

# MİKRODENETLEYİCİ İLE ROTORU SARGILI ASENKRON MOTOR ROTOR DİRENCİNİN DEĞİŞTİRİLEREK TORK VE HIZ KONTROLÜ

Şevki DEMİRBAŞ, Erdal IRMAK Sertaç BAYHAN\* ve İlhami ÇOLAK

GEMEC-Gazi Elektrik Makineleri ve Enerji Kontrol Grubu, Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Beşevler Ankara

\*Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Başkent Üniversitesi, Bağlıca Kampüsü Eskişehir Yolu 20. km Bağlıca 06530 Ankara

[icolak@gazi.edu.tr](mailto:icolak@gazi.edu.tr), [demirbas@gazi.edu.tr](mailto:demirbas@gazi.edu.tr), [erdal@gazi.edu.tr](mailto:erdal@gazi.edu.tr), [serbay@baskent.edu.tr](mailto:serbay@baskent.edu.tr)

(Geliş/Received: 26.11.2007 ; Kabul/Accepted: 15.07.2008)

## ÖZET

Bu çalışmada, bir mikrodeneleyici yardımıyla rotoru sargılı asenkron motor (RSAM)'un rotor devresi direnci ayarlanarak, motorun tork ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Hız denetleyicisi olarak, yapısının basit ve tepki hızının yüksek olmasından dolayı PI denetleyici tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma laboratuvar ortamında 1,5 kW gücüne sahip bir RSAM üzerinde denenmiştir. Deney sonuçları, gerçekleştirilen sistemin klasik yol verme yöntemlerine göre daha hızlı tepki verdiğini, daha kararlı çalıştığını ve hassas bir hız kontrolü sağladığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Rotoru sargılı asenkron motor, hız kontrolü, tork kontrolü, PI denetleyici.

## TORQUE AND SPEED CONTROL OF WOUND ROTOR INDUCTION MOTOR BY ADJUSTING THE ROTOR RESISTANCE WITH A MICROCONTROLLER

### ABSTRACT

In this study, the speed and torque of a wound rotor induction motor (WRIM) have been controlled by adjusting the rotor resistance using a microcontroller. PI controller has been chosen for the speed control due to its simple structure and higher response time. Realized system has been tested on a 1,5 kW WRIM in a laboratory. Experimental results show that implemented system has been faster, more stable and very sensitive in speed control when compared to classical systems.

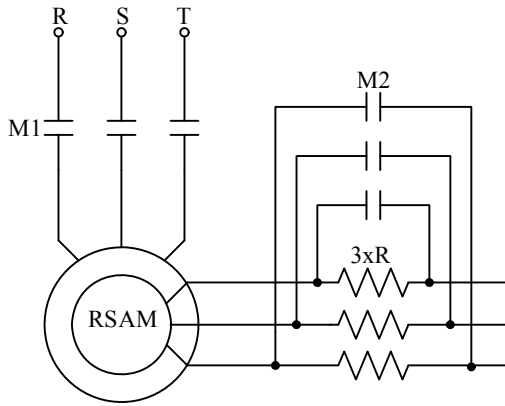
**Keywords:** Wound rotor induction motor, speed control, torque control, PI controller.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar yapısının basit, maliyetinin ucuz olması, az bakıma ihtiyaç göstermelerinden dolayı endüstride en fazla kullanılan elektrik makinelerindendir. Asenkron motorlar 1 faz ve 3 faz olarak imal edilmektedir. 3 faz asenkron motorlar kendi aralarında rotor yapılarına göre iki şekilde incelenmektedir: Sincap Kafesli Asenkron Motorlar (SKAM) ve Rotoru Sargılı Asenkron Motorlar (RSAM). SKAM'larda rotor sargıları tek iletken den teşekkül ettirilmiş ve sargı uçları kısa devre edilmiştir. Sincap-kafesli asenkron motorların, tam yükteki

kaymalarının küçük olması nedeniyle, hız regülasyonları oldukça iyidir [1]. Kalkış anında, normal yük akımının 3-5 katı fazla akım çekmelerinden dolayı, büyük güçlü yüklerde yüksek tork ile kalkınabilmesi için özel yol verme yöntemlerine ihtiyaç gösterirler. Bu da sürücü sisteminin maliyetini artırmaktadır. SKAM'ların aksine, RSAM'ların rotoru çok iletkenli sarımdan meydana gelmiş ve sargı uçları dışarı çıkartılmıştır. Bu sayede rotor devresi direnci kısa devre edilebileceği gibi, sonsuz direnç kullanmak suretiyle açık devre durumuna da getirilebilir. Rotor direncini değiştirmek suretiyle kayma gücü kontrol edilerek,

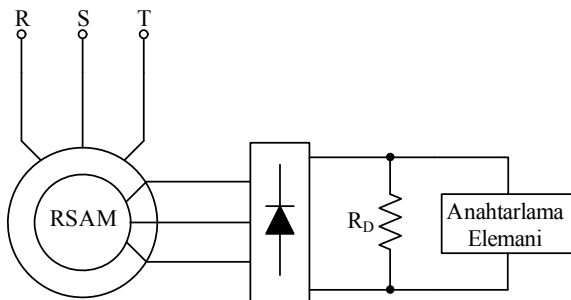
RSAM'un tork-hız karakteristiğini değiştirmek mümkün olduğundan, düşük akımda yüksek tork elde edilebilmekte ve hızı değiştirilebilmektedir. Şekil 1'de rotor devresine bağlanan harici dirençleri devreye alıp çıkartmak suretiyle kayma gücünün kontrol edildiği bir sistem verilmiştir. Burada rotor devresine bağlı harici dirençler kontaktörler yardımı ile devreye alınıp çıkartılmaktadır. Bu sistemlerde rotor direnci kademeli olarak değiştirildiğinden hassas tork kontrolü sağlanamamaktadır. Ayrıca kontaktörler gibi mekanik elemanların bulunması sistemin boyutunu büyütmede kullanım ömrünü azaltmaktadır.



