

## Şebeke Bağlantılı Bilezikli Asenkron Generatörün Aktif ve Reaktif Gücü Ayırıştırılarak Denetimi

Erhan Demirok<sup>1</sup>, Asif Sabanovic<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak. Mekatronik Programı

Sabancı Üniversitesi, Tuzla

<sup>1</sup>erhandemirok@su.sabanciuniv.edu

<sup>2</sup>asif@sabanciuniv.edu

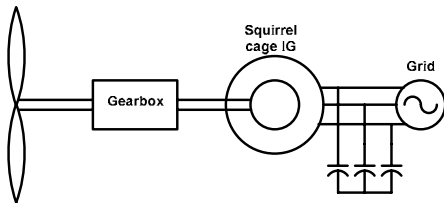
### Özetçe

Bu bildiriye, stator terminalleri doğrudan şebekeye bağlanmış bir bilezikli asenkron generatörün şebekeye verdiği aktif ve reaktif gücü uygun referans eksenini seçilip ayırıştırılarak denetimi simülasyon ile doğrulanmıştır. Stator yada rotor akı yönündeki referans eksen takımı uygulamalarında makina elektrik parametreleri bilgisinin hassas düzeyde bilinmesi gerekmektedir [1]. Bildiriye öne sürülen yöntemde ise referans eksen takımı stator gerilim yönündedir ve akı gözlemleyici tasarımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Eksen takımının stator gerilim yönlü olmasından dolayı generatörün şebekeye senkronize bağlanması da aynı zamanda yapılabilmektedir. Sistemin gerçekleştirilmesinde stator akım, stator gerilim, rotor gerilim, mekanik şaft hız ve pozisyon ölçümlerine gereksinim vardır.

### 1. Giriş

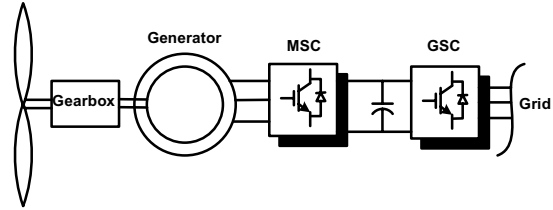
Fosil yakıtlarının ömrü dikkate alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve verimli kullanımı kaçınılmaz hale geldikçe generatör-şebeke-yük güç akışı denetimi aktif araştırma konusu haline gelmiştir. Generatörlerin kullanıldığı en yaygın yenilenebilir enerji kaynakları küçük çaplı hidroelektrik ve rüzgar santralleri olmasına rağmen bildiriye öne sürülen amaç, enerji kaynağından bağımsız olarak generatör şaft hızı veya türbin açısız hızı sınırlı bir aralıkta değişirken stator terminalindeki aktif ve reaktif güç akışını denetim altında tutmaktır. Bu amaçla seçilen elektrik makinasına ve uygulamaya göre generatör-şebeke güç akışı için farklı topolojiler kullanılmaktadır [2].

Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) kullanılarak ilk geliştirilen ve rüzgar türbinlerinde yaygın kullanılan topolojilerden birisi Şekil 1'de gösterilmektedir. SKAG şebekeye direk bağlanmıştır ve elektronik-mekanik komponentlerin basitliğinden dolayı maliyeti oldukça düşüktür. Sabit türbin hızı dişli kutusu ve generatörün kutup sayısı ile denetlenmektedir. Generatör için gerekli reaktif güç, kompanzasyon kondansatörleri tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 1: SKAG kullanarak sabit hız sabit frekanslı topoloji

Değişken hızlı sabit frekanslı topoloji için SKAG, senkron generatör (SG) yada bilezikli asenkron generatör (BAG) kullanılmaktadır (Şekil 2). Sabit türbin hızı gerekli olmamasına rağmen sabit frekans ve genlik için stator terminali ve şebeke arasına evirici-doğrultucu eklenir. Şekil 1'deki topolojide dişli kutusu ve kutup sayısı ile türbin hızı sabit tutulurken kaynaktan alınabilecek enerjide kayıp olmaktadır. Bu topolojide değişken hız söz konusu olduğundan optimum enerji transferi gerçekleştirilebilir. Evirici-doğrultucu devrelerinin güç kapasitesi en az generatörün gücü kadar olmalıdır. Generatör tarafındaki çevirici devre stator terminalindeki aktif gücü denetlerken, şebeke tarafındaki çevirici devre kondansatör gerilimini ve reaktif gücü denetlemektedir.



