

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK -ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAPAMA AÇISININ ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARIN  
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elk. Tek. Öğrt. Talat ÖZDEN**

**AGUSTOS 2006  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK –ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAPAMA AÇISININ ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARIN  
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**Elk. Tek. Öğrt. Talat ÖZDEN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
Yüksek Lisans ( Elektrik Mühendisliği )  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.07.2006  
Tezin Savunma Tarihi : 22.08.2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR  
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. H. İbrahim OKUMUŞ  
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2006**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, asenkron motorların doğrudan veya kumanda elemanları ile yol verilmeleri esnasında kapama açısının makine dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır.

Bu çalışmayı sürdürürken desteklerini esirgemeyen ve onları ihmal etmeme katlanan anneme, kardeşlerime ve bu çalışmanın bittiğini göremeden aramızdan ayrılan babam SEYFETTİN SELİM ÖZDEN'e sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni yönlendiren Sayın Hocam Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR'a gösterdiği ilgi, güler yüz ve yardımlarından ötürü saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

En sıkıntılı anında bile her türlü desteği sunmakta geri kalmayan, mesleki konularda ufkumu açan ve bu çalışma boyunca hep yanımda olan Sayın Öğr. Gör. Selami KESLER hocama teşekkür ederim.

Kıymetli arkadaşlarım Kemal BAYRAM, Adem BAYRAM ve Trabzon Endüstri Meslek Lisesi – Elektronik Bölümü öğretilerinden Volkan AKTÜRK'e çalışmalarım süresince gösterdikleri ilgi ve destekleri için minnettarım.

Her türlü desteği sunmaktan geri kalmayan ve beni gayretlendiren Gümüşhane MYO Müdürü Sayın Prof. Dr. Basri ERTAŞ'a, destekleri için Öğr. Gör. Muhammet BAKİ, Öğr. Gör. Kurtuluş DEMİR'e teşekkür ederim. Ayrıca Gümüşhane MYO çalışanlarının bu çalışma boyunca gösterdikleri sabır ve hoşgöründen dolayı şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı yapabilmek için "Akıllı Sistemler – ASOL" laboratuvarını bize açan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. İ.Hakkı ALTAŞ ve Yrd. Doç. Dr. H. İbrahim OKUMUŞ hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın ilk yıllarında beni yönlendiren ilkokul öğretmenim Emine KELEŞ ve tarih öğretmenim Hüseyin TÜRKFİLİZ hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Talat ÖZDEN  
Trabzon 2006

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| ÖNSÖZ .....  | II              |
| İÇİNDEKİLER .....  | III             |
| ÖZET .....   | V               |
| SUMMARY .....  | VI              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | VII             |
| TABLolar DİZİNİ .....  | IX              |
| SEMBOLLER DİZİNİ .....   | X               |
| 1. GENEL BİLGİLER .....  | 1               |
| 1.1. Giriş .....   | 1               |
| 1.2. Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar .....                                       | 2               |
| 1.3. Doğrusal Dönüşümler .....   | 4               |
| 1.3.1. Faz İndirgemesi (Faz Transformasyonu) .....                                   | 6               |
| 1.3.2. Referans Eksen Sistemleri Arasında İndirgeme (Komutator Transformasyonu)..... | 8               |
| 1.4. Asenkron Makineler .....  | 13              |
| 1.4.1. Asenkron Makinenin Gerilim Denklemleri .....                                  | 13              |
| 1.4.2. Stator Parametrelerini Rasgele Eksen Sistemine İndirgeme.....                 | 18              |
| 1.4.3. Rotor Parametrelerini Rasgele Eksen Sistemine İndirgeme.....                  | 20              |
| 1.4.4. Asenkron Makine Gerilim Denklemlerinin Rasgele Eksen Sisteminde Yazılması.    | 21              |
| 1.4.5. Asenkron Makine Moment Denklemlerinin Rasgele Eksen Sisteminde Yazılması      | 28              |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....  | 31              |
| 2.1. Bilgisayar destekli modelleme.....  | 31              |
| 2.2. Denetleyici Arabirimler.....  | 36              |
| 2.3. PIC 16F877A mikrodnetleyicisi.....  | 39              |
| 2.4. Faz Gerilimlerini Anahtarlama.....  | 41              |
| 2.5. Gerçekleştirilmiş Devre Modeli.....   | 43              |
| 2.5.1. Denetleme Devresi.....  | 43              |
| 2.5.2. Güç Devresi.....  | 52              |
| 2.6. Motor Parametrelerinin Belirlenmesi.....  | 56              |
| 2.7. Momentin Deneysel Olarak Belirlenmesi.....                                      | 56              |
| 3. BULGULAR.....   | 59              |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1. | En Fazla Negatif Moment Salınımları Olan Anahtarlama Açılırları ..... | 60 |
| 3.2. | En Az Negatif Moment Salınımları Olan Anahtarlama Açılırları .....    | 62 |
| 4.   | SONUÇLAR .....  | 64 |
| 5.   | ÖNERİLER .....  | 65 |
| 6.   | KAYNAKLAR .....   | 66 |
|      | EKLER .....   | 68 |
|      | ÖZGEÇMİŞ .....  | 77 |

## ÖZET

Bu çalışmada, temel olarak üç fazlı enerji sisteminden beslenen motorlar için kapama açısının yol alma momentlerine ve makinenin dinamik davranışına olan etkisi incelendi.

Doğrudan ya da kumanda sistemleri ile yol verilen motorlarda, tek ve üç fazlı anahtarlama elemanları mekanik olup her fazın kapama açısı, arıza ya da herhangi bir sebepten dolayı, farklı olabileceğinden faz gerilimleri motora her seferinde farklı anlarda uygulanmış olmaktadır.

Bu nedenle her bir fazı bağımsız olarak farklı açılarda kapatan kullanıcı giriqli PIC 16F877A denetleyicili bir güç devresi gerçekleştirilmiştir. Güç devresinde iki yönlü akım geçişine izin veren köprü bağlantılı hızlı diyot ve IGBT kullanılmıştır. Mikrodenetleyici çıkışında ise yalıtım ve sürücü devresi olarak TLP2200 yongası bulunmaktadır.

Sistemin matematiksel modeli VISSIM paket yazılımında oluşturulmuş bilgisayar benzetimi ile farklı kapama açılarının Asenkron motorun dinamik davranışına etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen mikrodenetleyicili anahtarlama devresi ile deneysel sonuçlar alınmış olup benzetim sonuçları ile desteklenmiştir.

Yapılan benzetim ve deneysel çalışmada en az ters yönlü moment oluşturan, motor yol almasını kolaylaştıran en iyi anahtarlama açıları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kapama Açısı, Asenkron Motor, PIC 16F877A

## SUMMARY

### **The Effect of the Closing Angle on the Dynamic Behavior for the Three Phase Induction Motors**

In this study, the effect of the closing angle on starting moments and dynamic behavior of the induction machine fed by three phase system is investigated.

As the switching elements of the machine with direct started or controlled systems has mechanical contacts, the closing angle of every phase can be different due to disorder or any reason, phase voltages are applied in different angle for the faulty contact.

Therefore, a power circuit, which closes every phase to be independent in different angles, with PIC 16F877A microcontroller having manual inputs, is implemented. High-speed diodes with bridge connection, which gives permission for current passing with two directions in the power circuit, and IGBT are used. There is also TLP2200- IGBT and MOSFET driver as insulation and driver circuit in microcontroller output.

Mathematical model of the system is formed in VISSIM software, and the effect of different closing angles on dynamic behavior of induction machine is investigated with computer simulations. Experimental results are obtained with performed switching circuit with microcontroller and supported with simulation results.

In the simulation and experimental study, the optimum closing angles which form the lowest moment response in opposite direction and soft starting are determined.

**Key words:** Closing angle, Induction Machine, PIC 16F877A, Microcontroller

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 1.1. Gerilim denetleyicisinin basit devresi .....   | 2               |
| Şekil 1.2. Sayısal denetleyicili sistem .....   | 3               |
| Şekil 1.3. Üç fazlı abc sisteminden eşdeğer iki fazlı qd sisteme indirgeme.....   | 6               |
| Şekil 1.4. Duran qd eksen sisteminden $\omega$ hızı ile dönen $\alpha\beta$ eksen sistemine geçiş.....  | 8               |
| Şekil 1.5. Üç fazlı duran abc eksen sisteminden, iki fazlı $\omega$ hızıyla dönen $\alpha\beta$ eksen sistemine indirgeme.....  | 11              |
| Şekil 1.6. Üç fazlı, $\omega_r$ hızıyla dönen $abc$ eksen sisteminden, iki fazlı, $\omega$ hızıyla dönen, $\alpha\beta$ eksen sistemleri arasında indirgeme ( $\omega > \omega_r$ ) ..... | 12              |
| Şekil 1.7. Stator ve rotor parametrelerinin senkron hızla hareket eden referans eksen sistemini indirgemesi.....  | 12              |
| Şekil 1.8. İki kutuplu, yıldız bağlı simetrik asenkron makine.....  | 14              |
| Şekil 1.9. Üç faz stator parametrelerinin $\omega$ hızıyla hareket eden referans eksen sistemine indirgenmesi .....   | 18              |
| Şekil 1.10. Üç faz rotor parametrelerinin $\omega$ hızıyla hareket eden referans eksen sistemine indirgenmesi.....  | 21              |
| Şekil 1.11. Simetrik, üç fazlı ASM'nin, iki fazlı rasgele eksen sistemindeki eşdeğer devresi.....   | 26              |
| Şekil 2.1. Bir mikroişlemci sisteminin blok diyagramı .....   | 38              |
| Şekil 2.2. Mikrodenetleyiciler .....  | 38              |
| Şekil 2.3. Bir mikrodenetleyici sistemin temel bileşenlerinin blok diyagramı .....  | 39              |
| Şekil 2.4. PIC 16F877A'nın giriş – çıkış bacak yapısı .....   | 40              |
| Şekil 2.5. PIC programlama ve deneme kartı ( PIC DK V2.1a ).....  | 41              |
| Şekil 2.6. Anahtarlama açısı denetim sistemi blok diyagramı .....   | 42              |
| Şekil 2.7. İki yönlü anahtarlama devresi .....  | 43              |
| Şekil 2.8. Proteus paket programı ile hazırlanmış devre benzetimi.....  | 44              |
| Şekil 2.9. Denetleme devresi açılı giriş ekranı ve tuş takımları .....  | 45              |
| Şekil 2.10. Anahtarlama açısı giriş ekranı.....   | 45              |
| Şekil 2.11. Anahtarlama açılarının girişinin görselleştirildiği LCD.....  | 46              |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.12. | Örnekleme Devresi.....   | 47 |
| Şekil 2.13. | Örnekleme İşareti (Fluke 199C marka osiloskop ile alınmıştır).....                   | 47 |
| Şekil 2.14. | Kaydırılmış tetikleme işaretleri.....  | 48 |
| Şekil 2.15. | R fazı anahtarlama açılarının osiloskop ekran görüntüsü.....                         | 49 |
| Şekil 2.16. | Başla anahtarına basıldıktan sonraki görsel uyarı mesajı .....                       | 50 |
| Şekil 2.17. | Dur anahtarına basıldıktan sonraki görsel uyarı mesajı .....                         | 50 |
| Şekil 2.18. | Denetleme ünitesi baskı devre şeması.....  | 51 |
| Şekil 2.19. | Denetleme ünitesi devre resmi.....   | 51 |
| Şekil 2.20. | TLP 2200'ün bacak numaraları ve iç devresi .....                                     | 52 |
| Şekil 2.21. | İki yönlü anahtarlama güç devresinin akım akış şeması .....                          | 53 |
| Şekil 2.22. | Güç ünitesi baskı devre şeması .....   | 54 |
| Şekil 2.23. | Güç devresi resmi.....   | 55 |
| Şekil 2.24. | Momentin analog benzetim devresi .....   | 57 |
| Şekil 2.25. | Moment analog benzetim devresinin Ms ihmal edilmiş My yokken ki bağlantı şeması..... | 58 |
| Şekil 2.26. | 60°,90° ve 60°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı.....       | 60 |
| Şekil 2.27. | 60°,90° ve 90°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı.....       | 61 |
| Şekil 2.28. | 330°,300° ve 270°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı.....    | 61 |
| Şekil 2.29. | 0°,0° ve 0°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı....           | 62 |
| Şekil 2.30. | 90°,90° ve 90°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı.....       | 63 |
| Şekil 2.31. | 90°,60° ve 30°'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı.....       | 63 |

## TABLO DİZİNİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Tablo 2.1. TLP 2200 entegresinin doğrulama tablosu .....                        | 52              |
| Tablo 2.2. LEYBOLD marka 0,37 kW'lık sincap kafesli ASM'nin parametreleri ..... | 56              |
| Tablo 3.1. En fazla negatif moment salınımları olan anahtarlama açıları.....    | 59              |
| Tablo 3.2. En az negatif moment salınımları olan anahtarlama açıları .....      | 60              |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                      |   |
|----------------------|---|
| $f$                  | :Sürtünme katsayısı   |
| $F$                  | :Faz dönüşüm matrisi  |
| $f_{abcs}, f_{abcr}$ | :Stator, rotor sargılarına ait mmk'ler  |
| $f_{qds}, f_{qdr}$   | :Stator, rotor sargılarına ait mmk'lerin eşdeğer iki fazlı eksen sistemindeki karşılığı |
| $i_{abcs}, i_{abcr}$ | :Üç fazlı abc sisteminde stator, rotor faz akımları                                     |
| $i_{qds}, i_{qdr}$   | :Stator, rotor faz akımlarının eşdeğer iki fazlı eksen sistemindeki karşılığı           |
| $i'_{abcr}$          | :Statora indirgenmiş rotor akımları   |
| $J$                  | :Eylemsizlik momenti  |
| $k$                  | :Stator-rotor dönüştürme oranı  |
| $K_s, K_r$           | :Stator, rotor denklemlerini indirgeme matrisi  |
| $K_{qd}$             | :Dönüşüm matris katsayısı   |
| $L_s$                | :Stator sargılarına ait endüktans   |
| $L_r$                | :Rotor sargılarına ait endüktans  |
| $L_{sr}$             | :Stator-rotor ortak endüktans   |
| $n$                  | :Devir sayısı (d/dk)  |
| $N_s, N_r$           | :Stator, rotor faz sarım sayısı   |
| $p$                  | :Çift kutup sayısı  |
| $r_s, r_r$           | :Stator, rotor faz sargı dirençleri   |
| $s$                  | :Kayma  |
| $T$                  | :Eksen sistemleri arasında dönüşüm sağlayan matris                                      |
| $TF$                 | :Rasgele eksen sistemine dönüşüm sağlayan matris  |
| $M_e$                | :Makinede üretilen moment   |
| $M_y$                | :Yük momenti  |
| $M_i$                | :Makinede indüklenen moment   |
| $M_s$                | :Sürtünme momenti   |
| $V_{abcs}, V_{abcr}$ | :Üç fazlı abc sisteminde stator, rotor faz gerilimleri                                  |
| $V_{qds}, V_{qdr}$   | :Stator, rotor faz gerilimlerinin eşdeğer iki fazlı eksen sistemindeki karşılığı        |
| $V'_{abcr}$          | :Statora indirgenmiş rotor gerilimleri  |
| $X_M$                | :Stator-rotor ortak endüktansı  |

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $L_t$                            | : Mıknatıslanma akısı endüktans katsayısı                    |
| $x_{1s}, x'_{1r}$                | :Stator, rotor kaçak reaktansları                            |
| $\alpha, \beta$                  | : $\omega$ hızıyla hareket eden eksen sistemi                |
| $\theta$                         | : $\alpha$ ile $q_s$ eksenleri arasındaki açı                |
| $\theta_r$                       | : $q_s$ ile $q_r$ eksenleri arasındaki açı                   |
| $\delta$                         | : $q_r$ ile $\alpha$ eksenleri arasındaki açı                |
| $q_r, d_r$                       | :Rotor hızıyla hareket eden eşdeğer iki fazlı eksen sistemi  |
| $q_s, d_s$                       | :Statorun referans seçildiği eşdeğer iki fazlı eksen sistemi |
| $\lambda_{abcs}, \lambda_{abcr}$ | :Stator, rotor sargılarına ait akılar                        |
| $\lambda'_{abcr}$                | :Statora indirgenmiş rotor akıları                           |
| $\varphi_{qds}, \varphi'_{qdr}$  | :İndirgenmiş stator, rotor akıları                           |
| $\omega, \omega_r, \omega_s$     | :Rasgele eksen sisteminin, rotorun, döner alanın açısal hızı |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Elektrik enerjisinin üretimine başlandığı yıllarda, üretim ve dağıtımın doğru akımla yapılıyor olması ve üretim sırasında gerilim seviyesinin düşük oluşu, verimsiz bir tüketime neden oluyordu. Senkron generatörler ve transformatörler 1885-86 yıllarında bilinmesine rağmen, alternatif akım motorları henüz bilinmiyordu. 1880'li yılların sonlarında, Nikola Tesla (1856-1943) tarafından gerçekleştirilen buluşla, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde yeni bir dönem başlamıştır. Tesla'nın bu buluşu ilk alternatif akım motoru örneğidir. Bununla ilgili ilk patent, 1888 yılında Tesla tarafından alınmış, bu konuya büyük ilgi duyan Westinghouse şirketi bu yeni makineyi geliştirerek kullanıma sunmuştur [1].