**Şekil 1.** Rotoru sargılı asenkron motorun rotor devresine direnç bağlanarak yol verilmesine ilişkin güç devresi (Driving circuit of a wound rotor induction motor by connecting an external resistance to its rotor circuit)

Güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kayma gücünün kontrolünde güç elektroniği elemanlarından faydalanılmaya başlanılmıştır. Bu yöntemlerde rotor devresinde endüklenen gerilim doğrultulduktan sonra güç anahtarları yardımıyla sabit bir direnç üzerinde harcanarak lineer hız ve tork ayarı yapılabilmektedir [1].

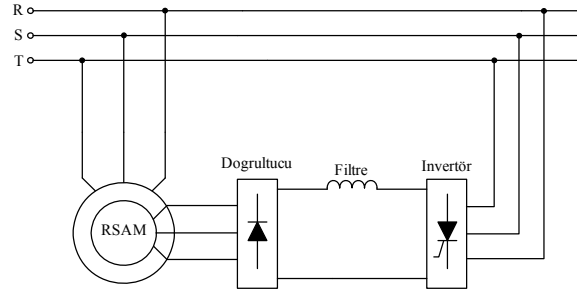
Şekil 2'de rotor devresinde yarıiletken elemanların kullanıldığı bir RSAM'un blok diyagramı verilmiştir. Burada anahtarlama elemanı olarak tristör [2-6], tristör ile birlikte IGBT [7] ve yalnızca IGBT [8] kullanılmaktadır.



**Şekil 2.** Rotoru sargılı asenkron motorun hızının kadesiz olarak yarıiletken kullanarak hız kontrolü (Smooth speed control of a wound rotor induction motor using a semi-conductor device)

Tristörlü devreler ek komütasyon devrelerine ihtiyaç gösterdiğinden sistem maliyeti artmakta ve komütasyon devrelerindeki kayıplar yüksek olmaktadır. Tristörlü devrelerdeki dezavantajı gidermek için tristör yerine IGBT kullanılmıştır [8]. Bu yöntemde IGBT sürme sinyalleri analog devreler ile gerçekleştirildiğinden sistemin tepkisi yavaş, gürültü bağımlılığı fazla ve sistemin maliyeti de yüksek olmaktadır.

Gerek klasik yöntemlerde, gerekse güç elektroniği anahtarları kullanılarak gerçekleştirilen yöntemlerde, rotor devresinde meydana gelen kayma gücü dirençler üzerinde harcanmaktadır. RSAM'larda rotor devresinde meydana gelen kayma gücünün dirençler üzerinde harcamak yerine, tekrar şebekeye aktarılacak sistemin verimi artırılabilir [9]. Şekil 3'te kayma gücünün şebekeye aktarıldığı bir RSAM'un blok diyagramı verilmiştir.



**Şekil 3.** Rotoru sargılı asenkron motorun rotor enerjisini invertör ile kaynağa aktararak rotor hızının kadesiz olarak kontrolü (Smooth speed control of wound rotor induction motor by transferring the rotor power to the grid)

Bu çalışmada, RSAM'un kayma gücünü kontrol ederek tork ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde rotor devresinde meydana gelen gerilim doğrultularak, bir mikrodenetleyici tarafından anahtarlanan IGBT yardımıyla sabit değerli bir direnç üzerinde harcanmaktadır. IGBT anahtarlama oranları değiştirilerek RSAM'un tork-hız karakteristiği ayarlanabilmektedir. Böylece motor kalkınma anında düşük akımda yüksek tork üretebildiği gibi belirli aralıklarda devir ayarı da yapılabilmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen sistemde bir PI denetleyici yardımıyla değişken yüklerde RSAM'un hızının sabit kalması da sağlanmaktadır. Deney sonuçları, gerçekleştirilen sistem ile RSAM'un yüksek tork ve düşük akım ile kalkınabileceğini, lineer tork ve belirli aralıklarda hız kontrolünün yapılabileceğini göstermiştir.

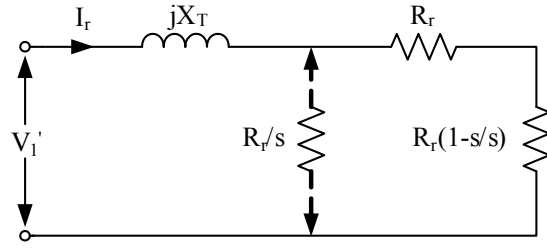
## 2. ROTORU SARGILI ASENKRON MOTOR TORK-HIZ KARAKTERİSTİKLERİ (TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS OF WOUND ROTOR INDUCTION MOTOR)

RSAM'ların tork-hız karakteristiklerinin elde edilebilmesi için öncelikle motorun kararlı durum eşdeğer devresinin elde edilmesi gerekmektedir. Asenkron motorların kararlı durum eşdeğer devresini en basit duruma getirebilmek için, ya stator değerleri

rotor tarafına, ya da rotor değerleri stator tarafına transfer edilmektedir. Bu çalışma da, stator değerleri rotor tarafına transfer edilmiştir. Şekil 4' te asenkron motorun rotor tarafına göre bir faz eşdeğer devresi görülmektedir. Eşdeğer devrede toplam kaçak reaktans,

$$jX_T = jX_s' + jX_r \quad (1)$$

olarak tanımlanmıştır. Rotorun dönmesi halinde, kayma çok küçük olduğundan  $\frac{R_r}{s}$  'nin yanında  $R_s'$  ihmal edilebilmektedir.



Şekil 4. Asenkron motorun rotor tarafına göre bir faz eşdeğer devresi (One phase equivalent circuit of the induction motor)

Eşdeğer devreden rotor devresi gücü ve rotor akımı;

$$P_r = I_r^2 \cdot \left( \frac{R_r}{s} \right) \quad (2)$$

$$I_r = \frac{V_1'}{\left( \frac{R_r}{s} \right) + jX_T} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 3' ü denklem 2' de yerine yazarak,

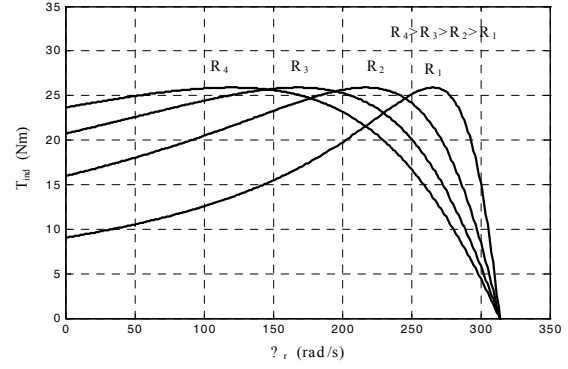
$$P_r = \frac{(V_1')^2}{\left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_T)^2} \cdot \left( \frac{R_r}{s} \right) \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Motorun ürettiği tork

$$T = \frac{P_r}{\omega_s} = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{(V_1')^2}{\left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_T)^2} \cdot \frac{R_r}{s} \quad (5)$$

ifadesiyle bulunur [10].

