

# ÇİFT BESLEMELİ İNDÜKSİYON JENERATÖR TİPİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ŞEBEKEDKİ HATA DURUMUNDA ELEKTRİK SİSTEMLERİNİN MEKANİK SİSTEMLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mert Coşgun<sup>1</sup>, Müfit Altın<sup>2</sup>, Z. Haktan Karadeniz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İYTE, LEE Enerji Mühendisliği Programı, mcosgun@iyte.edu.tr

<sup>2</sup>Siemens Gamesa, muefit.altin@siemensgamesa.com,

<sup>3</sup> İYTE, MF, Enerji Sistemleri Müh. Böl., haktankaradeniz@iyte.edu.tr

## ÖZET

Rüzgâr türbini teknolojisinin ilk dönemlerinde, mekanik ve elektrik sistemlerin ayrı ayrı geliştirilme süreçlerine odaklanılmış ve sadece bu alanlarda araştırmalar yapılmıştır. Günümüzdeki megavat boyutlarına ulaşan modern rüzgâr türbin tasarımlarının ülkelerin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşması için daha uygun maliyetli ve güvenilir olması için çalışmalar sürmektedir. Bu doğrultuda, rüzgâr türbini araştırma ve geliştirme süreçleri artık hem mekanik hem de elektrik sistemlere ve bunların alt sistem etkileşimlerine de odaklanmaya başlamıştır. Şebeke bağlantılarının gereksinimleri, şebeke kodları, sadece güç sistemleri ve bileşenleri için değil, mekanik sistem ve bileşenleri için de sorumluluklar getirmektedir. Bu çalışmada, şebekede meydana gelen arızalar sırasında, elektrik kontrol sistemlerinin tepkisinin, kule ve kanatlardaki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Güç üretimi için Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü kullanılmış; AC/DC, DC/DC çevirici ve kontrol sistemlerini içeren güç sistemleri MATLAB/Simulink'te modellenmiştir. Şebekeye bağlı rüzgâr türbini modeli ile şebeke bağlantı hatlarında meydana gelen voltaj düşümüne neden olan hataların üstesinden gelebilme (Fault Ride Through) durumunu test etmek için Simulink'te simülasyonlar tasarlanmış; ilgili durumda kontrol sisteminin tepkisi ve elektromanyetik tork çıkışı, mekanik sistem üzerindeki etkileri gözlemlemek için mekanik sistemi analiz aracı Horizontal Axis Wind Turbine Simulation Code 2 (HAWC2) programına gönderilmiştir. HAWC2'de ana gövdelerin kuvvetlere ve limitlere karşı etkileşimi analiz edilerek; sonuçlar grafiksel olarak raporlanmıştır. Hata olmayan sistemin durumu ile hata geldiği anda elde edilen veriler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Hata anında elektrik güç sistemlerinin şebekeye bağlı kalmak için verdiği tepkilerin mekanik sistemler üzerinde etkisi olduğu gözlenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Günümüzün daha teknolojik, geliştirilmiş ve yüksek megavat büyüklüğünde rüzgâr türbinleri, daha karmaşık çevre koşullarında ve giderek artan zorlu güç sistemi gereksinimlerinde çalışmaktadır. Uygun maliyetli ve güvenilir bir rüzgâr türbini tasarlamak çok disiplinli bir görevdir. Bununla birlikte, aeroelastik ve mekanik sistemler; elektrik ve kontrol sistemler ile şebeke entegrasyonu gibi rüzgâr türbini tasarım ve araştırma alanları, yeni teknolojilerin geliştirilmesi için özel alanlardır. Sahadaki rüzgâr türbinlerinden elde edilen deneyim, bu amaca ulaşmak için farklı tasarım alanlarındaki uzmanlıklar arasında köprü kurma ihtiyacı olduğunu göstermektedir [1].

Modern rüzgâr türbinlerinin tasarım hedefi, dağıtım şebekelerine bağlı orta büyüklükteki rüzgâr türbinlerinden, güç sistemlerinin iletim seviyesine bağlı büyük açık deniz rüzgâr enerji santrallerine dönüşmüştür [1]. Modern mühendislik tasarımı, tasarım döngüsünün bir parçası olarak dinamik analiz için kullanılan hesaplamalı kodlara dayanır, ancak rüzgâr türbini tasarım uygulamasında bu tür kodlar belirli özel disiplinlere yöneliktir. Aero-elastisite, güç sistemleri,

güç elektroniği, kontrol sistemleri gibi disiplinlerin her biri, ayrı ayrı yazılımların desteği ile tasarım döngüsüne katılmaktadır [2].

Rüzgâr enerjisine son yıllarda artan ilgi, güç sistemi düzenleyicilerinin şebeke bağlantı gereksinimlerini gözden geçirmesi ve yenilerinin eklenmesi ile sonuçlanmıştır. Temel olarak, rüzgâr enerjisi için bu şebeke kodları, geleneksel enerji santrallerininkine benzer bir operasyonel davranış gerektirir. Özellikle rüzgâr türbinlerinin gerilim düşüşü sırasında ve sonrasında şebekeye bağlı kalması gerekliliği, rüzgâr türbinlerinin tasarımındaki önemli bir zorluktur. Elektrik açısından bakıldığında, bu yeni şebeke kodları, şebeke gereksinimlerini karşılamak üzere uyarlanmış gelişmiş rüzgâr türbini kontrol sistemlerini geliştirilmesine yönelik önemli araştırma faaliyetlerini başlatmıştır. Bu sistemlerin, rüzgâr türbinleri üzerindeki yapısal yükleri de etkilediği düşünülmektedir. [3]

Modern rüzgâr türbinlerinin ana eğilimi değişken hızda çalışabilmek ve çevirici arabirimi aracılığıyla bir şebekeye bağlanmaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbini konsepti, bugün piyasada önemli bir hakimiyete sahiptir. Bunlardan biri, çift beslemeli indüksiyon jeneratörü kullanılan değişken hızlı rüzgâr türbini sistemidir [2]. Ancak bu jeneratörler, çalışmaları sırasında akım sensörü arızaları, voltaj düşmeleri, frekans değişimi ve hat kopması, topraklanması gibi farklı türdeki arızalardan etkilenebilir. Bu elektrik arızaları tasarımlarda ciddi endişe kaynağı olmaya devam etmektedir. Gerilim düşüşleri, stator akımındaki artışa sebep olup, akabinde DC baradaki gerilimi artırması ile rüzgâr türbinin elektrik sistemlerine zarar verebilen ciddi arızalardandır. Bu tür elektrik arızaları hızla yayılıp rüzgâr türbini, çevirici /evirici ve jeneratör gibi diğer sistem bileşenlerini etkileyerek elektrik enerjisi üretim kalitesini bozmaktadır [4].

Rüzgâr türbinlerinin yapısal yükleri ile türbin bileşenlerinin performansı ve güvenilirliği üzerinde güç sistemlerinin önemli etkileri vardır. Literatürde, dengeli gerilim arızalarının rüzgâr türbini yükleri üzerindeki etkisini araştıran yayınlar bulunmaktadır. Örneğin, bazı çalışmalar, dengeli besleme voltajı arızalarından dolayı rüzgâr türbinlerinin yapısal yüklerinin zaman tepkisini inceler. Bu tür incelemeler, şaft burulması, kule yanal kuvvet ve momentleri ile kanat üzerindeki kuvvet ve momentlerin bir gerilim arızasından niteliksel olarak nasıl etkilenebileceğini göstermektedir [3].

Bu makalede, çift beslemeli indüksiyon jeneratöre sahip rüzgâr türbini modeli ile 3-faz kısa devresi sırasında elektriksel sistemlerin tepkilerinin mekanik sisteme olan etkilerinin izlenmesi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalarda dinamik olarak bağlanan iki simülasyonun aksine önce Simulink üzerinde Elektromanyetik tork verisi elde edilerek HAWC2 üzerine dll ile girdi olması denenmiştir. Türbin, kule ve hub ana gövdeleri üzerindeki etkilerin gözlenmesi amaçlanmıştır. İkinci bölümde, çift beslemeli indüksiyon jeneratöre sahip rüzgâr türbinine ait genel bilgiler verilmiş, şematik gösterimi sunulmuştur. Üçüncü bölümde çift beslemeli indüksiyon jeneratörlü rüzgâr türbini tasarım aşamaları açıklanmış ve tasarımda kullanılan parametreler tablo halinde sunulmuştur. Dördüncü bölümde aktarma organları ile ilgili genel bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde dinamik analiz ortamları ile ilgili açıklama yapılmış; altıncı bölümde bu ortamlarda koşulan simülasyonlar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Son bölümde elde edilen sonuç ve kazanımlar özetlenmiştir.