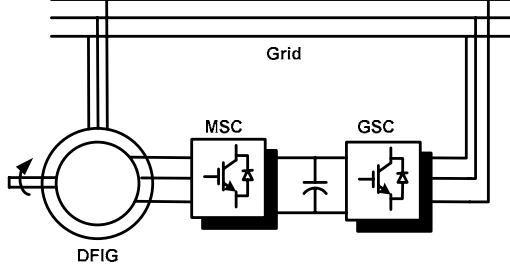
Şekil 2: Değişken hızlı sabit frekanslı topoloji

Bir diğer topoloji de Şekil 2'deki gibi değişken hızlı sabit frekanslı ancak generatörün terminali doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Kullanılan generatör BAG olduğundan generatör şebeke güç akışı rotor uyarması ile gerçekleştirilir. Rotordan verilen gücün dirençler üzerinde harcanması yerine evirici-doğrultucu devreleri rotor terminali ile şebeke arasına bağlanarak Scherbius yapısına dönüştürülmüştür. Rotordaki evirici-doğrultucu devresi denetleyici tasarımına bağlı olarak generatör-şebeke arasındaki aktif ve reaktif güç akışının birbirinden bağımsız olarak denetlenmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca rotor ile şebeke arasında çift yönlü güç akışının sağlanmasıyla senkron-altı ve senkron-üstü çalışma uygulanabilir. Bu da türbin hızının daha geniş bir çalışma aralığına sahip olmasını sağlamaktadır.

Evirici-doğrultucu devresinin rotor ile şebeke arasına bağlanmasından dolayı devrenin anma gücü generatörün anma gücünün yaklaşık 25% değerinde olmaktadır [3]. Bu sayede Şekil 3'te verilen topoloji hem değişken hızlı hem de kullanılan devrenin rotoru uyarma için düşük anma gücünde olması verimin daha yükselmesine neden olacaktır.

Bildiriye, getirisinin fazla olmasından dolayı BAG kullanarak değişken hızlı sabit frekans ve genlikli topoloji ele alınmıştır. 2. bölümde bilezikli asenkron makinanın elektrik ve mekanik

dinamik denklemleri verilerek problem tanıtımı yapılmıştır. 3. bölümde geribeslemeli doğrusallaştırma ile denetleyici ve



Şekil 3: BAG kullanarak değişken hızlı sabit frekanslı topoloji

bozucu etken gözlemleyici tasarımına yer verilmiştir. Simülasyon sonuçları ve sonuçlar üzerindeki tartışmalar ise 4. bölümde değerlendirilmiştir.

## 2. Bilezikli Asenkron Makinanın (BAM) Dinamik Denklemleri ve Problem Tanıtımı

Doğrusal manyetik bölgede ve dengeli çalışma koşulları varsayıldığında, BAM'ın gelişigüzel seçilen bir eksen takımı yönündeki eşdeğer 2 fazlı dinamik denklemleri

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_0 (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) + L_m \frac{di_{rd}}{dt} \quad (1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_0 (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) + L_m \frac{di_{rq}}{dt} \quad (2)$$

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - (\omega_0 - \omega) (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) + L_m \frac{di_{sd}}{dt} \quad (3)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + (\omega_0 - \omega) (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) + L_m \frac{di_{sq}}{dt} \quad (4)$$

Elektromanyetik tork,

$$T_{em} = \frac{3}{2} PL_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

olmaktadır. Burada  $u_{sd}$  ve  $u_{sq}$  sırasıyla stator gerilimi d ve q bileşenleri,  $u_{rd}$  ve  $u_{rq}$  sırasıyla rotor gerilimi d ve q bileşenleri,  $\omega_0$  gelişigüzel seçilen bir referans eksen takımının açısal hızı,  $\omega$  rotorun açısal hızı, P makinanın çift kutup sayısını,  $L_m$ ,  $L_s$  ve  $L_r$  ise sırasıyla stator ile rotor arasındaki ortak endüktansı, stator ve rotor endüktanslarını belirtmektedir.