Denklem 5'ten görüldüğü gibi rotor devresi direnci motorun ürettiği torku etkileyen önemli bir parametredir. Şekil 5'te farklı rotor dirençlerinde rotor açılma hızına bağlı olarak, motorun ürettiği torkun değişim grafiği verilmiştir. Burada  $R_4$  en yüksek direnç değerini,  $R_1$  ise en düşük direnç değerini ifade etmektedir. Şekil 5'ten görüleceği üzere rotor direnç değeri büyüdükçe, motorun kalkınma anında ürettiği tork artarken, aynı rotor direncine karşılık gelen hız değeri de azalmaktadır. Bu durumda motor kayıpları artar. Yüksek rotor direnci altında çalışan motorun maksimum torkun meydana geldiği hız değeri de azalmaktadır. Buna göre, uygun değerlerde rotor direnci seçilerek motorun maksimum torkla

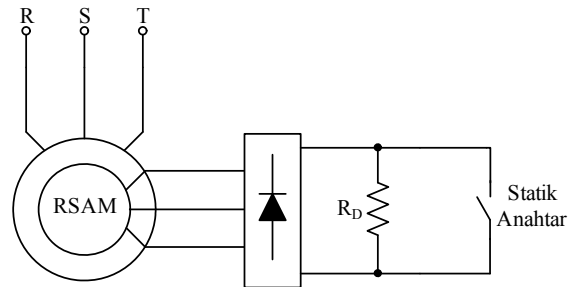


Şekil 5. Rotoru sargılı asenkron motorun değişik rotor direnç değerlerindeki Tork - Hız karakteristik eğrisi (Torque-speed characteristics of wound rotor induction motor for different values of rotor resistance)

kalkınmasını sağlamak mümkündür. Rotor devresine bağlanan dış direnç kademeli olabileceği gibi, kademelerle değişen bir direnç oluşturmada mümkündür. Eğer dış direnç kademeli ise, motorun çalışabileceği hız değerleri bu kademe sayısına bağlıdır. Ancak rotor sargı uçlarından alınan üç faz gerilimi doğrultucudan geçirilirse, bir DC kaynak elde edilmiş olur. Bu kaynaktan alınan güç (rotor devresi gücü) sabit bir direnç üzerinde yarıiletken anahtar yardımıyla kontrollü bir şekilde harcanırsa, motorun hızı sıfır ile maksimum değer arasında kademelerle kontrol edilebilir [10].

Şekil 6'da RSAM' da yarıiletken kontrollü sabit bir direnç kullanılarak rotor hızının kademelerle kontrolüne ilişkin blok diyagramı verilmiştir. Diyagramda, rotor gerilimi doğrultulduktan sonra  $R_D$  dış direncine uygulanmıştır.  $R_D$  direncine paralel bağlı statik anahtarın iletim kesim aralığı ayarlanarak,  $R_D$  direnci üzerinden geçen akım kontrol edilmektedir. Böylece direnç üzerinde harcanan rotor gücü denetlenmektedir.

Statik anahtarlar  $R_D$  dış direncinin kontrolü şu şekilde olmaktadır: Anahtar devamlı iletimde iken  $R_D$ 'nin etkin değeri  $R_{De}=0$ 'dır. Anahtar devamlı kesimde iken  $R_D$  direncinin etkin değeri  $R_{De}=R_D$  olmaktadır. Eğer anahtar kısa aralıklarla iletim ve kesim arasında değiştirilirse,  $R_{De}$ 'nin değeri  $0 \leq R_{De} \leq R_D$  arasında değiştirilebilir. Anahtarın çalışma oranı (iletim



Şekil 6. Statik kontrollü dış direncin rotor devresine bağlantısı (Connection of static controlled external resistance to the rotor circuit)

süresinin periyot'a oranı) " $\alpha$ " ile ifade edilirse;

$$\alpha = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $t_{on}$  anahtar iletim süresini,  $t_{off}$  anahtar kesim süresini göstermektedir.  $\alpha$  değeri anahtarın iletim ve kesim sürelerine bağlı olarak,  $0 \leq \alpha \leq 1$  arasında değişir,  $R_{De}$  ise,  $R_D$  dış direnci ile  $(1-\alpha)$  değerinin çarpımı olarak tanımlanmaktadır [11, 12].

$$R_{De} = R_D \cdot (1 - \alpha) \quad (7)$$

Eğer anahtar sürekli iletimde ise,  $t_{off}=0$  olduğundan,

$$\alpha = \frac{t_{on}}{t_{on} + 0} = 1$$

dir. Bu " $\alpha$ " değeri (7) nolu eşitlikte yerine yazılırsa;

$$R_{De} = R_D \cdot (1 - 1) = 0$$

olarak bulunur. Böylece anahtar tam iletimde iken etkin direnç değeri " $0$ " olmaktadır.

Anahtar sürekli kesimde ise,  $t_{on}=0$  ve

$$\alpha = \frac{0}{0 + t_{off}} = 0$$

dır. Bu durumdaki " $\alpha$ " değeri (7) nolu eşitlikte yerine yazılırsa;

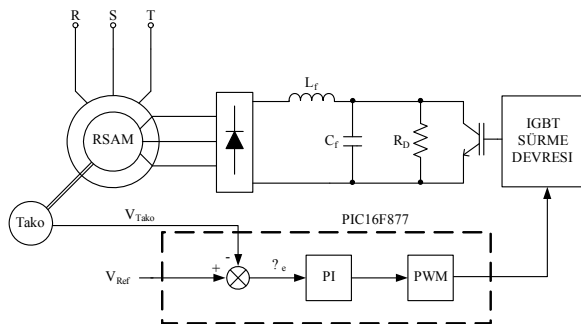
$$R_{De} = R_D \cdot (1 - 0) = R_D$$

olarak bulunur. Böylece anahtar tam kesimde iken etkin direnç değeri  $R_D$  olarak bulunur. Anahtarın elektronik olarak periyodik bir şekilde iletim ve kesim arasında değiştirilmesiyle,  $\alpha$  değeri ve dolayısıyla  $R_{De}$ 'nin değeri  $0 \leq R_{De} \leq R_D$  arasında sürekli ayar edilebilmektedir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Burada, bir doğrultucu yardımıyla doğrultulan rotor gerilimi bir filtre devresinden geçirildikten sonra, IGBT yardımıyla kontrollü olarak  $R_D$  direncine aktarılmaktadır.