Doğru akım makinelerinde, Fırça-Kollektör takımının neden olduğu arızalar yüzünden, ortaya çıkan işletme zorluğu ve sık sık bakım ve onarıma ihtiyaç duyması, bu makinelerin yerine daha dayanıklı ve işletmesi kolay olan Asenkron Makineleri (ASM) gündeme getirmiştir. Sanayide sıklıkla kullanılan asenkron makinelerin tercih edilme nedenleri, az arıza yapmaları, sağlam ve ucuz olmaları, bakıma ihtiyaç duymamalarıdır. Çalışma ilkesi bakımından bu makinelere "İndüksiyon Makineleri" de denir. Asenkron makineler genellikle motor olarak çalıştırılırlar; fakat belirli koşullar altında generatör olarak da kullanılabilirler.

Asenkron makineler elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme yoluyla geniş bir uygulama alanında kullanılırlar. Bu makineleri senkron makinelerden ayıran en temel özellik senkron hız dışında da enerji dönüşümü yapabilmeleridir. Bu hız, motor olarak çalışırken senkron hızdan düşüktür. Makine isminin "**Asenkron**" oluşu; stator döner alan hızı ile rotor dönüş hızı arasındaki farktan dolayıdır.

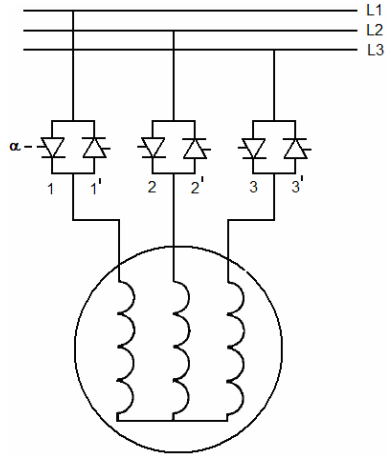
Bu makineler bir, iki, üç ve çok fazlı olmak üzere bir çok çeşitte imal edilebilirler. Yüklü çalışma ile yüksüz çalışma arasında hız değişimi az olduğundan, yük değişmelerine karşılık sabit hızlı kabul edilirler. Bunun yanında bazı nedenlerden dolayı uygulamada zorluklarla karşılaşılır. Bunlardan ilki, hız denetimi kolay ve ucuz değildir. İkincisi, küçük yüklerde güç katsayısı düşüktür. Üçüncü olarak; yol alma sırasında besleme sisteminden anma akımının beş ila yedi katı fazla akım çekmeleridir [1].

Yukarda ifade edilen nedenlerden dolayı Asenkron Makineler işletme sırasında yardımcı elemanlara ihtiyaç duyarlar. Bu aşamada devreye sürücü düzenekler girer. Bu düzenekler gerekli tahrik gücünü, ekonomik ve istenilen şekilde olmasını sağlar [2].

Asenkron motorların gücü arttıkça, doğrudan enerjilendirilmesi söz konusu olmasa da besleme kaynağının anahtarlama anındaki faz gerilimi geçiş durumları makinenin dinamik davranışını etkilemektedir. Bu çalışmada da besleme kaynağının faz gerilimi anlık durumlarına göre anahtarlama açıları bağımsız değiştirilerek, kumanda sistemlerinde muhtemel var olan gecikmeler ve anlık anahtarlama etkileri dinamik olarak incelenerek deneysel olarak desteklenmiştir.

## 1.2. Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

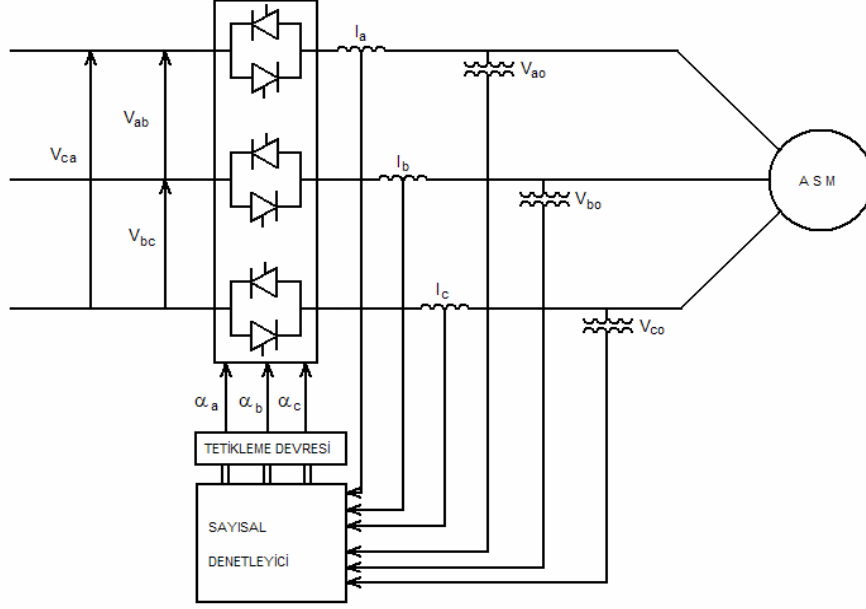
Deleroi [3], asenkron makinelerin geçici hal davranışlarının iyileştirilmesi konusunda yaptığı çalışmada, anahtarlama açısının motor dinamik davranışı üzerindeki etkisini göstermiş ve makineye yol verirken kullanılan tristörlerin tetikleme açıları için yeni geliştirilmiş dinamik bir fonksiyon kullanmıştır. Ancak anahtarlama süresi dört-beş periyot boyunca devam ettirilmiş ve Şekil 1.1.'de de görüldüğü gibi kullandığı tristörlü güç elektroniği sisteminden dolayı anahtarlama açıları  $60^\circ$  altına inememiştir.



Şekil 1.1. Gerilim denetleyicisinin basit devresi

Oyama ve Lipo [4], asenkron makinelerin yol verme anındaki şebeke gerilimlerinin dengesiz olabileceği durumuna göre incelemeler yapmış ve faz gerilim denetleyicileri ile

yine anahtarlama yöntemine dayalı Şekil 1.2.'de görülen yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir.



Şekil 1.2. Sayısal denetleyicili sistem

Akıllı sistem içeren çalışmalarda ise, en iyi çözüm aranmış olup, yumuşak yol verme ve motor kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir. Sistemin dinamik davranışı bilgisayar benzetimi ile incelenmiş ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir [5].

Iyenger ve Sastry'in [6] yapmış olduğu çalışmada, bulanık mantık denetimli uygun yol verici gerilim denetleyicisi kullanılarak, asenkron makinenin geçici durum davranışı düzeltilmeye çalışılmıştır. Ancak besleme kaynağı faz gerilimleri anlık geçişleri ve kapama açısı dikkate alınmamış, motora doğrudan denetleyici çıkış gerilimleri bulanık mantık tabanlı olarak uygulanmıştır.

Bir başka çalışma da ise [7], anahtarlama açılarının kapasitör tip tek fazlı asenkron motorun dinamik davranışı üzerine etkilerini incelemiştir. Yol verme sisteminde diğer çalışmalardan farklı bir AA anahtarlama sistemi kullanmış ve benzetim ile elde edilmiş sonuçları deneysel sonuçlarla desteklenmiştir. Ancak bu uygulamada da anahtarlama açısı girişleri elle ayarlı bir direnç yardımı ile ayarlandığından ve yol verme anahtar sistemi içerisinde yine tristör kullanıldığından belli açı aralığında anahtarlama yapılabilmektedir.

### 1.3. Doğrusal Dönüşümler

Üç fazlı bilezikli bir asenkron makine gerilim denklemleri matrisel olarak yazıldığında, endüktans katsayılarından meydana gelen matrisin, rotor konumuna bağlı olarak değiştiği, bu nedenle zamana bağımlı katsayılar içerdiği görülür. Makine gerilim denklemlerinden meydana gelen bu matris 6x6 boyutundadır ve doğrudan çözümü zordur.

Bilinen matris çözüm yöntemleri kullanılarak makine denklem sisteminin doğrudan çözümünün kolay olmayışı nedeniyle, çeşitli dönüşümler ( indirgemeler ) kullanılır. İndirgemeler sonucu, makine denklemlerine ait durum değişkenlerine ilişkin katsayı matrisi zamandan bağımsız, fakat durum değişkenlerine bağımlı doğrusal olmayan denklem sistemi haline gelir. İndirgeme sonucu elde edilen katsayılar matrisinin meydana getirdiği denklem sisteminin çözümü indirgeme yapılmadan önceki denklem sistemine göre oldukça kolaylaşır.

Asenkron makine gerilim denklemlerine uygulanan *faz indirgemesi* sonucunda, üç fazlı makine denklemleri, eşdeğer iki fazlı denklem sistemine indirgenir. Bu indirgeme sırasında, üç fazlı sistemden iki fazlı sisteme geçerken *mmk* ve *gücün* değişmediği kabul edilir. Yani, indirgeme sonucu elde edilen iki fazlı sistemle, eşdeğeri olduğu üç fazlı sistem *mmk* ve *güçler* bakımından birbirine eşittir. Eğer, indirgeme sırasında *mmk* ve *güçlerin* eşitliği dikkate alınmazsa; elde edilen eşdeğer sistemin davranışı, orjinal sistemin davranışını temsil etmez. Bunun için ayrıca dönüşüm yapmak gerekir. Bu durumu ortadan kaldırmak için, indirgeme sırasında *gücün* ve *mmk*'nin değişmediği kabul edilir ve indirgeme işlemlerine yansıtılırsa, elde edilen eşdeğer sistem doğrudan esas sistemin davranışını verir [8].

Faz indirgemesinden sonra uygulanacak ikinci indirgeme yöntemi olan eksen sistemleri arasındaki indirgeme (*komutatör indirgemesi*) sayesinde, rotor ve stator parametreleri arasında rotor hareketinden dolayı var olan zamana bağımlı değişim ortadan kaldırılır. Elde edilen yeni denklem sistemi sayesinde, ASM'nin dinamik davranışı doğru akım makinesinin dinamik davranışına benzer. Makinenin dinamik davranışını bu şekilde inceleyebilmek için, rotor ve stator parametrelerinden meydana gelen gerilim denklemlerini, seçilecek olan ortak referans eksen sistemine indirgemek gerekir. Bu indirgeme işlemleri sonucunda elde edilen katsayılar matrisi, tamamen zamandan bağımsız, katsayılarından meydana gelir [8].



Asenkron makine gibi düzgün hava aralığına sahip makinelerde indirgeme sırasında, referans eksenler farklı şekillerde seçilebilir. Bu seçimlerden ilki, stator üzerine çakıştırılmış, *duran referans eksen sistemi*; ikincisi, hava aralığında döner alanla aynı hızda hareket eden, *senkron hızlı referans eksen sistemi* ve son olarak ta, rotor üzerinde rotorla aynı hızda hareket eden, *rotor hızlı referans eksen sistemi* seçilebilir.

Referans eksen sistemlerinin seçilmesinde, davranışı incelenecek makinenin çalışma şartları belirleyici olur. [9] kaynağında yer alan ve bu çalışmada da kullanılan  $\omega$  hızıyla hareket eden “*Rasgele Eksen Sistemine*” indirgenmiş ASM gerilim denklemlerinde, indirgeme yapılan referans eksen sisteminin hızı  $\omega$  ile gösterilmiştir. Burada,  $\omega$ ’nın alacağı değerler referans eksenin türünü belirleyecektir.

Şöyle ki ;

- a.  $\omega = 0$  seçildiğinde; referans eksen sistemi stator üzerinde “*duran eksen sistemi*”;
- b.  $\omega = \omega_r$  seçildiğinde; referans eksen sistemi rotor üzerinde “*rotor hızıyla dönen eksen sistemi*”;
- c.  $\omega = \omega_s$  seçildiğinde; referans eksen sistemi döner alan üzerinde “*senkron hızla dönen eksen sistemi*”; seçilmiş olur.

Referans eksen sistemlerinin seçilmesinde, makinenin çalışma şartlarının belirleyici olacağı daha önceden söylenmişti [9]. Bu şartlar aşağıda verilmiştir.

a. Statora uygulanan gerilimlerin dengesiz, rotora uygulanan gerilimlerin dengeli veya bileziklerin kısa devre olduğu çalışma şartlarının inceleneceği durumlarda, referans eksen sistemi olarak duran eksen sistemi seçilir ( $\omega = 0$ ).

b. Rotor sargılarına uygulanan gerilimlerin dengesiz, stator sargılarına uygulanan gerilimlerin dengeli olduğu çalışma şartlarının analizinde, referans eksen sistemi olarak, rotor hızıyla hareket eden eksen sistemi tercih edilir ( $\omega = \omega_r$ ).

c. Stator ve rotor tarafı için dengeli durumlar söz konusu olduğunda, referans eksen sistemi olarak, döner alan üzerinde senkron hızla hareket eden eksen sistemi, seçilmelidir ( $\omega = \omega_s$ ).

Zamana bağımlı katsayıların yer aldığı asenkron makine denklemlerine uygulanacak indirgemeler sayesinde, zamandan bağımsız katsayılı denklem sisteminin elde edileceği yukarıda açıklanmıştı. Bu indirgeme işlemleri, peş peşe uygulanan farklı iki indirgeme yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemler;

**a. Faz İndirgemesi( Faz Transformasyonu):** Bu indirgeme işlemi sayesinde, üç fazlı  $abc$  eksen sisteminde yazılmış makine denklem sistemi, eşdeğeri olan iki fazlı  $qd$  eksen sistemine indirgenir.

**b. Komutatör İndirgemesi (Eksen Sistemleri Arasında İndirgeme):** Stator ve rotor sargılarına uygulanan faz indirgenmesinden sonra, elde edilen iki fazlı eşdeğer eksen sistemlerini, istenen hızda farklı referans eksen sistemine indirgeme imkanı sağlar.

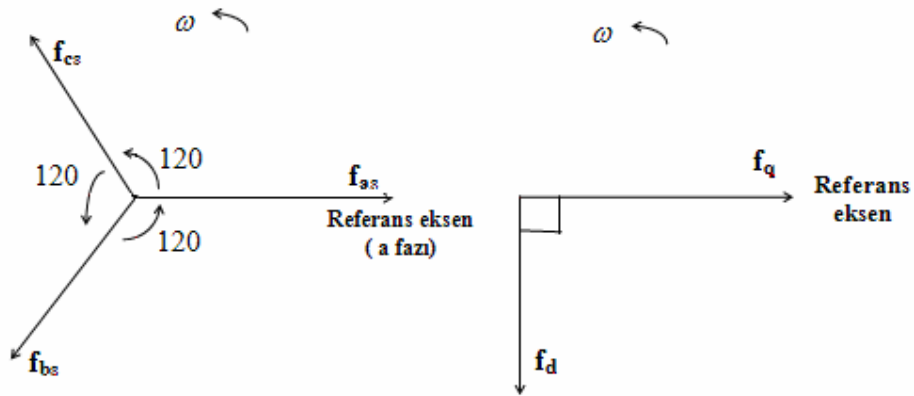
### 1.3.1. Faz İndirgemesi (Faz Transformasyonu)

Faz indirgemesi kullanılarak, üç fazlı asenkron makine gerilim denklemleri, eşdeğeri olan iki fazlı  $qd$  eksen sistemine dönüştürülür. Elde edilen iki fazlı model, ek olarak sıfır bileşenleri de içerir. Dengeli durumların incelenmesinde modeldeki sıfır bileşenlerin herhangi bir etkinliği yoktur. Ancak makinedeki dengesiz durumların incelenmesinde rol oynarlar. Bu nedenle dengeli durumlarda dikkate alınmazlar.

İndirgeme işlemi yapılırken eşdeğer iki sistemin;

- Bileşke  $mmk$ 'leri,
- Çekilen ve üretilen  $güçleri$  eşit olmalıdır.

Sonuç olarak elde edilen eşdeğer iki fazlı sistemin  $mmk$  ve  $gücü$ , orijinal sisteme eşit olacak şekilde indirgeme yapılır. Şekil 1.3.'de, indirgemeye ait yardımcı çizim görülmektedir.