## 2. ÇİFT BESLEMELİ ENDÜKSİYON JENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİNİ GENEL ÖZELLİKLERİ

DFIG (Double Fed Induction Generator), Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü, rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan bir jeneratör türüdür. DFIG hem rotor hem de stator akımlarını kontrol etme kabiliyeti ile karakterize edilir, bu da onu değişken hızlı çalışmaya uygun hale getirir [5]. DFIG rüzgâr türbinlerinin bazı temel özellikleri şunlardır:

1. Değişken hızlı çalışma: DFIG rüzgâr türbinleri, sabit hızlı türbinlere kıyasla rüzgârdan daha fazla enerji yakalamalarına izin verecek şekilde değişken hızlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Rotor hızı, şebeke frekansından bağımsız olarak kontrol edilerek farklı rüzgâr hızlarında optimum güç üretimi sağlanır.

2. Güç dönüştürücü sistemi: DFIG sistemi, rotor devresinde bulunan bir güç çeviricisi içerir. Rotor tarafı çevirici (RSC) olarak bilinen bu dönüştürücü, rotor ve şebeke arasında çift yönlü güç akışına izin verir. Rotor akımlarını kontrol ederek türbinin farklı hızlarda çalışmasını ve jeneratörün reaktif güç çıkışını ayarlamasını sağlar.

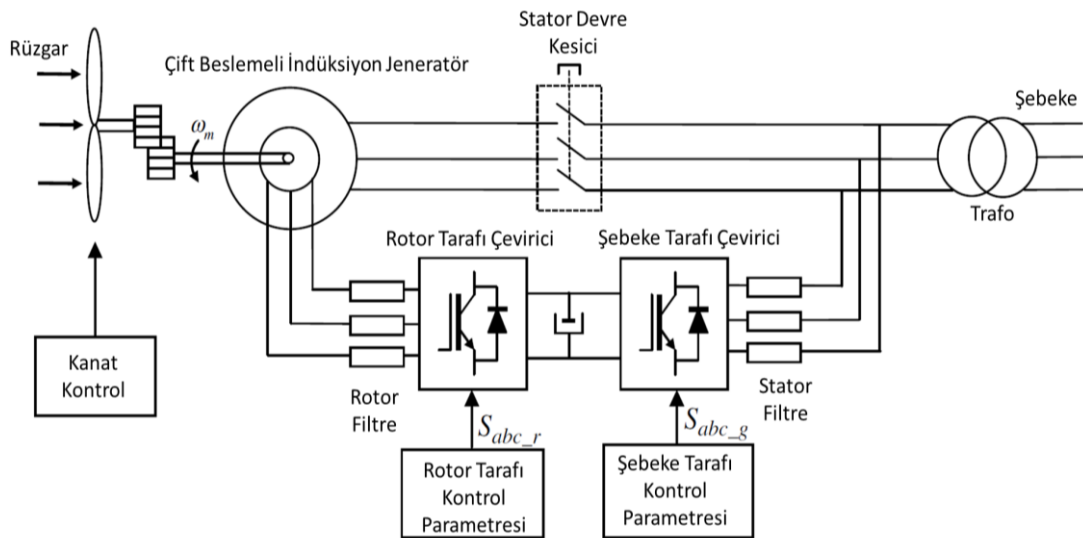
3. Kayma halkaları ve fırçalar: DFIG rotoru, rotor ile stator arasında elektrik gücü ve kontrol sinyallerinin transferini kolaylaştıran kayma halkaları ve fırçalarla donatılmıştır. Bu bileşenler, RSC'nin rotor sargılarına bağlanmasını sağlar.

4. Şebeke bağlantısı: DFIG statoru doğrudan şebekeye bağlıdır ve jeneratörün elektrik şebekesine güç beslemesine olanak tanır. Stator, tipik olarak şebeke ile senkronize edilmiş sabit bir frekans ve voltajda çalışır.

5. Kontrol sistemi: DFIG rüzgâr türbinleri, rotor ve stator akımlarını düzenlemek için gelişmiş kontrol sistemleri gerektirir. Kontrol sistemi, jeneratörün performansını optimize etmek ve şebeke uyumluluğunu sağlamak için güç dönüştürücünün çalışmasını ayarlar.

6. Arıza sırasında şebekeye bağlı kalma kapasitesi: DFIG rüzgâr türbinleri, arıza sırasında şebekeye bağlı kalabilme (FRT) özelliği ile tasarlanmıştır ve bu, şebeke arızaları veya kesintileri sırasında şebekeye bağlı kalmalarına izin verir. Kontrol sistemi, kararlılığı korumak ve şebeke voltajını desteklemek için rotor akımlarını ayarlayarak şebeke arızalarını tespit eder ve bunlara yanıt verir.

DFIG rüzgâr türbinleri, gelişmiş enerji yakalama, gelişmiş şebeke uyumluluğu ve reaktif güç desteği sağlama yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Ancak sabit hızlı türbinlere göre daha karmaşık ve maliyetlidirler. Bununla birlikte, DFIG teknolojisi, değişen rüzgâr koşullarında yüksek enerji dönüştürme verimliliği elde etme kabiliyeti nedeniyle rüzgâr enerjisi endüstrisinde geniş çapta benimsenmiştir. Şekil 1'de DFIG rüzgâr türbini şematik gösterimi verilmiştir. Rotor ve stator bağlantıları ile çevirici bağlantıları ve şebekeye bağlantı örneği verilmiştir [5].



Şekil 1. DFIG Rüzgâr Türbini şematik gösterimi

### 3. ÇİFT BESLEMELİ ENDÜKSİYON JENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

DFIM iki adet üç fazlı sarım setinden oluşur: biri stator ve diğeri rotorda bulunur. Bu iki üç fazlı sargının bağımsız olarak beslenmesi gerekir ve ayrıca her iki sarıma da çift yönlü enerji sağlanabilir. Rotor üç fazlı sarımları, yıldız veya üçgen konfigürasyonda bağlanabilir ve fırçalar ve kayar halka düzeneği sayesinde beslenirler.

Bu nedenle stator, uzamsal olarak  $120^\circ$  kaydırılmış üç sarımdan ve  $p$  sayıda çift kutuptan oluşur. Bu üç stator sargısı  $f_s$  frekanslı dengeli bir üç fazlı voltajla beslendiğinde, stator akısı indüklenir. Bu stator akısı sabit hızda döner. Yani, senkron hız ( $n_s$ ) aşağıdaki ifade ile verilir:

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (1)$$

Prensip olarak, bu dönel stator akısı, Faraday yasasına göre rotor sargılarında bir elektromotor kuvveti indükler. Rotor sargılarında indüklenen bu voltaj ve fırçalar yoluyla dışarıdan enjekte edilebilen voltaj nedeniyle, rotor sargılarında bir akım indüklenir. Bu akım, Laplace yasasına göre makinenin rotorunda indüklenmiş bir kuvvet oluşturur. İndüklenen rotor gerilimlerinin ve akımlarının açısız frekansı aşağıdaki gibi bir ilişkidir:

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad (2)$$

$\omega_r$  : Rotor voltaj ve akımın açısız frekansı (rad/s)

$\omega_s$  : Stator voltaj ve akımın açısız frekansı (rad/s)

$\omega_m$  : Rotor açısız frekansı (rad/s)

Statorun hızı ile rotor açısız frekansı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için yaygın olarak kullanılan terim, slip, ( $s$ ):

