



Bileşik Yük Modelinin ÇBAG Tabanlı Rüzgar Türbini Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

M. Kenan Döşoğlu*¹

¹Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce

(Alınış Tarihi: 04.03.2019, Kabul Tarihi: 10.04.2019)

* İlgili yazar: kenandosoglu@duzce.edu.tr

Anahtar Kelimeler

ÇBAG
Güç kalitesi
Bileşik yük modeli

Özet: Lineer olmayan yük modellerinin sistem üzerinde oluşturmuş olduğu etkiler güç kalitesi açısından önemli bir konudur. Bu çalışmada, şebekeye bağlı Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar türbininde lineer olmayan yük modellerin etkisi incelenmiştir. Lineer olmayan yük modeli olarak üstel, sabit empedans, sabit akım, sabit aktif güç (ZIP) ve asenkron motor kullanılmıştır. Üstel-ZIP-Asenkron Motor biçiminde bileşik yük modeli oluşturulmuştur. Farklı zamanlar içerisinde bileşik yük modelleri devreye girip çıkmıştır. Bileşik yük modellerinin kararlılık analizi ve salınım durumları incelenmiştir. Bu benzetim çalışması MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Bileşik yük modeli analizinde 34.5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG elektriksel moment, ÇBAG d-q eksen stator akım ve ÇBAG d-q eksen rotor akım değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kısa süre olarak devreye girip çıkan bileşik yük modelinin güç sistem üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Investigation Of Effects On DFIG Based Wind Turbine Of Composite Load Modeling

Keywords

DFIG
Power quality
Composite load modeling

Abstract: The effects of nonlinear load models on the system are an important issue in terms of power quality. In this study, the effect of nonlinear load models in the grid-connected Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based wind turbine was investigated. Exponential, constant impedance, constant current, constant active power (ZIP) and induction motor are used as nonlinear load model. Composite load modeling is consist of exponential-ZIP-induction motor. Composite load modeling is turn on and turns off system within different times. Analysis and stability analysis of the composite load modeling were examined. This simulation study was carried out in MATLAB / SIMULINK environment. 34.5 kV bus voltage, DFIG terminal voltage, DFIG electrical torque, DFIG d-q axis stator current variations and DFIG d-q axis rotor current variations in composite load model analysis are examined. As a result of, it has been seen that composite load modeling which is activated as short time is effective on the power system.

1. Giriş

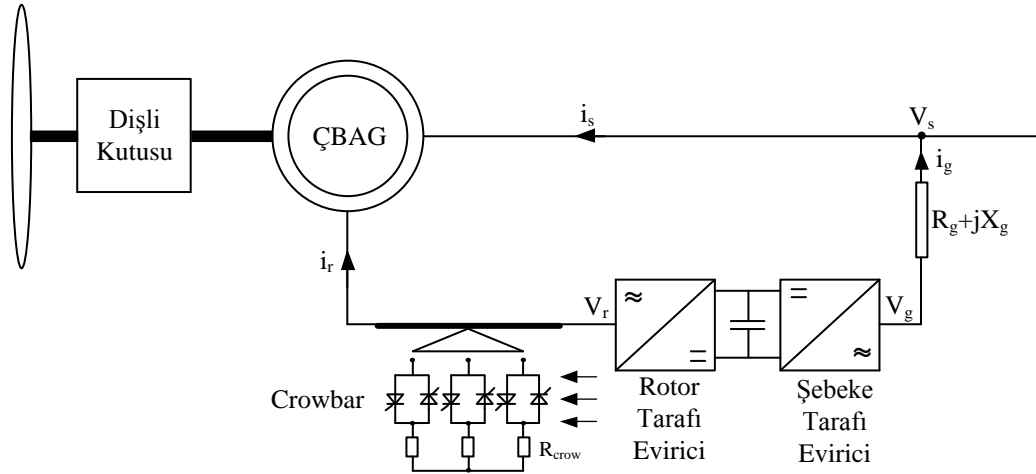
Büyük güçlü olarak imal edilen rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantılı çalışması günümüzde yaygındır. Şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin kullanılması güç sistemlerinin gerilim kararlılığı açısından çalışma koşullarını iyileştirme özelliğini ortaya çıkardığını söyleyebiliriz. Şebeke tarafında oluşabilecek olumsuz durumlar güç kalitesi açısından önemli bir konu haline gelmiştir. Bu konuyla ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar santralinde geçici kararlılık için farklı simetrik ve asimetrik arıza analizleri yapılmıştır. Hat ortasında ve baralarda meydana gelen farklı kısa devre analizleri sonucunda bara gerilim profillerinde değişimler incelenmiş ve yorumlanmıştır (Sun vd., 2005; García-Gracia vd., 2008). Diğer bir geçici durum analizi ise iletim hatlarının kısa süreli olarak devre dışı kalmasıdır. Kesicilerin yanlış koordinasyonu

sonucunda meydana gelen olumsuz durumların ÇBAG tabanlı rüzgar türbini ile entegre edilmiş çok baralı güç sisteminde oluşturmuş olduğu etkiler üzerinde durulmuştur. Sistemin bara gerilimleri, aktif güç ve reaktif güç değişimleri yorumlanmıştır (Yang, vd., 2012; Döşoğlu, 2016). Şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı rüzgar türbini ile harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Güç elektroniği tabanlı elemanlardan oluşan nonlinear yük modelleri yüzünden meydana gelen harmonik ve titreşim durum analizler yapılmıştır. Gerilim ve akım dağılımları için farklı filtre tasarımları ve Statik Var Kompansatörler kullanılmıştır (Gaillard, vd., 2009; Jing, vd., 2007). Şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde güç kalitesi etkileyen unsurlardan biriside sonsuz şebekedeki kısa devre gücü ve X/R oranıdır. Arıza durumlarında sistemin farklı kısa devre gücü ve X/R oranındaki benzetim modelleri oluşturulmuştur. Sistem parametreleri ve ÇBAG tabanlı rüzgar türbin parametrelerinde değişimler incelenmiştir (Liu, vd., 2018; Holdsworth, vd., 2004). Şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde gerilim kararlılığı açısından 2. dereceden gerilim denkleminde oluşan ZIP yük modelin farklı senaryolar ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistem gerilim-maksimum yüklenme parametre değerleri için farklı sabit empedans, sabit akım, sabit aktif güç değerleri kullanılarak bara gerilim profillerinin değişimleri incelenmiştir (Döşoğlu ve Dursun, 2018; Döşoğlu ve Arsoy, 2014).