Şekil 1.3. Üç fazlı  $abc$  sisteminden eşdeğer iki fazlı  $qd$  sisteme indirgeme

İndirgmeden önce üç fazlı  $abc$  sisteminin meydana getirdiği  $mmk$ , indirgeme sonucu elde edilen eşdeğer iki fazlı  $qd$  eksen sisteminin oluşturacağı  $mmk$ 'ye eşit olacaktır. İki

fazlı eksen sisteminde elde edilecek  $mmk$  'ler (1.1) denkleminde akımlara bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_0 \end{bmatrix} = N_a \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \sin(0) & \sin(-2\pi/3) & \sin(2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Bu denklem sistemiyle ifade edilen  $mmk$ 'ler, dönüşüm sonucu elde edilen eşdeğer sargılardan akan  $i_q$  ve  $i_d$  akımları tarafından oluşturulur. Bu akımların  $abc$  sistemindeki akımlar cinsinden karşılıkları denklem (1.2)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_0 \end{bmatrix} = K_{qd} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \sin(0) & \sin(-2\pi/3) & \sin(2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Güçlerin eşitliği gereğince gerilimler içinde aynı dönüşüm yapılır,

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_0 \end{bmatrix} = K_{qd} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \sin(0) & \sin(-2\pi/3) & \sin(2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

(1.1), (1.2), (1.3) denkleminde yer alan dönüşüm matrisine *faz dönüşüm matrisi* denir. Bu matrisi  $F$  ile gösterelim.

$$F = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \sin(0) & \sin(-2\pi/3) & \sin(2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

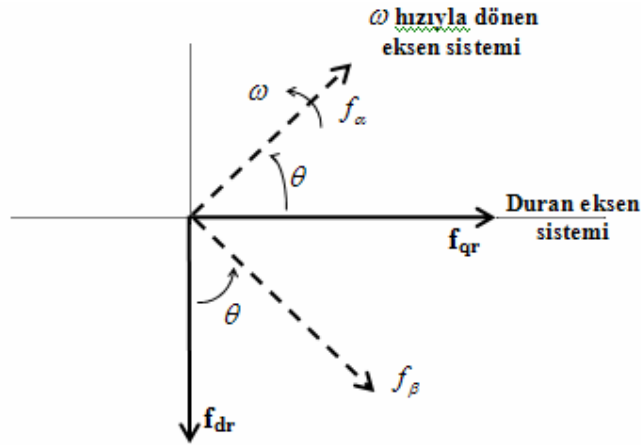
$F$  matrisinin önünde yer alan  $K_{qd}$  sabiti, yukarıda tanımlanan dönüşümün **ortogonal dönüşüm** olması, dönüşüm sonucu *güçün* ve *mmk*'nin değişmeyeceği kuralından faydalanarak 2/3 olarak hesaplanmıştır.

### 1.3.2. Referans Eksen Sistemleri Arasında İndirgeme (Komutator Transformasyonu)

Yukarıda açıklanan faz indirgemesi kullanılarak, statorun duran üç fazı yine statorda duran iki faza, benzer şekilde rotorun dönen üç fazı da, rotorla beraber dönen iki faza indirgenir. Rotora ait dönen üç fazlı  $abc$  eksenini, indirgenen iki faz eksenini, rotorla birlikte döndüklerinden birbirlerine göre duran eksen takımı oluştururlar. Faz indirgenmesi kullanılarak rotorla beraber hareket eden eşdeğer iki faz eksenini, statora göre duran eksen takımına dönüştürülemez. Bu nedenle, stator  $a$  faz eksenini referans alınarak, rotorun iki faza indirgenmiş rotorla beraber dönen  $\alpha \beta$  eksen takımı, statora göre duran,  $qd$  eksen takımına *komutator indirgeme* yöntemiyle dönüştürülür.

İki fazlı eksen sistemleri arasında yapılan bu indirgemeyle, stator ve rotor parametreleri, referans seçilen ortak eksen sisteminde ifade edilir. Bu sayede makineye ait denklem sisteminin çözümünü kolaylaştıran zamandan bağımsız katsayılı denklem sistemi elde edilir [8].

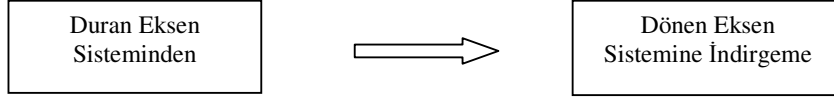
Aşağıda, duran eksen sistemine ait büyüklüklerin, dönen eksen sistemine indirgenmesine kullanılacak trigonometrik bağıntıların çıkartıldığı şekil görülmektedir.



Şekil 1.4. Duran  $qd$  eksen sisteminden  $\omega$  hızı ile dönen  $\alpha \beta$  eksen sistemine geçiş

Burada, duran eksenler  $qd$ , dönen eksenle  $\alpha \beta$  ile gösterilmiştir.  $\theta$ ,  $q$  eksenini ile  $\alpha$  eksenini arasındaki açıdır.  $d\theta/dt$ ,  $\alpha \beta$  eksen sisteminin açısal hızıdır.  $f_\alpha$  ve  $f_\beta$  nin,  $f_q$  ve  $f_d$  cinsinden karşılığı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

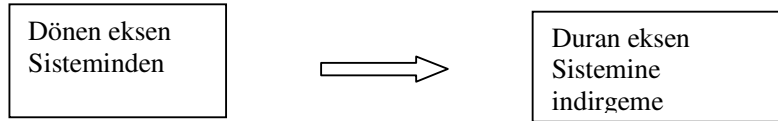


Duran eksen sisteminden döner eksen sistemine indirgemeyi sağlayan, indirgeme matrisini  $T$  ile gösterelim.

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Benzer şekilde, döner eksen sisteminden duran eksen sistemine indirgeme için kullanılacak trigonometrik bağıntıları da yazabiliriz.

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (1.7)$$



Denklem (1.5)'den ters dönüşüm yapılarak döner  $\alpha \beta$  eksen sistemine ait büyüklükler, duran  $qd$  eksen sistemine dönüştürülür. Aşağıda denklem (1.8)'de verilen matrise dikkat edilecek olursa  $T$  matrisinin tersi olduğu görülecektir.

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Yukarda açıklanan faz indirgemesi ve eksen sistemleri arasındaki indirgemeyi birleştirerek bir arada gösterebiliriz. Bunun için stator ve rotora ait üç fazlı  $abc$  denklemlerini eşdeğeri olan iki fazlı  $\omega$  hızıyla dönen,  $\alpha \beta$  eksen sistemine indirgenmesini görelim.

$$[f_{\alpha\beta 0s}] = [T][F][i_{abcs}] \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha s} \\ f_{\beta s} \\ f_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \sin(0) & \sin(-2\pi/3) & \sin(2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

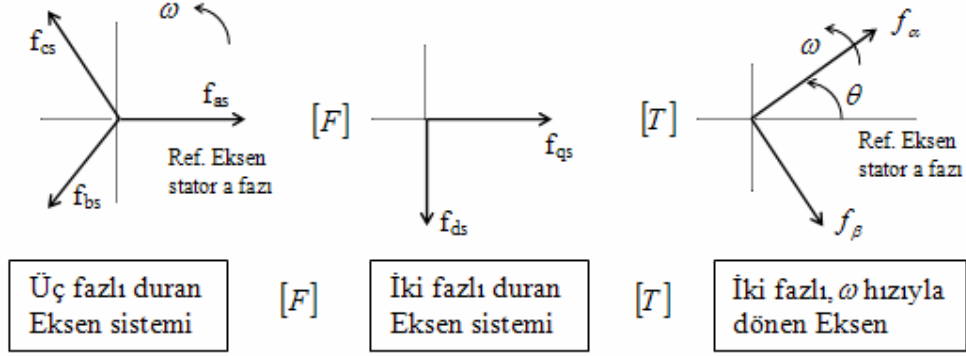
Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra aşağıdaki denklem takımı elde edilir.

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha s} \\ f_{\beta s} \\ f_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

(1.11) denkleminde elde edilen dönüşüm matrisini  $TF$  ile gösterelim. Dikkat edilecek olursa,  $TF$  matrisi,  $T$  ile  $F$  matrisinin çarpımından elde edilen matristir.

$$TF = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$TF$  matrisinin yaptığı indirgeme işlemlerinin daha kolay anlaşılabilmesi için yapılan dönüşümün eksen sistemleriyle ifadesi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Üç fazlı duran abc eksen sisteminden, iki fazlı  $\omega$  hızıyla dönen  $\alpha\beta$  eksen sistemine indirgeme.

$TF$  indirgeme matrisiyle doğrudan doğruya, statorun duran üç fazlı  $abc$  eksen sisteminden,  $\omega$  hızıyla dönen iki fazlı  $\alpha\beta$  eksen sistemine indirgeme sağlanır.

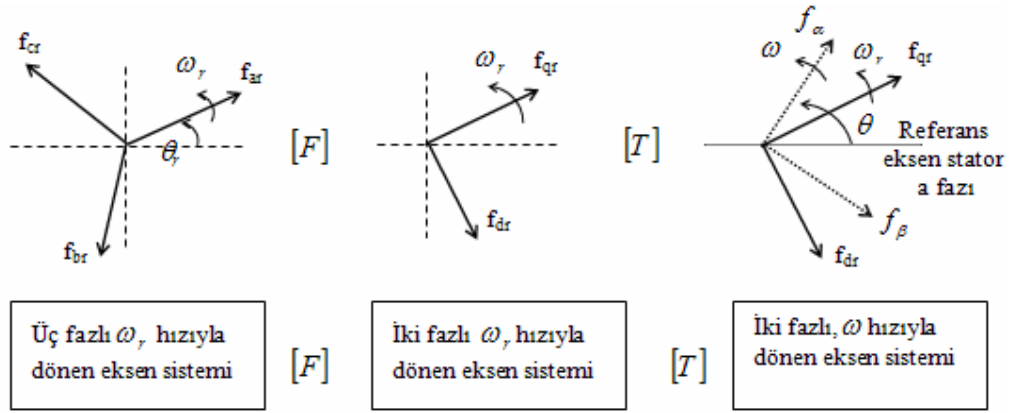
Aynı indirgeme işlemleri üç fazlı rotor büyüklükleri için de uygulanabilir. Ancak burada, indirgeme yapılacak referans eksen sistemiyle rotor üç faz eksen sistemi arasındaki açıyı  $\delta$  ile gösterebiliriz ( $\delta = \theta - \theta_r$ ).

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha r} \\ f_{\beta r} \\ f_{0r} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos(\delta - 2\pi/3) & \cos(\delta + 2\pi/3) \\ \sin \delta & \sin(\delta - 2\pi/3) & \sin(\delta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

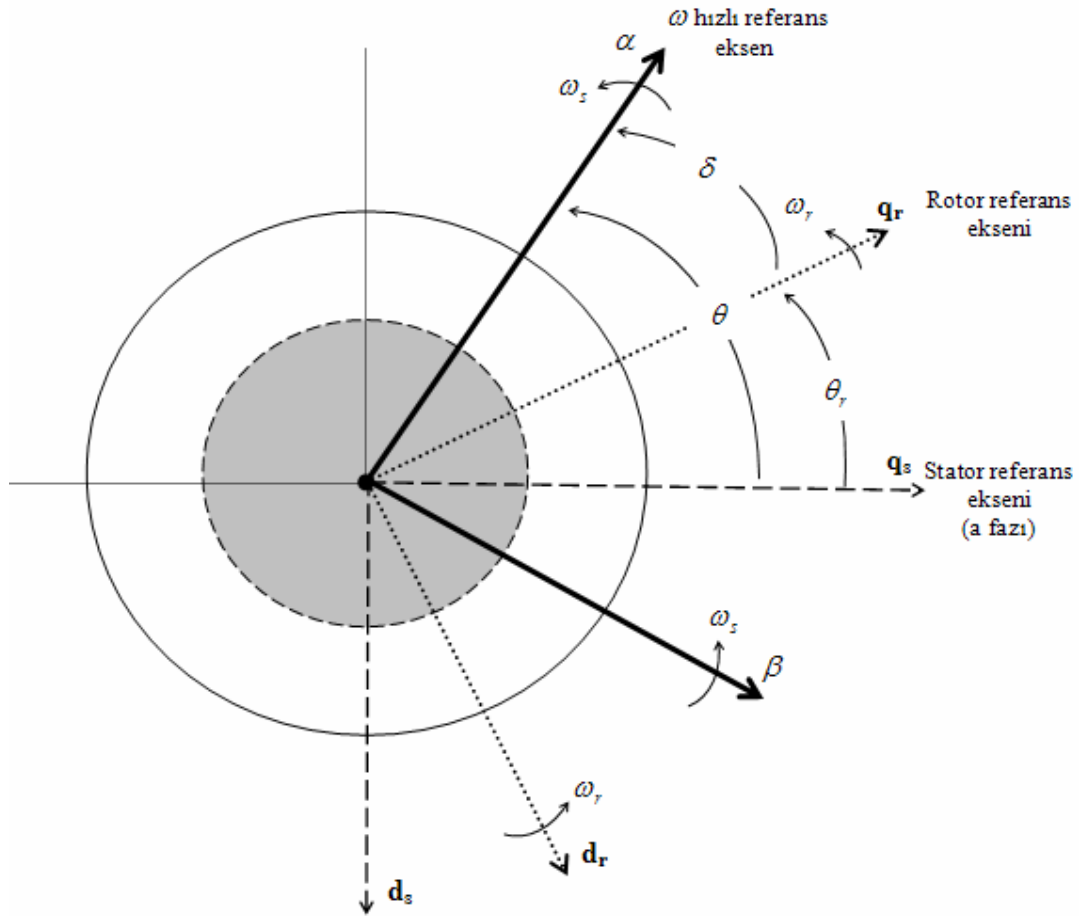
elde edilir. Şekil 1.5.'de, stator için çizilen indirgeme şekillerinin benzeri rotor tarafı için de çizilebilir.

Burada dikkat edilecek husus,  $T$  matrisinde  $\theta$  açısının yerini,  $\delta = \theta - \theta_r$  açısının almış olmasıdır.

(1.11) ve (1.13) denklemlerinde açıklanan ve bu çalışmada da asenkron makinenin dinamik davranışının incelenmesinde kullanılan, senkron hızla hareket eden referans eksen sistemi, ve bu sisteme indirgenen duran ve dönen eksen sistemleri bir arada Şekil 1.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Üç fazlı,  $\omega_r$  hızıyla dönen abc eksen sisteminden, iki fazlı,  $\omega$  hızıyla dönen,  $\alpha\beta$  eksen sistemleri arasında indirgeme ( $\omega > \omega_r$ )



Şekil 1.7. Stator ve rotor parametrelerinin senkron hızla hareket eden referans eksen sistemini indirgemesi [8]



Şekil 1.7.'de;

$\omega_s$  =Senkron hızla dönen referans eksen sisteminin açısal hızı,

$\omega_r$  =Rotorla hareket eden referans eksen sisteminin açısal hızı,

$\theta$  =Stator  $q_s$  eksenini ile  $\alpha$  referans eksenini arasındaki açı,

$\theta_r$  = Stator  $q_s$  ekseniniyle, rotor  $q_r$  eksenini arasındaki açı,

$\delta$  =Rotor eksenini ile referans eksenini arasındaki açı ( $\delta = \theta - \theta_r$ )

#### 1.4. Asenkron Makineler

Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde, asenkron makineler geniş bir uygulama alanına sahiptir. Öyle ki, bu makinenin yer almadığı elektrik endüstri dalı düşünülemez. Pompalar, vinçler, asansörler, çok fazlı ASM'lerin yaygın kullanım alanlarından bir kaçıdır. Bir fazlı küçük güçlü ASM'ler de çok yaygın olarak ev araç gereçlerinde ve küçük tezgâhlarda kullanılmaktadır.

Bu bölümde, ASM'ler incelenirken öncelikle makinenin bilinen matematik modelinden yararlanılmıştır. Simetrik makinenin gerilim ve moment denklemleri makine parametrelerine bağlı olarak ifade edilmiştir. Daha sonra, bölüm 1.3.'de anlatılan indirgeme yöntemleri kullanılarak, makine denklemleri rasgele eksen sistemine indirgenmiştir. Makinenin çalışma şartları dikkate alınarak, denklemler referans seçilen senkron hızla hareket eden eksen sistemine indirgenmiştir. Elde edilen denklem sisteminin çözümüne uygun sayısal çözüm yöntemi olan, dört adımlı Runge-Kutta yöntemi kullanılarak VISSIM paket programı yardımıyla, makinenin istenen çalışma şartlarındaki dinamik davranışı incelenmiştir.

##### 1.4.1. Asenkron Makinenin Gerilim Denklemleri

Stator sargıları, uygulanan sinüzoidal gerilimlerle, sinüzoidal mmk'ler üretecek şekilde,  $120^0$  lik açılarla yerleştirilmiş üç özdeş sargıdan meydana gelmiştir. Makine denklemlerinde yer alan  $N_s$  ve  $r_s$  sırasıyla bir faza ait sargının sarım sayısını ve omik direnci göstermektedir. Benzer şekilde, rotor sargıları da stator sargılarında olduğu gibi özdeş ve  $120^0$ 'lik açıyla yerleştirilen üç faz sargısından meydana gelmiştir.  $N_r$ , rotorun her bir faz sargısının sarım sayısını,  $r_r$  'de omik direncini göstermektedir [9].

