimin frekansı şebeke frekansı ile aynı olmalıdır. Rotor beslemesinin frekansını PWM konvertörler yardımı ile değiştirerek stator frekansının sabit kalması rüzgar hızına bağlı olmaksızın sağlanabilir. Bu durum ÇBAG’nin değişken hızlı uygulamalarda daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır.

Şekil 1’de görüleceği gibi ÇBAG’nin stator sargıları şebekeye doğrudan bağlıyken rotor sargıları bir çift konvertör aracılığıyla bağlanır. Bu konvertörler aktif ve reaktif güç üretimiyle birlikte çıkış gerilimini de kontrol ederek geniş bir hız aralığında makinenin düzgün bir şekilde çalışmasına yardımcı olur.

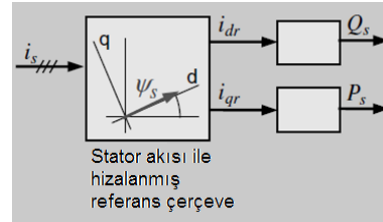


Şekil 1: ÇBAG-RT Bağlantı şeması [8]

3. Kontrol

ÇBAG’ün yüksek güçlü uygulamalar için en uygun çözüm olmasının sebebi düşük rüzgar hızlarında çıkış gücünü maksimize etmesi, yüksek hızlarda ise çıkış gücünü sınırlayarak sistemin zarar görmesini engellemesidir [9]. Fakat bunu gerçekleştirebilmek için ÇBAG etkin şekilde kontrol edilmelidir ve bu amaçla çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Zira rüzgar hızındaki ani değişiklikler çıkış sinyallerinde dalgalanmalara ve makinenin istenilen şekilde çalışmamasına sebep olabilir.

Vektör kontrol yöntemi Hasse ve Blaschke tarafından DA motor sürücülerinden esinlenilerek geliştirilmiştir [6]. Bu yöntem akı ve momentin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesine imkan tanır. Vektör kontrolün faz akımları önce Clark dönüşümüyle α - β koordinat sistemine, daha sonra da Park dönüşümüyle d-q koordinat sistemine aktarılmaktadır. Bu iki koordinat sistemi arasındaki fark α - β sistemi zamana bağlı olarak hareket ederken d-q sisteminin sabit olmasıdır [10]. d-q sisteminde, d (direct) eksen ile q (quadrature) eksen arasında 90° ’lik bir açı vardır. Akımın d-eksenindeki elemanı akıyı, q-eksenindeki elemanı ise momenti temsil eder.



Şekil 2: Stator akısı yönlendirmeli referans çerçeve [11]

Alan yönelimi akı veya gerilime göre olabilir. Akıya bağlı yönelimde, manyetik akı vektörü d-ekseni ile üst üste gelir, bu durumda gerilimin d-eksenindeki değeri sıfır olur. Gerilime bağlı yönelimde ise stator gerilimi q-ekseni ile çakışır. Şekil 2’de akıya bağlı yönelim durumunda aktif güç ve reaktif gücün sırasıyla rotor akımının q ve d eksen elemanlarıyla kontrol edilebildiği gösterilmiştir.

Vektör kontrolü yönteminde kontrol elemanları AA sinyaller yerine işlenmesi daha kolay olan DA sinyallerle uğraştıklarından kontrol işlemi çok daha basit bir hale gelir. Bu durumda AA sinyallerin dönüştürülmesinde görevli olan elemanlar kritik bir role sahiptir ve çok hızlı bir şekilde bu işlemi gerçekleştirmelidirler.

4. ÇBAG-RT Arıza Durumları

Rüzgar türbinlerinin dağılımı genellikle kırsal alanlarda yoğunlaşmaktadır. Bu alanlarda elektrik dağıtım sisteminin zayıf olması sık görülen bir durumdur. Bu sebeple besleme geriliminde zaman zaman dalgalanmalar görülebilmektedir. Bu tarz durumlarda, üretilen enerjide ve çıkış geriliminde dalgalanmaların yanı sıra türbinler üzerinde artan stator ve rotor akımlarına bağlı olarak elektriksel zorlanma ve momentteki dalgalanmalar neticesinde mekanik zorlanma da söz konusu olur. ÇBAG'ın statoru şebekeye doğrudan bağlı olduğu için bu etkilere karşı daha hassastır. Rüzgar türbininin arıza durumuna geçmemesi için besleme gerilimi değeri düştüğünde makine reaktif güç üreterek, yükseldiğinde ise tüketerek hem türbinin bu dalgalanmalardan etkilenmesini önler hem de şebekenin türbinin olası bozucu etkilerinden kurtulmasını sağlar.