Şekil 7'de görüleceği üzere rotorun doğru akım devresinde sadece rotor sargılarının kaçak reaktansı



Şekil 7. Hız kontrol devresinin blok diyagramı (Block diagram of the speed control circuit)

vardır. Bu kaçak reaktans, anahtarın iletim ve kesim periyodu süresince çok küçük zaman sabitesine neden olmaktadır. Zaman sabitesinin küçük olması nedeniyle, rotor devresinden dolaşan  $I_{dc}$  akımı çok kısa sürede kararlı hale ulaşmakta ve anahtar uçlarındaki gerilimde sivri tepeler oluşturmaktadır. Bu tepeler yüksek bir gerilim değeriyle anahtarı bozmaya zorlamaktadır. Rotorun doğru akım devresine ilave bir bobin bağlanarak bu sivri tepelerin etkisi azaltılabilmektedir. Tasarlanan sistemde bu bobinin değeri  $L_f = 3.2$  mH olarak seçilmiştir. Ayrıca rotor devresinden alınan enerji doğrultulduktan sonra gerilimde medyana gelen dalgacık miktarını azaltmak için bir kondansatör filtresinden geçirilmiştir. Filtre kondansatörü hesaplanırken dalgacık geriliminin tepe değeri  $0.75$  V olarak seçilmiştir. Bu kondansatörün değeri, 8 nolu eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve  $C_f = 2222 \mu F$  bulunmuştur, hesaplanan bu değer yerine standart olarak üretilen  $2200 \mu F$ 'lık kondansatör kullanılmıştır.

$$C_f = \frac{V_{DC}}{f_o \cdot R \cdot V_{ripple(p-p)}} \quad (8)$$

Ayrıca asenkron motorun hızını kontrol edebilmek için PI kontrollü bir hız kontrol devresi eklenmiştir. PI kontrolörün görevi referans hız ile gerçek hız arasındaki hatayı en aza indirmektir. Hata sinyali PI denetleyiciye girdiğinde oransal kazanç ( $k_p$ ) ve hata sinyalinin integrali alınarak integral etki kazancı ( $k_i$ ) ile çarpılmaktadır. PI tipi kontrol, oransal ve integral kontrol etkilerinin birleştirilmesinden meydana gelir.

PI denetleyici çıkışı:

$$V_d(t) = k_p \omega_e(t) + k_i \int_0^t \omega_e(t) dt \quad (9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$V_d(t)$  : PI denetleyici çıkışı

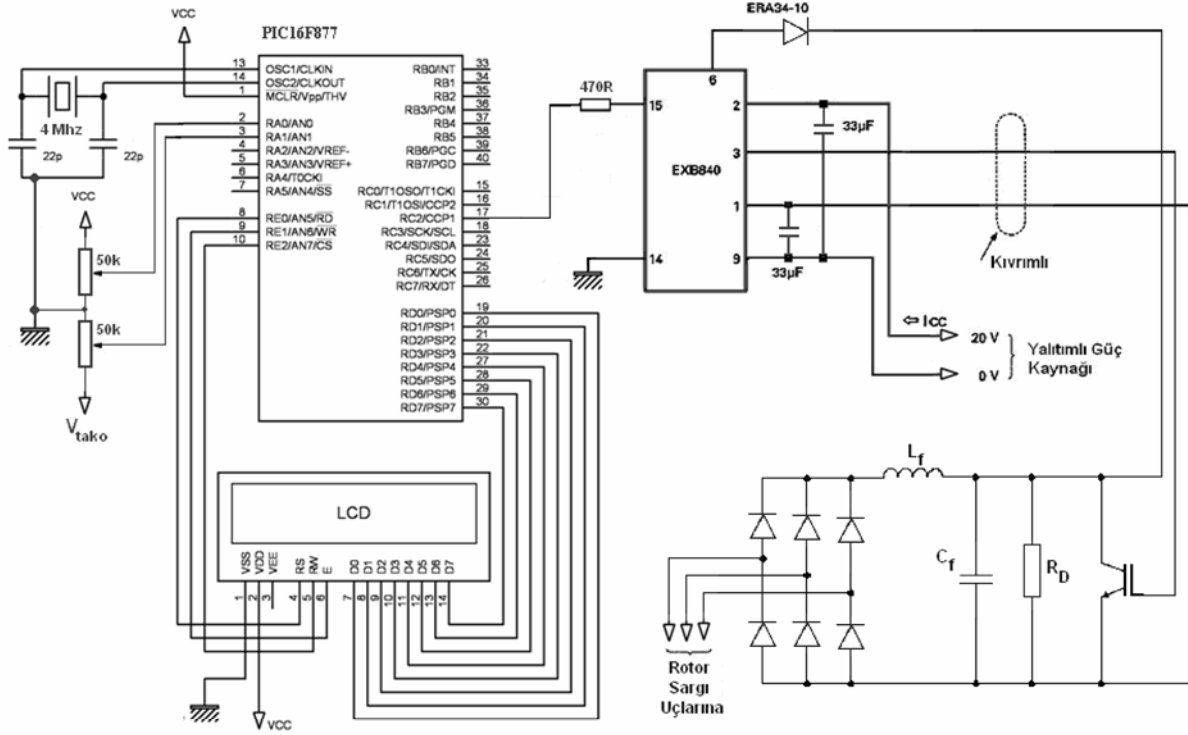
$k_p$  : Oransal kazanç katsayısı

$\omega_e(t)$  : Hata

$k_i$  : Integral kazanç katsayısı

olarak verilmiştir [13]. PI parametrelerinin seçiminde çok sayıda deney tekrarlanmış ve en iyi sonuç  $k_p=0.8$  ve  $k_i=0.75$  değerlerinde elde edilmiştir. Şekil 7'de verilen blok diyagramda PI denetleyici ile PWM sinyalleri PIC16F877 mikrodenetleyici [14] kullanılarak üretilmiştir. Mikrodenetleyiciden elde edilen PWM sinyalleri IGBT sürme devresi yardımıyla IGBT ye aktarılmaktadır. Uygulamada FUJI marka 2MBI100U4A-120 modeli bir IGBT kullanılmıştır. Bu IGBT 1200 V, 100 A özelliklere sahiptir. Anahtarlama frekansı 15 kHz olarak seçilmiştir.