Yapılan bu çalışmada literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak üstel, ZIP ve asenkron motor yük olarak kullanılarak bileşik model oluşturulmuştur. ÇBAG'de stator ve rotor dinamik modelleri kullanılmıştır. Bileşik yük modelin şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı rüzgar türbini üzerindeki etkileri farklı çalışma zamanlarına göre ayarlanmıştır. Farklı zamanlarda devreye giren çıkış bileşik yük modelin geçici kararlılık analizi ve salınım durumları gözlemlenmiştir. Bara gerilimleri, ÇBAG açılma hızı, elektriksel moment ve d-q eksen stator akım değişimleri farklı durumlara göre yorumlanmıştır.

2. Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) Tabanlı Rüzgar Santrali

ÇBAG dişli kutusu, crowbar ünitesi, generatör ve şebeke-rotor evirici devresinden oluşmaktadır. ÇBAG'ün devre modeli şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ÇBAG devre modeli

ÇBAG stator kısmı direk olarak şebekeye bağlanırken, rotor kısmı arka arkaya bağlı evirici devresi sayesinde şebekeye bağlanmaktadır. Arka arkaya bağlı evirici devresi ÇBAG'nin farklı hızlarda çalışmasına izin vermektedir. ÇBAG rüzgar hızının düşük ve yüksek olduğu durumlarda belli bir seviyeye kadar çıkış gücünü sabit tutma özelliğine sahiptir. Rotor tarafındaki evirici devresinde bulunan crowbar ünitesi seviye sınırlarının ihmal edilmesi durumunda generatörü şebekeden ayırmaktadır. Rotor tarafı ve şebeke tarafı evirici devresi kontrol eşitlikleri denklem 1 ile denklem 14 arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dx_1}{dt} = P_{ref} + P_s \quad (1)$$

$$i_{qr_ref} = K_{p1} (P_{ref} + P_s) + K_{i1} x_1 \quad (2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = i_{qr_ref} - i_{qr} = K_{p1} (P_{ref} + P_s) + K_{i1} x_1 - i_{qr} \quad (3)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = v_{s_ref} - v_s \quad (4)$$

$$i_{dr_ref} = K_{p3} (v_{s_ref} - v_s) + K_{i3} x_3 \quad (5)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = i_{dr_ref} - i_{dr} = K_{p3} (v_{s_ref} - v_s) + K_{i3} x_3 - i_{dr} \quad (6)$$

$$v_{qr} = K_{p2} (K_{p1} \Delta P + K_{i1} x_1 - i_{qr}) + K_{i2} x_2 + s w_s L_m i_{ds} + s w_s L_{rr} i_{qr} \quad (7)$$

$$v_{dr} = K_{p2} (K_{p3} \Delta v + K_{i3} x_3 - i_{dr}) + K_{i2} x_4 - s w_s L_m i_{qs} - s w_s L_{rr} i_{dr} \quad (8)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = V_{dc_ref} - V_{dc} \quad (9)$$

$$i_{dgrid_ref} = -K_{pdgrid} \Delta v_{dc} + K_{1dgrid} x_5 \quad (10)$$

$$\frac{dx_6}{dt} = i_{dgrid_ref} - i_{dgrid} = -K_{pdgrid} \Delta v_{dc} + K_{1dgrid} x_5 - i_{dgrid} \quad (11)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = i_{qgrid_ref} - i_{qgrid} \quad (12)$$

$$\Delta v_{dgrid} = K_{pgrid} \frac{dx_6}{dt} + K_{igrid} x_6 = K_{pgrid} (-K_{pdgrid} \Delta v_{dc} + K_{1dgrid} x_5 - i_{dgrid}) + K_{1grid} x_6 \quad (13)$$

$$\Delta v_{qgrid} = K_{pgrid} \frac{dx_7}{dt} + K_{igrid} x_7 = K_{pgrid} (i_{qgrid_ref} - i_{qgrid}) + K_{1grid} x_7 \quad (14)$$

Burada, x_1, x_2, x_3, x_4 rotor tarafındaki evirici kontrol eşitlikleri, K_{p1} ve K_{i1} güç düzenleyici oransal ve integral oranları, K_{p2} ve K_{i2} , rotor tarafındaki eviricinin oransal ve integral oranları, K_{p3} ve K_{i3} , şebeke gerilim düzenleyicisinin oransal ve integral oranları, i_{dr_ref} ve i_{qr_ref} rotor tarafındaki eviricinin d-q eksenini için akım kontrol referansı, v_s ve v_{s_ref} , özel çıkış gerilimi ve özel referans gerilimi, P_s ve P_{ref} aktif güç ve aktif güç referans değeri, s kayma, w_s statorun açısal hızı, L_m manyetik endüktans L_{rr} , rotor ve manyetik endüktansın toplamı, Δv ve ΔP gerilim ve aktif güç değişim değeri, v_{dr} ve v_{qr} rotor d-q eksen gerilimi, i_{ds} , i_{dr} , i_{qs} , i_{qr} d-q eksen stator ve rotor akımları x_5, x_6, x_7 şebeke tarafındaki evirici kontrol eşitlikleri, K_{pdgrid} ve K_{idgrid} DC bara gerilim düzenleyici oransal ve integral oranları, K_{pgrid} ve K_{igrid} şebeke tarafındaki eviricinin oransal ve integral oranları, V_{dc} ve V_{dc_ref} DC link gerilimi ve DC link gerilim referansı, i_{dgrid} ve i_{dgrid_ref} şebeke tarafındaki evirici d eksen elemanı ve şebeke tarafındaki evirici için kontrol referansı, i_{qgrid} ve i_{qgrid_ref} , şebeke tarafındaki eviricinin q eksen akımı ve şebeke tarafındaki evirici için kontrol referansı, Δv_{dgrid} ve Δv_{qgrid} , d-q eksen şebeke tarafı evirici gerilim değişim değeri, Δv_{dc} DC link gerilim değişim değeridir (Wu, vd., 2007). ÇBAG'ün stator ve rotor devresi matematiksel modellemesinde hızlı ve doğru hesaplama yapabilmesi için d-q eksen stator ve rotor gerilimleri kullanılmaktadır. D-q eksen stator ve rotor gerilimleri denklem 15 ve denklem 18 arasında gösterilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + w_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (15)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - w_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (16)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s w_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (17)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s w_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (18)$$