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (3)$$

Şeklinde ifade edilir. Her iki eşitliği (2) ve (3), bir araya getirdiğimiz de slip,  $\omega_r$  ve  $\omega_s$  arasındaki ilişki şu şekilde elde edilir:

$$\omega_r = s\omega_s \quad (4)$$

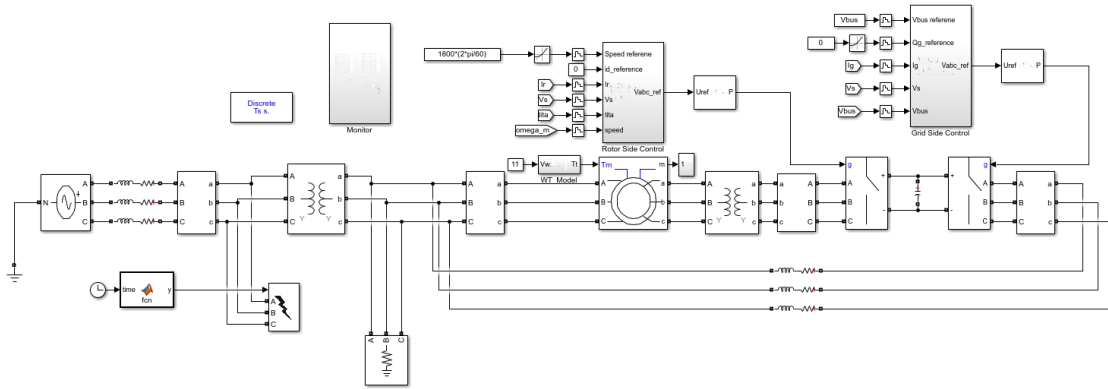
Slip kavramı temel DFIG parametrelerini hesaplamak için eşitliklerin rotor ya da stator tarafına göre çözülmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışma da kullanılan parametreler 2MW DFIG Rüzgâr Türbini için referans olarak Tablo 1'deki gibi kullanılmıştır [5].

Tablo 1. DFIG 2MW Rüzgâr Türbini Temel Parametreler

Temel Parametre	Değer	Açıklama
Senkron Hız	1500 rev/min	50Hz frekanstaki senkron hız
Nominal Güç	2MW	Nominal 3 faz stator aktif güç
Nominal Stator Voltajı	690 V <sub>rms</sub>	Stator hattan hatta voltaj değeri
Nominal Stator Akımı	1760 A <sub>rms</sub>	Stator faz akımı
Nominal Tork	12.7 kNm	Jeneratör nominal tork
Stator Bağlanma Tipi	Yıldız	
p	2	Kutup çifti
Nominal Rotor Voltajı	2070 V <sub>rms</sub>	Rotor hattan hatta voltaj değeri
Rotor Bağlanma Tipi	Yıldız	
u	0.34	
Rs	2.6 mOhm	Stator direnci
Lss	87 uH	Stator kaçak akı indüktans değeri
Lm	2.5 mH	Manyetikleşme indüktansı

$R_{Or}'$	26.1 mOhm	Rotor Direnci
$L_{Osr}'$	783 uH	Rotor kaçak akı indüktans değeri
$R_r$	2.9 mOhm	Stator Tarafına Aktarılmış Rotor Direnci
$L_{sr}$	87 uH	Stator Tarafına Aktarılmış Rotor kaçak akı indüktans değeri
$L_s$	2.587 mH	Stator İndüktans: $L_s = L_m + L_{ss}$
$L_r$	2.587 mH	Rotor İndüktans: $L_r = L_m + L_{sr}$

MATLAB/Simulink üzerinde Tablo 1'de verilen parametreler ve DFIM ile ilgili eşitlikler kullanılarak DFIG Rüzgâr Türbini tasarımı Şekil 2'deki gibi yapılmıştır.



Şekil 2. DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Modeli

DFIG Simulink modeli, Şebekeye yükseltici bir trafo ile bağlanmış; Rotor ve Stator kontrolleri içeren bir 2MW rüzgâr türbini iç yapısını simüle etmektedir. Simulink platformunda normal çalışma, şebeke hatası sırasında çalışma gibi çeşitli senaryoları koşturmayı imkân vermektedir.

Stator kontrolcü modeli Şekil 3'te; Rotor kontrolcü modeli Şekil 4'te gösterilmiştir. Her iki kontrolcü tasarımı sırasında  $\alpha$ - $\beta$  (alpha-beta) dönüşümü kullanılarak 3-faz eşitliklerden 2 parametrelilik eşitliklere geçiş yapılmıştır.  $\alpha$ - $\beta$  dönüşümü için durum uzayı denklemleri şu şekilde takip edilmiştir:

Stator ve Rotor akı denklemleri tekrar matris formunda yazıldığı zaman (5) numaralı denklem oluşmaktadır. Bu denklemler  $\alpha$ - $\beta$  parametreleri şeklinde yeniden yazarak (6) numaralı matris formu oluşacaktır. Yukarıdaki tabloda verilen jeneratör parametreleri ile akı ve voltaj vektörleri ile durum uzay matrisleri hesaplanır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{\psi}_s^s \\ \vec{\psi}_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_r}{\sigma L_r} + j\omega_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{\psi}_s^s \\ \vec{\psi}_r^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{v}_s^s \\ \vec{v}_r^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\vec{\psi}_s$ : Stator akı vektörü,  $\vec{\psi}_r$ : Rotor akı vektörü,  $\vec{v}_s$ : Stator voltaj vektörü,  $\vec{v}_r$ : Rotor voltaj vektörü.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} \\ \psi_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{-R_r}{\sigma L_r} & -\omega_m \\ 0 & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \omega_m & \frac{-R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} \\ \psi_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{\alpha r} \\ v_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\Psi_{\alpha s}$ : Stator akı vektörü  $\alpha$  bileşeni,  $\Psi_{\beta s}$  Stator akı vektörü  $\beta$  bileşeni;  $\Psi_{\alpha r}$ : Rotor akı vektörü  $\alpha$  bileşeni,  $\Psi_{\beta r}$  Rotor akı vektörü  $\beta$  bileşeni

$v_{\alpha s}$ : Stator voltaj vektörü  $\alpha$  bileşeni,  $v_{\beta s}$ : Stator voltaj vektörü  $\beta$  bileşeni;  $v_{\alpha r}$ : Rotor voltaj vektörü  $\alpha$  bileşeni,  $v_{\beta r}$ : Voltaj vektörü  $\beta$  bileşeni

Eşitliklerde (5) numaralı eşitlikteki Flux değişkenleri yerine Akım değişkenleri kullanılarak yeniden yazıldığı zaman (7) numaralı Stator ve Rotor akım matris formu oluşmaktadır. (7) numaralı eşitlik; (6) numaralı eşitlikteki benzer dönüşüm ile  $\alpha$ - $\beta$  parametrelerini içeren (8) numaralı akım matris formuna dönüşecektir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s^s \\ \vec{i}_r^s \end{bmatrix} = \left( \frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} -R_s L_r - j\omega_m L_m^2 & R_r L_m - j\omega_m L_m L_r \\ R_s L_m + j\omega_m L_m L_s & -R_r L_s + j\omega_m L_r L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{i}_s^s \\ \vec{i}_r^s \end{bmatrix} + \left( \frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} L_r & -L_m \\ -L_m & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{v}_s^s \\ \vec{v}_r^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\vec{i}_s$ : Stator akım vektörü,  $\vec{i}_r$ : Rotor akım vektörü,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} = \left( \frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 & R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ -\omega_m L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_m L_m L_r & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_m L_r L_s \\ \omega_m L_s L_m & R_s L_m & \omega_m L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} + \left( \frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{\alpha r} \\ v_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$i_{\alpha s}$ : Stator akım  $\alpha$  bileşeni,  $i_{\beta s}$ : Stator akım  $\beta$  bileşeni,  $i_{\alpha r}$ : Rotor akım  $\alpha$  bileşeni,  $i_{\beta r}$ : Rotor akım  $\beta$  bileşeni.