Şekil 8'de uygulaması gerçekleştirilen kontrol ve sürücü devre şeması görülmektedir. Rotor uçlarından alınan üç faz gerilim doğrultulmuş ve bir filtreden geçirilerek dış devre direncine uygulanmıştır. Dış devre direncinden geçen akımı kontrol etmek için bu



Şekil 8. Uygulaması gerçekleştirilen kontrol ve sürücü devre şeması (Control and driver circuits of the system)

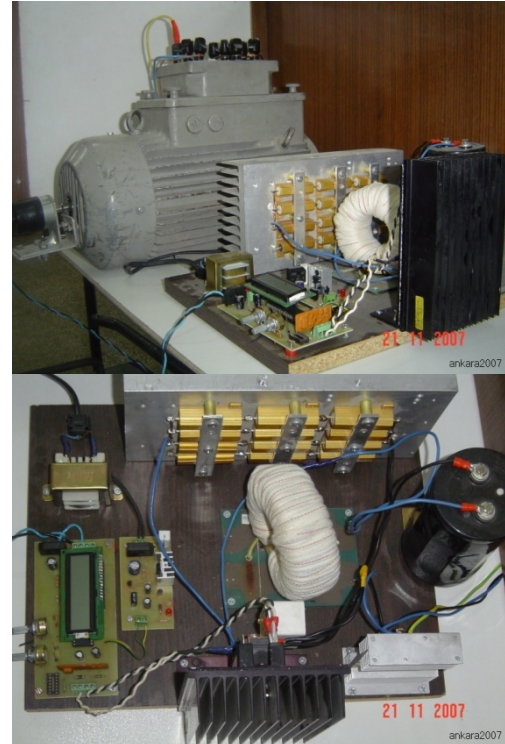
dirence paralel bağlı bir IGBT bulunmaktadır. IGBT'nin anahtarlama ise IGBT sürücü devresi [15, 16] ile gerçekleştirilmektedir. Sürücü devre için gerekli olan sinyaller kontrol devresi tarafından üretilmektedir.

Kontrol devresi üzerinde iki adet 50 kΩ değerinde potansiyometre bulunmaktadır. Bunlardan biri referans potansiyometresi, diğeri ise takometre kalibrasyon potansiyometresidir. Referans potansiyometresi ile istenilen devir sayısı mikrodenetleyiciye girilmekte, bu bilgi takometreden gelen hız bilgisi ile mikrodenetleyici içerisinde karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonucu elde edilen değer önce PI denetleyiciye uygulanmaktadır. PI denetleyicinin çıkışından alınan değer, mikrodenetleyicide üretilecek olan PWM sinyalinin görev çevrimine atanmaktadır. Üretilen bu PWM sinyalleri daha sonra IGBT sürme devresine uygulanarak, IGBT için gerekli sürme sinyalleri elde edilmektedir. Sistemde geri besleme alabilmek için mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren takometre kullanılmıştır. Takometreden alınan gerilim değeri anma hız değerinde 35 Volt civarındadır. Bu değer doğrudan mikrodenetleyici girişine uygulanamayacağı için uygun gerilim seviyesine düşürülmektedir. Bu gerilim düşürme işleminin sabit değerli bir direnç ile yapılması uygun olmayacaktır. Çünkü düşük hız değerlerinde takometrenin ürettiği olduğu gerilimin değeri azaldığı için, mikrodenetleyicinin analog okuma çözünürlüğü azalmakta ve hata oranı artmaktadır. Bu nedenle, devreye eklenen potansiyometre ile takometrenin ürettiği gerilim ayarlanarak mikrodenetleyicinin girişine uygun hale getirilir. Aynı zamanda, sistemdeki referans ve ölçülen hız bilgilerinin görüntülenmesini sağlamak

amacıyla sisteme bir LCD ekran ilave edilmiştir. Şekil 9'da deney düzeneğinin görünümü verilmiştir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EXPERIMENTAL RESULTS AND EVALUATION OF THE STUDY)

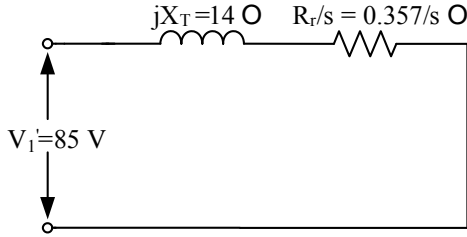
Bu çalışmada kullanılan RSAM "SIEMENS" marka



Şekil 9. Geliştirilen sistemin fotoğrafı (Photograph of the system designed)

olup motor etiket değerleri ve bu motorun stator ve rotor faz sargılarına ait direnç ve endüktans değerleri, ampermetre-voltmetre metodu ile ölçülerek bulunmuş ve ekte verilmiştir.

Bulunan parametreler arasında yer alan “a” değeri stator ile rotor arasındaki dönüştürme oranıdır. Bulunan değerlere göre, Şekil 4’ten, deneyde kullanılan motorun bir faz A.A. eşdeğer devresi Şekil 10’deki gibi çizilebilir.