Makine parametrelerine bağlı gerilim denklemleri aşağıdaki gibidir.

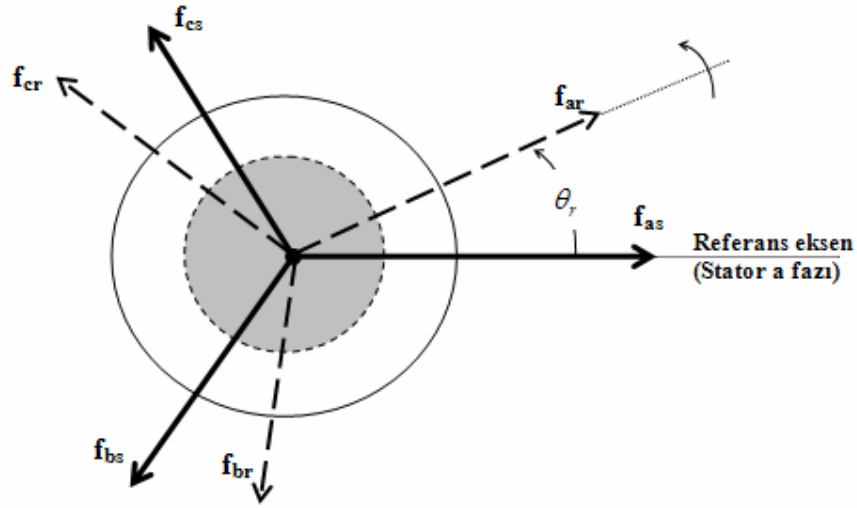
$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (1.14)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (1.15)$$

$$(f_{abxs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (1.16)$$

$$(f_{abxr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \quad (1.17)$$

Bu denklemlerde yer alan  $p$  türev operatörü olup,  $p = d/dt$  'dir.



Şekil 1.8. İki kutuplu, yıldız bağlı simetrik asenkron makine

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan  $s$  indisi, stator devresine ait büyüklükleri,  $r$  indisi rotor devresine ait büyüklükleri gösterir. Burada  $r_s$  ve  $r_r$  matrisleri köşegen matrislerdir. Makineye ait akı denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Denklem (1.18)'de yer alan, stator ve rotor sargılarına ait endüktans matrisleri ve stator-rotor arasındaki ortak endüktans matrisi açık şekilde aşağıda verilmiştir.

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Denklemlerde yer alan  $L_{ls}$  ve  $L_{ms}$ , stator faz sargılarına ait kaçak ve magnetik endüktans katsayıları olup, benzer şekilde  $L_{lr}$ ,  $L_{mr}$  rotor faz sargılarına ait kaçak ve magnetik endüktanslarıdır.  $L_{sr}$  ise, stator-rotor arasındaki ortak endüktans katsayısıdır.

Asenkron makine rotorları her zaman sargılı yapılmaz. Bu sargılar yerine, ferromagnetik çekirdek üzerine dengeli şekilde dağıtılmış bakır veya alüminyum çubukların ortak bir bilezik üzerinden kısa devre edilmeleriyle elde edilen kafes yapı kullanılabilir. Bu yapıya sincap kafesli rotor denir. Sincap kafesli rotor sargılarıyla dengeli stator sargıları arasındaki ortak endüktanslar sargılı rotorlardaki gibi üç fazlı ve dengeli değildir. Bununla birlikte, sincap kafesli rotorlarla yapılan çalışmalarda, kolaylık açısından sincap kafesli rotor üç fazlı sargı gibi kabul edilip çözüm yapılabilir. Sincap kafesli rotorlarda, rotor sargısı olarak kullanılan iletken çubuklar rotor eksenine paralel değil de,

eğik yerleştirilirler. Çubuklardaki bu eğiklik,  $mmk$  'de oluşacak harmonik momentlerini azalttığından makinede oluşacak moment dalgalanmaları zayıflar.

Makine modeli hazırlanırken bazı basitleştirmeler ve ihmaller yapılarak çözümün daha basitleşmesi sağlanır. Bu basitleştirmelere örnek olarak; makinede meydana gelen doymanın veya harmonik momentlerin etkisinin ihmal edilmesi verilebilir. Birçok uygulamada bu basitleştirmeler çözüm aşamasında büyük kolaylık sağlar.

Makine parametrelerinden meydana gelen gerilim denklemlerinde, rotor tarafı parametreleri hesap kolaylığı açısından stator-rotor sargı oranlarından faydalanarak statora indirgenmiştir. Bu nedenle denklemlerdeki rotor parametreleri statora indirgenmiş haliyle kullanılır. Yani;

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr} \quad (1.22)$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} v_{abcr} \quad (1.23)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \lambda_{abcr} \quad (1.24)$$

elde edilir.

(1.19), (1.20) ve (1.21) denklemlerde yer alan ortak endüktanslar  $L_{ms}$ ,  $L_{mr}$ ,  $L_{sr}$  ile gösterilirler ve aşağıdaki gibi tanımlanırlar.

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (1.25)$$

$$L'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (1.26)$$

$$L_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$L_{mr}$  ve indirgenmiş  $L'_r$  endüktans eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms} \quad (1.28)$$

ve

$$L'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_r \quad (1.29)$$

(1.20) denkleminde;

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L'_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L'_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

(1.30) denkleminde  $L'_{lr}$ ;

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad (1.31)$$

olarak tanımlanmıştır. Statora indirgenmiş akı denklemleri (1.32) denkleminde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Benzer şekilde, makine gerilim denklemlerindeki rotor parametreleri statora indirgenmiş haliyle yeniden yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^T & r' + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

elde edilir. (1.33) denklem sisteminde  $r'_r$ ;

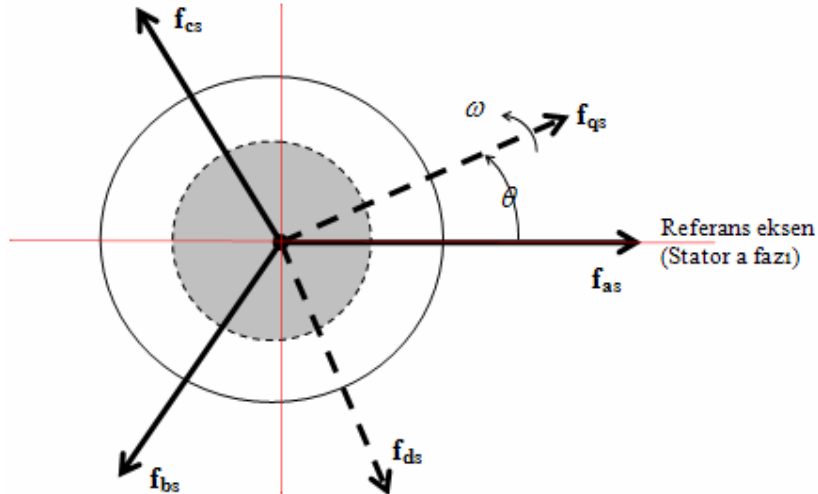
$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 r_r \quad (1.34)$$

olarak tanımlanmıştır.

#### 1.4.2. Stator Parametrelerini Rasgele Eksen Sistemine İndirgeme

Üç fazlı asenkron makinenin, stator parametrelerine bağlı denklemlerini  $\omega$  hızıyla hareket eden ve stator  $a$  fazı ile arasında  $\theta$  açısı olan, iki fazlı  $qd$  referans eksen sistemine indirgeyelim. İndirgeme işleminin anlaşılmasına yardımcı olacak Şekil 1.9.'da verilmiştir.

$$f_{qdos} = K_s f_{abcs} \quad (1.35)$$



Şekil 1.9. Üç faz stator parametrelerinin  $\omega$  hızıyla hareket eden referans eksen sistemine indirgenmesi

(1.35) denkleminde;

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (1.36)$$

$$(f_{abxs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (1.37)$$

olarak tanımlanmıştır.

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

(1.38) denkleminde yer alan  $\theta$  ;

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (1.39)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

$K_s$  matrisinin tersi alınarak  $qd$  referans eksen sisteminden, üç fazlı sisteme geri dönüş sağlanır.  $K_s$  matrisinin tersi;

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

elde edilir.

Denklemlerde yer alan  $f$ , gerilim, akım, akı ve elektrik yükü olarak tanımlanabilir. Denklemlerde üs olarak gösterilen  $T$ , matrislerin tersini ifade etmektedir. İndis olarak gösterilen  $s$ , parametrelerin duran eksen sistemlerine ait olduğunu gösterir.  $\theta$ , açılal yer değiştirmeyi tanımlar ve alacağı değer referans seçilecek eksen sistemini belirler.

Üç fazlı abc sisteminin eşdeğeri olan iki fazlı  $f_{qs}$  ve  $f_{ds}$  eksenleri,  $90^\circ$ 'lik açıyla yerleştirilmiş ve  $\omega$  açılal hızıyla hareket etmektedir. Buna karşılık üç fazı temsil eden  $f_{as}$ ,

$f_{bs}, f_{cs}$  eksenleri  $120^0$ 'lik açıyla yerleştirilmiştir.  $f_{as}, f_{bs}, f_{cs}$  eksenlerinin  $f_{qs}$  eksenindeki eşdeğerlerini bulmak için (1.38) denkleminde verilen matrisinin ilk satırındaki değerler,  $f_{ds}$  eksenini eşdeğerini bulmak için ikinci satırdaki değerler kullanılacaktır.

İndirgeme işlemleri incelendiğinde, statora ait sıfır bileşenlerin referans eksen sisteminde gösterilmeden,  $\theta$ 'dan bağımsız aritmetik ifadelerle *abc eksen* sistemindeki büyüklükler cinsinden ifade dildiği görülür.

### 1.4.3. Rotor Parametrelerini Rasgele Eksen Sistemine İndirgeme

Şimdi de; üç fazlı asenkron makinenin rotor parametrelerine bağlı gerilim denklemlerini  $\omega$  hızıyla hareket eden ve rotor  $a$  fazı ile arasında  $\delta$ , ( $\delta = \theta - \theta_r$ ), kadar faz farkı olan  $q, d_r$  referans eksen sistemine indirgeyelim. İndirgeme işlemine yardımcı olacak çizim Şekil 1.10.'da verilmiştir. İndirgemeye ilişkin bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$f'_{qd0s} = K_r f'_{abcr} \quad (1.41)$$

(1.41) denkleminde;

$$(f'_{qd0s})^T = [f'_{qs} \ f'_{ds} \ f'_{os}] \quad (1.42)$$

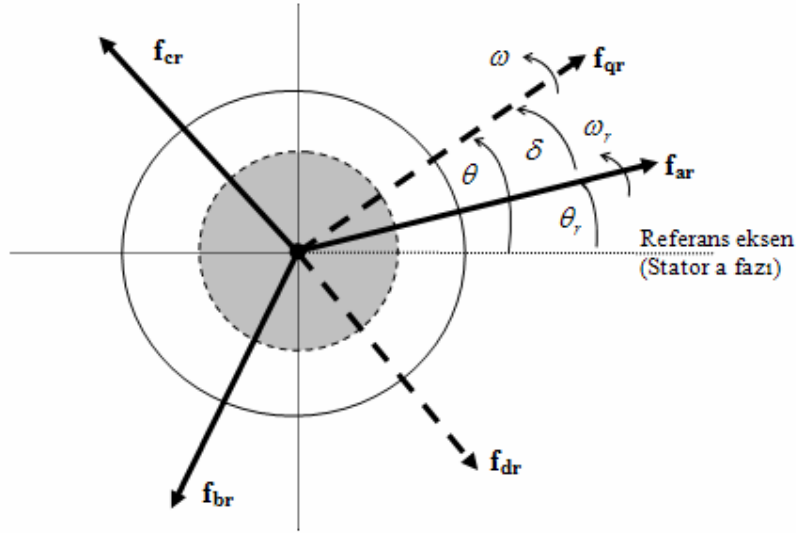
$$(f'_{abcr})^T = [f'_{ar} \ f'_{br} \ f'_{cr}] \quad (1.43)$$

olarak tanımlanmıştır.  $K_r$  dönüşüm matrisi;

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \cos(\delta - 2\pi/3) & \cos(\delta + 2\pi/3) \\ \sin(\delta) & \sin(\delta - 2\pi/3) & \sin(\delta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

elde edilir.  $K_r$  matrisinde,  $\delta = (\theta - \theta_r)$  şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca  $\theta_r$  (1.45) denkleminde verilmiştir.





Şekil 1.10. Üç faz rotor parametrelerinin  $\omega$  hızıyla hareket eden referans eksen sistemine indirgenmesi

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (1.45)$$

$K_r$  matrisinin tersi alınarak  $qdr$  referans eksen sisteminden, üç fazlı  $abc$  sisteme geri dönüş sağlanır. Bu matris;

$$(K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) & 1 \\ \cos(\delta - 2\pi/3) & \sin(\delta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\delta + 2\pi/3) & \sin(\delta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

olarak tanımlanır. Bu bölümde tanımlanan denklemlerde yer alan  $r$  indisi ilgili parametrelerin rotora ait olduğunu gösterir.

#### 1.4.4. Asenkron Makine Gerilim Denklemlerinin Rasgele Eksen Sisteminde Yazılması

Açıklanan indirgeme yöntemleri kullanılarak, asenkron makine stator ve rotor denklemleri,  $\omega$  hızıyla hareket eden ortak referans eksen sistemine (rasgele eksen

sistemine) indirgenebilir. İndirgeme sonucunda makinenin yeni denklem sistemi aşağıdaki gibi olur.

$$v_{qd0s} = r_s i_{qd0s} - \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (1.47)$$

$$v'_{qd0r} = r'_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qd0r} \quad (1.48)$$

bu denklemlerde yer alan  $\lambda_{dqs}$  ve  $\lambda'_{dqr}$  ;

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad \lambda_{qs} \quad 0] \quad (1.49)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} \quad \lambda'_{qr} \quad 0] \quad (1.50)$$

olarak tanımlanır.

Asenkron makinenin statora indirgenmiş akı denklemleri (1.32) denklem sisteminde verilmişti. (1.35) ve (1.41) denklemlerinde tanımlanan indirgemeler kullanılarak, makineye ait akı denklemlerinin iki fazlı eksen sistemine indirgenmiş yeni hali elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L' (K_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

Yukarıdaki denklem sisteminde yer alan  $L_s$ , (1.19) denkleminde,  $L'_{sr}$ , (1.27) denkleminde ve  $L'_r$  (1.30) denkleminde tanımlanmıştır. Yine, (1.51) denkleminde tanımlanan akılara ait katsayıların oluşturduğu matrisin her terimi gerekli sadeleştirme işlemleri yapıldıktan sonra en sade haliyle (1.52)'de verilmiştir.

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (1.52)$$

(1.52) matrisinde verilen M endüktansı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (1.53)$$

$$K_r L'_r (K_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{ls} \end{bmatrix} \quad (1.54)$$

$$K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} = K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

(1.47) ve (1.48)'da verilen gerilim denklemlerini  $\omega$  hızıyla hareket eden  $qd$  eksen sistemine göre açıkça yazarsak;

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (1.56)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (1.57)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (1.58)$$

$$0 = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (1.59)$$

$$0 = r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (1.60)$$

$$0 = r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \quad (1.61)$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca (1.52), (1.54) ve (1.55) matrisleri, (1.51) matrisinde yerlerine yazılırsa yeni akı denklem sistemi elde edilir.

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (1.62)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (1.63)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (1.64)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (1.65)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (1.66)$$

$$\lambda_{or} = L_{lr} i'_{or} \quad (1.67)$$

Yukarıda gerilim ve akı denklemleri tanımlanan, simetrik üç fazlı ASM'nin indirgeme işlemlerinden sonra, iki fazlı rasgele eksen sistemindeki eşdeğer devresi Şekil 1.11'de verilmiştir.

Makine ve güç sistemi modellemelerinde, denklemlerde yer alan makine parametreleri genellikle *ohm* cinsinden veya *per-unit* (seçilen baz empedans değerine bağlı) olarak tanımlanır. Bu nedenle daha önceden tanımlanan gerilim ve akı denklemlerinde mevcut olan endüktans katsayıları yerine,  $\omega_b$  frekansındaki endüktif reaktans değerleri kullanılır. Buna göre (1.56)-(1.61) denklemler yeniden düzenlenirse;

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \varphi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{qs} \quad (1.68)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \varphi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{ds} \quad (1.69)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{0s} \quad (1.70)$$

$$0 = r'_{r} i'_{qr} + \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \varphi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \varphi'_{qr} \quad (1.71)$$

$$0 = r'_r i'_{dr} + \left( \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \varphi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \varphi'_{dr} \quad (1.72)$$

$$0 = r'_r i'_{or} + \frac{p}{\omega_b} \varphi'_{or} \quad (1.73)$$

elde edilir.