Gerilim dalgalanması durumunda, RSC reaktif güç kontrolü ile birlikte elektromanyetik moment dalgalanmalarını engelleyerek enerjideki ve çıkış gerilimindeki dalgalanmaların bertaraf edilmesinden sorumlu iken GSC yine iki konvertör arasındaki baranın DA gerilim değerinin sabit tutulmasını sağlar.

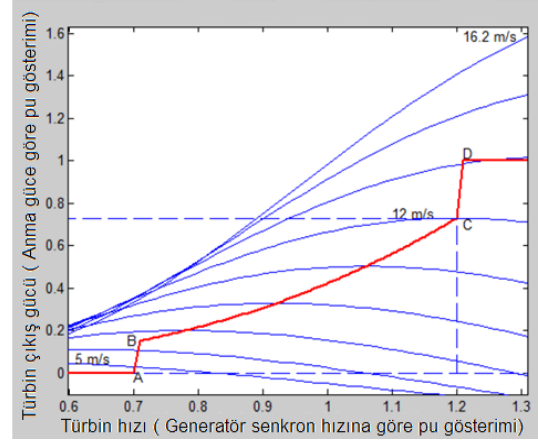
5. Metodoloji

ÇBAG tabanlı Rüzgar Türbini (RT); şebeke-tarafı konvertörü (GSC) ve rotor-tarafı konvertörü (RSC) kontrol sistemleri olmak üzere iki ana kontrol sistemine sahiptir. GSC kontrol sisteminin görevi rotor tarafından şebekeye verilen gücün gerilimin büyüklüğü ve frekans açısından sabit olmasını sağlamak adına iki konvertör arasındaki DA gerilimi sabit tutmaktır. DA gerilimin kontrolü RSC kontrol sisteminin doğru çalışması açısından da gereklidir.

GSC kontrol sistemi anlık DA gerilim değeri ile önceden belirlenmiş referans gerilim değerini sürekli olarak karşılaştırır. İki değer arasındaki farktan PI kontrolörler yardımıyla stator akımının d-eksen bileşeni için referans değeri elde edilir. q-eksen bileşeni için referans değer sıfır olarak belirlenmiştir. Daha sonra ölçülen stator akım değerleri referans değerlerle karşılaştırılır. Aradaki farktan PI kontrolörler tarafından bu kez referans gerilim değerleri elde edilir. Son olarak kontrol sinyalleri üretilir ve basit bir matematiksel işlemeden sonra GSC'ye gönderilir.

Daha fazla değişkenle başa çıkmak zorunda olduğundan dolayı RSC sistemi daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Aktif güç (frekans) ve reaktif güç (çıkış gerilimi) RSC kontrol sistemi tarafından kontrol edilir. ÇBAG şebekeye bağlı olarak çalıştığında akıya bağlı yönelimde q-eksen rotor akımı aktif gücü, d-eksen rotor akımı ise reaktif gücü kontrol eder.

Bu bölümde aktif ve reaktif güç kontrolü adım adım anlatılmıştır. Ölçülen aktif ve reaktif güç değerleri referans değerler ile karşılaştırılır. Üretilen reaktif güç için referans değer sıfır olarak belirlenmiştir. Yüksek rüzgar hızlarında rotor daha hızlı döndüğü ve daha çok enerji ürettiği için aktif güç için referans değeri rüzgar hızına göre farklılık gösterir. Sistem referans olarak Çıkış gücü-Türbin hızı grafiğini takip eder. Bu makalenin konusu olan çalışmada sistem Şekil 3'te yer alan kırmızı renkli eğriyi takip eder.



Şekil 3: Türbin güç karakteristiği

Referans ve gerçek değerler arasındaki fark rotor akımının d-eksen (reaktif güçten) ve q-eksen (aktif güçten) elemanlarının elde edilmesinde kullanılır. Daha sonra, bu değerler gerçek değerlerle karşılaştırılır ve yine PI kontrolörler yardımıyla RSC için referans gerilim değerleri elde edilir. Bir akım regülatörü yardımıyla RSC'nin gerçek gerilim değerleri belirlenir. Referans ve gerçek değerler kullanılarak PWM sinyalleri üretilir ve rotor tarafı konvertörüne gönderilir.