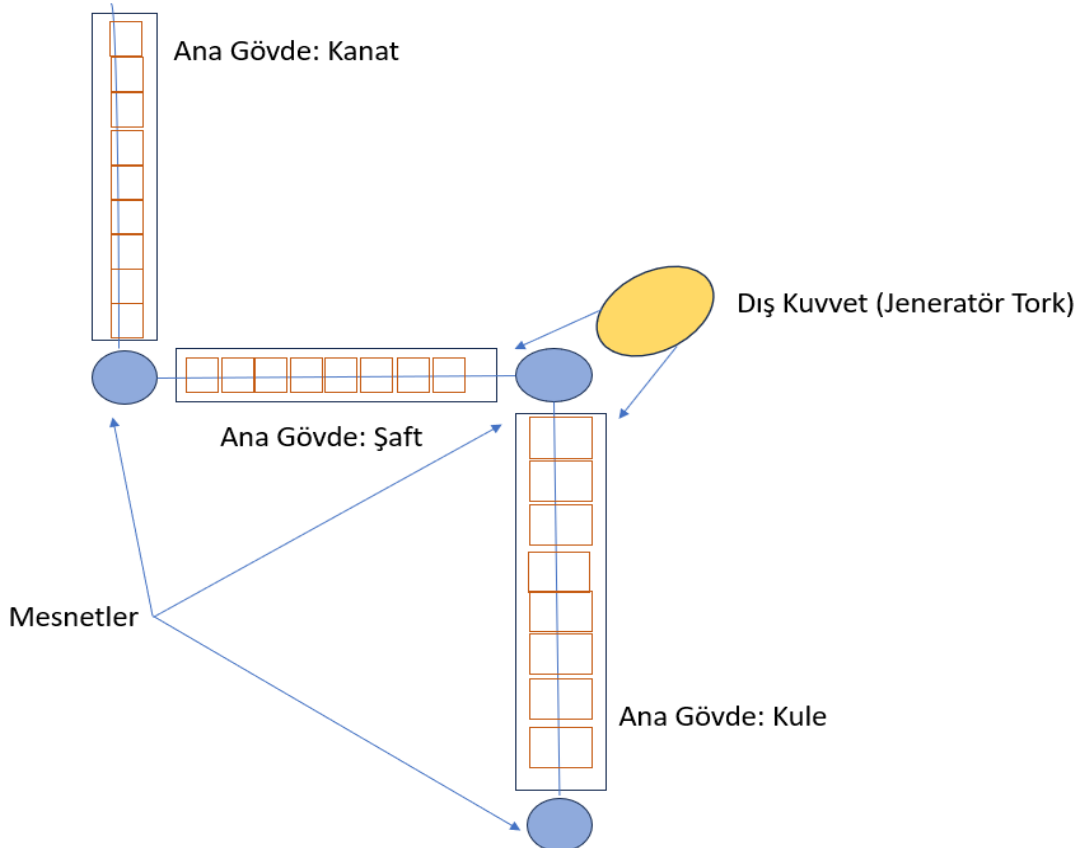
#### 4. AKTARMA ORGANI TASARIMI

Büyük ve etkili değişimlere karşı mekanik sistemlerdeki tepkinin analiz edilmesi için aktarma organı sistemlerinin en az iki kütleli bir modelle yaklaşık olarak belirlenmesi gerekir. İki kütleli bir mekanik model kullanımı, şebeke arızaları sırasında jeneratörden ve güç çeviriciden daha doğru bir yanıt almak ve güç sistemi üzerindeki etkinin daha doğru bir tahminine sahip olmak için yeterlidir [2].

Bu model, düşük hızlı şaft ve jeneratör rotor ataletinden oluşur. Düşük hızlı şaft, bir ucunda kule tepesine göre dönmek üzere sınırlandırılmış veya topaklanmış bir kütle ya da karşılık gelen ataletle sahip bir eleman olarak jeneratör rotor ataletine bağlı dönen bir kiriştir. Jeneratörün ataleti, dişli kutusu hız oranının karesi ile ölçeklendirilerek düşük hız tarafına aktarılmıştır. Milin diğer ucu, aerodinamik rotora rijit bir şekilde bağlanmıştır. Aerodinamik rotordan şaft yoluyla kuleye yük aktarımı, jeneratör manyetik alanının jeneratör rotor kütlelerine uyguladığı torka eşittir. Yataklar, radyal ve aksel yönlerde rijit kabul edilir [1]. HAWC2 ortamında modellenmiş aktarma organı Şekil 3'te görülebilir. Kanat, şaft ile kule ana gövdesine bağlanmış, dış kuvvetler ve mesnetler gösterilmiştir.

Aktarma organı, her dişlinin şaftın eksenine eş aksel olarak yalnızca bir dönme serbestlik derecesine sahip olduğu tek bir paralel dişli kutusudur. Dişliler arasındaki temas kuvvetlerinin, temas hattı boyunca deformasyonla doğrusal orantılı olduğu varsayılır ve tork ve açısal dönüşler cinsinden yazılır. Bu basitleştirmeler, bir katılık sabiti ile birbirine bağlanan iki kütleli bir modelini verir [1].

NREL (National Renewable Energy Laboratory) rüzgâr türbin modeli, aktarma organı tasarımı için temel olarak alınmıştır. HAWC2 modelleme programı ile türbin mekanik sistem tasarımı NREL türbin modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. NREL türbin parametreleri [6]'daki gibi kullanılmıştır.



### Şekil 3. DFIG Rüzgâr Türbini aktarma organı şematik gösterimi

## 5. DİNAMİK ANALİZ ORTAMI

HAWC2 (Hidrodinamik Aktüatör Disk tabanlı Rüzgâr türbini simülasyon Kodu), rüzgâr türbinlerinin simülasyonu ve analizi için kullanılan bir yazılım aracıdır [7]. Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) tarafından geliştirilmiştir ve rüzgâr enerjisi endüstrisinde rüzgâr türbini sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. HAWC2, rüzgâr türbinlerinin davranışını ve performansını tahmin etmek için mühendislik modellerini kullanan sayısal bir simülasyon aracıdır. Rüzgâr türbini rotorunu, gelen rüzgâr akışından enerji çeken bir disk olarak temsil eden aktüatör disk tabanlı bir yaklaşım kullanır. Yazılım, rüzgâr türbininin davranışını simüle etmek için rüzgâr koşulları, türbin geometrisi, aerodinamik özellikler, kontrol sistemleri ve yapısal dinamikler gibi çeşitli faktörleri dikkate alır [7].

Yazılım, kullanıcıların değişen rüzgâr hızları ve türbülans gibi farklı çalışma koşulları altında rüzgâr türbinlerinin dinamik tepkisini incelemelerine olanak tanır. Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansı, yapısal yükleri, güç üretimi ve diğer önemli parametreleri hakkında bilgi sağlar. Bu bilgi, rüzgâr türbini tasarımı, optimizasyonu ve performans değerlendirmesi için değerlidir [7].

Bu çalışmada MATLAB/Simulink ile HAWC2 bağımsız uygulamalar olarak tutulup birbirleri arasında eş zamanlı olmayan veri alışverişi olacak şekilde kullanılmıştır [1].