(1.68)-(1.73) denklemlerinde yer alan  $\omega_b$ , endüktif reaktansların hesaplandığı ve baz olarak seçilen açısal hız değeri olup senkron açısal hıza eşittir. Benzer şekilde, (1.62)-(1.67) akı denklemleri de yeniden düzenlenirse;

$$\varphi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (1.74)$$

$$\varphi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (1.75)$$

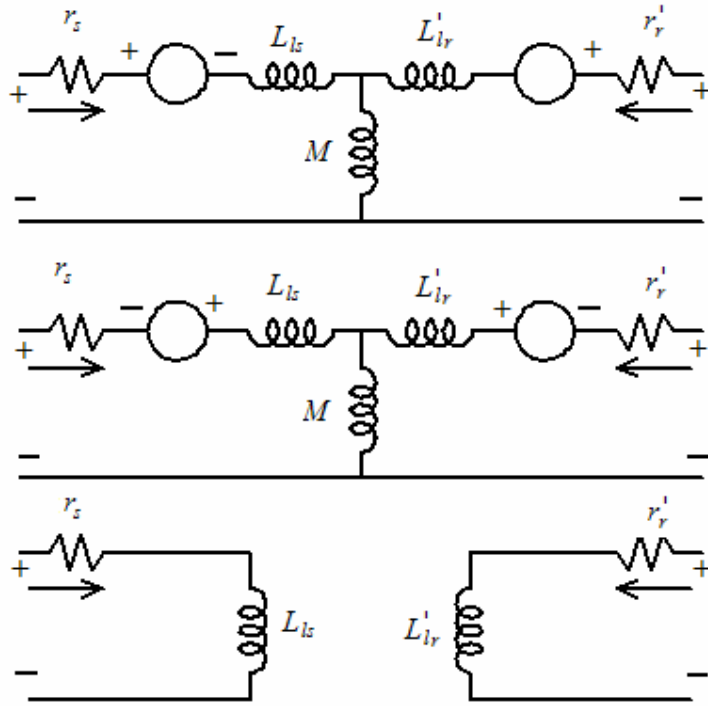
$$\varphi_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (1.76)$$

$$\varphi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (1.77)$$

$$\varphi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (1.78)$$

$$\varphi'_{or} = X'_{lr} i'_{or} \quad (1.79)$$

denklem sistemi elde edilir.



Şekil 1.11. Simetrik, üç fazlı ASM'nin, iki fazlı rasgele eksen sistemindeki eşdeğer devresi [9].

(1.56)-(1.61) veya (1.68)-(1.73) gerilim denklemleri incelendiğinde  $qd$  eksenlerine ait akıların durum değişkeni olduğu görülür. Bununla beraber denklemlerde yer alan akımlarında akılara bağlı olarak değiştiği görülür. Bu bağımlılık denklem sistemlerinin çözümünü zorlaştırır. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için denklemlerin ya yalnızca akımlara, ya da akılara bağlı olarak ifade edilmesi gerekir.

Makineye ait denklem sisteminde, akımların ve  $\omega$  hızının durum değişkeni olarak seçildiği ve denklemlerde bulunan akılar yerine, akımlar cinsinden karşılığının yazıldığı denklem sistemi (1.80)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & 0 \\ -(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 & -(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (1.80)$$

(1.80)'de tanımlanan denklem sisteminde bulunan  $X_{ss}$  ve  $X'_{rr}$  aşağıda tanımlanmıştır.

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad (1.81)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad (1.82)$$

(1.72)-(1.78)'deki akı denklemleri matris formunda yazıldığında;

$$\begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{0s} \\ \varphi'_{dq} \\ \varphi'_{ds} \\ \varphi'_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (1.83)$$

elde edilir. (1.80)'de tanımlanan denklem sisteminde akımlar yerine akılar durum değişkeni seçilirse, (1.83) matrisinin yeniden düzenlenmesi gerekir.

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 & 0 \\ 0 & X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{0s} \\ \varphi'_{dq} \\ \varphi'_{ds} \\ \varphi'_{0s} \end{bmatrix} \quad (1.84)$$

(1.84) matrisinde çarpan olarak bulunan D;

$$D = X_{ss} X'_{rr} + (X_M)^2 \quad (1.85)$$

olarak tanımlanmıştır.

(1.84) denklemindeki akımlar, (1.68)-(1.73) gerilim denklemlerinde yerine yazıldığında, akıların durum değişkeni olduğu yeni denklem sistemi elde edilir. Yeni denklem sistemi matris formunda aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & 0 \\ -(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 & -(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{0s} \\ \varphi^{dq} \\ \dot{\varphi}_{ds} \\ \dot{\varphi}_{0s} \end{bmatrix} \quad (1.86)$$

(1.80) ve (1.86) denklem sistemleri incelendiğinde dikkat çekici hususlar olduğu görülür. Eğer (1.80) denklem sistemindeki gibi akımlar durum değişkeni seçilirse;  $qd$  eksen sistemine ait gerilim denklemlerinde durum değişkeni olan akımlardan iki tanesinin türevinin olduğu görülür. Bunun yanında, (1.86) denklem sistemindeki gibi akımlar durum değişkeni seçilirse, her bir denklem yalnız bir durum değişkeninin türevini içerir. Bu nedenle akıların durum değişkeni olduğu denklem sisteminin çözümü daha kolaydır. Bu yüzden, bu çalışmada akıların durum değişkeni olduğu denklem sistemi seçilerek çözüme gidilmiştir.

#### 1.4.5. Asenkron Makine Moment Denklemlerinin Rasgele Eksen Sisteminde Yazılması

Üç fazlı asenkron makinenin  $abc$  parametrelerine bağlı elektromagnetik moment denklemi (1.87)'de verilmiştir.



$$M_e = \left(\frac{p}{2}\right)(i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] i'_{abcr} \quad (1.87)$$

Denklem (1.86)'de verilen üç fazlı ASM'ye ait elektromagnetik momentin, referans seçilen rasgele eksen sistemindeki karşılığını elde etmek için, (1.86) denkleminde bulunan üç fazlı  $abc$  parametreleri yerine, iki fazlı  $qd$  eksen sistemindeki karşılıklarının yazılması gerekir. Yani;

$$M_e = \left(\frac{p}{2}\right) [(K_s)^{-1} i_{qd0s}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] (K_r)^{-1} i'_{qdor} \quad (1.88)$$

elde edilir. Moment denklemi referans seçilen eksen sistemine ait akımlar cinsinden yazıldığında, moment denklemi akımlara bağlı olarak elde edilir.

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (1.89)$$

$M_e$  momentinin yönü motorun pozitif moment yönünü gösterir. Moment denklemleri makineye ait farklı büyüklükler cinsinden ifade edilebilir.

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_{qr} i'_{dr} - \lambda_{ds} i'_{qr}) \quad (1.90)$$

(1.90) denkleminde moment rotor parametrelerine bağlıdır. Benzer şekilde, stator parametrelerine bağlı moment denklemi,

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (1.91)$$

olarak yazılabilir. (1.91) ve (1.92) denklemleri endüktans terimleri içerir. Aynı denklemleri endüktif reaktanslara bağlı yeniden ifade edecek olursak,

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\varphi'_{qr} i'_{dr} - \varphi'_{dr} i'_{qr}) \quad (1.92)$$

ve

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (1.93)$$

denklemleri elde edilir. Moment denklemini akımlardan arındırıp akılara göre düzenleyecek olursak,

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\frac{X_M}{D\omega_b}(\varphi_{qs}\varphi'_{dr} - \varphi'_{qr}\varphi_{ds}) \quad (1.94)$$

bağıntısı ortaya çıkar. (1.94) denkleminde yer alan  $D$  katsayısı, (1.85) eşitliğiyle daha önceden tanımlanmıştır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Bilgisayar Destekli Modelleme

Günümüzde birçok meslek grubunun tasarımlarını gerçekleştirmeden önce, matematiksel modelleme yardımı ile gerçeğe yakın sonuçları alınabilmektedir. Elektrik-Elektronik Mühendisliği uygulamalarında da birçok benzetim paket programları ile tasarlanacak sistemin sonuçları deneysel olarak gerçekleştirilmeden önce yapılabilmektedir. MATLAB, VISSIM, MULTISIM, WORKBENCH, CIRCUITMARKER, PROTEUS, LABVIEW vb. yazılımlar benzetim programlarına örnek olarak verilebilir. Bu tür paket programlar hem zamandan, hem de ekonomiden kazanç sağlarlar. En önemli avantajları ise hatalı bir uygulama sonucunda hayati tehlike oluşturmazlar sadece uyarı veya yanlış sonuç verirler.

Bu uygulamada öncelikli olarak motor modellemesi için VISSIM benzetim programı kullanılmıştır [12]. Bu yazılım ile aşağıda verilen asenkron makinenin matematiksel denklemlerinden faydalanılarak EK.1’de görülen blok şemalar halinde benzetim programı oluşturuldu.

#### 3 fazlı asenkron motorun $d$ - $q$ eksen sisteminde denklemleri (statora bağlı);

$$V_{as} = \sqrt{2}VCos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$V_{bs} = \sqrt{2}VCos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.2)$$

$$V_{cs} = \sqrt{2}VCos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

$$V_{qs} = \frac{2}{3}\left[V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c\right] \quad (2.4)$$

$$V_{ds} = \frac{2}{3} \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} V_b + \frac{\sqrt{3}}{2} V_c \right] \quad (2.5)$$

***d* ekseninde;**

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (2.6)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ts} i_{ds} + \lambda_{dm} \quad (2.7)$$

(2.7) denklemi düzenlenecek olursa;

$$i_{ds} = \frac{\lambda_{ds} - \lambda_{dm}}{L_{ts}} \quad (2.8)$$

elde edilir.

$$\lambda_{dm} = \frac{L_t}{L_{ts}} \lambda_{ds} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{dr} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + \lambda_{dm} \quad (2.10)$$

(2.10) denklemi de düzenlenecek olursa;

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr} - \lambda_{dm}}{L_{lr}} \quad (2.11)$$

elde edilir.

$$V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega_e \lambda_{qr} \quad (2.12)$$

Buradan benzetim için durum denklemleri (2.13),(2.14) ve (2.15)'deki gibi düzenlenerek;

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = V_{ds} - \frac{R_s}{L_{ls}}(\lambda_{ds} - \lambda_{dm}) \quad (2.13)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = \frac{R_r}{L_{lr}}(\lambda_{dm} - \lambda_{dr}) + \omega_e \lambda_{qr} \quad (2.14)$$

$$\lambda_{dm} = \frac{L_t}{L_{ls}} \lambda_{ds} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{dr} \quad (2.15)$$

kullanılır.

**q ekseninde;**

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (2.16)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + \lambda_{qm} \quad (2.17)$$

(2.17) denklemi düzenlenecek olursa;

$$i_{ds} = \frac{\lambda_{qs} - \lambda_{qm}}{L_{ls}} \quad (2.18)$$

elde edilir.

$$\lambda_{qm} = \frac{L_t}{L_{ls}} \lambda_{qs} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{qr} \quad (2.19)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + \lambda_{qm} \quad (2.20)$$

(2.20) denklemi de düzenlenecek olursa;

$$i_{qr} = \frac{\lambda_{qr} - \lambda_{qm}}{L_{lr}} \quad (2.21)$$

elde edilir.

$$V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - \omega_e \lambda_{dr} \quad (2.22)$$

Buradan benzetim için durum denklemleri (2.23),(2.24) ve (2.25)'deki gibi düzenlenerek;

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = V_{qs} - \frac{R_s}{L_{ls}} (\lambda_{qs} - \lambda_{qm}) \quad (2.23)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = \frac{R_r}{L_{lr}} (\lambda_{qm} - \lambda_{qr}) + \omega_e \lambda_{dr} \quad (2.24)$$

$$\lambda_{qm} = \frac{L_t}{L_{ls}} \lambda_{qs} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{qr} \quad (2.25)$$

kullanılır.

**Asenkron makinenin d-q eksenindeki mıknatıslanma akısı;**

$$\lambda_{dm} = M(i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.26)$$

(2.18) ve (2.11) denklemlerden  $i_{ds}$  ve  $i_{dr}$  ile (2.26) düzenlenecek olursa;

$$\lambda_{dm} = M \left( \frac{\lambda_{ds} - \lambda_{dm}}{L_{ls}} \right) + M \left( \frac{\lambda_{dr} - \lambda_{dm}}{L_{lr}} \right) \quad (2.27)$$

bulunur. Düzenlemeye devam edildiğinde;

$$\lambda_{dm} = \frac{M}{L_{ls}} \lambda_{ds} + \frac{M}{L_{lr}} \lambda_{dr} - \left( \frac{M}{L_{ls}} + \frac{M}{L_{lr}} \right) \lambda_{dm} \quad (2.28)$$

$$\lambda_{dm} = \frac{1}{\frac{1}{M} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L_{lr}}} \left( \frac{1}{L_{ls}} \lambda_{ds} + \frac{1}{L_{lr}} \lambda_{dr} \right) \quad (2.29)$$

elde edilir. (2.29) denklemindeki parantezin önündeki katsayıyı  $L_t$  ile ifade edip düzenlersek;

$$\lambda_{dm} = \frac{L_t}{L_{ls}} \lambda_{ds} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{dr} \quad (2.30)$$

olur.  $L_t$ 'de (2.31) denklemindeki gibidir.

$$L_t = \frac{1}{\frac{1}{M} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L_{lr}}} \quad (2.31)$$

Benzer şekilde;

$$\lambda_{qm} = \frac{L_t}{L_{ls}} \lambda_{qs} + \frac{L_t}{L_{lr}} \lambda_{qr} \quad (2.32)$$

olarak bulunur. Burada;

$$M = \frac{X_m}{\omega_{kaynak}} \quad (2.33)$$

$$L_{ls} = \frac{X_{ls}}{\omega_{kaynak}} \quad (2.34)$$

$$L_{lr} = \frac{X_{lr}}{\omega_{kaynak}} \quad (2.35)$$

olarak ifade edilir. Makine momenti ve açısal hızı ise;

$$M_e = \frac{3}{2} P (\lambda_{qs} i_{ds} - \lambda_{ds} i_{qs}) \quad (2.36)$$

$$\omega_m = \frac{1}{j} \int (M_m - M_y) dt \quad (2.37)$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.38)$$

$$\theta_r = \int \omega_e dt \quad (2.39)$$

olur.

Bu benzetimde parametre tanımlaması yapılmak şartı ile her türlü asenkron makinenin a,b,c fazındaki gerilimleri, dq gerilim ve akımları, momenti, elektriksel ve mekaniksel açısal hızı, bütün dq dönüşüm akılarını ve devir sayısını (rpm) geçici davranışları ile elde etmek mümkündür.

Benzetim programı dinamik denklemleri çözümlerken 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi tercih edilmiştir. Adımlama (iterasyon) katsayısı olarak 0.001 seçilmiştir.

## 2.2. Denetleyici Arabirimler

Gömülü Bilgisayar Sisteminde ( Embedded Computing System ) amaç, elektronik ayağa özel bir işlevi sürekli olarak tekrar ettirmektir. Sistem içerisindeki program buna göre hazırlanmıştır. Bir masaüstü veya dizüstü bilgisayarda olduğu gibi kullanıcının yüklediği programa göre farklı işlemleri yerine getiremez. Program sistem belleğine bir defa yazıldıktan sonra genelde değiştirilmez. Bu nedenle gömülü sistem adı verilmiştir.

Günümüzde gömülü bilgisayar sistemi olmadığı elektronik aygıt neredeyse yok denecek kadar azdır. Bunlardan bazıları;

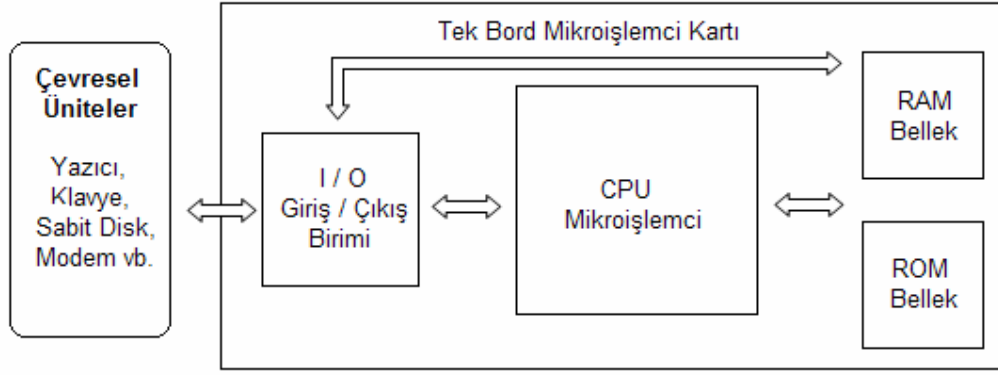


- Cep telefonu,
- Dijital fotoğraf makinesi,
- Televizyon,
- Radyo,
- Bilgisayar klavyesi,
- Bina alarm sistemleri,
- Yazıcı,
- Yol bilgisayarı,
- Yakıt enjeksiyon sistemi,
- Dijital osiloskop vb.

aygıtlardır. Kısa bir listesi verilen gömülü sistemli aygıtlar önümüzdeki yıllarda daha da artacaktır. Listenin gömülü sistemler lehine artma sebebi, mikroişlemciler ve mikrodenetleyiciler arasındaki fark ile açıklanabilir.