1.5 MW anma güce sahip bir ÇBAG-RT sistemi modellenmiş ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sistem frekansı 50 Hz' dir. Generator, rüzgar türbini ve sistemin geri kalanı ile ilgili parametreler aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Çizelge 1: Generator parametreleri

Anma gücü	1.5 MW	Kutup sayısı	6
Anma gerilimi	575 V	Anma hızı	1000 rpm
Stator direnci	0.00706 pu	Mıknatıslanma endüktansı	2.9 pu
Stator kaçak reaktansı	0.171 pu	Rotor direnci (statora indirgenmiş)	0.005 pu
Frekans	50 Hz	Rotor kaçak endüktansı (statora indirgenmiş)	0.156 pu

Çizelge 2: Türbin, konvertör ve kontrol parametreleri

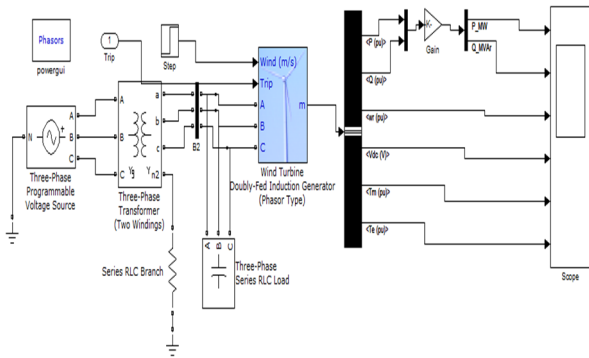
Türbin Parametreleri	RT anma mekanik gücü	1.5 MW
	Maksimum adım açısı	45°
Konvertör Parametreleri	Anma DA bara gerilimi	1200 V
	DA bara kapasitesi	0.01 F

6. Benzetim

Kontrol sisteminin çalışmasını gözlemlemek adına ÇBAG-RT sistemi MATLAB/Simulink programında modellenmiştir.

6.1. Model

Şekil 4'te MATLAB/Simulink programında kurulan modelin görüntüsü verilmiştir. Bu modelde generatörün statoru şebekeye yükseltici bir transformatör üzerinden bağlanmıştır. Transformatörün birincil ve ikincil sargılarındaki gerilim değerleri sırasıyla 575 V ve 25 kV'tur. 400 kVAr'lık bir kapasitör bankı transformatörün birincil tarafına paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 4: ÇBAG-RT Simulink modeli

Modellemede kullanılan blok, ÇBAG' nin matematiksel modelini ve tahrik sistemini (rüzgar türbini ve dişli kutusu) içerir. Bu blok aynı zamanda kontrol, ölçme ve veri işleme alt-sistemlerini de içerisinde barındırır. Sistemin doğru şekilde kurulduğundan emin olmak için farklı rüzgar hızlarında ölçümler yapılmış ve her seferinde üretilen güç değerleri not edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre güç eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğri Şekil 5'te görülebilir. Ortaya çıkan eğrinin standart rüzgar gücü eğrisi ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Güç üretimi için gerekli olan en düşük rüzgar hızı 4 m/s'dir ve devreye girme noktası olarak anlandırılır. Rüzgar hızı 15 m/s'ye ulaştıktan sonra makine anma güç değerinde çalışır. Bu iki hız arasındaki bölgede ise rüzgar hızı ile çıkış gücü arasındaki ilişki hemen hemen lineer bir özellik gösterir.

Şekil 5: ÇBAG-RT güç eğrisi

6.2. Benzetim Sonuçları

Önceki bölümde gösterilen modelin benzetimi yapılmıştır. Sisteme giriş olarak basamak fonksiyon şeklinde değişen bir rüzgar hızı verilmiştir. Rüzgar hızı başlangıçta 10 m/s'dir (bu değerde makine anma gücünün %80'ini üretmektedir) ve başlangıçtan 20 saniye sonra rüzgar hızı aniden 22 m/s hızla ulaşmaktadır ki bu değer oldukça yüksektir. Türbinin çok yüksek rüzgar hızları için herhangi bir frenleme sisteminin olmadığı ve türbinin bu hızlarda da enerji üretmeye devam ettiği varsayılmıştır. Kontrol sisteminin böyle bir dış etkiye vereceği tepki gözlenmek istenmiştir. Referans akım değerlerindeki değişim gösterilecektir. Bu referans değerler akım regülatörleri ile PWM sinyallerinin üretilmesinde kilit role sahiptir.

