

# **Standart Kafes Rotorlu Asenkron Makina ve Sürücü Kullanarak Rüzgar Türbininden Maksimum Enerji Elde Edilmesini Sağlayan Bir Sistemin Analizi, Tasarımı ve Uygulanması**

H.Tarik DURU, Sabri CAMUR, Birol ARİFOĞLU, Ersoy BEŞER  
Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Müh.Böl.

## **ÖZET**

Bu çalışmada değişken rüzgar hızlarında rüzgar türbininden alınacak enerjinin maksimum olmasının sağlayan bir sistemin analizi, tasarımı ve uygulanması açıklanmaktadır. Sistemde rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, sürekli olarak senkron üstü fren bölgesinde çalıştırılan standart bir asenkron motor tarafından sağlanmaktadır. Asenkron motor değişken frekansta ve genlikte gerilim üreten bir PWM sürücü tarafından beslenmektedir. Rüzgar hızı basit bir anometre ile ölçülerek türbinin çalışma noktası, ölçülen rüzgar hızı için maksimum enerji aktarımına olanak sağlayan hızda tutulmaktadır. Bu şekilde mevcut bir türbin ve rüzgar rejimi için üretilen elektrik enerjisi olabilecek en büyük değerde gerçekleşmektedir. Üretilen elektrik enerjisi, akü şarjı yada doğrudan şebekeye paralel çalışma şeklinde aktarılabilir. Bildiride sistemin genel hatları ile tanıtımı, modellenme ve deneysel çalışma sonuçları verilmiştir.

## **1.GİRİŞ**

Rüzgar, son yıllarda giderek önem kazanan ve sağlanan teknolojik gelişime paralel olarak gelecek için ümit veren bir enerji kaynağıdır. Uygun rüzgar rejimlerine sahip bölgelerde büyük güçlü rüzgar çiftlikleri şeklindeki uygulamaların sayısı ve güçlerinin giderek artmasının yanı sıra, küçük ve orta güçlü rüzgar enerjisi sitemleri, çiftlikler, küçük ve orta ölçekli sanayi tesisleri, askeri uygulamalar, yazlık evler, haberleşme istasyonları, çevre aydınlatması sulama ve yedek güç ihtiyaçları için önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Şu an için orta ve küçük güçlü sistemlerin gelişmesi açısından en önemli engel, mevcut yasal düzenlemelerin uygun olmaması ve sistemlerin büyük ölçüde yurtdışından ithal edilmesi nedeniyle maliyetlerin yüksekliğidir. Uzun vadede rüzgar türbin ve diğer donanımların yerli teknoloji ile üretilmesi ve uygun yasal düzenlemelerin hayata geçirilmesi ile orta ve küçük güçlü rüzgar sistemlerinin giderek yaygınlaşacağı ve ticari olarak daha da önem kazanacağı açıktır.

Rüzgardan elektrik elde edilmesinde, sistem gücü ve şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız çalışma durumunda göre farklı teknikler kullanılmaktadır. Büyük güçlü ve şebekeye paralel bağlı sistemlerde genellikle çift sargılı asenkron generatörler kullanılmakta ve sistemin güç transferi kontrol sargısı ve kanat açıları ile ayarlanmaktadır. Küçük ve orta güçlü sistemler için yaygın olarak kullanılan üretim tekniği, miknatıs uyarmalı çok kutuplu senkron generatörler ile akü şarjı şeklindedir. Güç transferinin maksimizasyonu güneş panellerinde de kullanılan bir yöntemle mikroişlemci denetimli bir da-da çevirici yardımıyla şarj akımının optimum şekilde denetlenmesi ile yapılmaktadır. İstenildiği takdirde şebekeye paralel bağlantı bir

evirici üzerinden sağlanmaktadır. Ancak bu seçenek rejeneratif çalışmanın teknik ve yasal olarak uygun olması durumunda söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada önerilen sistem ise uygulamada henüz kullanılmayan yeni bir yaklaşımdır. Burada enerji üretimi gerilimi ve frekansı geri beslemeli olarak rüzgar hızına bağlı bir şekilde bir Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) inverter ile denetlenen ve sürekli olarak senkron üstü fren bölgesinde çalıştırılan standart bir asenkron motor ile sağlanmaktadır. Önerilen sistemin en önemli üstünlüğü, ucuz ve kolay temin edilen standart asenkron motor ve hız denetimi için kullanılan standart bir sürücü ile tasarlanmasıdır. Ayrıca mıknatıs uyarmalı senkron generatöre göre generatör olarak çalışan bir asenkron motorun optimum güç transferinin daha kolay yapılması da sistem açısından bir önemli bir üstünlüktür.