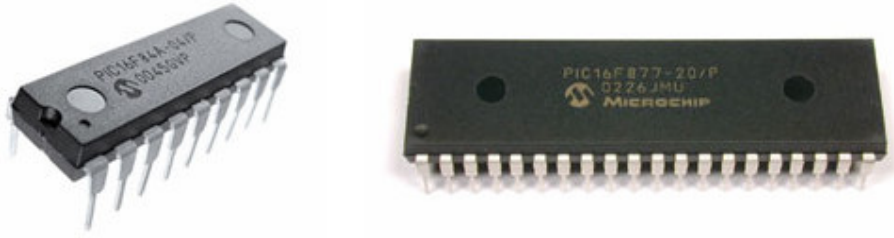
Mikroişlemciler bilgisayar programlarının yapmak istediği tüm işlemleri yerine getirdiği için çoğu zaman merkezi işlem ünitesi (CPU – Central Processing Unit) olarak adlandırılırlar. Mikroişlemcilerin genel kullanım alanı, bilgisayarlar olduğu gibi bilgisayarla denetim edilecek iş tezgâhları veya ev aygıtları da olabilir. Mikroişlemciler bu tip elektrikli aygıtların denetiminde kullanıldıklarında gömülü bilgisayar sistemi sınıfına girmektedir. Yani sistemin belleğine yazılan program aygıtta sürekli aynı işlemi yaptırmak amacı ile kullanılır. Bir mikroişlemcinin işlevini yerine getirebilmesi için giriş/çıkış birimi ve bellek birimlerine ihtiyacı vardır. Bu üniteler merkezi işlem birimi dışında, bilgisayarın ana kartı üzerine yerleştirilmiş entegrelerden ve bağlantı yuvalarına oturtulmuş kartlardan oluşur. Aralarındaki iletişimi ise veri yolu ve adres yolu denilen iletim hatları yapar.

1970 ve 1980 yılları arasında Intel, NEC ve Motorola yonga üreticileri tarafından gerçekleştirilen birçok mikroişlemci, gömülü sistemlerde çok kullanılmıştır. Motorola üretimi olan 6800, 6809 ve 68000 yongaların hala çalışır durumda olan elektronik devre sistemlerinde kullanıldığını söyleyebiliriz.



Şekil 2.1. Bir mikroşlemci sisteminin blok diyagramı

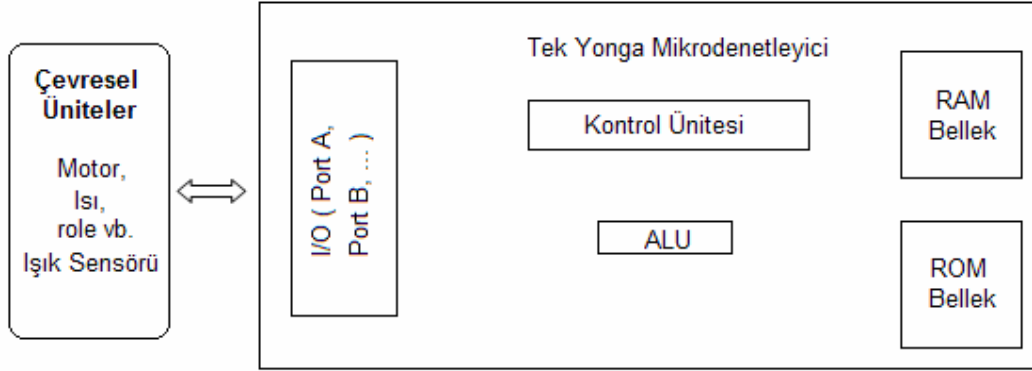
Mikroşlemcili sistemin içerisinde bulunması gereken temel bileşenlerden RAM, ROM, ALU, denetim ünitesi ve I/O ünitesini tek bir yonga içinde barındıran entegre devreye mikrodenetleyici (microcontroller) denilir.



Şekil 2.2. Mikrodenetleyiciler

Mikrodenetleyiciler veri giriş aygıtlarından gelen analog ve sayısal verileri ALU ve denetleme ünitesi aracılığı ile değerlendirdikten sonra çıkış sinyali I/O kapıları aracılığı ile denetim yaptığı aygıtlara gönderirler. Çıkışlar genellikle küçük güç çeken LED veya LCD ekranlardır. Bu nedenle mikrodenetleyiciler çok düşük güç harcarlar. Örneğin mikroşlemcili bir sistem olan masaüstü bilgisayarı enerji sisteminden en az 50 W çekerken, pil ile çalıştırılan mikrodenetleyici 50 mW'lık bir güç harcar. Kullanım yerleri olarak gömülü sistemlerde verdiğimiz tüm örnekleri sayabiliriz. Bu yüzden mikrodenetleyicilerin adı bazı yerlerde gömülü denetleyici ( embedded controller ) olarak da geçer. Günümüzde mikrodenetleyicileri kullanımı yaygınlaştıkça Motorola, Atmel, NEC, Hitachi, Philips, Mitsubishi, Microchip gibi birçok yonga üreticisi ya kendi

geliştirdikleri mikrodenetleyicileri ya da Intel teknolojisine yeni eklentiler yaparak çok çeşitli mikrodenetleyiciler üretmeye başladılar. Her firma ürettiği yongaya farklı isimler vermektedirler. Örneğin Microchip ürettiklerine PIC adını verirken, Intel'in ürettiği ve 1980lerin başlarında piyasaya sürdüğü 8051, bazen MCS-51 olarak da adlandırılırlar [10].



Şekil 2.3. Bir mikrodenetleyici sistemin temel bileşenlerinin blok diyagramı

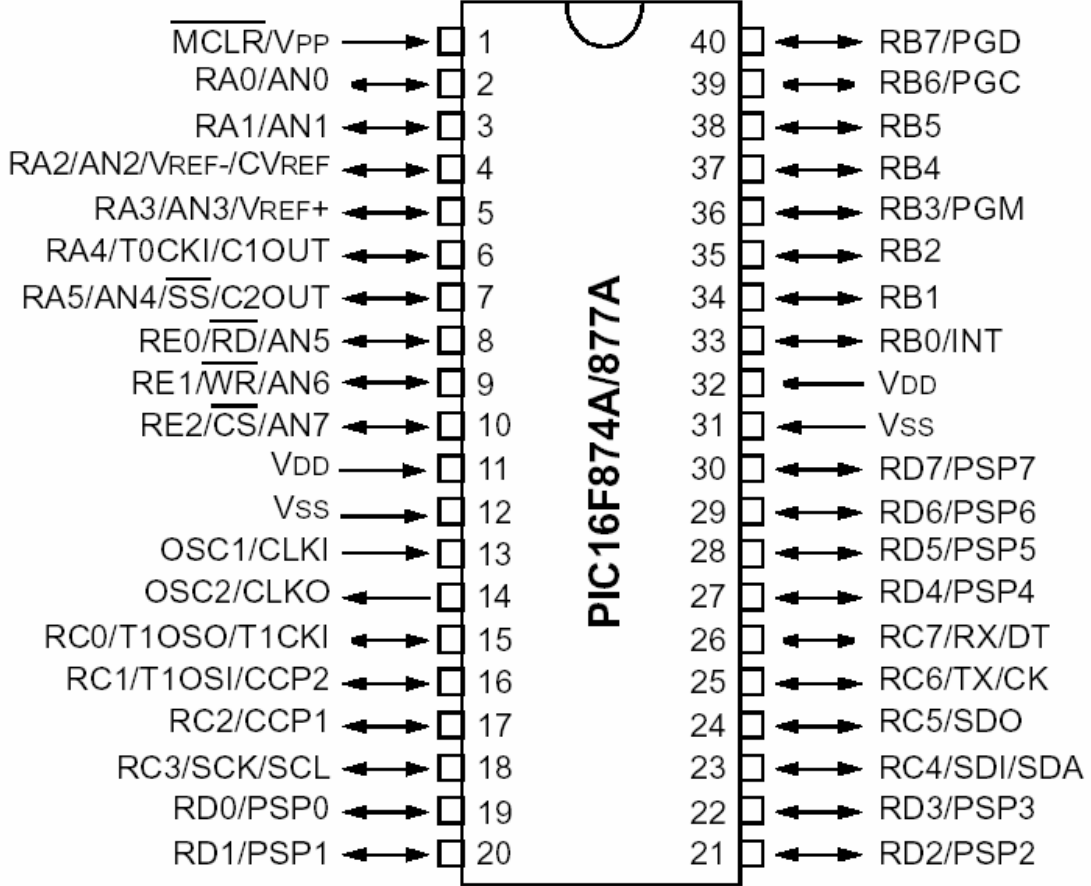
### 2.3. PIC 16F877A Mikrodenetleyicisi

Çevresel üniteleri denetleyici arabirim olan PIC, adını **P**eripheral **I**nterface **C**ontroler cümlesindeki kelimelerin baş harflerinden almış olan bir mikrodenetleyicidir. PIC motor, röle, ısı ve ışık algılayıcısı, LCD ekran gibi çevresel ünitelerin denetimini çok hızlı olarak yapabilecek şekilde tasarlanmış bir yongadır.

Deneyisel çalışmamızın denetim kısmında kullandığımız PIC, 16F877A'dır. Bu mikrodenetleyicinin giriş – çıkış kapılarının fazla ve çalışma frekansının 20 MHz olması seçim nedenidir. 40 bacaklı bir yapıya sahip olan yongada; 8 KB flash bellek, 368 byte Ram bellek, 256 byte EEPROM bellek, 15 adet kesme, 8'er adet bağlantı ucu olan A,B,C,D,E isimlerinde 5 adet giriş – çıkış kapısı, 3 adet zamanlayıcı, 2 adet yakalama / karşılaştırma / PWM modülü, 8 giriş kanallı 10 bit'lik analog digital dönüştürücü, 2 adet analog karşılaştırıcı vardır. Mikrodenetleyicinin paket yapısı ise 40-pin PDIP'dir. Şekil 2.4. 'te mikrodenetleyicinin giriş – çıkış bacak yapısı görülmektedir [15].

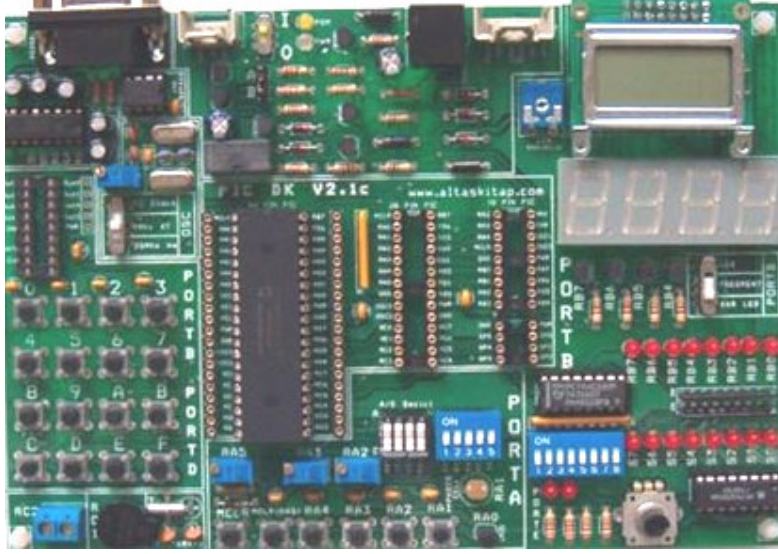
Mikrodenetleyici Assembly, Basic ve C gibi programlama dilleri ile programlanabilir. Editör programlarda yazılan program yine yardımcı bir yazılım ile makine diline çevrilerek yongaya uygun bir ara donanım yardımı ile yüklenir. Bu ara

donanım bir programlama kartı olabileceği gibi, hem programlama hem de deneme özelliği olan bir kartta olabilir.



Şekil 2.4. PIC 16F877A'nın giriş – çıkış bacak yapısı

PIC deneme kartı ile bilgisayar üzerinde yapmış olduğunuz programları kolayca PIC'e yükleyebilir ve microdenetleyiciye yüklediğiniz programın hedeflediğiniz gibi çalışıp çalışmadığını ayrı bir devre kurmadan ve PIC'i sökmeden aynı kartın üzerinde deneyebilirsiniz. Şekil 2.5.'de görülün deneme ve programlama kartı ile, 8, 18, 28, 40 bacaklı PIC'lere bilgisayardan seri kapı aracılığı ile yazılım yükleyebilir ve deneyebilirsiniz.



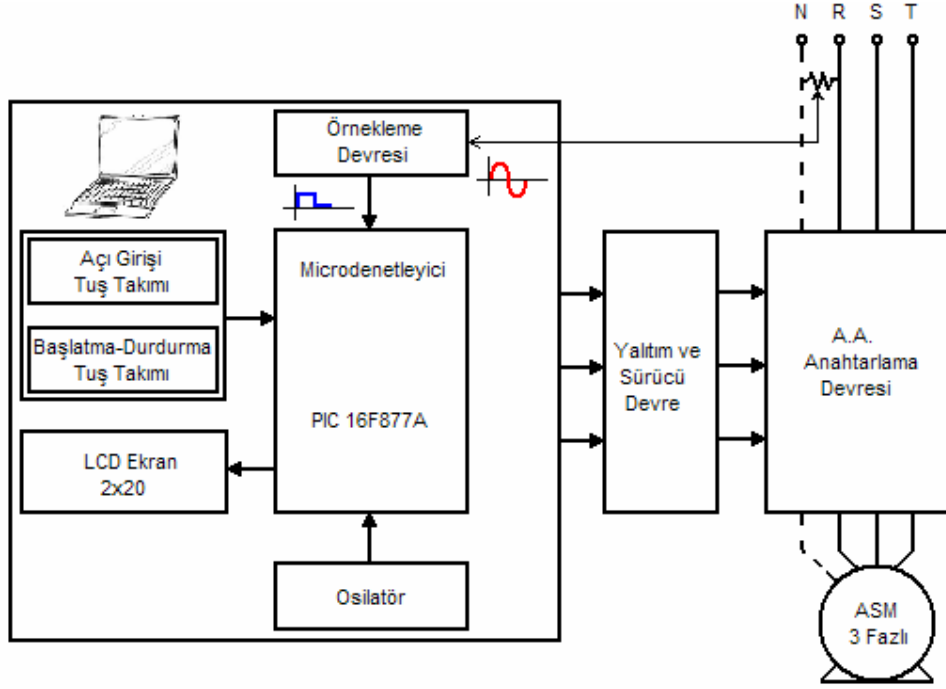
Şekil 2.5. PIC programlama ve deneme kartı ( PIC DK V2.1a )

Deneme kartında analog ve sayısal giriş oluşturmak için; üç adet kademeli ayarlı direnç, altı adet anlık buton veya kalıcı (dip switch) tip anahtarla 1 ve 0 oluşturabilme, 4x3 klavye ( altı adet anlık buton ile ), sıcaklık ölçümü için NTC ve aydınlık düzeyi ölçümü için Fotosel bulunmaktadır [11].

#### 2.4. Faz Gerilimlerini Anahtarlama

Tasarlanan sistem, tuş takımı yardımı ile **her fazı bağımsız olarak 5'er derecelik duyarlılıkla, 0° ile 360° arasında** açılı girişi sağlamaktadır. Girişler LCD ekran yardımı ile gözlemlenebilir. İstenilen anahtarlama açıları girildiğinde, **Başlat** anahtarına basılarak sistem çalıştırılır. Mikrodenetleyicimizin içerisine yüklü olan programın yardımı ile C-7 kapısının 0 veya 1 durumu denetlenir. Bu kapıya sayısallaştırılmış bilgi, örnekleme devresi yardımı ile gönderilir.

Örnekleme bloğu basit bir karşılaştırıcı devreden oluşur. Sinusoidal dalga olarak alınan işaret Şekil 2.6.'da da görüldüğü gibi kare dalgaya çevrilerek mikrodenetleyiciye gönderilir.