Şekil 6: Rotor hızının değişimi

Şebeke tarafı konvertörü akımın d-eksen bileşenini değiştirerek DA bara geriliminin sabit tutulmasından sorumludur. Denklem 3'e göre, DA gerilimdeki dalgalanmalar stator akımındaki ve anlık güçteki değişimlerin bir sonucudur. Benzetimde sisteme verilen girdiye göre, DA gerilimin referans ve gerçek değerleri ilk 60 saniye için Şekil 7'deki gibidir. Grafikten rahatça görülebildiği gibi DA gerilim bazı anlarda 1200 V olan referans değerden farklılık göstermektedir.

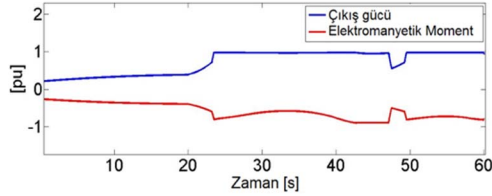
Şekil 7: Referans ve Gerçek DA gerilim değişimleri

Bu noktalar 23., 47. ve 49. saniyeler civarındadır. Bu kısa süreli dalgalanmaların sebebi çıkış gücündeki anlık değişimlerdir.

Şekil 8: Çıkış gücü ve çıkış gücünü değiştirmek için gerekli q -ekseni rotor akımı cevabı

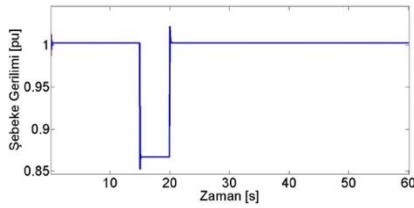
Aktif güç kontrolünde amaç makinenin her koşul için olabilecek en yüksek seviyede enerji ürettiğinden emin olmaktır. Rüzgar hızı arttığında rüzgardan elde edilebilecek enerji de artar. Burada üst sınır generatörün anma güç değeridir. Fakat, ÇBAG'nin bazı durumlarda anma gücün biraz daha

üzerinde üretim yapabileceği unutulmamalıdır. Referans güç eğrisi rüzgar türbininin karakteristik eğrisine bağlı olarak belirlenir. Herhangi bir rüzgar hızı değeri için üretilen güç miktarı referans değerin altına düştüğü takdirde rotor sargılarına şebeke üzerinden konvertörler aracılığıyla gönderilen akım değeri artar. Akımın moment elemanının artması rotora fazladan bir elektromanyetik moment sağlanması ve rotor hızının maksimum güç üretecek şekilde ayarlanması anlamına gelir. Elektromanyetik moment ile çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 9'da gösterilmiştir. Moment değerinin negatif olduğuna ve dolayısıyla moment ve güç arasında pozitif bir ilişki olduğuna dikkat edilmelidir.



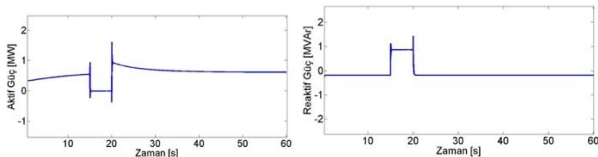
Şekil 9: Moment ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Arıza durumunun benzetiminde amaç şebeke koşullarındaki değişimlere generatörün verdiği tepkiyi gözlemlemek olduğu için parametrelerde birtakım değişiklikler yapılmıştır. Öyle ki; giriş parametresi olarak değişen rüzgar hızı yerine bu kez rüzgarın 10 m/s sabit hızla esmekte olduğu varsayılmıştır. Şebeke geriliminde ise benzetimin 15. saniyesinden başlamak suretiyle 5 saniye boyunca %15'lik bir düşüm yaşadığı arıza durumu modellenmiştir. Gerilimin genliğinde yaşanan değişime Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10: Şebeke geriliminin zamana göre değişimi