Bu bildiride öncelikle bir rüzgar türbinin matematiksel olarak modellenmesi ile ilgili temel bilgiler verilecek ve değişik rüzgar hızları için türbinin üreteceği güç ve döndürme momentlerinin analizi yapılacaktır. Daha sonra türbin, asenkron motor ve PWM inverter sisteminin analizi yapılarak sistemin her rüzgar hızı için çalışması gereken optimum çalışma noktaları belirlenecektir. Bu noktalara göre elde edilen tablo yardımıyla sistemin değişken rüzgar hızlarındaki performansı incelenecektir. Sistemin fiziksel tasarımı ile ilgili temel noktalar ve ileriye dönük çalışmalarda bildirinin sonuçlar bölümünde değerlendirilecektir.

## 2-SİSTEMİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bilindiği gibi herhangi bir türbin sistemi ve rüzgar hızı için türbinden alınabilecek güç,

$$P_t = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p \quad (1)$$

ile verilir [1]-[4].

Burada,

$\rho$ : Havanın özgül ağırlığı  $\text{kg/m}^3$

$R$ : Türbin yarı çapı (m)

$v$ : Rüzgar hızı (m/s)

$C_p$ : Güç katsayısıdır.

$C_p$  katsayısı da

$$\lambda = R\omega/v \quad (2)$$

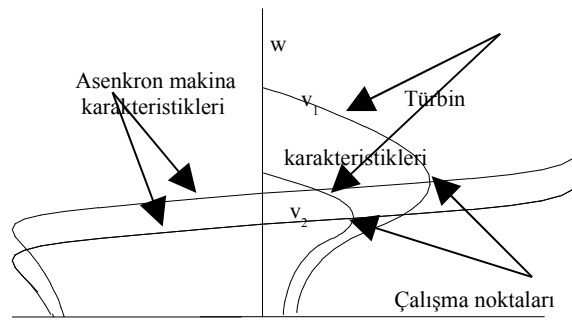
uç hız oranına bağlı bir büyüklük olup, her rüzgar hızı için, belirli mil hızında bir maksimum değere sahiptir.

Burada,

$\omega$ : Mil açısal hızı (rad/s)'dir.

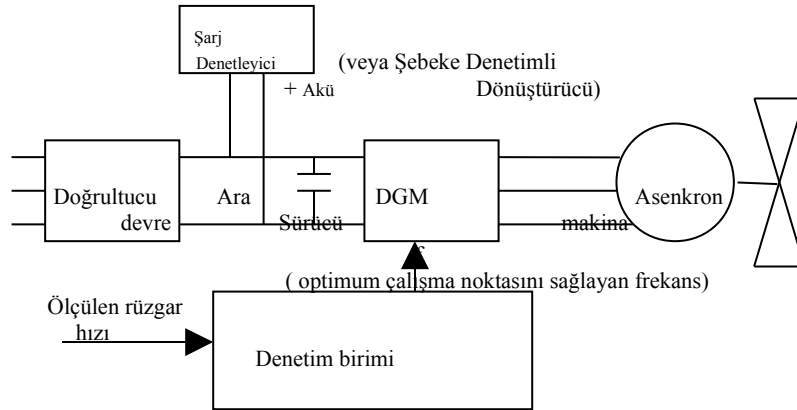
Buna göre herhangi bir rüzgar hızı için uç hız oranının  $C_p$ 'yi maksimum yaptığı nokta, mevcut rüzgardan en yüksek güç alınabilecek çalışma noktasıdır. Denetimsiz bir sistemde sistemin çalışma noktası tümüyle yük ve alternatörün karakteristiklerinin öngördüğü bir hızda oluşacağından güç aktarımının her rüzgar hızı için maksimum olması mümkün olmamaktadır. Şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatör sistemlerinde enerji transferi kanat açısını değiştirmek ya da çift uyarmalı makina kullanılarak sağlanmakta, küçük güçlü akü şarj uygulamalarında ise mıknatıs uyarmalı senkron generatör ve akü şarj akımının denetlenmesi yolu ile yapılmaktadır. Önerilen sistem ise rüzgar hızına göre türbin hızını denetleyecek şekilde çalışmakta ve