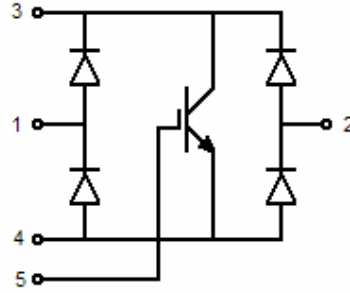


Şekil 2.6. Anahtarlama açısı denetim sistemi blok diyagramı

Mikrodenetleyici C-7 kapısına gelen bu sayısal işaretin 1 (bir) kalma süresince bir sayıcı ünitesini çalıştırır. Giriş işareti 0'a (sıfır) düştüğü an sayma işlemi durur ve sayıcının eriştiği sayı belleğe yazdırılır. EK.2'de verilen gömülü program bir sonraki adımında bellekteki sayıyı 2 ile çarpar ve 72'ye böler. Böylelikle elde edilen katsayı 5°'lik açıya karşılık gelir. Başlangıç da girilen anahtarlama açı değişkenleri çağrılarak, elde edilen katsayı ile çarpılır. Sonuçların her biri bir değişkene aktarılarak programın başka bir sayaç başlatması sağlanır. Sayaç saymaya devam ederken değişkenlerin içindeki sayılara eşit oldukça çıkış işareti olarak C-0, C-1 ve C-2 kapıları aktif olur. Bu bir tür darbe genişliği sürekli olan PWM işareti üretimi gibidir.

Bu çıkış işaretleri sürücü devre için tetikleme sinyalleri oluşturur. Sürücü devre her faz için TLP 2200 entegresi ve 15 V'luk ayrı ayrı galvanik izolasyonlu beslemelerden oluşmaktadır. Optik olarak yalıtım da yapabilen bu entegre, gelen işareti PIC ünitesi ile yalıtıp güç devresindeki IGBT anahtarları tetiklemek üzere gönderilir. Aynı sürücü entegre motorun durdurulması istendiğinde yine PIC denetimli olarak tetikleme işaretini sıfır seviyesine çeker. Böylece elektronik bir başlatma-durdurma kumanda sistemi görevini de görür.

Motor çalışma gerilimi alternatif olduğundan, Şekil 2.7.'de görülen iki yönlü anahtarlama ( Bidirectional Switching Mode ) güç devresinden her faz için ayrı ayrı transistör ve diyot grubu kullanıldı. Böylelikle alternatif akımın her iki yarısında akım sürekliliği sağlanmış olup, sadece başlatma durumunda anahtarlama açısı uygulanmaktadır.



Şekil 2.7. İki yönlü anahtarlama devresi

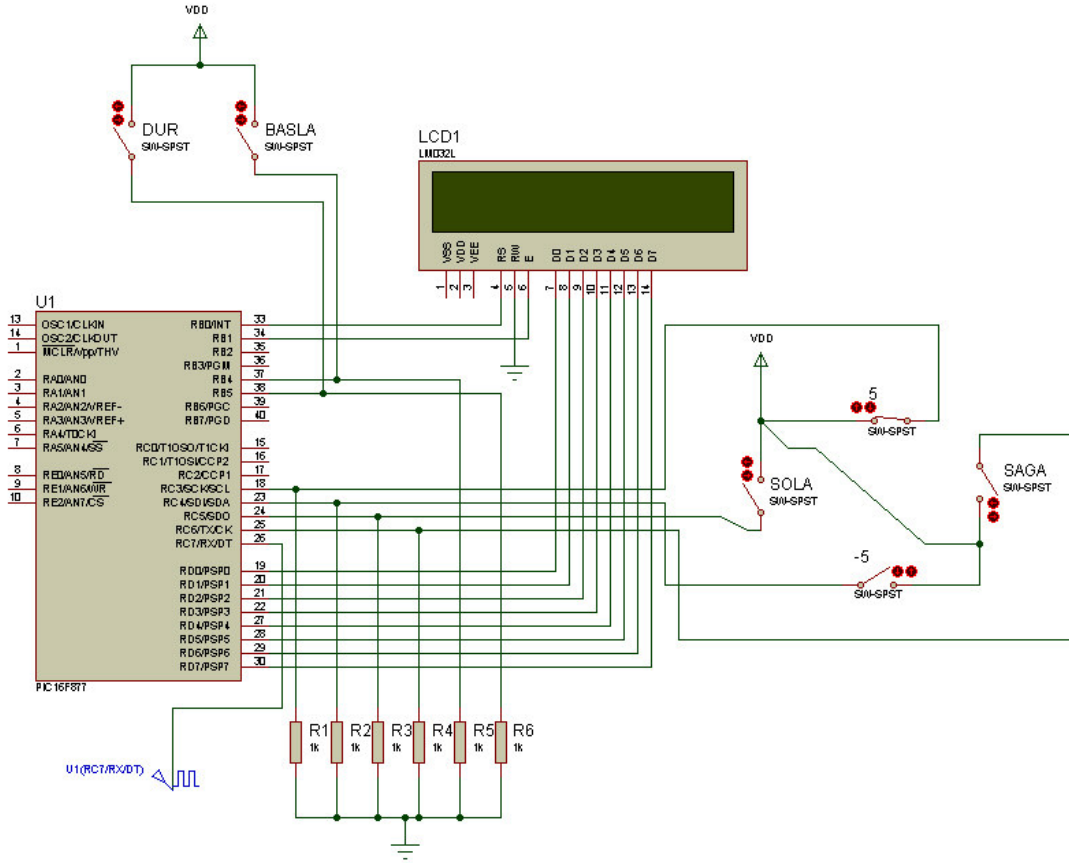
Günümüzde yaygınlaşmaya başlayan bu kullanım tekniği, yarıiletken eleman üreticileri tarafından da fark edilmiş ve aynı paket içinde dört diyot ve bir IGBT'den oluşan yeni devre elemanları (FIO 50-12BD) tasarlamışlardır. Aynı anahtarlama grubu IGBT yerine, MOSFET veya Tristörlü olarak da tasarlanabilmektedir.

## 2.5. Gerçekleştirilmiş Devre Modeli

### 2.5.1. Denetleme Devresi

Sistem ilk olarak Labcenter Electronics [13] firmasının hazırlamış olduğu Proteus adlı benzetim programı ile tamamen bilgisayar ortamında tasarlandı. Bu benzetim programının sunduğu kolaylıkla PIC için yazmış olduğumuz yazılım, Şekil 2.8.'de görülen PIC 16F877A mikrodenetleyicisinin içine yüklendi. Yazımı biten programın deneme çalışmaları bu yardımcı yazılım ile tamamlandıktan sonra uygulama devresi gerçek elemanlara kurulmaya başlandı.

Mikrodenetleyiciye gömülü olan programın genel çalışma ilkesi tarama esaslıdır. Yazılım öncelikli olarak kapı girişlerini tarama yöntemi ile denetleyerek, elde ettiği yeni girişlere göre program akışını da göz önünde bulundurarak çıkış üretmektedir.

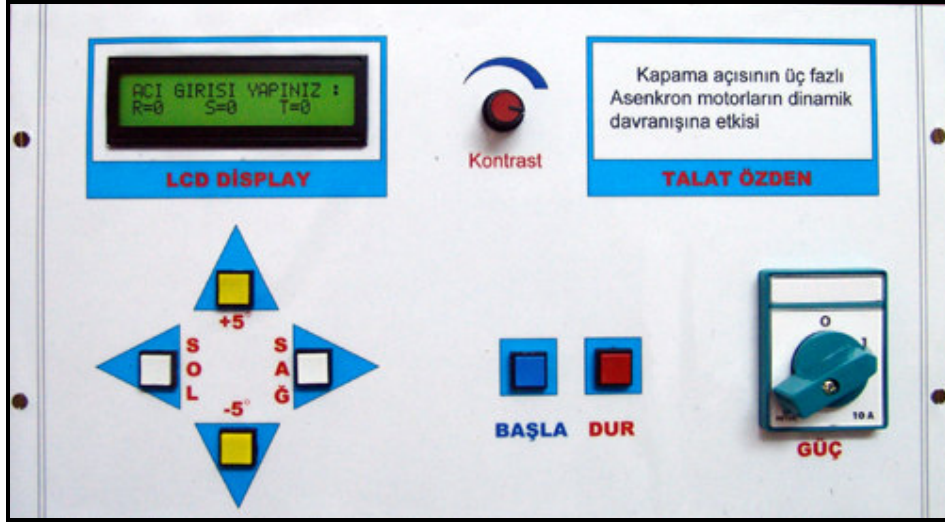


Şekil 2.8. Proteus paket programı ile hazırlanmış devre benzetimi

EK.2'de verilen program metninin en başındaki değişken ve kapı tanımlama kısmından da anlaşılacağı gibi, bazı kapılar çıkış bazı kapılar da giriş olarak tanımlandı. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra giriş birimi elemanları giriş kapılarına, çıkış birimi elemanları da çıkış kapılarına gerekli yardımcı elemanlar ile bağlandı.

Giriş birimleri; anahtarlama açısı değerini girebildiğimiz tuş takımı, sistemi durdurup başlatabilen ikinci tuş takımı, örnekleme devresi ve osilatör devresidir. Çıkış birimleri ise; LCD ekran ve güç devresini sürmek için kullanılanyalıtım ve sürücü devresidir.





Şekil 2.9. Denetleme devresi açılış ekranı ve tuş takımları

Şekil 2.9.'da ki panel üzerindeki güç anahtarı "1" konumuna getirildiğinde denetleme devresinin tümü ve güç devresi beslemeleri enerjilendirilmiş olur. Panel üzerindeki LCD ekranda Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi her faz için açılış alanları belirir.



Şekil 2.10. Anahtarlama açılış ekranı

Sistem veri giriş elemanı olarak tanımladığımız Şekil 2.9.'da gözüken dört adet tuş takımından sarı olanlar kullanılarak 5'er derecelik hassasiyetle her faz için açılış yapılabilir. Panel üzerinde bu anahtarlar +5 ve -5 olarak isimlendirilmişlerdir. Anahtarların ürettiği sayısal 1 işaretleri, mikrodenetleyicinin C-3 ve C-4 kapılarına gitmektedir. Eğer

anahtarlardan herhangi birine devamlı olarak basılı tutarak kesintisiz sayısal 1 işareti mikrodenetleyiciye gönderilirse, gömülü program her 250  $\mu$ s'de bir kez basılmış gibi algılayacaktır. Bu 250  $\mu$ s'lik değer butonları algılayan giriş kapılarının parazitlerden etkilenmesini engellemek için ilk algılama anından sonra sistemi bekletmek için kullanılan PAUSE komutunun zamanıdır. Eğer istenilirse programın içinden bu değerler değiştirilerek düzeltilmiş program mikrodenetleyiciye tekrar yüklenebilir. Ancak denemeler sonucunda 250  $\mu$ s'lik değer optimum değer olarak tespit edilmiştir.

Her bir faz açısı için gömülü programda bir değişken atanmıştır. Atanan bu değişken değeri, tuşlardan gelen her bir sayısal 1 işareti algılandığında,  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$  arasında sınırlanmış, beşer beşer sayan  $RF=RF+5$  veya  $RF=RF-5$  gibi klasik bir sayaç ile artırılıp azaltılır. Yeni oluşan değişken değeri de LCD ekranda anında görüntülenir.

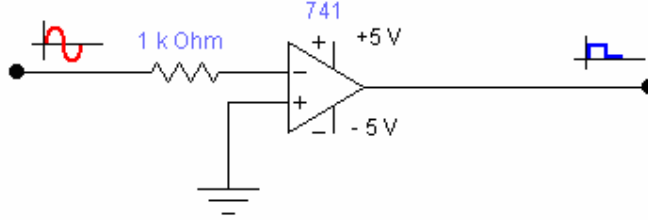
Herhangi bir fazın açısı girişi tamamlandıktan sonra, Şekil 2.9.'da görülen panel üzerinde ki **SAG** ve **SOL** olarak adlandırılmış anahtarlar yardımı ile, diğer bir fazın açısı girişi için LCD ekrandaki imleç hareket ettirilir. **SAG** veya **SOL** anahtarların herhangi birine basıldığında sırası ile C-6 veya C-5 kapılarına sayısal 1 işareti uygulanmış olur. Böylelikle imlecin ekrandaki konumunu sayısal değerine göre ayarlayan DS sayacının değeri artırılmış ya da azaltılmış olur. DS sayacının değerine göre imleç ekrandaki yeni yerine konumlandırılır. Böylelikle diğer fazın açısı ayarlanabilir.



Şekil 2.11. Anahtarlama açılarının girişinin görselleştirildiği LCD

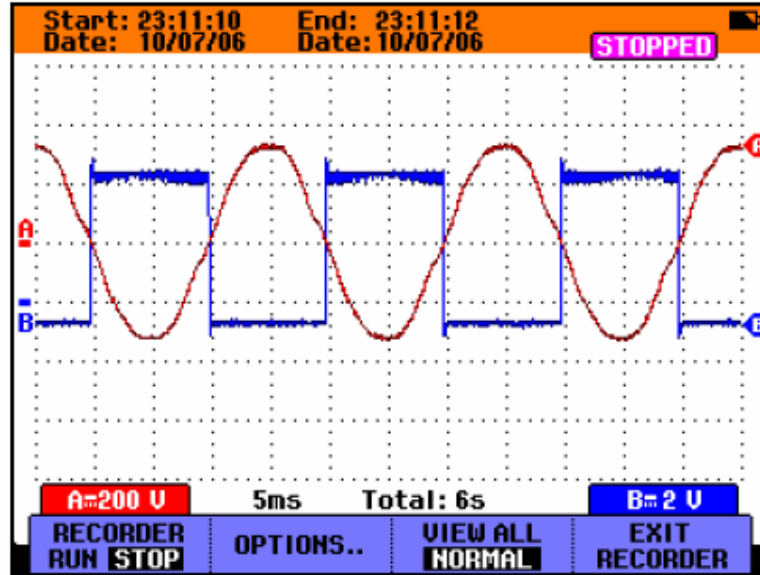
Şekil 2.11.'de ki gibi her fazın anahtarlama açısı tanımlama işlemi bittikten sonra, Şekil 2.9.'da ki **BAŞLA** anahtarına basılır. Bu durumda anahtarın ürettiği sayısal 1 işareti B-4 kapısına aktif eder. Gömülü program bu durumu algıladıktan sonra Şekil 2.12'de

görülen devrenin yardımı ile üretilen örnekleme işareti, mikrodenetleyicinin C-7 kapısına gönderilir. Örnekleme işareti artık kare dalga biçimindedir ve gömülü program sayısal 1 olma anınca SAYAC değişkenini değerini artırır.



Şekil 2.12. Örnekleme Devresi

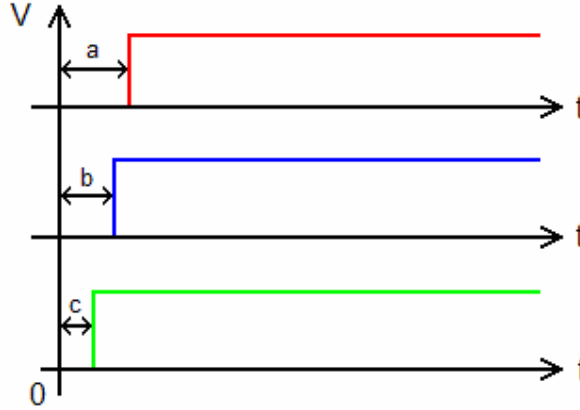
Şekil 2.13.'de görülen örnekleme işaretinin 1 olma anı bittiğinde gömülü program SAYAC değişkeninin saymasını durdurur. Örnekleme işaretini karşılaştırıcı devre yardımı ile elde ettiğimiz için pozitif periyotta sayısal 1, negatif periyotta sayısal 0 elde ederiz. Bu sebepten dolayı SAYAC değişkeninin vardığı rakam ancak yarım periyot süresine karşılık gelmektedir. Yazılım sonraki adımda bir tam periyodun oluşma sayısını bulabilmek için SAYAC değişkenini iki ile çarparak başka bir değişkene sonucunu aktarır. Elde edilen yeni sayı artık tam bir periyotluk örnekleme işaretini temsil etmektedir.



Şekil 2.13. Örnekleme İşareti (Fluke 199C marka osiloskop ile alınmıştır)

Yapılan uygulamada küçük açı değişimlerinin büyük moment dalgalanmalarına sebep vereceği düşünülmediğinden açı giriş değerleri 5°'lik değişimlerle ayarlanabilmesi düşünölmüştür. Bu sebepten ötürü, tam bir periyotun oluşma süresini temsil eden rakamı, 5°'lik açıyı temsil etmesi için programda 72'ye bölünmektedir. Bu adımdan sonra elde edilen katsayı tekrar başka bir değişkene aktarılır.

Bundan sonraki adımda gömülü program bu katsayıyı Şekil 2.11.'de LCD ekrana girilen her fazın anahtarlama açı değerleri ile çarpar ve her faz için elde edilen sayıları RFY, SFY, TFY gibi değişkenlere aktarılır. Bu değişkenlerin tuttuğu sayılar R fazının 0 (sıfır) anı referans olmak üzere, gecikecek anahtarlama geriliminin açısal cinsten karşılığını temsil eder.