## 6. TEST SİMÜLASYONLARI

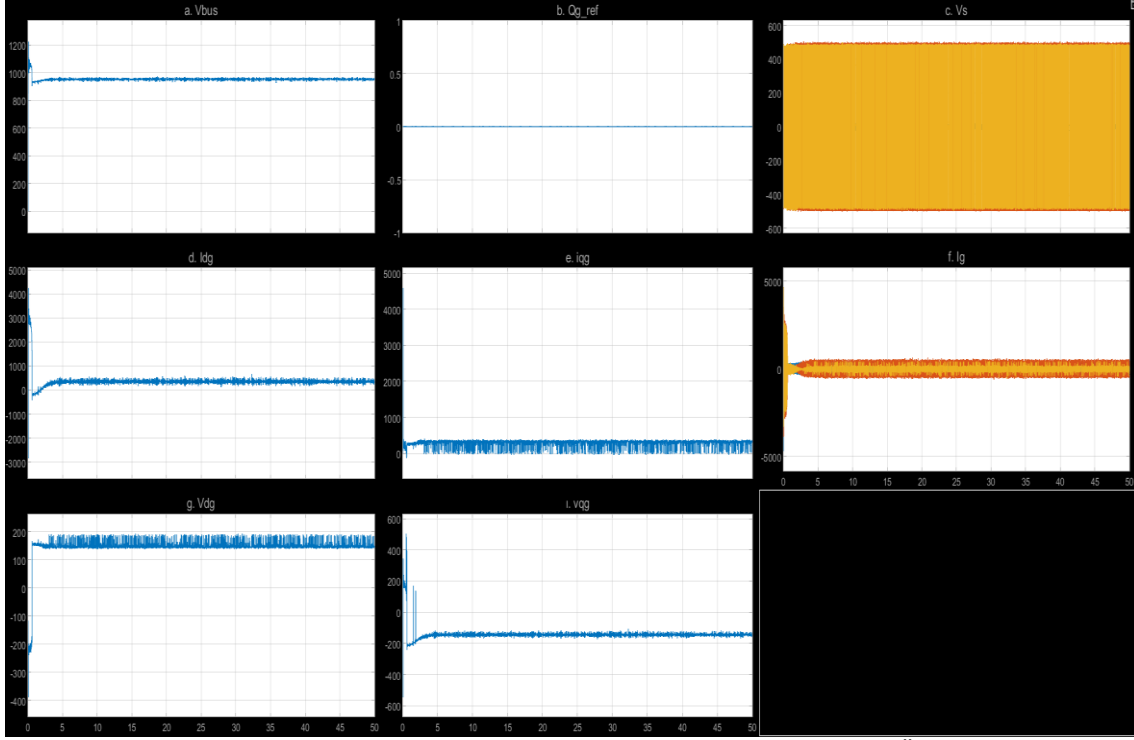
MATLAB/Simulink ortamında DFIG normal operasyon ve şebeke hattında meydana gelen 3 fazın toprak ile kısa devresi nedenli voltaj düşümü senaryoları koşulmuştur. Her bir durum için elektromanyetik torkun zamana dayalı verileri çıktı olarak alınmıştır. HWAC2 yazılımına elektromanyetik tork verileri dışardan ek veri olarak .dll dosyası halinde gönderilerek mevcut NREL türbini üzerindeki mekanik sistemlerin değişimleri gözlenmiştir. Simulink üzerinde koşulan senaryoların ilkinde şebeke bağlantısında hata olmadığı durumlarda DFIG Rüzgâr Türbinde Şebeke ve Rotor tarafından alınan ölçümler sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’ de gösterilmiştir. Aynı senaryo için Aktif Güç ve Reaktif Güç ile Elektromanyetik Tork çıktısı Şekil 6’te sunulmuştur. Şebeke tarafı bara voltajı 950 V civarı sabit kalmış; stator akım ve voltaj bileşenleri grafiksel olarak sunulmuştur. Stator 3 faz voltaj ve akım değerleri de sunulmuş her iki değerinde 3 fazın dengede olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızının 8 m/sn olduğu testlerde, rotor açılma hızı Şekil 5-a da gözlenmiştir.

Şebeke bağlantısında 3 faz ve toprak kısa devre hatasını simüle edebilmek için Şekil 2’de gösterilen model üzerindeki hata bloğu yardımı ile simülasyon 30. saniyesinde 3 faz toprak hatası gönderilmiş, 10 saniye boyunca hata uygulanmış ve 10. Saniyenin sonunda 40. saniyede hata kaldırılmıştır. Şekil 7 ve Şekil 8’de Rotor ve Stator tarafından alınan ölçümler ve hataya karşı olan tepkiler gözlenmiştir. Şekil 9’de hata anında Aktif Güç ve Reaktif Güç ile Elektromanyetik Tork çıktıları gözlenmiştir. Bara voltajı hata ilk anında %50 yakın oranında azalmış; daha sonra stator akımlarının hıza bağlı artışı nedeni ile de nominal değerinin üstüne çıktığı görülmüştür 3 faz Stator Akım ve Voltaj da düşüşler gözlenmiştir. Şebeke tarafındaki akım ve voltaj bileşenleri yüksek değişim ile salınım yaptığı gözlenmiştir. Rotor tarafında şebekeye bağlı kalmak için rotor açılma hızında hata süresince artış olmuş; elektromanyetik torkun arttığı gözlenmiştir. Akım ve voltaj bileşenlerinde hata süresince yüksek salınım olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bulgular [5] ile karşılaştırılmış paralel çıktılar olduğu görülmüş; modelin doğru çalıştığı ortaya konulmuştur.

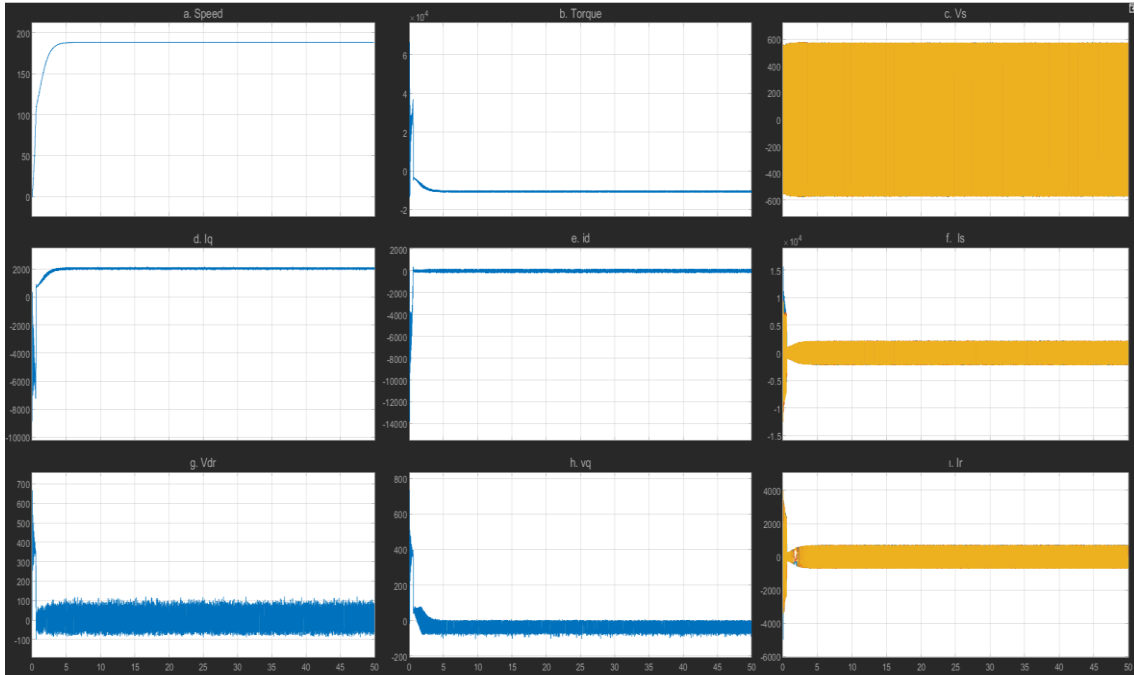
Şekil 7,8 ve 9 üzerinden, normal duruma göre olan değişiklikler gözlenmiş; beklentiye uygun olarak arıza anındaki tepkilerin varlığı tespit edilmiştir. Elektromanyetik tork verileri; arızanın ilk tepkisi olarak düşmüş, şebekeye bağlı kalma doğrultusunda artış göstererek salınım göstermiştir. Hatanın ortadan kalkması anında Elektromanyetik tork nominal değerden yüksek değerlere çıkmış, 3-4 saniye süresince salınıma devam etmiştir. Her iki durum için Elektromanyetik tork



verisi zaman bağılı olarak kaydedilerek p.u (per unit)'e çevrilmiştir. Bu veriler daha sonra, Fortran üzerinde Subroutine oluşturularak dizi içerisine çağrılmış ve .dll dosyası olarak kaydedilmiştir. HAWC2'nin. htc simülasyon yazılımı ile .dll dosyası çağrılarak, elektromanyetik tork değerinin NREL türbini üzerine etkisi için testlerin koşulması gerçekleştirilmiştir.