bu şekilde türbinin, tüm rüzgar hızlarında en büyük güç aktarımının sağlandığı mil hızında çalışması sağlamaktadır. Şekil 1.'de değişken frekans ve gerilimle beslenen bir asenkron makinanın farklı iki rüzgar durumu için senkron üstü fren bölgesinde çalışması durumu gösterilmiştir. Bilindiği gibi senkron hızın üzerinde çalışmaya zorlanan asenkron motor generatör çalışma moduna ( senkron üstü fren ya da faydalı fren bölgesi de denilebilir) geçmektedir. Bu şekilde çalışan bir asenkron makina, mıknatıslama akımı ve bunun gerektirdiği reaktif gücü kendisini besleyen kaynaktan çekerken, milinden aldığı mekanik gücü de elektrik gücüne çevirerek yine kendisini besleyen kaynağa vermektedir. Sabit frekansla beslemede, bu çalışma şekli sadece belirli bir hızın üzerinde meydana gelir, Örneğin  $2p=4$  kutuplu bir makina, 50 Hz için sadece 1500 d/dk üzerinde döndürülürse, generatör çalışma moduna geçebilir. Değişken frekanslı bir sürücü kullanıldığında ise teorik olarak 0'dan büyük her hız için asenkron makinanın bu şekilde çalışması mümkündür.



Şekil 1. Asenkron makinanın iki farklı rüzgar hızı için senkron üstü fren bölgesinde çalışması.

Önerilen sistemin blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

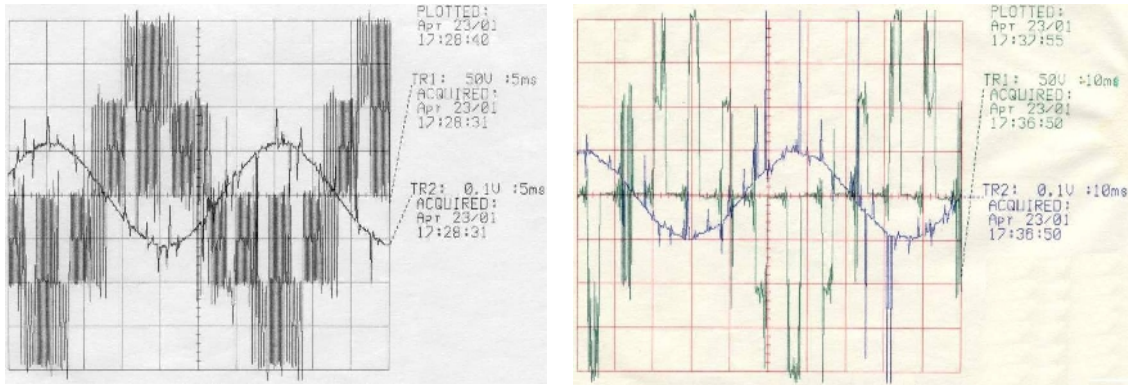


Şekil 2. Sistemin blok diyagramı

Sistemin tasarım aşamasında türbinin farklı rüzgar hızları için türbinin maksimum güç ürettiği devir sayıları belirlenerek, bir "rüzgar hızı-optimum mil hızı- optimum frekans" tablosunun yada yaklaşık bir giriş-çıkış fonksiyonunun oluşturulması gereklidir. Bu tablo yada fonksiyon yardımıyla ölçülen herhangi bir rüzgar hızı için asenkron motorun besleme frekansı belirlenerek sürücüye referans olarak verilmektedir. Bu şekilde asenkron makinanın tüm rüzgar hızlarında maksimum enerji

transfer edilmesi sağlanmaktadır. DGM sürücünün girişinde denetimsiz doğrultucu kullanıldığından, türbinden alınan enerjinin aktarılması ancak ara devre üzerinden mümkündür. Bu amaçla ara devreye bir da-da dönüştürücü bağlanarak akü sarjı, veya şebeke denetimli bir dönüştürücü bağlanarak, şebekeye paralel çalışma sağlanabilir. Asenkron makinanın gereksinim duyduğu reaktif güç ara devre kondansatörleri tarafından sağlanmaktadır. Şekil 3.'te deneysel olarak elde edilmiş ve asenkron makinanın farklı hızlarda DGM inverter yardımıyla senkron üstü fren bölgesinde çalışma durumunu gösteren osiloskop çıktıları verilmiştir.