ÇBAG stator ve rotor akı denklemleri denklem 19 ve denklem 22 arasında gösterilmiştir.

$$\lambda_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (19)$$

$$\lambda_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (20)$$

$$\lambda_{dr} = (L_r + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (21)$$

$$\lambda_{qr} = (L_r + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (22)$$

Bu eşitliklerde; v_{ds} , v_{qs} d-q eksen stator gerilimleri, d-q stator ve rotor kaçak akıları R_s ve R_r , d-q stator ve rotor dirençleri, L_s and L_r d-q stator ve rotor endüktanstır (Ekanayake, ve Holdsworth, 2003; Krause, 2002; Sloopweg, vd., 2001). Bu çalışmada stator modellemesinde azaltılmış derece modellemesi yapılmıştır. ÇBAG'de ADM'de stator dinamiği için oluşturulan ifadeler denklem 23 ile denklem 26 arasında verilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X' i_{qs} + E_{ds} \quad (23)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X' i_{ds} + E_{qs} \quad (24)$$

$$\frac{dE_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_0} \left[E_{ds} - (X - X') I_{qs} \right] + s w_s E_{qs} - w_s \frac{L_m}{L_m + L_s} v_{dr} \quad (25)$$

$$\frac{dE_{qs}}{dt} = -\frac{1}{T_0} \left[E_{qs} + (X - X') I_{ds} \right] - s w_s E_{ds} + w_s \frac{L_m}{L_m + L_s} v_{qr} \quad (26)$$

Stator dinamik denkleminde stator geçici reaktans denklem 27'de verilirken, geçici açma zaman sabiti denklem 28'de verilmiştir.

$$X' = w_s \left(L_m + L_s - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \right) \quad (27)$$

$$T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} = \frac{L_{rr}}{R_r} \quad (28)$$

ÇBAG stator dinamik modellemesinin yanısıra, rotor dinamik modellemesi geliştirilmiştir. Rotor dinamik modellemesinde Öncelikli olarak azaltılmış derece modelinde stator akılarının türevinin ihmal edilmesine bağlı olarak kullanılan geçici reaktans ve gerilim kaynağına ilaveten rotor ekseninde bir gerilim kaynağı ilave edilmiştir. Statorda kullanılan emk denklemleri kısmından yola çıkarak rotor devresi için emk elde edilmiştir. Rotor emk elde edilmesinden rotor d-q eksen gerilimlerinde faydalanılmıştır. ÇBAG rotor dinamiği oluştururken d-q eksen rotor akım değişimleri türevli ifadeleri kullanılmıştır. ÇBAG rotor dinamiği için oluşturulan ifadeler denklem 29 ve denklem 30'da gösterilmiştir.

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - L_{r1} i_{qr} + L_{r2} \frac{di_{dr}}{dt} - \frac{s w_s L_m}{L_s + L_m} \lambda_{qs} \quad (29)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + L_{r1} i_{dr} + L_{r2} \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{s w_s L_m}{L_s + L_m} \lambda_{ds} \quad (30)$$

Burada, L_{r1} ve L_{r2} ifadeleri denklem 31 ve denklem 32'de gösterilmiştir.

$$L_{r1} = -\frac{L_m}{L_s + L_m} + L_r + L_m \quad (31)$$

$$L_{r2} = \frac{L_m}{L_s + L_m} + L_r + L_m \quad (32)$$

Rotor dinamiği için oluşturulan d-q eksen emf gerilim kaynağı ifadeleri denklem 33 ve denklem 34' de gösterilmiştir (Döşoğlu ve Arsoy, 2016; Döşoğlu, 2017).

$$e_{dr} = -\frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} \lambda_{qs} \quad (33)$$

$$e_{dr} = \frac{sw_s L_m}{L_s + L_m} \lambda_{ds} \quad (34)$$

3. Bileşik Yük Modeli

Üstel bir fonksiyon özelliğine sahip olan yük modelinin aktif ve reaktif güç eşitlikleri denklem 35 ve denklem 36'da verilmiştir.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (35)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (36)$$

Burada, P_0 ve Q_0 yükün aktif ve reaktif gücü, V bara gerilimi, V_0 yük akışı sonucundaki bara gerilimi, np ve nq değerleri özel durumlarda 0, 1 ve 2 değerlerini almaktadır. ZIP yük modeli için güç ifadeleri gerilime bağlı 2.dereceden bir denklemden oluşmaktadır. Sabit akımın doğrusal olmasında ve gücün sabit olmasında güç gerilim değişiminden tamamen bağımsız olmaktadır. ZIP yük modelin aktif ve reaktif güç eşitliklerini denklem 37 ve denklem 38'de gösterilmiştir.

$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \frac{V}{V_0} + p_3 \right] \quad (37)$$