Amaç BAM stator terminali ile şebeke arasındaki güç akışı denetlemek olduğundan, öncelikle aktif ve reaktif güce ilişkin denklemlerin türetilmesi gerekmektedir.

$$P_s = \frac{3}{2} u_s^T i_s \quad (6)$$

$$u_s^T = [u_{sd} \quad u_{sq}] \quad \text{ve} \quad i_s^T = [i_{sd} \quad i_{sq}]$$

Buna göre aktif ve reaktif güç,

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \quad (8)$$

olmaktadır. Denklem (1)-(4) ve (7), (8) kullanılarak denetleyici tasarımı için aktif ve reaktif güç hataları türetilir.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (P_{ref} - P_s) = \lim_{t \rightarrow \infty} e_p = 0 \quad (9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (Q_{ref} - Q_s) = \lim_{t \rightarrow \infty} e_Q = 0 \quad (10)$$

Şebeke gerilimi sabit genlikte varsayıldığından, aktif ve reaktif güç dolaylı olarak stator akımının denetimiyle gerçekleştirilir.

## 3. Lineer olmayan denetleyici ve bozucu etken gözlemleyici tasarımı

Aktif ve reaktif gücün ayrıştırılarak istenilen bir gezegeyi takip edebilmesi için hata dinamiği tanımlanırsa

$$\dot{e}_p = \dot{P}_{ref} - \dot{P}_s \quad \text{ve} \quad \dot{e}_Q = \dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_s \quad (11)$$

Denklem (7) ve (8), denklem (11) içinde kullanıldığında

$$\dot{e}_p = F - \frac{3}{2} (u_{sd} \dot{i}_{sd} + u_{sq} \dot{i}_{sq}) \quad (12)$$

$$\dot{e}_Q = G - \frac{3}{2} (u_{sq} \dot{i}_{sd} - u_{sd} \dot{i}_{sq}) \quad (13)$$

olmaktadır. 2 fazlı dinamik denklemlerin de yerine koyulmasıyla hata denklemleri

$$\dot{e}_p = E_p + \frac{3}{2} \mu (u_{sd} u_{rd} + u_{sq} u_{rq}) \quad (14)$$

$$\dot{e}_Q = E_Q + \frac{3}{2} \mu (u_{sq} u_{rd} - u_{sd} u_{rq}) \quad (15)$$

Burada  $E_p$  ve  $E_Q$

$$\begin{aligned} E_p &= \dot{P}_{ref} - \underbrace{\frac{3}{2} (u_{sd} \dot{i}_{sd} + u_{sq} \dot{i}_{sq})}_F + \frac{3}{2} \mu_{sq} i_{sd} \\ &\quad - \frac{3}{2} \alpha \beta u_{sq} i_{rd} - \frac{3}{2} \beta \omega u_{sq} i_{rq} - \frac{3}{2} [\omega_s + \omega(1 - \sigma)] u_{sq} i_{sq} \\ &\quad - \frac{3}{2} \frac{1}{\sigma L_s} u_{sq} u_{sd} - \frac{3}{2} \mu_{sd} i_{sq} + \frac{3}{2} \alpha \beta u_{sd} i_{rq} \\ &\quad - \frac{3}{2} [\omega_s + \omega(1 - \sigma)] u_{sd} i_{sd} + \frac{3}{2} \frac{1}{\sigma L_s} u_{sd} u_{sq} \\ E_Q &= \dot{Q}_{ref} - \underbrace{\frac{3}{2} (u_{sq} \dot{i}_{sd} - u_{sd} \dot{i}_{sq})}_G + E_p - F \end{aligned}$$

Denklem (14) ve (15)'teki  $E_p$  ve  $E_Q$  bozucu etkenler olarak tanımlanıp denetleyici girişi  $u_{rd}$ ,  $u_{rq}$  rotor gerilimleri seçilirse

$$\frac{3}{2} \mu (u_{sd} u_{rd} + u_{sq} u_{rq}) = -\hat{E}_p - \eta_p e_p \quad (16)$$

$$\frac{3}{2} \mu (u_{sq} u_{rd} - u_{sd} u_{rq}) = -\hat{E}_Q - \eta_Q e_Q \quad (17)$$

olmaktadır. Burada  $\alpha = \frac{R_r}{L_r}$ ,  $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s}$ ,  $\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s}$ ,

$\mu = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ ,  $\sigma = L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$ ,  $\hat{E}_p$  ve  $\hat{E}_Q$  ise kestirilmiş

bozucu etkenler,  $\eta_p$  ve  $\eta_Q$  ise pozitif denetleyici kazançlarıdır. Denklem (16) ve (17) kapalı formda yazıldığında denetleyici girişleri