Şekil 3. İki farklı hızda senkron üstü fren bölgesinde çalışan asenkron motorun akım ve gerilimleri



### 3- RÜZGAR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ

Bir generatörün, rüzgar türbini tarafından döndürülmesi, elektrikle hareketlendirmedeki kuvvet makinası ve iş makinasından oluşmuş temel bir sistem şeklinde düşünülebilir. Böyle bir sistemin çalışma noktası, kuvvet makinasının döndürme momenti - dönüş hızı karakteristiği ile iş makinasının döndürme momenti- dönüş hızı karakteristiğinin kesişme noktasıdır. Bu nedenle modellemenin ilk aşamasını rüzgar türbinin mil hızına bağlı olarak ürettiği döndürme momentinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Rüzgar türbininin ürettiği döndürme momenti (1) ifadesinin,  $w$  mil hızına bölünmesi ile elde edilebilir. Bu işlem yapılırsa,

$$M_t = (0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda)) / w \quad (3)$$

$$M_t = (0.5\rho\pi R^3 v^2 C_T(\lambda)) \quad (4)$$

elde edilir. Burada,

$M_t$  : Türbinin döndürme momenti,

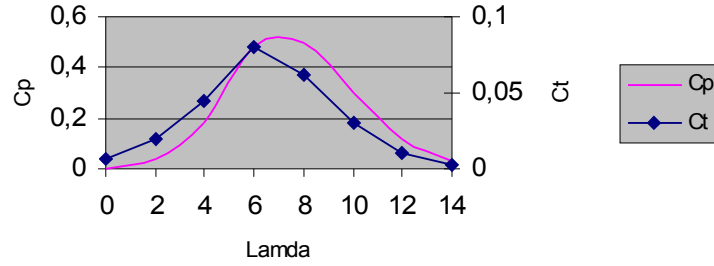
$C_T$  : Döndürtme Moment katsayısıdır.

Güç katsayısı  $C_p$  ile moment katsayısı arasında,

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T(\lambda) \quad (5)$$

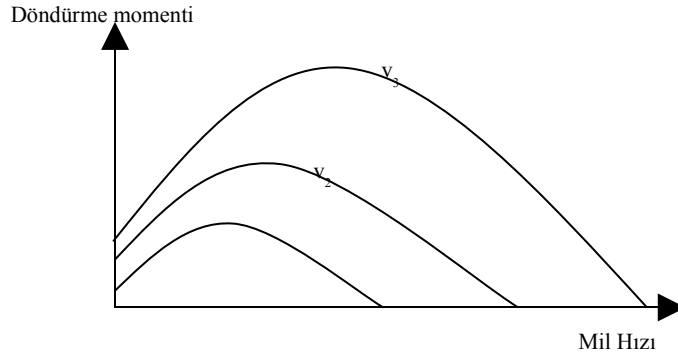
bağıntısı geçerlidir

Modelleme açısından en önemli büyüklük olan  $C_T$  katsayısının uç hız oranına göre değişimi, türbin üreticisi firmalar tarafından verilmiş grafiklerden, rüzgar tüneli testlerinden elde edilebilir ya da bir prototip için sonlu elemanlar analizi yardımıyla, hesaplanabilir [4]. Herhangi bir şekilde elde edilen  $C_T=f(\lambda)$  değişimi yüksek dereceli polinomlarla matematiksel olarak ifade edilebileceği gibi, kullanılan yazılımın elvermesi durumunda bir giriş-çıkış tablosu (Look Up Table) ile de modellenebilir. Tipik olarak döndürme momenti ve güç katsayısının, uç hız oranına bağlı değişimi şekil 4'te verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta maksimum döndürme momentini oluşturduğu uç hız oranı ile maksimum gücün oluşturduğu uç hız oranının farklı olmasıdır.