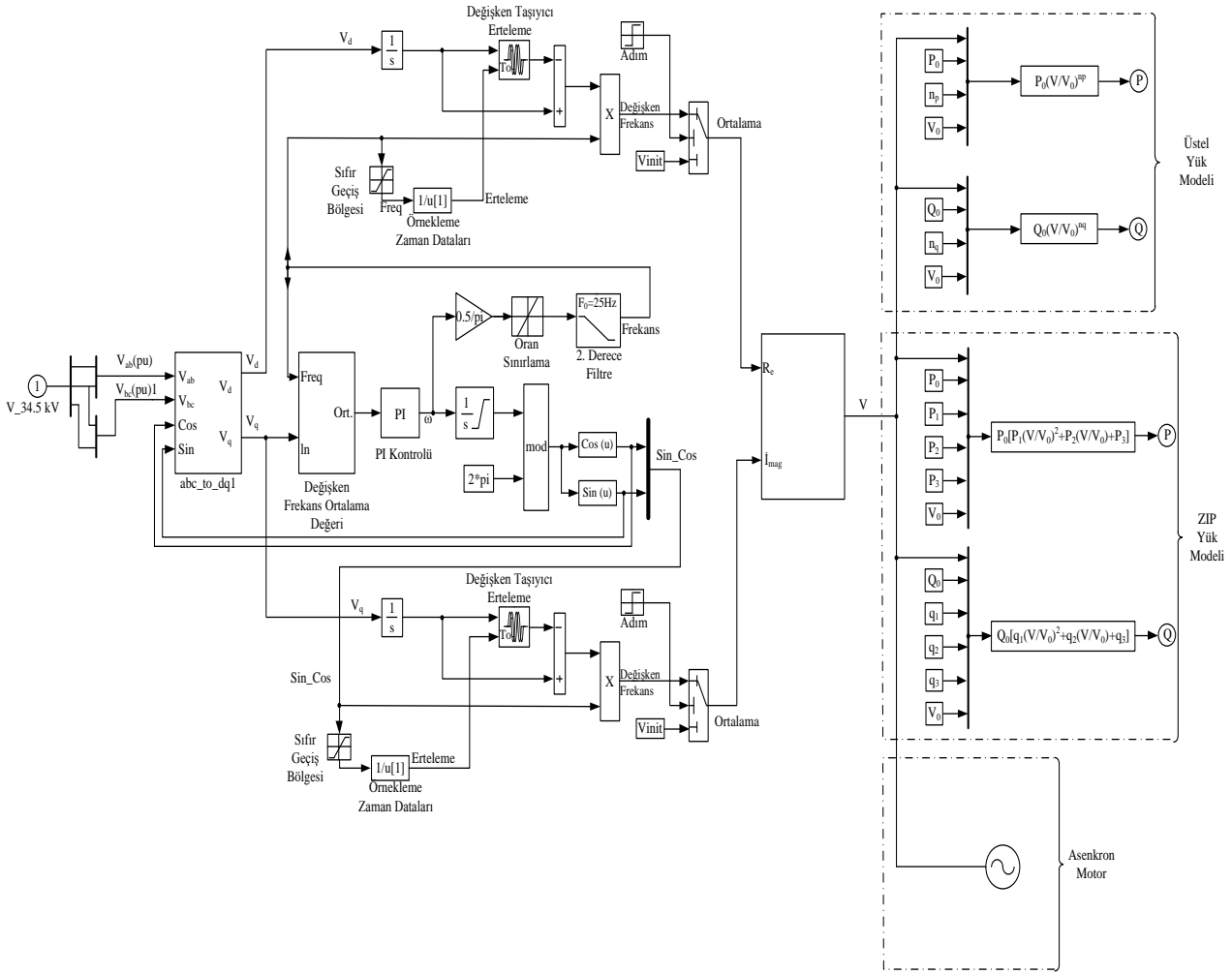
$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \frac{V}{V_0} + q_3 \right] \quad (38)$$

Burada, P_0 ve Q_0 yükün aktif ve reaktif gücü, V bara gerilimi, V_0 yük akışı sonucundaki bara gerilimi, p ve q değerleri aktif ve reaktif güç parametreleridir. ZIP yük modelde $p_1+p_2+p_3=1$ ve $q_1+q_2+q_3=1$ olarak alınmaktadır (Ma, vd., 2008; Li vd., 2007). Bileşik yük modelinde üstel ve ZIP yük modellerine paralel bağlı olarak asenkron motor ilave edilmiştir. Üstel, ZIP ve asenkron motor ile oluşturulan bileşik yük modellerinin aktif ve reaktif güç eşitlikleri denklem 39 ve denklem 40'da gösterilmiştir.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} + P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] + P_{im} \quad (39)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} + Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] + Q_{im} \quad (40)$$

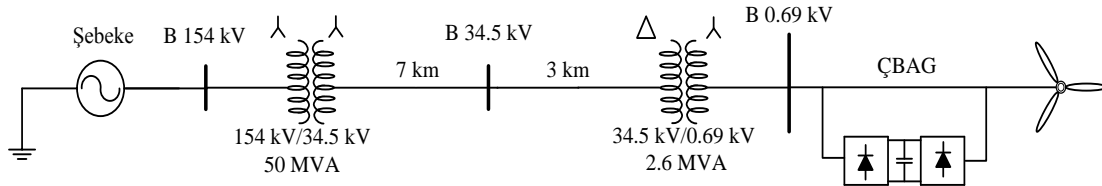
Burada, P_{im} asenkron motorun aktif gücü, Q_{im} ise asenkron motorun reaktif gücü olarak tanımlanmıştır. Bileşik yük modelinin devre yapısı şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bileşik yük modeli

4. Benzetim Çalışması

2.3 MW gücündeki bir rüzgar türbini, üçgen/yıldız bağlı 0.69kV/34.5kV gerilimli 2.6MVA güçlü bir yükseltici bir transformatör üzerinden Şekil 3’de görüldüğü gibi bir güç sistemine bağlıdır.



Şekil 3. Sistem modeli

Santral çıkışında 34.5 kV’luk 10 km’lik bir hat bulunmaktadır. Bu hattın sonunda da yıldız/yıldız bağlı 34.5 kV/154 kV gerilimli 50 MVA gücünde yıldız/yıldız bağlı bir transformatör üzerinden kısa devre gücü 2500 MVA ve X/R oranı 7 olan bir iletim şebekesine bağlantısı vardır. Rüzgar türbini generatörü olarak ÇBAG kullanılmıştır. Rüzgar hızı da 8m/s sabit olarak kabul edilmiştir. Benzetim çalışmasında, her iki transformatörün doyum karakteristikleri ihmal edilmiştir. 10 km’lik hat için pi eşdeğer devresi modeli kullanılmıştır. 10 km’lik hat B 34.5 kV noktasında bölümlendirilmiş olup, geçici olayların oluşturulacağı yer olarak belirlenmiştir. ÇBAG tabanlı

rüzgar türbini generatör parametre değerleri ve bileşik yük modelindeki parametre değerleri tablo 1 ve tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. ÇBAG parametre değerleri