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3\mu} C^{-1} \begin{bmatrix} -\hat{E}_p - \eta_p e_p \\ -\hat{E}_Q - \eta_Q e_Q \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{u_{sd}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} & \frac{u_{sq}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \\ \frac{u_{sq}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} & -\frac{u_{sd}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & N \\ N & -M \end{bmatrix} \quad (19)$$

Herhangi bir t zaman anında denetleyici girişleri tanımında tekillik olmaması için stator gerilimleri  $u_{sd}$  ve  $u_{sq}$  aynı anda sıfır olmamalıdır. Buna göre denetleyici girişlerinin son hali

$$u_{rd} = \frac{2}{3\mu} \left[ M(-\hat{E}_p - \eta_p e_p) + N(-\hat{E}_q - \eta_q e_q) \right] \quad (20)$$

$$u_{rq} = \frac{2}{3\mu} \left[ N(-\hat{E}_p - \eta_p e_p) + M(\hat{E}_q + \eta_q e_q) \right] \quad (21)$$

olmaktadır.

### 3.1. Kararlılık Analizi

Denklem (20) ve (21), hata denklemlerinde yerine konulduğunda yeni hata denklemleri,

$$\dot{e}_p = \underbrace{(E_p - \hat{E}_p)}_{\varepsilon_p} - \eta_p e_p = \varepsilon_p - \eta_p e_p \quad (22)$$

$$\dot{e}_q = \underbrace{(E_q - \hat{E}_q)}_{\varepsilon_q} - \eta_q e_q = \varepsilon_q - \eta_q e_q \quad (23)$$

Bozucu etken gözlemleyicisinin  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_p = 0$  ve  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_q = 0$

koşullarını tam olarak sağladığı varsayımı altında pozitif fonksiyonlar tanımlanır

$$V_p = \frac{1}{2} |e_p|^2 \quad \text{ve} \quad V_q = \frac{1}{2} |e_q|^2$$

türevleri negatif tanımlı olmaktadır.

$$\dot{V}_p = e_p \dot{e}_p = -\eta_p e_p^2 \quad (24)$$

$$\dot{V}_q = e_q \dot{e}_q = -\eta_q e_q^2 \quad (25)$$

Lyapunov kararlılık teoremine göre [4], hata durumlarının global eksponansiyel kararlılığı gösterilebilmektedir.

- $V_p(0) = 0$  ve  $V_q(0) = 0$
- $V_p > 0$  ve  $V_q > 0$
- $\dot{V}_p < 0$  ve  $\dot{V}_q < 0$

$|e_p|^2 = 2V_p$  ve  $|e_q|^2 = 2V_q$  olduğuna göre,  $\dot{V}_p$  ve  $\dot{V}_q$  aşağıda belirtildiği gibi negatif tanımlı bir fonksiyon ile üstten sınırlandırılabilir.

$$\dot{V}_p \leq -\eta_p V_p, \quad \dot{V}_q \leq -\eta_q V_q \quad (26)$$

$$V_p = \frac{1}{2} |e_p|^2, \quad V_q = \frac{1}{2} |e_q|^2 \quad \text{ile} \quad V_p(0) = \frac{1}{2} |e_p(0)|^2$$

$$V_p(0) = \frac{1}{2} |e_p(0)|^2 \quad \text{özellikleri kullanılarak ve sınırlı başlangıç}$$

hata değerleri  $e_p(0)$ ,  $e_q(0)$  verilerek aktif ve reaktif güç hataların global eksponansiyel kararlılığı

$$|e_p(t)|^2 \leq |e_p(0)|^2 e^{-\eta_p t} \quad (27)$$

$$|e_q(t)|^2 \leq |e_q(0)|^2 e^{-\eta_q t} \quad (28)$$

görülebilmektedir.

### 3.2. Bozucu Etken Gözlemleyici Tasarımı

Aktif ve reaktif güç hatalarının global eksponansiyel kararlılığı, bozucu etkenlerin kestirilmesine bağlıdır. Bildiride öne sürülen gözlemleyici tasarımı alçak geçiren süzgeç hesabına dayalıdır. Denklem (14) ve (15) kullanılarak

$$\dot{e}_p = E_p + \frac{3}{2} U_p \quad \text{ve} \quad \dot{e}_q = E_q + \frac{3}{2} U_q \quad (29)$$

yazılabilir. Burada  $U_p = \frac{3}{2} \mu (u_{sd} u_{rd} + u_{sq} u_{rq})$  ve

$U_q = \frac{3}{2} \mu (u_{sq} u_{rd} - u_{sd} u_{rq})$  olarak tanımlanmıştır. Denklem (29)'dan faydalanılarak

$$\hat{E}_p = \left( \dot{e}_p - \frac{3}{2} U_p \right) \frac{g}{s+g} \quad (30)$$