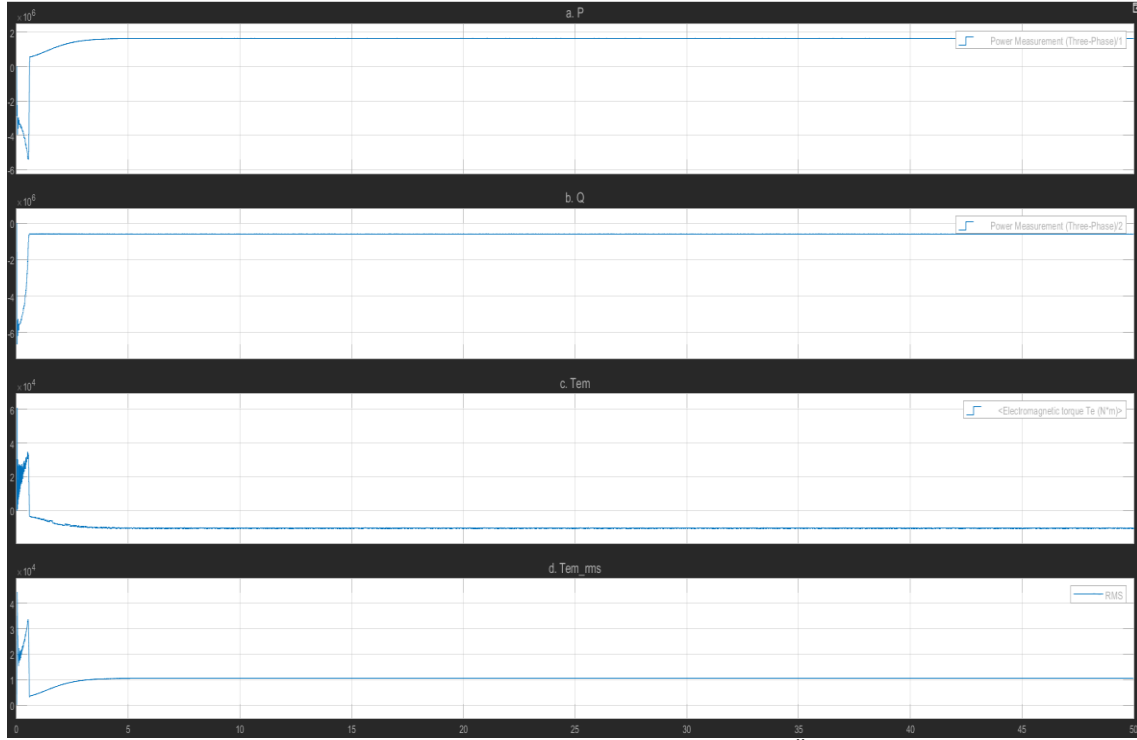


**Şekil 4.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Normal Operasyon Şebeke Tarafı Ölçümleri. a. Vbus: Bus Voltajı Grid b. Reaktif Güç c. Stator Voltajı d. Grid Akımı “d” koordinatına göre e. Grid Akımı “q” koordinatına göre f. Grid Akımı g. Grid Voltajı “d” koordinatına göre, h. Grid Voltajı “q” koordinatına göre

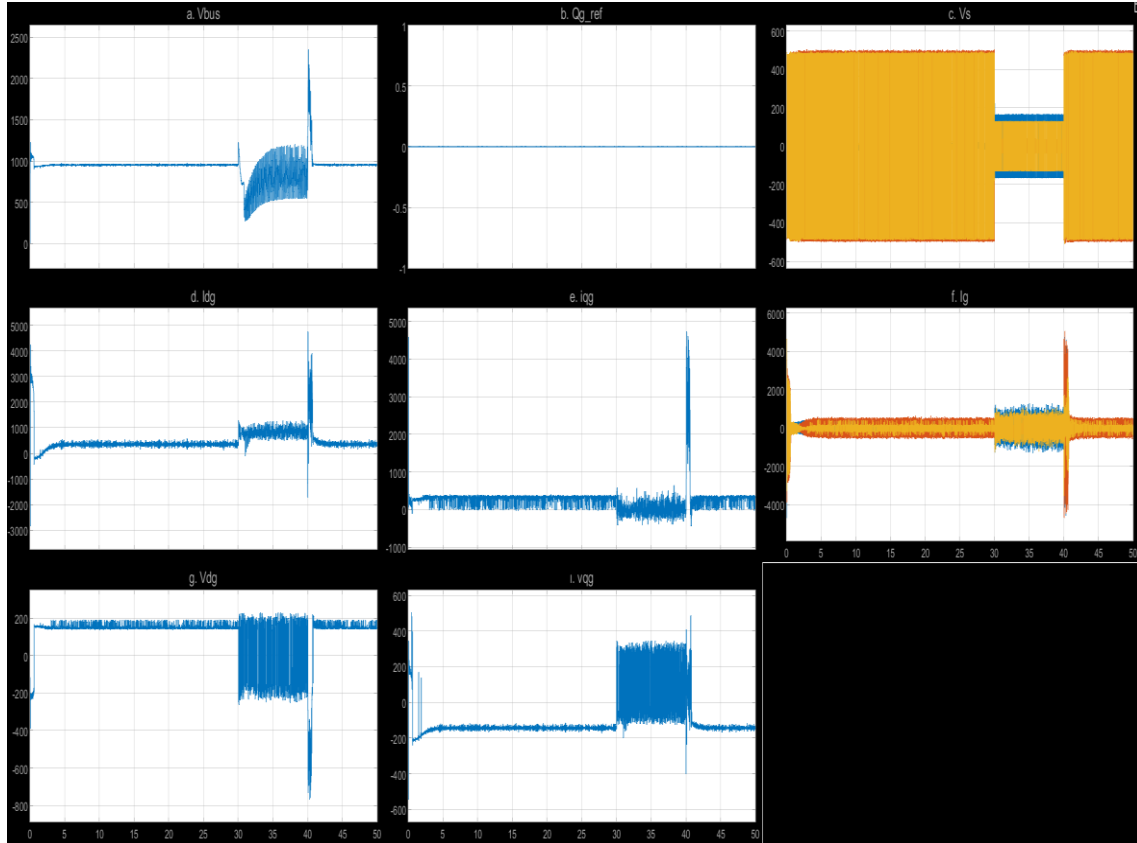


**Şekil 5.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Normal Operasyon Rotor Tarafı Ölçümleri. a. Nominal Hız ve Referansı b. Elektromanyetik Tork c. Stator Voltajı d. Rotor Akımı “q” koordinatına

göre e. Rotor Akımı “d” koordinatına göre f. Stator Akımı g. Grid Voltajı “d” koordinatına göre, h. Grid Voltajı “q” koordinatına göre ı. Rotor Akımı

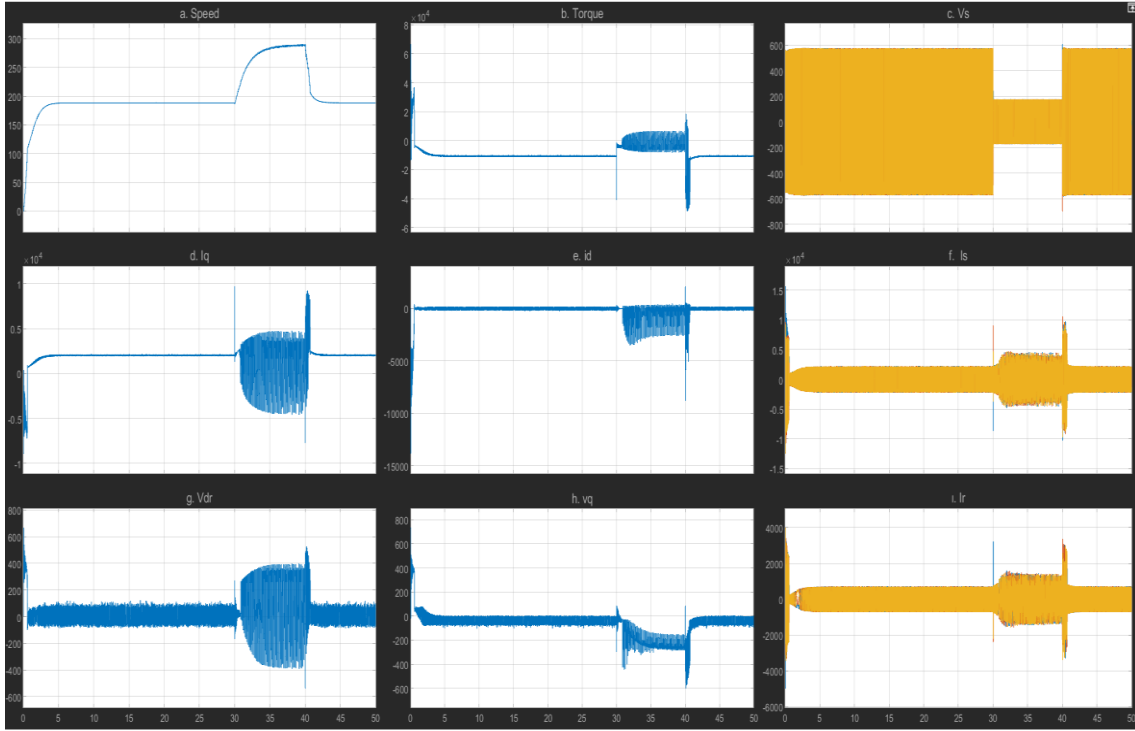


**Şekil 6.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Normal Operasyon Güç Ölçümleri. a. Nominal Aktif Güç b. Nominal Reaktif Güç c. Elektromanyetik Tork d. Elektromanyetik Tork rms değeri