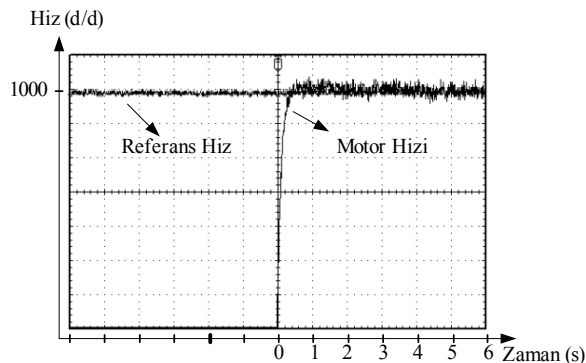


**Şekil 10.** Deneyde kullanılan motorun rotor tarafına aktarılmış bir faz eşdeğer devresi (One phase equivalent circuit transferred to the rotor side of wound rotor induction motor)

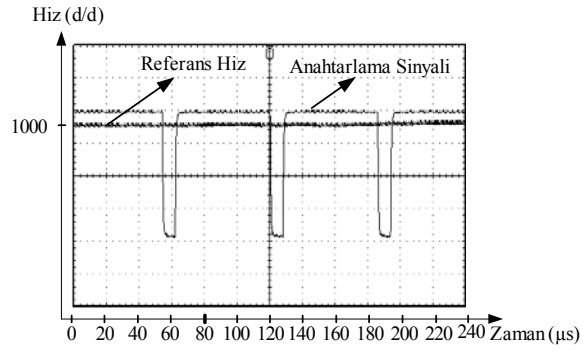
Gerçekleştirilen sistemde referans hız değeri 1000 d/d olarak ayarlanmış ve kullanılan harici direnç değeri 40 Ω olarak seçilmiştir. Şekil 11’de uygulaması gerçekleştirilen sistem yardımıyla sürülen RSAM’ un kalkınma anında, motor hızının zamana bağlı olarak değişim eğrisi görülmektedir. Bu eğri incelendiğinde gerçekleştirilen hız kontrol devresi yardımıyla motor hızının çok kısa bir sürede referans hız değerine ulaştığı ve orada sabit kaldığı görülmektedir. Hız denetleyicisi olarak PI denetleyici kullanılması sistemin tepkisini hızlandırmış ve kararlı duruma geçme zamanını kısaltmıştır.

Klasik yol vermeli sistemlerde motor üzerindeki yük artırıldığında motor hızında azalma meydana gelmektedir veya tersi durumda motor üzerindeki yük azaltıldığında motor hızında artış meydana gelmektedir. Bu durum bazı çalışma noktalarında ciddi problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

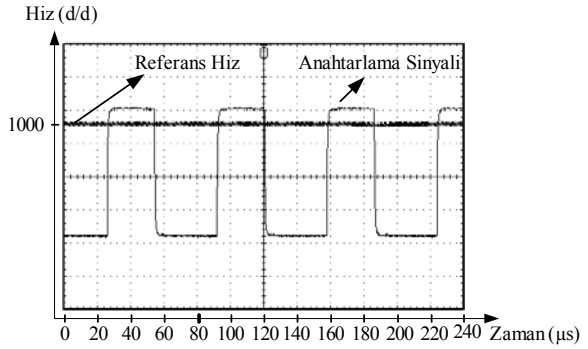
Gerçekleştirilen hız kontrol devresi ile yapılan deneyden alınan değişik yük durumlarındaki anahtarlama sinyalleri Şekiller 12 ve 13’de görülmektedir.



**Şekil 11.** Motor hızının referans hızı takip etmesi (Following the reference speed by motor speed)



**Şekil 12.** Yük altında anahtarlama sinyali ile motor hız değişim sinyali eğrileri (Waveforms of the motor speed and switching signals under load)



**Şekil 13.** Yüksüz durumda anahtarlama sinyali ile motor hız değişim sinyali eğrileri (Waveforms of the motor speed and switching signals at no-load)

Şekil 12’de görüleceği üzere motor üzerine yük alındığında anahtarlama sinyali artarak rotor devresi direncini azaltmaktadır.

Azalan rotor direnci, artan yüke karşılık motor hızındaki azalmayı dengeleyerek, motor hızının sabit kalmasını sağlamaktadır. Bu durum matematiksel olarak belirtilecek olunursa, Şekil 12’de verilen anahtarlama durumunda (6) nolu eşitlikten yararlanarak;

$$\alpha = \frac{3}{3 + 0,2} = 0,9375$$

olarak bulunur. Bu değer (7) nolu eşitlikte yerine yazılırsa, etkin rotor direnci;

$$R_{De} = 40 \cdot (1 - 0,9375) = 2,5 \Omega$$

olarak bulunur. Hesaplanan bu değerler (5) nolu eşitlikte yerine yazılırsa, tork değeri;

$$T = 1,668 \text{ Nm olarak bulunur.}$$

Tersi durum ise, Şekil 13’de görülmektedir. Motor üzerinde bulunan yük azaltıldığında anahtarlama sinyali azalarak rotor devresi direncini artırmaktadır. Artan rotor direnci, azalan yüke karşılık motor hızındaki artışı dengeleyerek, motor hızının sabit kalmasını sağlamaktadır.

Şekil 13’de verilen anahtarlama durumunda ise, (6) nolu eşitlikten yararlanarak;

$$\alpha = \frac{2}{2+1,2} = 0,625$$

olarak bulunur. Bu değer (7) nolu eşitlikte yerine yazılırsa, etkin rotor direnci;

$$R_{De} = 40.(1-0,625) = 15\Omega$$

olarak bulunur. Hesaplanan bu değerler (5) nolu eşitlikte yerine yazılırsa, tork değeri;

$$T=0,847 \text{ Nm olarak bulunur.}$$

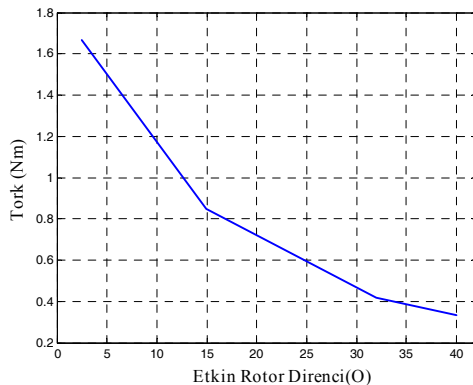
Değişik  $\alpha$  değerleri için hesaplanan etkin rotor direnci ve tork değerleri Tablo 1’de görülmektedir. Bu değerler yardımıyla çizilen Tork-Rotor Etkin Direnci grafiği ise Şekil 14’te görülmektedir.