Bu benzetimde şebekeye ait koruma ve kontrol koşulları benzetimin daha basit hale getirilmesi adına göz ardı edilmiştir. Bir diğer deyişle şebekeye ait koruma sistemlerinin 5 saniyelik bir gerilim düşümünde devreye girmeyeceği varsayılmıştır. Ayrıca, bu bölümde reaktif güç kontrolü uygulanmaya devam edildiği takdirde (referans değer sıfır iken) bu işlem gerçekleştirilemeyecek ve türbin arıza durumuna geçecektir. Bu yüzden arıza durumunda reaktif güç kontrolünün devre dışı olması gerekir. Generatörün şebekeye bağlı kalabilmesi için çıkış geriliminin belli bir seviyede kalması gerekir. Arıza durumunda gerilim değeri düştüğü takdirde makine reaktif güç üreterek çıkış gerilimini olmasını gereken seviyeye çekmeye çalışır. Arıza durumuna bağlı olarak aktif güç ve reaktif güç eğrileri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: Arıza durumunda aktif ve reaktif güç eğrileri

7. Sonuçlar

Önceki bölümlerde verilen bilgiler ve benzetim sonuçları ışığında PI kontrolörlerin verimli çalışması açısından sorun yaratan üç faz AA sinyallerin basit matematiksel operasyonlar sonucunda iki elemanlı DA sinyallere çevrilebildiği görülmüştür. Vektör kontrolü sadece PI kontrolörlerin daha hızlı ve doğru çalışmasını sağlamamakta, ayrıca moment ve manyetik akımın dolayısıyla da aktif güç ve reaktif gücün ayrı ayrı kontrol edilebilmesine imkan sağlamaktadır. Benzetim sonuçları ÇBAG'nin sistemdeki bozulmalara hızlı bir şekilde tepki vererek reaktif enerji üretimini/tüketimini sınırladığını, her koşulda olabilecek en yüksek seviyede enerji ürettiğini ve şebekeye verilecek enerjinin istenilen şekilde iletiltiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, değişken-hızlı uygulamalarda generatörün istenilen şekilde çalışabilmesi, enerji kalitesinin ve verimliliğinin sürdürülebilmesi için etkin bir kontrol sistemine olan ihtiyaç da benzetim sonuçlarının bir başka çıktısıdır. ÇBAG, farklı rüzgar hızlarına kolayca adapte olabildiği için bu tarz uygulamalar için optimum çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

8. Kaynaklar

- [1] U.S. Energy Information Administration, "Electric Power Monthly," Washington, DC, May, 2016.
- [2] A. K. Gupta, H. Bhushan, P. Samuel, Generator Topologies with Power Electronics Converters for a Wind Energy Conversion System: A Review. Presented at NCRATES, April, 2013.
- [3] R. Pena, J. C. Clare and G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator using back-to-back PWM converters and its application to Variable-Speed Wind-Energy Generation," *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231-241, May, 1996.
- [4] M. Doumi, A. G. Aissaoui, A. Tahour, M. Abid and K. Tahir, "Non linear control of a Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines," in *CEIT*, pp. 1-6, 2015.
- [5] S. Chandrasekaran, C. Rossi, D. Casadei and A. Tani, "Improved control strategy of Wind Turbine with DFIG for low voltage ride through capability," in *SPEEDAM*, Sorrento, pp. 19-24, 2012.
- [6] M. Loucif, A. Boumediene and A. Mechernene, "Backstepping control of Double Fed Induction Generator driven by Wind Turbine," in *3rd Int. Conf. on Systems and Control*, Algiers, pp. 153-158, 2013.
- [7] J. Yao, H. Li, Y. Liao and Z. Chen, "An improved control strategy of limiting the dc-link voltage fluctuation for a Doubly Fed Induction Wind Generator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1205-1213, May, 2015.
- [8] *Courseware Sample: Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)*, Festo Didactic Ltee/Ltd, 2011.
- [9] C. A. M. Amendola and D. P. Gonzaga, "Fuzzy-logic control system of a variable-speed variable-pitch Wind-Turbine and a Double-Fed Induction Generator," in *ISDA*, Rio de Janeiro, pp. 252-257, 2007.
- [10] *Field-Oriented Control of 3-Phase AC-Motors*, Texas Instruments Inc., pp. 2-5., 1998.
- [11] G. Abad, J. Lopez, M. A. Rodriguez L. Marroyo and G. Iwanski, "Vector control strategies for grid-connected DFIM Wind Turbines", John Wiley & Sons, Inc., p. 304, 2011.