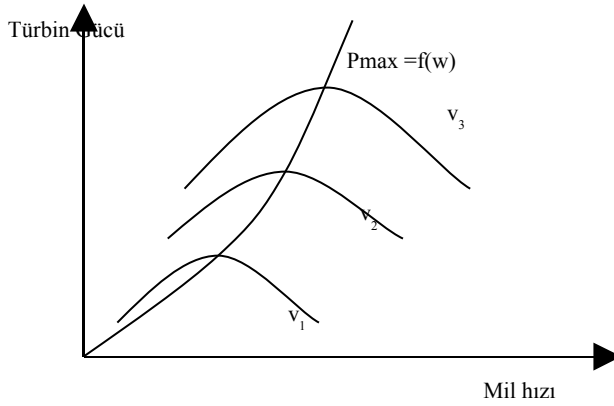
Şekil 4. Uç hız oranına bağlı  $C_T$  ve  $C_P$  faktörlerinin değişimi

Farklı rüzgar hızları için türbin döndürme momentinin mil hızına bağlı değişimi de (4) bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir. Bu şekilde elde edilmiş Döndürme momenti - mil hızı değişimi tipik olarak şekil 5'teki gibidir.



Şekil 5. Farklı rüzgar hızları için türbinin döndürme momenti, mil hızı karakteristiği

Döndürme momentinin yanı sıra bir başka önemli karakteristik de türbinden alınabilecek güçlerin mil hızına göre değişimidir. Bu değişim de tipik olarak şekil 6.'daki gibidir.

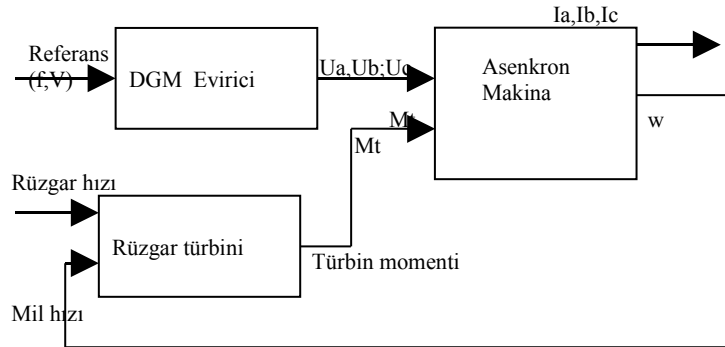


Şekil 6. Farklı rüzgar hızlarında, türbin gücünün ve her hızdaki maksimum gücün mil hızına bağlı değişimleri ( $P_{max} = f(w)$  kübik bir değişim gösterir.)

Yukarıda elde edilen karakteristikler yardımıyla, bir rüzgar türbinin her hangi bir tipteki generatörle akuple çalışması durumunda, farklı rüzgar hızları için modellenmesi ve analizi mümkün olacaktır.

#### 4- ASENKRON MOTOR, DGM EVİRİCİ VE TÜRBİN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

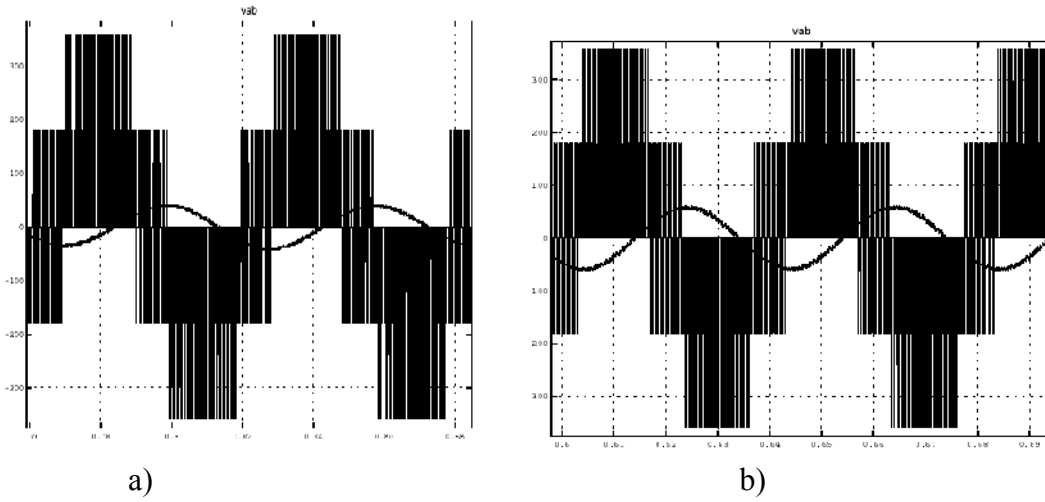
Modelleme için asenkron motorun, rüzgar türbinin ve DGM eviricinin gerçeğe mümkün olduğunca yakın matematiksel ifadelerinin zamana bağlı olarak yazılması gereklidir. Bu işlem sonucu elde edilen diferansiyel denklemler uygun bir algoritma ile sayısal olarak bilgisayar ortamında çözülebilir. Bunun yanı sıra günümüzde geliştirilen bilgisayar yazılımları çok daha pratik olarak dinamik sistemlerin çözümüne olanak sağlamaktadır. Bu bildiriye ikinci yaklaşım benimsenmiştir. Şekil 7.'de oluşturulan sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 7. Optimum çalışma noktalarının belirlenmesi için kullanılan modelin blok diyagramı