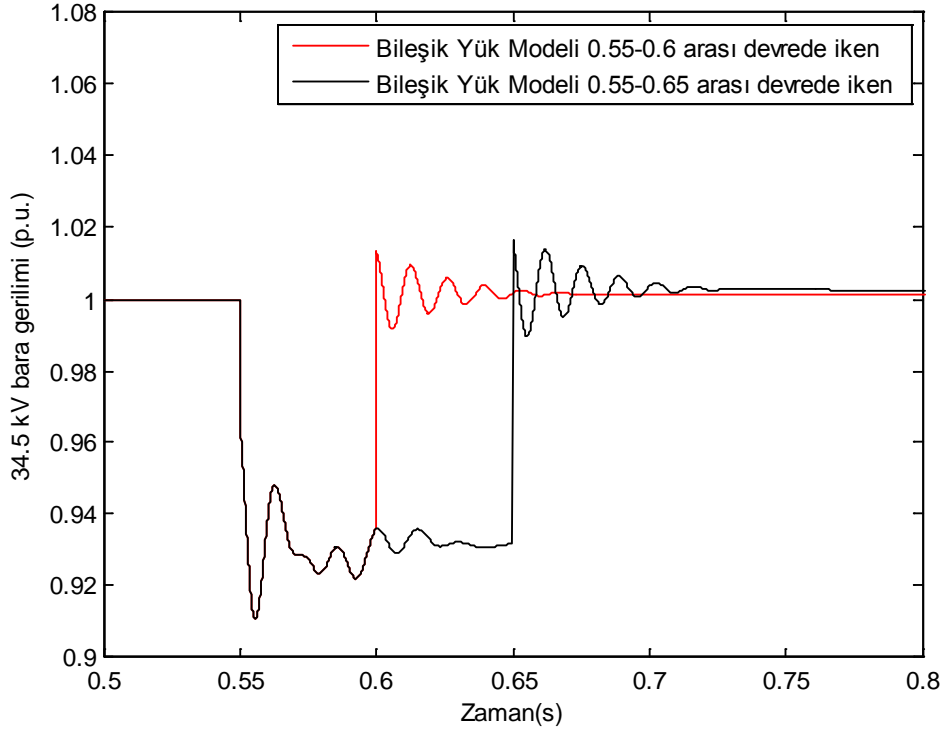
ÇBAG	Parametre Değerleri
R_s	0.00706 Ω
L_s	0.171H
R_r	0.005 Ω
L_r	0.156 H
L_m	2 H
H	5.04

Tablo 2. Bileşik yük modeli parametre değerleri

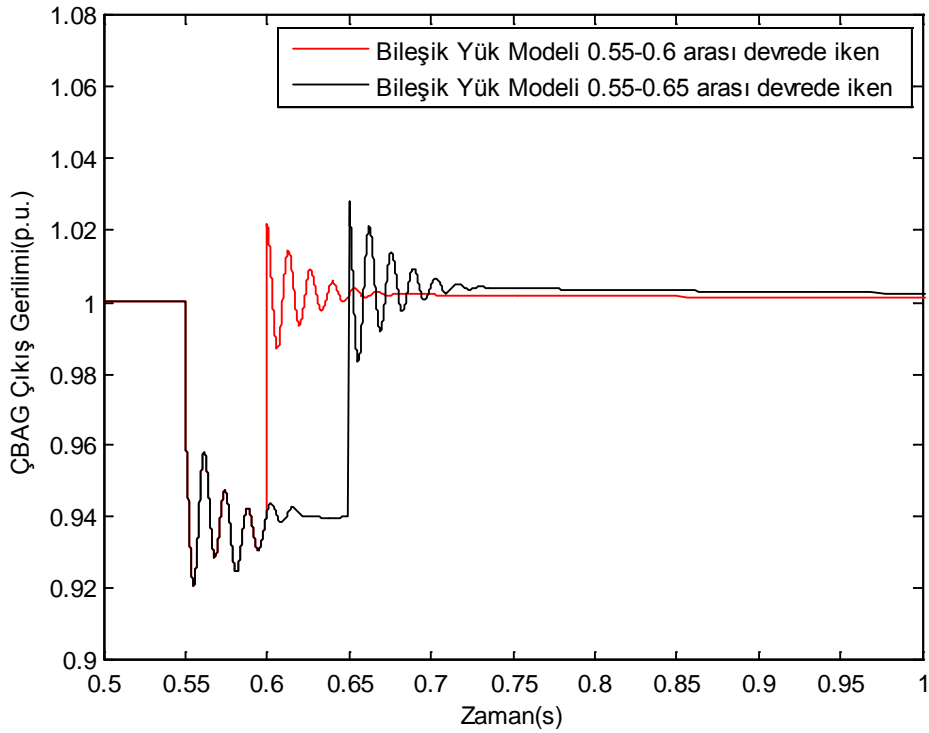
Yük Modeli	Parametre Değerleri	Asenkron Motor	Parametre Değerleri
Üstel	$n_p=1, n_q=1$	R_s	0.0092 Ω
ZIP	$p_1= 0.3$ $p_2= 0.3$ $p_3= 0.4$	L_s	0.0717 H
ZIP	$q_1= 0.3$ $q_2= 0.3$ $q_3= 0.4$	R_r	0.007 Ω
—	—	L_r	0.0717 H
—	—	L_m	4.14 H
—	—	H	0.5 s