**Tablo 1.** Değişik  $\alpha$  değerleri için hesaplanan etkin rotor direnci ve tork değerleri (Effective rotor resistance and torque values for various  $\alpha$  values)

$\alpha$	$R_{De} (\Omega)$	T (Nm)
0	40	0,334
0,2	32	0,416
0,625	15	0,847
0,9375	2,5	1,668

Şekil 5 incelenecek olunursa, motorun anma hız değerlerine yakın noktalarda çalışması durumunda, aynı hız değerinde rotor etkin direnci büyüdükçe, motorun üretmiş olduğu tork değerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum yukarıda hesaplanan değerler yardımıyla çizilen Şekil 14’deki Tork-Rotor Etkin Direnci grafiğinde de açıkça görülmektedir.

RSAM’ un sabit hız değerinde çalışmasını sağlamak amacıyla, rotor devresine bağlanan statik ayarlı yükün değeri motor üzerindeki yüke bağlı olarak sürekli değişmekte, bu durum ise motorun üretmiş olduğu torku doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sabit tork uygulaması gereken yerlerde bu tür sistemler kararsız çalışmaktadır. Yapılan diğer bir deneysel çalışmada ise değişik anahtarlama oranlarında motor hızının



**Şekil 14.** Tork-rotor etkin direnci grafiği (Variation of torque versus effective rotor resistance)

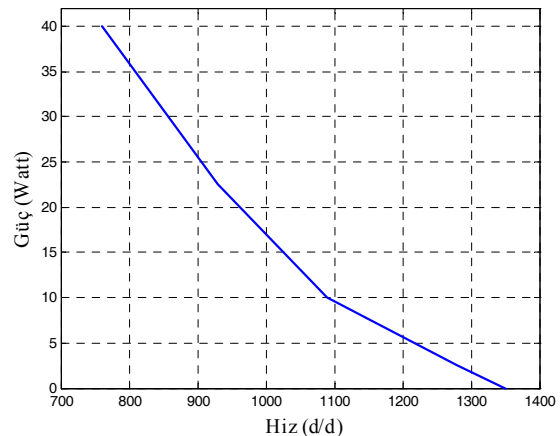
değişimi ve harici direnç üzerinde harcanan güç değerleri incelenmiş ve sistemin verim analizi yapılmıştır. Değişik anahtarlama oranlarına göre ölçülen hız ve harici direnç üzerine düşen gerilim değerleri, hesaplanan güç ve verim değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de yer alan değerler kullanılarak her hız değeri için harici direnç üzerinde harcanan güç değerleri hesaplanmış ve bu değerler yardımıyla çizilen Hız- Harici Direnç Gücü grafiği ise Şekil 15’te verilmiştir.

**Tablo 2.** Değişik anahtarlama oranlarına göre hız, harici direnç üzerine düşen gerilim, harici direnç üzerinde harcanan enerji ve verim değerleri (Values of speed, efficiency, voltage and power consumed on the external resistance at different duty cycle)

Anahtarlama Oranı (%)	n(d/d)	$V_{RD}(V)$	$P_{RD}(W)$	$\eta(\%)$
0	760	40	40	48
25	930	30	22.5	60
50	1090	20	10	72
75	1280	10	2.5	77
100	1350	0	0	81

Tablo 2 incelenecek olunursa anahtarlama oranının sıfır olduğu durumda rotor etkin direnci harici direnç değeri olan  $40 \Omega$ ’a eşittir. Bu durumda akımın büyük kısmı rotor etkin direnci üzerinden akmakta ve hız değeri buna bağlı olarak düşmektedir. Anahtarlama oranı %25’ e ayarlandığında rotor etkin direnci  $30 \Omega$  olmakta ve hız değeri yükselmektedir. Bu şekilde anahtarlama oranı yükseldikçe rotor etkin direnci azalmakta ve motorun hızı anma değerine doğru yaklaşmaktadır. Şekil 15 incelendiğinde rotor anma değerine doğru hızlandıkça rotor etkin direnci üzerinde harcanan güç değeri de azalmaktadır.

Anahtarlama oranının %100 olduğu durumda harici direnç üzerinden geçen akım değeri sıfır olmakta böylece harici direnç üzerinde harcanan güçte sıfır olmaktadır. Sonuç olarak rotor enerjisi harici bir direnç üzerinde kontrollü olarak harcadığı için hız kontrolü sağlanmaktadır. Tablo 2’de verilen harici



**Şekil 15.** Rotor hızı - harici direnç gücü grafiği (Rotor speed versus power of rotor resistance)



direnç üzerinde harcanan güç değerlerini kullanarak sistemin değişik hız değerlerindeki verimini hesaplamak mümkündür. 4 nolu eşitlik yardımıyla Tablo 2’de verilen hız değerleri için rotor devresine aktarılan giriş gücü değerleri hesaplanmış ve sistemin verimi her hız değeri için bulunmuştur. Hesaplanan verim değerleri Tablo 2’de en sağdaki sütunda verilmiştir. Verim hesabı yapılırken stator devresi kayıpları, anahtarlama kayıpları, sürtünme ve rüzgar kayıpları ihmal edilmiştir. Hesaplanan verim değerleri incelendiğinde gerçekleştirilen sistemin sürekli çalışma durumunda özellikle düşük hız değerlerinde verimsiz çalıştığı gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, rotoru sargılı asenkron motorun rotor devresinde üretilen alternatif gerilim bir köprü doğrultucu yardımıyla doğrultulmuş ve elde edilen güç rotor devresine bağlanan bir harici direnç üzerinde harcanmıştır. Gücün direnç üzerinde kontrollü olarak harcanması için, dirence paralel olarak bir IGBT bağlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen hız kontrol devresiyle RSAM’un rotor direnci, dirence bağlı olarak rotor hızı ve torku, IGBT’ nin darbeleme oranına ve dolayısıyla kaymaya bağlı olarak, ayar edilebilmiştir. Ayrıca, geliştirilen hız kontrol devresinde geri beslemeli PI denetleyici kullanılarak, motor hızının sabit kalması için gerekli anahtarlama sinyali otomatik olarak sistem tarafından sağlanmıştır. Hız denetleyicisi olarak PI denetleyici kullanılması sistemin tepkisini ve kararlı duruma geçirme zamanını kısaltmıştır. Buna ek olarak, hız kontrol devresinde analog devre elemanları yerine mikrodenetleyici kullanılması devrenin gürültü bağımlılığını azaltmış, hız kontrol sisteminde kontaktör ve reosta gibi mekanik elemanlar olmadığından, sistemin ömrü uzatılmış ve hız kontrolünde kullanım kolaylığı sağlanarak hassasiyet artırılmıştır. Verim analizi yapılarak, gerçekleştirilen sistemin düşük hız sürekli çalışma durumunda veriminin önemli ölçüde düştüğü be nedenle kullanıma uygun olmadığı görülmüştür.