Modelin çözümünde, herhangi bir rüzgar hızı için DGM evirici referans frekansı ve gerilimi değiştirilerek, rüzgar hızından en yüksek gücün alınabileceği çalışma noktaları belirlenmiştir. Bu işlem farklı rüzgar hızları için tekrarlanarak, oluşabilecek tüm rüzgar hızları için sistemin optimum çalışma noktaları elde edilmiştir. Burada

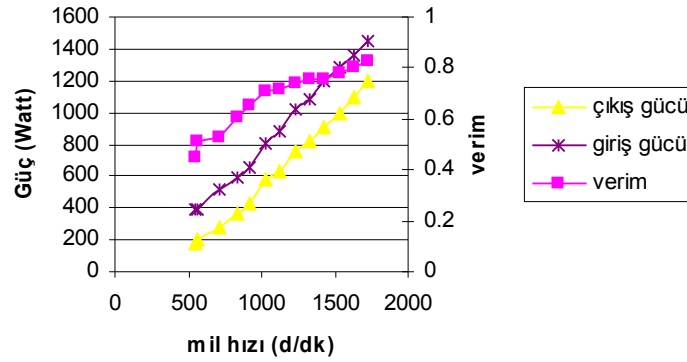
önemli olan bir konu da referans  $f$  değerleri ile  $V$  değerleri arasındaki ilişkidir. Bilindiği gibi, uygulamada kullanılan asenkron motor sürücülerinin  $V$ - $f$  karakteristiklerinde iki temel yaklaşım söz konusudur. Bunlardan biri, moment gereksinimi hızdan bağımsız olan yükler için uygulanan ve  $V/f$  'in yaklaşık sabit tutulduğu (sabit akı) çalışma şekli olup, örneğin vinç tipi yükler için uygun olan karakteristik, diğeri de gereksinim duyduğu döndürme momenti hızın karesi ile artan yükler için uygulanan fan tipi karakteristikdir. Yapılan incelemede  $V/f$  oranının sabit tutulduğu durumda asenkron makinanın verimi ve güç faktörü düşük buna karşın akımın da yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, rüzgar türbinine daha iyi uyum sağlaması nedeniyle, önerilen sistemde  $V$ - $f$  karakteristiğinin fan tipi yükler için uygulanan şekline benzer olarak kullanılmasının daha iyi sonuç vereceği belirlenmiştir. Şekil 7.de iki farklı rüzgar hızı için asenkron makinanın optimum çalışma noktalarında çalışmasına ilişkin simülasyon sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 7. a)  $v=10$  m/s için, b) $v=14$  m/s için optimum çalışma noktasında akım ve gerilimler.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Simülasyonda elde edilen sonuçların doğrulanması için, laboratuvar ortamında asenkron motorun senkron üstü fren bölgesindeki performansının gözlenebilmesi için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada simülasyonlarda da parametreleri kullanılmış olan 1.1 kW, 230 V, 4.8 A, 1390 d/dk etiket değerlerine sahip bir asenkron motor, gerilimi ve frekansı bağımsız olarak denetlenen bir senkron generatör ile beslenmiş ve türbin yerine hızı ayarlanabilen bir d.a. motor kullanılmıştır. Asenkron makinanın akımı her çalışma durumunda nominal değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 8.'de bu şekilde elde edilen karakteristikler görülmektedir.



Şekil 8. Asenkron makinanın generatör olarak çalışması durumunda giriş ve çıkış güçleri ve verimin değişimi.