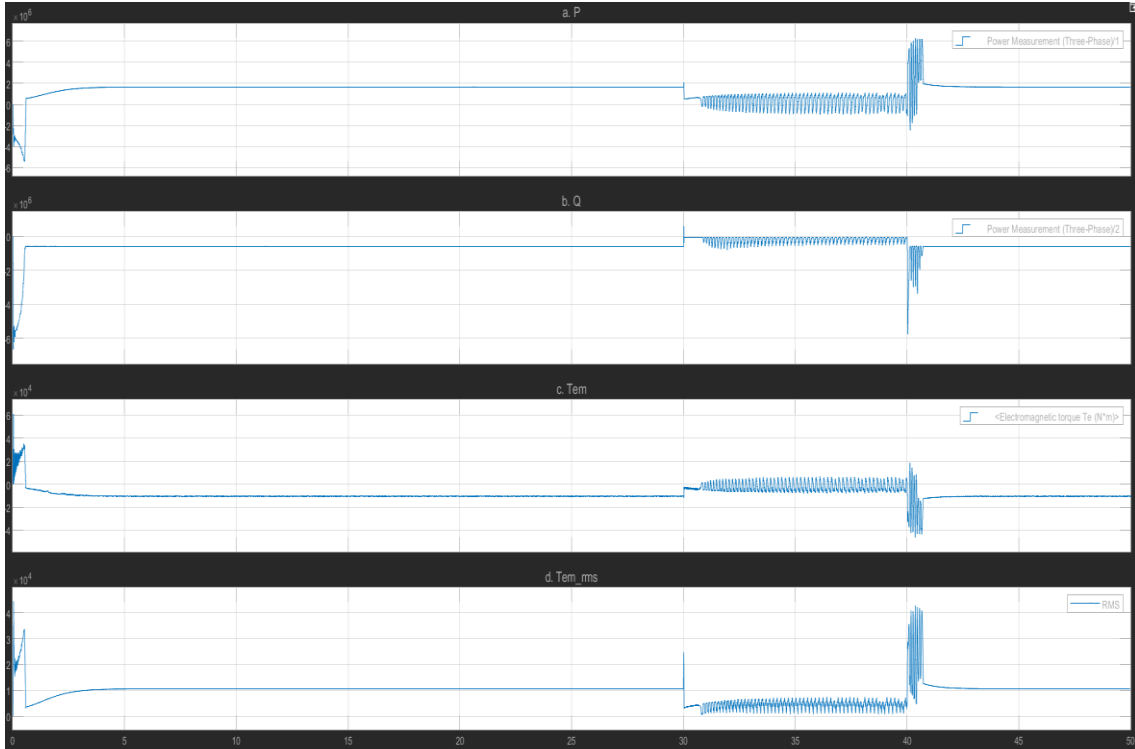


**Şekil 7.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Voltaj Dip Hatalı Operasyon Grid Tarafı Ölçümleri. a. Vbus: Bus Voltajı Grid b. Reaktif Güç c. Stator Voltajı d. Grid Akımı “d” koordinatına göre e.

Grid Akımı “q” koordinatına göre f. Grid Voltajı “d” koordinatına göre, h. Grid Voltajı “q” koordinatına göre

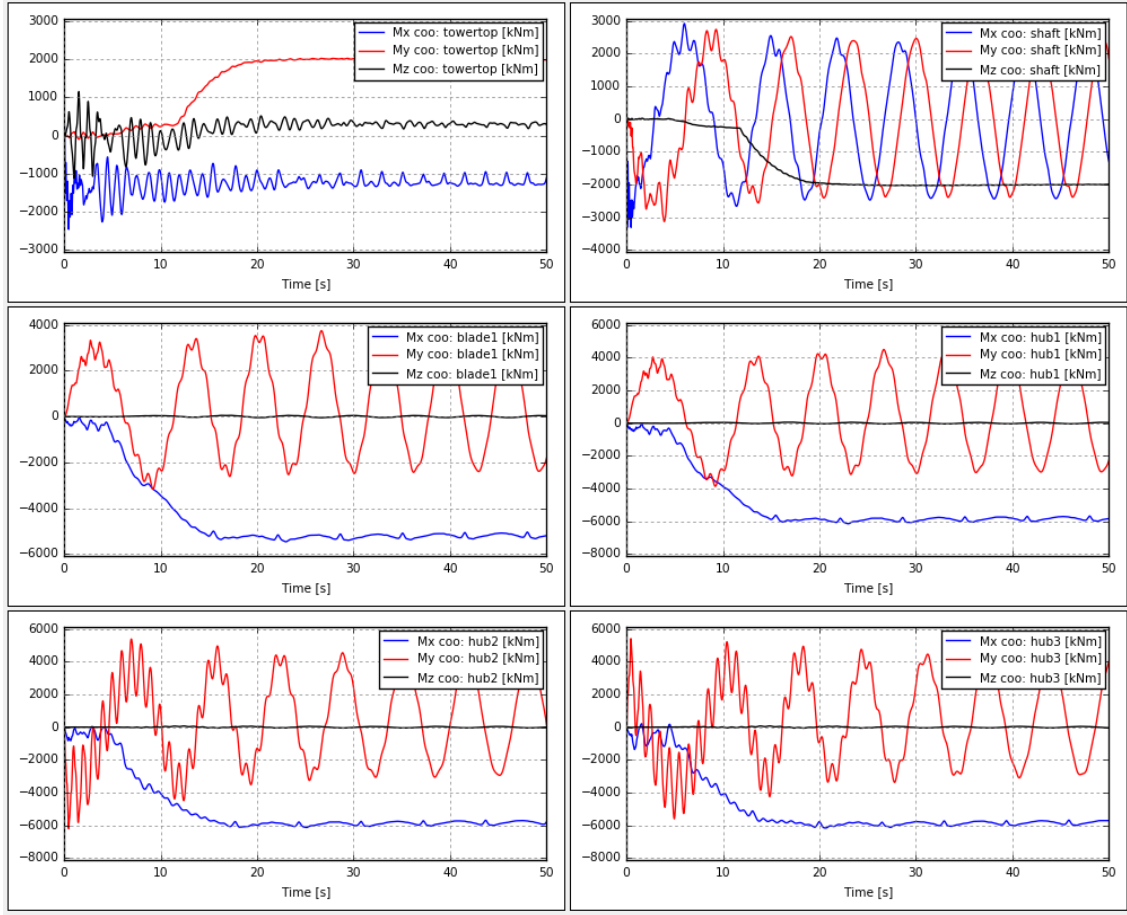


**Şekil 8.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Voltaj Dip Hatalı Operasyon Rotor Tarafı Ölçümleri. a. Nominal Hız ve Referansı b. Elektromanyetik Tork c. Stator Voltajı d. Rotor Akımı “q” koordinatına göre e. Rotor Akımı “d” koordinatına göre f. Stator Akımı g. Grid Voltajı “d” koordinatına göre, h. Grid Voltajı “q” koordinatına göre i. Rotor Akımı