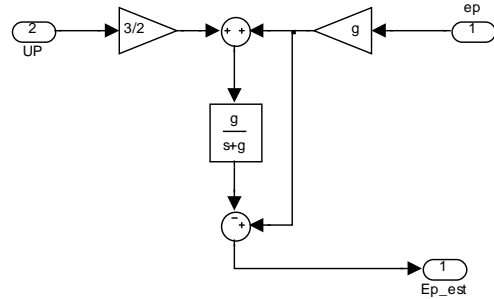
$$\hat{E}_q = \left( \dot{e}_q - \frac{3}{2} U_q \right) \frac{g}{s+g} \quad (31)$$

süzgeçlenmiş bozucu etkenler kestirilmiştir. g, süzgeç katsayısı olarak tanımlanmıştır. Kestirimlerin en son hali basitleştirmeden sonra

$$\hat{E}_p = e_p g - \frac{g}{s+g} \left[ e_p g + \frac{3}{2} U_p \right] \quad (32)$$

$$\hat{E}_q = e_q g - \frac{g}{s+g} \left[ e_q g + \frac{3}{2} U_q \right] \quad (33)$$

olmaktadır.



Şekil 4: Bozucu etken gözlemleyici blok gösterimi

## 4. Simülasyon Sonuçları

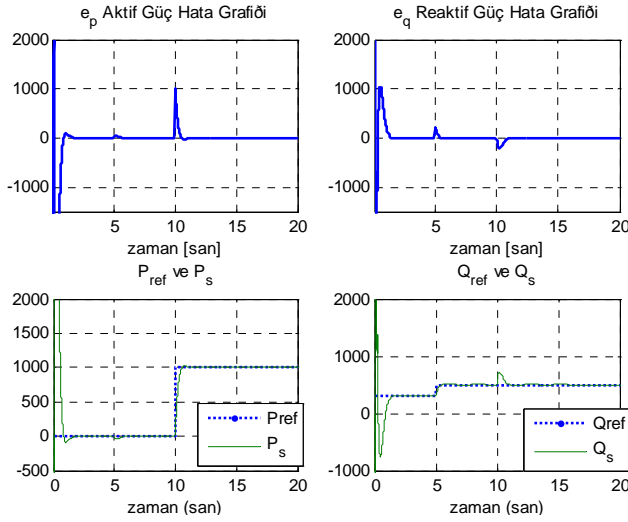
Simülasyonda kullanılan BAM modelinin plaka değerleri ile elektriksel ve mekaniksel parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Öncelikle sabit rotor hız altında, verilen aktif ve reaktif güç gezinmelerin takip edilmesi incelenmiştir. Süzgeç katsayısı ve denetleyici kazançları  $g = 100$ ,  $\eta_p = 200$ ,  $\eta_q = 200$  olarak seçilmiştir. Referans eksen takımının hızı  $100\pi$  yapılarak stator gerilim eksen takımına dönüştürülmüştür.  $u_{sq}$  stator gerilimi de sıfır seçilerek referans eksen d yönünde yapılmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6, sabit 100 rad/sn rotor açılma hızı altındaki sonuçları göstermektedir.

Şekil 7 ve Şekil 8, değişken rotor açılma hızı referans olarak verildiğinde simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Sistemin başarımı, sabit ve değişken rotor hız gezinmeleri altında güç referans takibi yapılırken makina ile evirici-doğrultucu devresinin gerilim-akım değerleri de anma değerlerinin altında