Şekil 8.'de görüldüğü gibi V/f yaklaşık olarak sabit tutulduğundan çıkış gücü değişimi doğrusal ile karesel arası bir değişim göstermektedir. Yukarıda da değinildiği gibi düşük hızlar için gerilimin, V/f sabit durumdaki oranının öngördüğünden daha düşük değerlere ayarlanması ile (V/f değişimi fan tipi yük şeklinde ayarlanarak) giriş gücü - mil hızı karakteristiği ideal şekli olan kübik değişime uygun hale getirilebilir. Dikkate çarpan bir diğer önemli nokta da generatör olarak çalışma durumunda asenkron makina veriminin, motor çalışmaya göre belirgin bir şekilde yüksek olmasıdır. Tam yük civarında küçük güçlü bir asenkron makina için oldukça yüksek sayılabilecek bir verim değeri (%82 civarı) belirlenmiştir.

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlardan, önerilen sistemin farklı rüzgar hızları için oldukça pratik bir şekilde maksimum enerji transferini sağlayabildiği gösterilmiştir. Mıknatıs uyarmalı senkron generatör ile tasarlanan sistemlerde, özellikle yüksek çalışma frekanslarında senkron reaktansın artması ve bunun sonucu görülen gerilim düşümleri nedeniyle çıkış gücünün belirli bir değerin üzerine çıkamaması problemi, önerilen sistemde söz konusu olmamaktadır. Ayrıca sistemin, özellikle düşük rüzgar hızlarında motor destekli olarak kolaylıkla devreye girmesi ve türbin tasarımının buna göre yapılabilmesi bir başka üstünlük olarak görülmektedir. Sistemin gerçekleştirilmesindeki son aşama saha testlerinin yapılması olup halen bu çalışmalarımız devam etmektedir. DGM eviricinin rüzgar hızındaki ani değişimlere karşı denetim birimi tarafından üretilecek ani referans değişikliklerini takip edebilmesi durumunda simülasyonlarda ve laboratuvar deneylerinde elde edilen sonuçların uygulamada da gözleneceği öngörülmektedir. Bu şekilde bir çalışma için vektör denetim yöntemi kullanan asenkron motor sürücülerinin daha iyi bir performans göstereceği belirlenmiştir. Ayrıca sürücünün doğrudan rejeneratif çalışmayı desteklemesi halinde üretilen enerjinin şebekeye geri beslenmesi mümkün olacağından akü maliyeti ve bakım gereksinimi ortadan kalkacaktır.

Giriş bölümünde de değinildiği gibi küçük ve orta güçlü rüzgar türbini uygulamalarının artmasındaki en önemli engel, mevcut mevzuatın uygun olmaması ve sistem maliyetlerinin yüksekliğidir. Mevzuatın güncelleştirilerek küçük güçlü otonom, ve



orta güçlü şebekeyle paralel çalışan sistemlerin tesisine izin verilmesi ve teşvik edilmesi ayrıca yapılan akademik çalışmalara sağlanan desteğin artması ile rüzgar enerjisi uygulamalarının hızla artması ve bu teknolojinin büyük oranda ulusal kaynaklarla geliştirilmesi mümkün görünmektedir.

#### .KAYNAKLAR

- [1]- “Değişken Hız Sabit Frekans Yöntemi ile Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Uygulaması ”;S.Çamur,B.Arifoğlu,Z.Bilgin,T.Duru;Elektrik Mühendisliği 9.Ulusal Kongresi Eylül 2001, sf 166-170
- [2]-“Autonomus Wind Energy Conversion System with a Simple Controller for Maximum Power Transfer”;Ermiş M.,Ertan H.B.,Akpınar E.,Ülgüt F.; IEE Proceedings-B,Vol.139,No. 5,Sept.1992,pp 421-428.
- [3]-“A Peak Power Tracker for Small Wind Turbines in Battery Charging Applications”;DeBroeA.M.,DrouilhetS.,GevorgianV.;IEEETrans.On Energy Conversion,Vol.14,No.4,December 1999,pp 1630-1635
- [4]-"Study of The Dynamic Behavior of PM Synchronous Machine used in Wind Energy Conversion"; E.J.Sambatra,G.Bakarar,C.Nichita;B.Dakyo; Proceedings (CD) ICEM 2002,Brugge,Belgium