5. Benzetim Çalışması Sonuçları

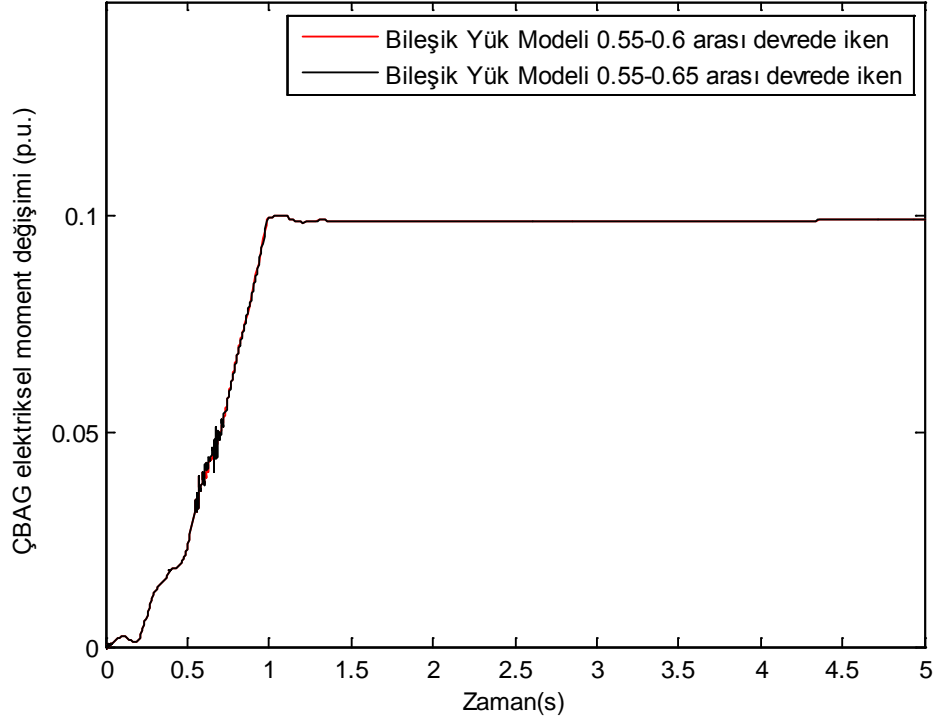
Yapılan benzetim çalışmasında 34.5 kV'luk baraya 0.9 MW-0.96 MVar gücünde üstel ve ZIP yük modeli kullanılırken 1 MW gücünde asenkron motor yük olarak bağlanmıştır. İlk analizde üstel-ZIP-asekron motorun devreye girip çıkma analizi 0.55 ile 0.6 saniye olarak incelenmiştir. İkinci analiz olarak üstel-ZIP-asekron motorun devreye girip çıkması 0.55 ile 0.6 saniye olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. 34.5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG açılma hızı, ÇBAG elektriksel moment, ÇBAG d-q eksen stator akım ve ÇBAG d-q eksen rotor akım değişimleri şekil 4 ile şekil 10 arasında gösterilmiştir.



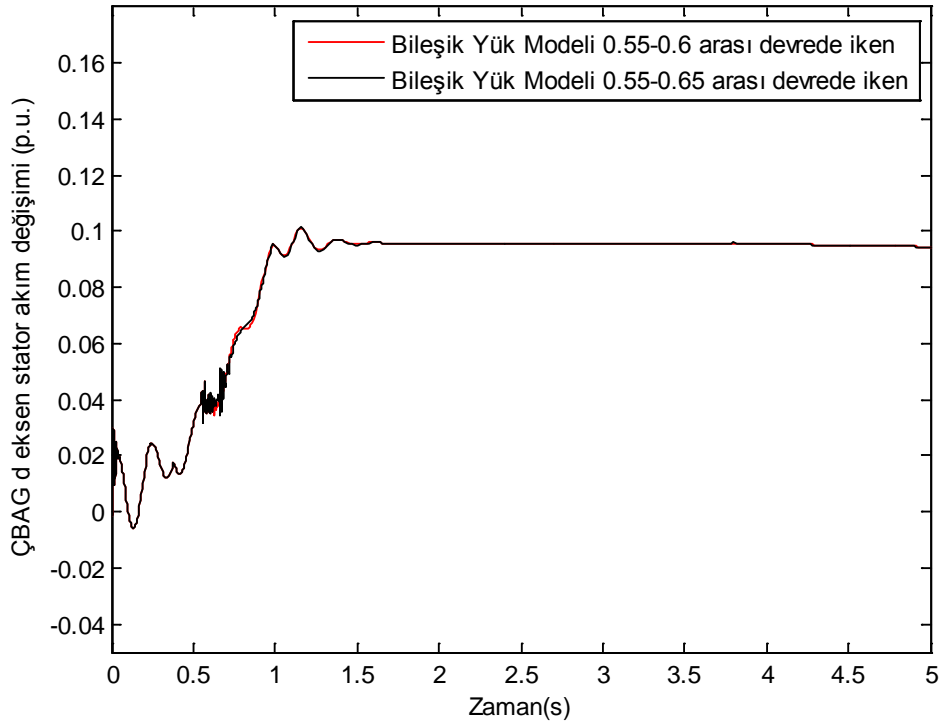
Şekil 4. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde 34.5 kV bara gerilim değişimi



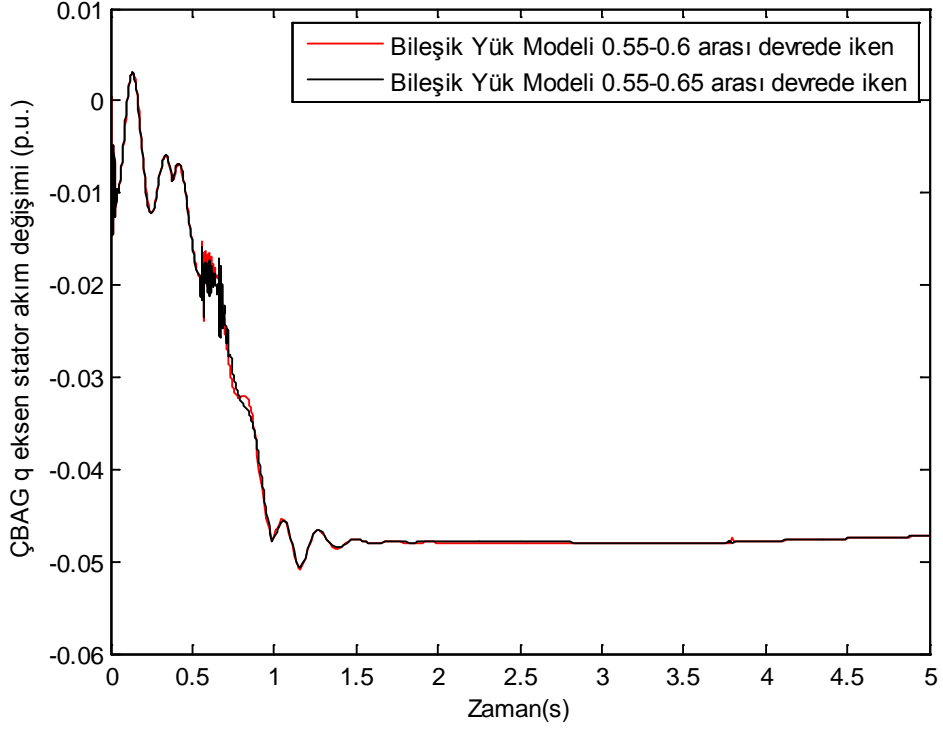
Şekil 5. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG çıkış gerilim değişimi