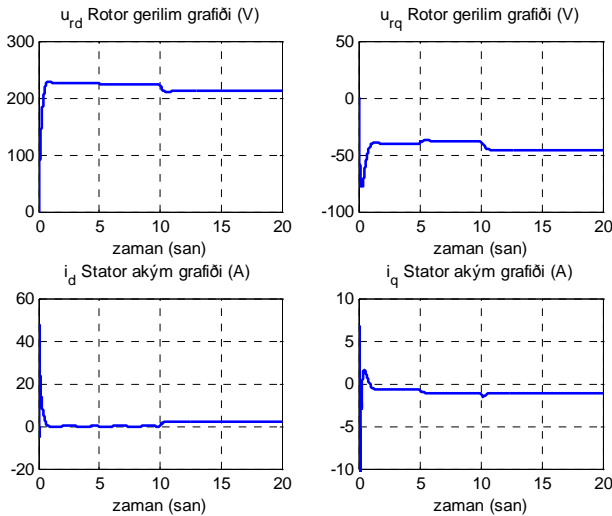
Tablo 1: BAM parametre tablosu

Anma Güç	5	kW
Anma hız	100	rad/sn
Anma gerilim	230/380	V
Anma tork	50	Nm
Anma frekans	50	Hz
$R_s$	0,95	ohm
$L_s$	0,094	H
$R_r$	1,8	ohm
$L_r$	0,088	ohm
$L_m$	0,082	H
$P$	3	
$J$	0,1	kg.m <sup>2</sup>

olmasıyla mümkündür. Şekil 5 ve 7'den görüldüğü üzere aktif ve reaktif güç birbirlerinden bağımsız olarak kendi gezinmelerini izlemektedir.

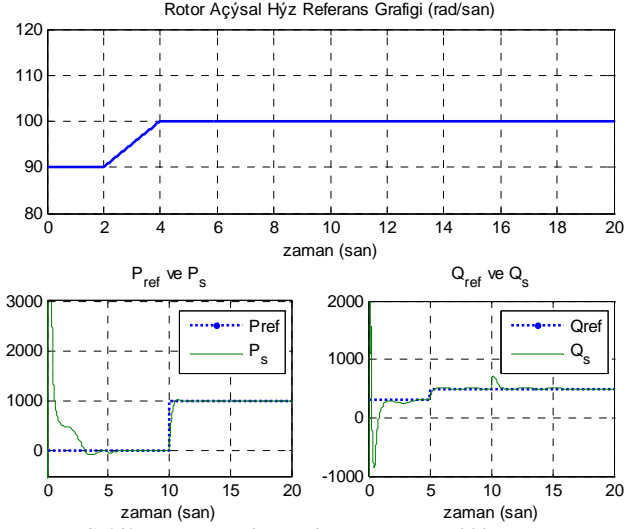


Şekil 5: Hata ve güç grafikleri

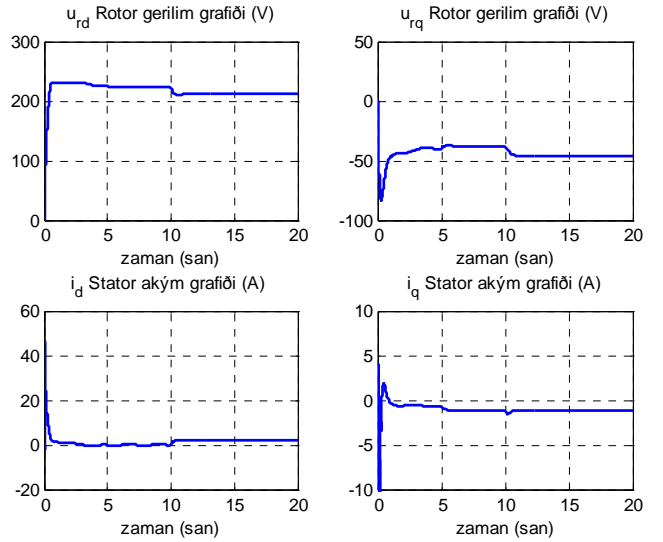


Şekil 6: Rotor gerilimi ve stator akım grafikleri

Denetleyici girişi rotor gerilimi ile stator akımı sınırlı rotor hız girişi verildiği sürece anma değerleri altında kalmaktadır (Şekil 6 ve 8).



Şekil 7: Rotor referans hızı ve güç grafikleri



Şekil 8: Rotor gerilimi ve stator akım grafikleri

## 5. Kaynakça

- [1] Petersson A., "Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines", Phd Thesis, Chalmers University of Technology, 2005
- [2] Pena R., Clare J.C. ve Asher G.M., "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," IEE Proc, Vol.143, No.3, s:231-241, 1996
- [3] S. Muller, M. Deicke ve R. W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IEEE Proceeding of IAS'00, Rome, 2000.
- [4] Marquez J. Horacio, "Nonlinear Control Systems: Analysis and Design", John Wiley & Sons, 2003