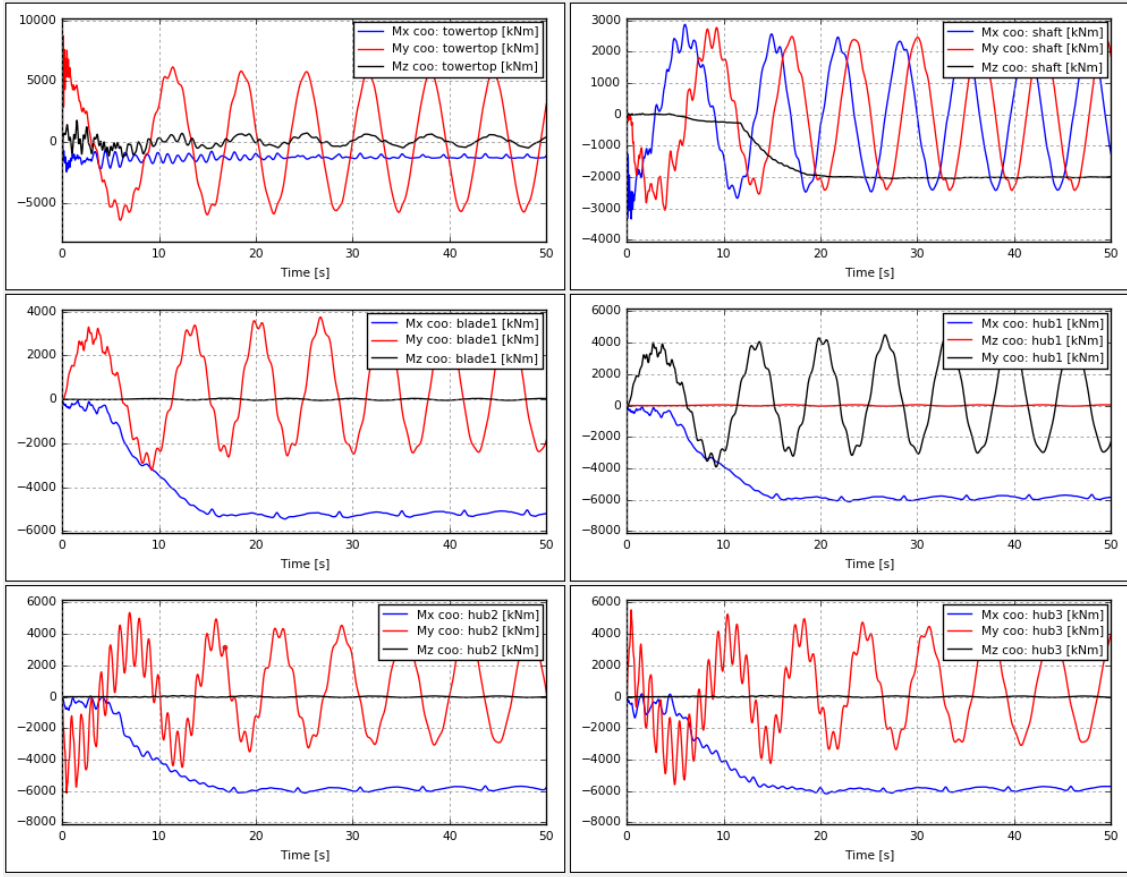
**Şekil 9.** DFIG Rüzgâr Türbini Simulink Voltaj Dip Hatalı Operasyon Güç Ölçümleri. a. Nominal Aktif Güç b. Nominal Reaktif Güç c. Elektromanyetik Tork d. Elektromanyetik Tork rms değeri

HAWC2 simülasyon yazılımı ile NREL modeli üzerinde Simulink ile elde edilen verilerin incelenmesine devam edilmiştir. HAWC2 üzerindeki .dll dosyasının Fortran90 subroutineine okuması sırasında aksaklıklar yaşansa da HAWC2 üzerinde Simulink'te elde edilen verilere uygun şekilde dışardan Kule ve Şaft ana gövdesine moment uygulanmış ve etkileri incelenmiştir. Şekil 10'da dışardan tork uygulanmadan önceki HAWC2 simülasyon verileri paylaşılmıştır. Şekil 11'da HAWC2'deki NREL modeline kule ana gövdesine dışardan tork uygulanarak simülasyon çıktıları gösterilmiştir.



**Şekil 10.** HAWC2 Simülasyon çıktıları. a. Kule üst momentleri b. Şaft Momentleri c. Kanat no:1 momentleri d. Hub1- 1. Kanat Bağlantı Noktası momentleri e. Hub2- 2. Kanat Bağlantı Noktası momentleri f. Hub3- 3. Kanat Bağlantı Noktası momentleri

Normal operasyon sırasında elde edilen kule, şaft, kanat ve hub momentlerinin dışardan uygulanan elektromanyetik moment ile karşılaştırılması sonucunda, kule ana gövdesi üzerinde momentlerde değişiklik olduğu, y ekseninde gözlenen momentin 2000kNm sabit değerlerinden 5000kNm, -5000kNm değerleri arasında salınım yaptığı gözlenmiştir. Model üzerinde farklı ana gövdelere dışardan benzer ek momentler uygulanmaya devam edilmiş ve her bir ana gövde için değişimler karşılaştırılmış modelin ve simülasyonun doğruluğu gözlenmiştir.



**Şekil 11.** HAWC2 Dış tork uygulama simülasyon çıktıları. a. Kule üst momentleri b. Şaft Momentleri c. Kanat no:1 momentleri d. Hub1- 1. Kanat Bağlantı Noktası momentleri e. Hub2- 2. Kanat Bağlantı Noktası momentleri f. Hub3- 3. Kanat Bağlantı Noktası momentleri

## 7. SONUÇ

Bu çalışmada, DFIG Rüzgâr Türbinin, şebekede meydana gelen arızalar sırasında, elektrik kontrol sistemlerinin tepkisinin, kule ve kanatlardaki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. MATLAB/Simulink üzerinde şebekeye bağlı rüzgâr türbini modellenmiş; hata senaryoları oluşturularak elektriksel tepkiler ölçülmüştür. Hata anında DFIG bara voltajının düştüğü ancak hata süresince şebekeye bağlı kalmak için referans hızının artması ile bara voltajının artmaya başladığı gözlenmiştir. Rotor ve stator tarafındaki 3 faz akım ve voltaj verilerinde düşme gözlenmiştir. Aktif güç üretimi anlık olarak düşmüş sonrasında artan hıza ve bara voltajına bağlı olarak salınım göstermiştir. HAWC2 tarafında ilgili durumda mekanik sistem üzerindeki etkileri gözlemek için kontrol sisteminin tepkisi ölçülmek üzere simülasyonlar koşulmuştur. Dışardan tork uygulaması olmaksızın alınan veriler ile tork uygulaması sonucunda gözlemlenen verilerin karşılaştırılması sonucunda kule üst gövdesi y-eksen momente büyük etki olmuş, x ve z ekseninde de etkiler olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, rüzgâr türbini tasarımda normal operasyon dışında gelişen olaylara karşı alınan tedbirlerin etkilerinin araştırılması için Elektriksel Sistemler ile Mekanik sistemlerin beraber incelenmesi, elektriksek tasarım çıktılarının kule, kanat şaft ve benzeri ana gövdeler üzerindeki etkilerinin tasarımlardaki hesaplara katılması gerektiği anlaşılmıştır. Sonraki süreçte, gelecek çalışma olarak, HWAC2 üzerinden dinamik bağlantı kurulması; elektromanyetik tork bilgisinin direk etki edeceği ana gövdeler üzerine dinamik veri girdisi sağlanarak anlık olarak değişim gözlenmesi planlanmıştır.

**KAYNAKLAR**

- [1] **Barahona, B.** 2012. Integrated analysis of wind turbines–The impact of power systems on wind turbine design (Doctoral dissertation, Ph. D. dissertation, Technical University of Denmark).
- [2] **Hansen, A. D.,** 2007. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines. *Renewable energy*, 32(9), 1594-1610.
- [3] **Cutululis, N. A.,** 2014. Unbalanced voltage faults: the impact on structural loads of doubly fed asynchronous generator wind turbines. *Wind Energy*, 17(8), 1123-1135.
- [4] **Abdelmalek, S.,** 2019. Voltage dips effects detection and compensation for doubly-fed induction generator based wind energy conversion system. *Revue Roumaine Des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique Et Energetique*, 64(3), 199-204.
- [5] **Abad, G.,** 2011. *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation.* John Wiley & Sons.
- [6] **Jonkman, J.,** 2009. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development (No. NREL/TP-500-38060). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [7] **Larsen, T. J.,** 2007. *How 2 HAWC2, the user's manual.* Risø National Laboratory.