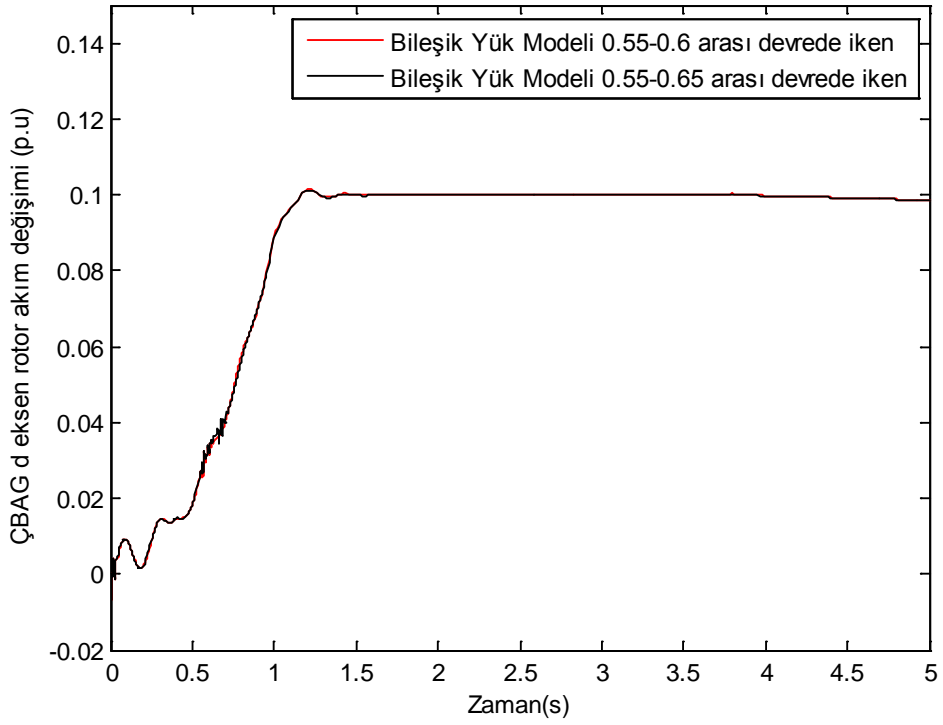
Şekil 6. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG elektriksel moment değişimi



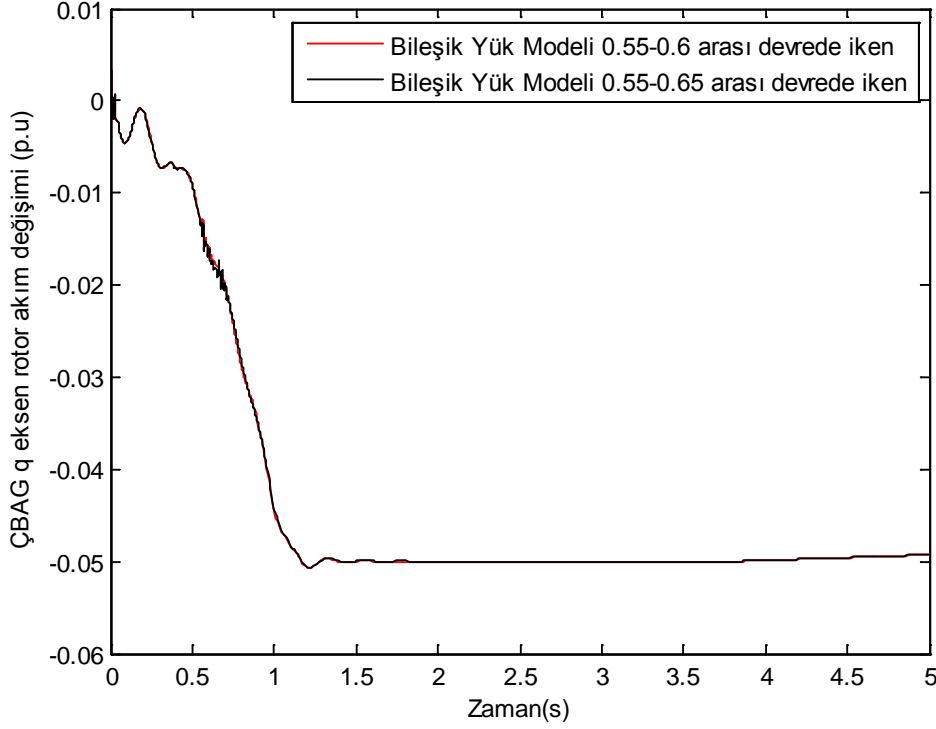
Şekil 7. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG d eksen stator akım değişimi



Şekil 8. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG q eksen stator akım değişimi



Şekil 9. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG d eksen rotor akım değişimi



Şekil 10. Farklı zamanlarda devreye giren bileşik yük modelinde ÇBAG q eksen rotor akım değişimi

0.55-0.6 saniyede üstel-ZIP-asenron motorun devreye girip çıkmasında elde edilen benzetim çalışması sonuçlarında 34.5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin yaklaşık olarak 0.67 saniye sonra kararlı hale geldiği görülmüştür. ÇBAG elektriksel momentinin yaklaşık olarak 1.3 saniyede kararlı hale geldiği görülmüştür. ÇBAG d-q eksen stator ve rotor akım değişimleri ise 0.55-0.6 saniyede üstel-ZIP-asenron motorun devreye girip çıkmasında 1.35 saniye sonra kararlı olmuştur. 34.5 kV bara geriliminin salınım aralığı 1.02 ile 0.91 p.u. arasında, ÇBAG çıkış geriliminin 1.027 ile 0.92 p.u. arasında, ÇBAG elektriksel momentinin 0.1 ile 0 p.u. arasında, ÇBAG d-q eksen stator akım değişimlerinin 0.12 ile 0 p.u arasında ve ÇBAG d-q eksen rotor akım değişimlerinin 0 ile -0.05 p.u. arasında değiştiği görülmüştür.