## SEMBOLLER (Nomenclature)

$V_1$	: Stator gerilimi (V)
$V_r$	: Rotor tarafına aktarılmış stator gerilimi (V)
$I_r$	: Rotor akımı (A)
$I_s$	: Stator akımı (A)
$X_T$	: Rotor tarafına göre toplam stator ve rotor kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
$R_r$	: Rotor direnci ( $\Omega$ )
$L_r$	: Rotor endüktansı (Henry)
$R_s$	: Stator direnci ( $\Omega$ )
$L_s$	: Stator endüktansı (Henry)
$s$	: Rotor kayması
$X_r$	: Rotor kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
$X_s$	: Rotor tarafına aktarılmış stator kaçak reaktansı ( $\Omega$ )

$R_D$	: Harici bağlanan direnç değeri ( $\Omega$ )
$R_{De}$	: Harici bağlanan direncin etkin değeri ( $\Omega$ )
$T$	: Motorun ürettiği olduğu tork değeri (Nm)
$k_p$	: Oransal kazanç katsayısı
$k_i$	: İntegral kazanç katsayısı
$P_m$	: Üretilen mekaniksel güç (W)
$n_r$	: Rotor hızı (d/d)
$a$	: Stator ile rotor arasındaki dönüştürme oranı

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çolak, İ., **Asenkron Motorlar**, Nobel Yayınları, Ankara, 2001.
2. Filho, R., Sanchez, B., Sanchez, E. & Armando, V., “Control Of Wound-Rotor Induction Machine”, **International Conference on Power Electronics and Drive Systems Proceedings**, Singapore, 97-103, 26-29 May 1997
3. Lesan, S., Smiai, M. & Shepherd, W., “Control of Wound Rotor Induction Motor Using Thyristors in the Secondary Circuits”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol 32, No.2, 335-344, 1996.
4. Moo, C. S., Wei, C. C., Huang, C. L. & Chen, C. S., “Starting Control of Wound-Rotor Induction Motors By Using Chopper-Controlled Resistance in Rotor Circuit”, **Industry Applications Society Annual Meeting**, 2295-2300 1989.
5. Ramamoorthy, M. & Wani, N. S., “Dynamic Model for a Chopper-Controlled Slip-Ring Induction Motor”, **IEEE Transactions on Ind. Electronics and Control Inst**, Vol.25,No.3, 260-266, 1978.
6. Abdelfattah, M. Y. & Ahmed, M. M., “An Artificial Neural Network-Based Chopper-Controlled Slip-Ring Induction Motor” **Electrotechnical Conference**, Melecon, 142-146, May 7-9, 2002.
7. Shoihet, A. & Slonim, M. “New Topology for soft starting and speed regulation of wound rotor asynchronous machine using IGBT controller”, **43rd IEEE Midwest Symp. On Circuits and Systems**, Vol. 2, 630-632, Aug 8-11 2000.
8. Demirtaş, M., “Rotoru Sargılı Asenkron Motorlarda Yüksek Frekansta Çalışan Yarıiletken Kullanarak Hızın Kontrol Edilmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
9. Filho, R. & Sanchez, B., “On the wound-rotor induction machine control”, **Electrical Machines and Drivers Conference**, TB3/9.1 - TB3/9.3 May, 1997.
10. Çalikoğlu, D. ve Çolak, İ. “Rotoru Sargılı Asenkron Motorlarda Yarıiletken Kullanarak Hızın Kontrol Edilmesi”, **Gazi Üniv. Tek. Eğt. Fak. Dergisi**, 1988.
11. Wani, N.S. & Ramamoorthy, M., “Chopper controlled slipring induction motor”, **Industrial Electronic and Control Instrumentation**, Vol. 24, No 2, 153-161 1977.



12. Sen, P. C. & Ma, K. H. J., "Rotor chopper control for induction motor drive", **TRC Strategy, IEEE Trans. Ind. Appl**, 1975
13. Demirbaş, Ş. "İnternet tabanlı PI kontrollü bir doğru akım motoru deney seti", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 22, No 2, 401-410, 2007
14. "PIC16F87X Data Sheet", Microchip Technology Inc., 2001, <http://www.microchip.com>
15. "2MBI1004A-120 IGBT Module Data Sheet", Fuji Electric, March 2005, <http://www.fujielectric.de>
16. "IGBT-Driving Hybrid ICs(EXB8-Series) Application Manual", Fuji Electric, April, 2004, <http://www.fujielectric.de>

#### EK (APPENDIX)

Bu çalışmada kullanılan RSAM "SIEMENS" marka olup etiket değerleri aşağıda belirtilmiştir.

P	=1,5 kW
Cosφ	=0,73
n <sub>r</sub>	=1365 d/d
Stator/RotorBağlantısı	=Y/Y
V <sub>1</sub>	=380 V
I <sub>s</sub>	=4,5 A
E <sub>r</sub>	=85 V
I <sub>r</sub>	=12,5 A

Motorun stator ve rotor faz sargılarına ait direnç ve endüktans değerleri, ampermetre-voltmetre metodu ile ölçülerek aşağıda belirtilmiştir.

R <sub>s</sub>	= 6.66 Ω
L <sub>s</sub>	= 216 mH
X <sub>s</sub>	= 67,85 Ω
R <sub>r</sub>	= 0,357 Ω
L <sub>r</sub>	= 34 mH
X <sub>r</sub>	= 10.7 Ω
a	= 4.47