Üstel-ZIP-asenron motorun 0.1 saniye aralığında devreye girip çıkmasında elde edilen benzetim çalışması sonuçlarında 34.5 kV bara gerilimi ve ÇBAG çıkış geriliminin yaklaşık olarak 0.72 saniyede kararlı hale geldiği görülmüştür. ÇBAG elektriksel momentinin 1.3 saniyede kararlı hale geldiği görülürken, ÇBAG d-q eksen stator ve rotor akım değişimlerinde sistemin 1.35 saniyede kararlı hale geldiği görülmüştür. 34.5 kV bara geriliminin salınım aralığı 1.02 ile 0.905 p.u. arasında, ÇBAG çıkış geriliminin 1.025 ile 0.92 p.u. arasında, ÇBAG elektriksel momentinin 0.1 ile 0 p.u. arasında, ÇBAG d-q eksen stator akım değişimlerinin 0.12 ile 0 p.u arasında ve ÇBAG d-q eksen rotor akım değişimlerinin 0 ile -0.05 p.u. arasında değiştiği görülmüştür.

6. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, farklı yük modelleri ile oluşturulan bileşik yük modelinin farklı zamanlarda devreye girip çıkması esnasındaki etkisi şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar türbinde incelenmiştir. ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde stator ve rotor emf modelleri kullanılmıştır. Bileşik yük modeli olarak üstel-ZIP-asenron motor kullanılmıştır. 2 aşamadan oluşan analizler 0.05 saniye ve 0.1 saniye aralığındaki bileşik yük modellerinin devrede olması esnasındaki 34.5 kV bara gerilimi ve ÇBAG farklı parametre üzerinde irdelenmiştir. Özellikle bileşik yük modelinin 0.05 saniyede devrede olması esnasında sistem kararlı hale daha uzun sürede gelmiştir. Dahası salınım açısından sistem üzerinde daha fazla etkili olmuştur. 0.1 saniyede bileşik yük modelinin salınım yönünden daha iyi sonuçlar vermiştir. En uzun sürede kararlılığa ulaşan ve salınımların sönümlenmesi daha uzun sürede olan parametre bileşik yük modelinin devrede olması esnasında ÇBAG d-q eksen stator ve rotor akım değişimleri olurken, en kısa sürede kararlılığa ulaşan ve salınımların sönümlenmesi daha kısa sürede olan parametre bileşik yük modelinin devrede olması esnasında 34.5 kV bara gerilimi olmuştur. Yapılan bu çalışma, endüstride kullanılan daha farklı lineer olmayan yük modellerinin şebeke bağlantılı farklı generatör tabanlı rüzgar türbinlerinde oluşabilecek güç kalitesi problemlerinin analiz edilmesine öncü olacak ve gelecek çalışmalar için fayda sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Sun, T., Chen, Z., Blaabjerg, F. (2005). Transient Stability of DFIG Wind Turbines at an External Short Circuit Fault. *Wind Energy*, 8, 3, 345-360.
- García-Gracia, M., Comech, M. P., Sallan, J., Llombart, A. (2008). Modelling Wind Farms for Grid Disturbance Studies, *Renew Energy*, 33, 9, 2109–2121.
- Yang, L., Xu, Z., Ostergaard, J., Dong, Z. Y., Wong, K. P. (2012). Advanced control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through, *IEEE Transactions on Power Systems*, 27, 2, 713-722.
- Döşoğlu, M. K. (2016). Hybrid Low Voltage Ride Through Enhancement for Transient Stability Capability in Wind Farms, *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 78, 655-662.
- Gaillard, A., Poure, P., Saadate, S., Machmoum, M. (2009). Variable Speed DFIG Wind Energy System for Power Generation and Harmonic Current Mitigation, *Renewable Energy*, 34, 6, 1545-1553.
- Jing, J. I. N., Qian, A. I., Yan, Z. H. A. O. (2007). Reactive Compensation Principle and Simulation of FACTS Device in Wind Farm [J], *Electric Power Automation Equipment*, 8, 58-60.
- Liu, M., Pan, W., Quan, R., Liu, H. Li. T., Yang, G. (2018). A Short-Circuit Calculation Method for DFIG-Based Wind Farms, *IEEE Access*, 6, 52793-52800.
- Holdsworth, L., Charalambous, I., Ekanayake, J. B., Jenkins, N. (2004). Power System Fault Ride Through Capabilities of Induction Generator Based Wind Turbines, *Wind Engineering*, 28, 4, 399-409.
- Döşoğlu, M. K., Dursun, M. (2018). Investigation with ZIP load Model of Voltage Stability Analysis in Wind Turbine integrated Power System," 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1-5, Ankara, Türkiye.
- Döşoğlu, M. K., Arsoy, A. B. (2014). Modeling and Simulation of Static Loads for Wind Power Applications, *Neural Computing and Applications*, 25, 5, 997-1006.
- Wu, F., Zhang, X. P., Godfrey, K., Ju, P. (2007). Small Signal Stability Analysis and Optimal Control of a Wind Turbine With Doubly Fed İnduction Generator, *IET Generation Transmission and Distribution*, 1, 5, 751-760.
- Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., Jenkins, N. (2003). Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Double Fed Induction Generators (DFIG) Wind Turbines, *Electric Power Systems Research*, 67, 3, 207-215.
- Krause, P. C. (2002). *Analysis of Electric Machinery*, 2th ed. New York. McGraw-Hill.
- Slotweg, J. G., Polinder, H., Kling, W. L. (2001). Dynamic Modelling of A Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator, 2001 Power Engineering Society Summer Meeting, Canada.
- Döşoğlu, M. K., Arsoy, A. B. (2016). Enhancement of a Reduced Order Doubly Fed İnduction Generator Model for Wind Farm Transient Stability Analyses, *Turkish Journal of Electrical Engineering Computer Sciences*, 24, 4, 2124-2134.
- Döşoğlu, M. K. (2017). Enhancement of SDRU and RCC for Low Voltage Ride Through Capability in DFIG Based Wind Farm, *Electrical Engineering*, 99, 2, 673-683.
- Ma, J., Han, D., He, R. M., Dong, Z. Y., Hill, D. J. (2008). Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23, 76-83.
- Li, Y., Chiang, H. D, Choi, B. K., Chen, Y. T., Huang, D. H., Lauby, M. G. (2007). Representative Static Load Models for Transient Stability Analysis: Development and Examination, *IET Generation Transmission and Distribution*, 1, 422-431.