Şekil 2.14. Kaydırılmış tetikleme işaretleri

*a- R fazı için kaydırılmış tetikleme işareti*

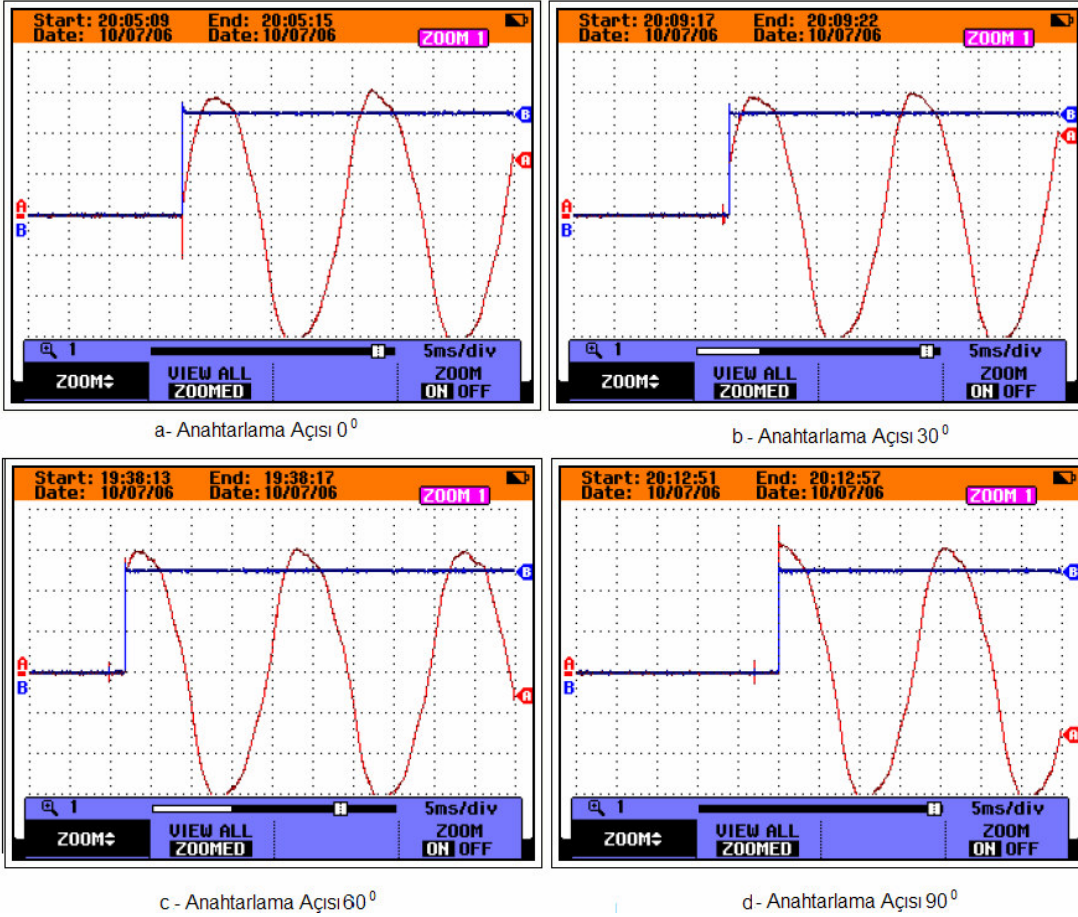
*b- S fazı için kaydırılmış tetikleme işareti*

*c- T fazı için kaydırılmış tetikleme işareti*

Bir periyotluk zamana denk gelen sayı ( T ), döngünün son sayısını temsil etmek üzere artış miktarı bir olan yeni bir FOR – NEXT döngüsü kurulur. Bu döngünün arasına her bir fazın anahtarlama açılarını temsil eden rakamlar karşılaştırma komutu yardımı ile aşağıdaki gibi yazılır.

```
FOR I=0 TO T
  IF RFY=I THEN PORTC.0=1
  IF SFY=I THEN PORTC.1=1
  IF TFY=I THEN PORTC.2=1
NEXT I
```

Döngü ilerledikçe anahtarlama açısının gecikme sayılarına denk gelecek, bu durumu IF komutu yakalayacak ve ilgili kapının çıkışını sayısal 1 işaretine ayarlayacaktır. Bu elde edilen yeni işaretler mikrodenetleyicinin C-0, C-1 ve C-2 numaralı bacaklarından alınır. C-0, C-1 ve C-2 kapıları sırasıyla R, S ve T fazlarının gecikme açıları kadar kaymış tetikleme işaretlerini üretmiş olurlar.



Şekil 2.15. R fazı anahtarlama açılarının osiloskop ekran görüntüsü

Tüm bu algılamalar ve hesaplamalar yapılırken LCD Ekranda Şekil 2.16.'da ki gibi *Sistem Çalışıyor* ibaresi gözükür.



Şekil 2.16. Başla anahtarına basıldıktan sonraki görsel uyarı mesajı

Sistem durdurulmak istendiğinde Şekil 2.9.'da görülen panelin üzerindeki **DUR** butonuna basılır. Anahtar, mikrodenetleyicinin B-5 kapısına sayısal 1 işareti gönderir. Gömülü program bu kapının bir olduğunu algıladığı anda C kapısına bağlı bütün bacaklarını sayısal 0 seviyesine çeker. Böylelikle tetikleme işaretleri de kesilmiş olur. Sistem durdurulurken LCD ekranda Şekil 2.17.'de ki gibi *Sistem Durduruldu* ibaresi gözükür.

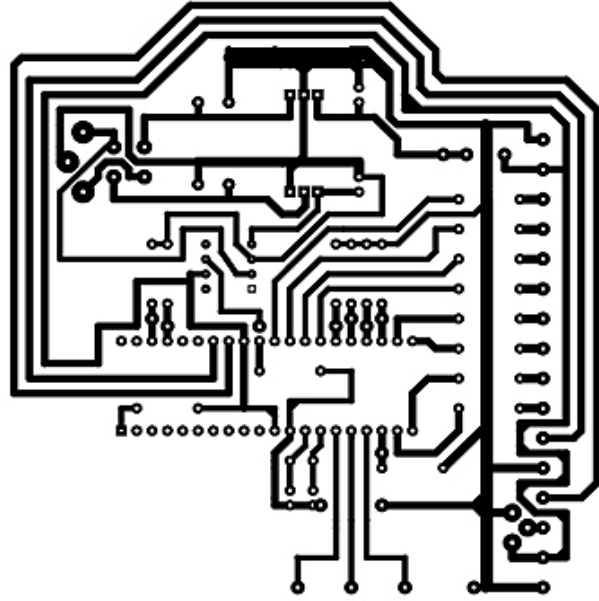


Şekil 2.17. Dur anahtarına basıldıktan sonraki görsel uyarı mesajı

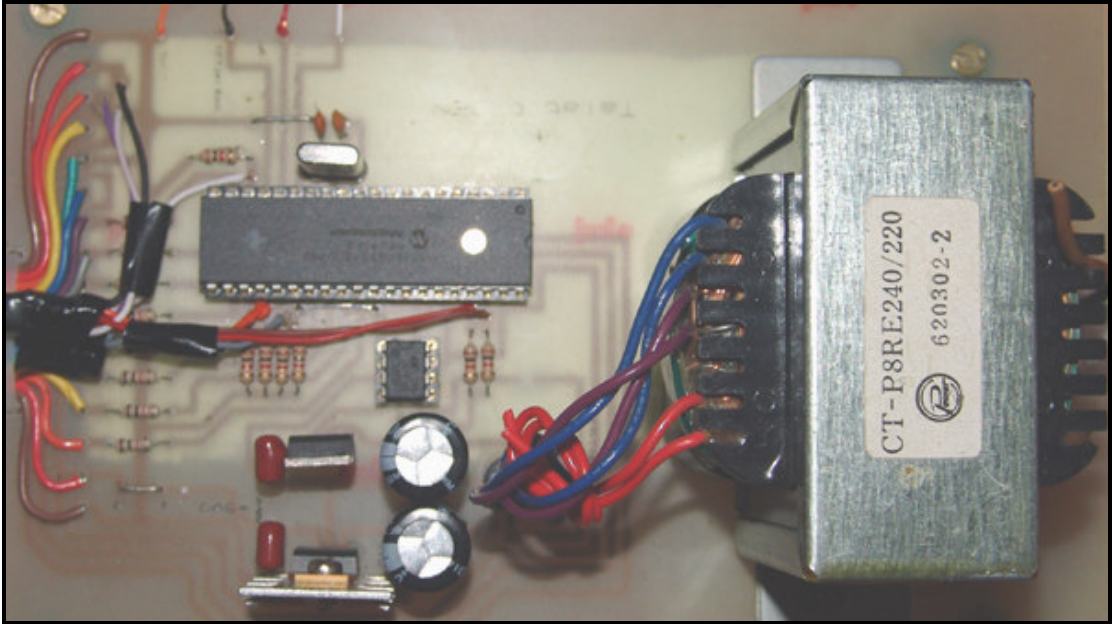
Yaklaşık 2 saniyelik uyarı mesajından sonra sistem başlangıç durumuna geri döner. Anlatıldığı gibi tekrar fazların anahtarlama açılış değerleri girilerek sistem kolayca çalıştırılabilir. Kullanılan PIC16F877A mikrodenetleyicisi 20 MHz hızında çalıştırıldığı 50 Hz'lik şebeke frekansına göre çok hızlı olduğundan sistemin zamansal gecikmesi çok küçüktür. Tasarım yazılımsal bir temele oturduğu için esnekler. Gömülü programda

istenilen değişiklikler yapılarak soketli yapıya sahip mikrodenetleyiciye rahatça yüklenebilir ve yeni ihtiyaçlara karşılık verecek şekilde güncellemeler yapılabilir.

Mikrodenetleyiciye sahip denetleme devresinin Şekil 2.18. ve Şekil 2.19.'da baskı devre şeması ve devre resmi görülmektedir.



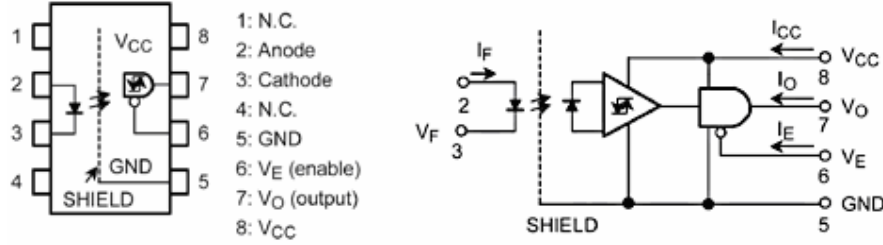
Şekil 2.18. Denetleme ünitesi baskı devre şeması



Şekil 2.19. Denetleme ünitesi devre resmi

### 2.5.2 Güç Devresi

Yalıtım ve sürücü devresi için, mikrodenetleyicinin C-0, C-1 ve C-2 numaralı bacağından elde edilen tetikleme işaretleri Şekil 2.14.'de gösterilmiştir. Bu işaretler sırası ile R, S ve T fazlarının anahtarlama açıları kadar kaydırılmış darbe genişliği sürekli olan PWM'lerdir. Öncelikli olarak mikrodenetleyiciden gelen bu işaretler güç devresi ile yalıtılmıştır. Hem yalıtım hem de IGBT sürücü entegresi olarak TLP 2200 yongası kullanılmıştır. Şekil 2.20.'de iç şeması görülebilen bu entegre optik yalıtım yaparken aynı zamanda özellikle IGBT ve MOSFET gibi güç elektroniği devre elemanlarını yalıtım devresinin haricinde kalan kısmı ile kararlı bir şekilde sürebilmektedir.



Şekil 2.20. TLP 2200'ün bacak numaraları ve iç devresi

TLP 2200'ün en önemli özelliğinden biri yetkilendirme (enable) bacağıнын olmasıdır. Giriş işareti sayısal olarak ne olursa olsun, Tablo 2.1.'de verildiği gibi yetkilendirme bacağına gelen düşük seviye sayılsa işaret olmadıkça çıkış olarak ya sıfır yada yine düşük seviye işaret üretmektedir. Böylelikle entegrenin yetkilendirme bacağı olan 6 numaralı bacağı mikrodenetleyici ya da mikroişlemci tarafından denetlenerek giriş varken bile istenildiği zaman çıkış üretebilen bir denetleme sistemi oluşturulabilir.

Tablo 2.1. TLP 2200 entegresinin doğrulama tablosu

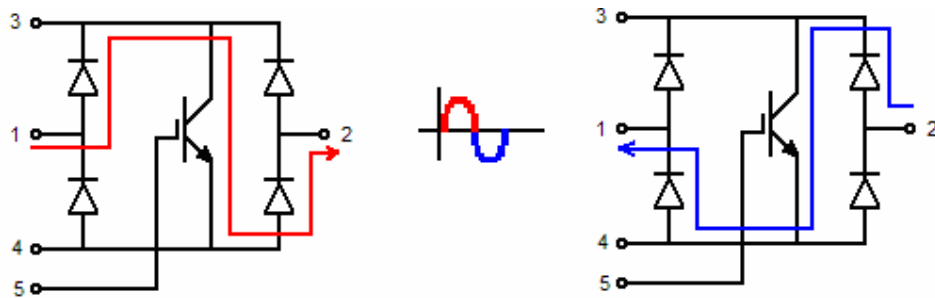
| Input | Enable | Output |
|-------|--------|--------|
| H     | H      | Z      |
| L     | H      | Z      |
| H     | L      | H      |
| L     | L      | L      |



Bunun yanı sıra giriş işaretinin +5V gibi sabit bir seviyeye sahip olduğu düşünülürse, yetkilendirme bacağına istediğimiz zaman yüksek veya düşük seviyeye çekmek sureti ile çıkış işareti olarak istenilen darbe genişliğine sahip PWM işareti oluşturulabilir.

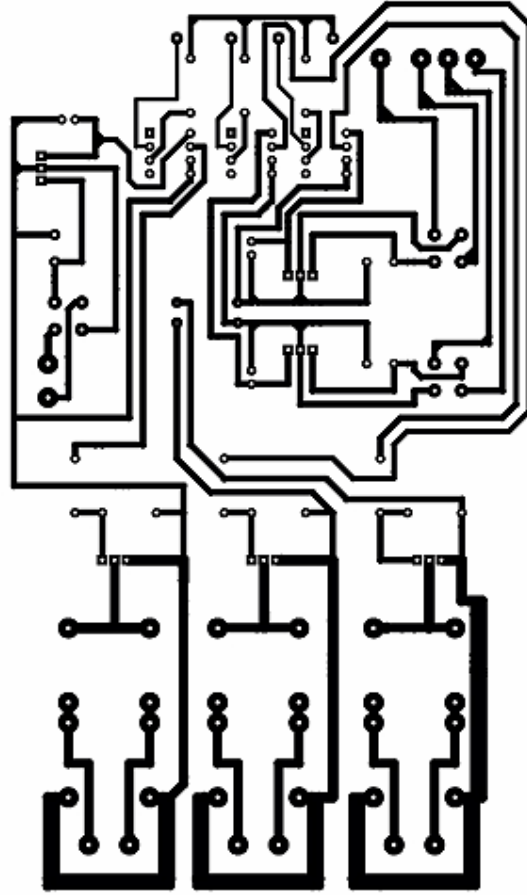
Bu çalışmada yapılan uygulama devresinde ise entegrenin yetkilendirme bacağı gnd'ye bağlanmıştır. Çünkü sistemimiz sadece başlangıçtaki anahtarlama açılarını istenilen oranda kaydırarak motora yol vermektedir. Bu sebepten ötürü, herhangi bir şekilde IGBT'lerin tetikleme sinyalleri kesilmemelidir. Bu durum da TLP 2200'ün yetkilendirme bacağına devamlı düşük seviye verip, mikrodenetleyicinin C-0, C-1 ve C-2 bacağından gelen +5V'luk işaretleri yalıtım devresinden geçirerek, +15V'luk seviyeye çıkartıp, IGBT'nin tetikleme girişi olan Gate bacağına verilerek sağlanır. Böylelikle sadece başlangıçtaki anahtarlama açısı kadar sonra IGBT'lere tetikleme gider. Bu tetikleme işareti kesilmedikçe IGBT'ler sürekli devrede kalır.

Motorun çalışma gerilimi alternatif olduğundan, Şekil 2.7.'de görülen iki yönlü anahtarlama ( Bidirectional Switching Mode ) güç devresi, her faz için ayrı ayrı IGBT ve diyot grubu kullanılarak tasarlandığı daha önce belirtilmişti. Bir transistor çeşidi olan IGBT'ler sadece tek yön akımlı anahtarlardır. Tristör ve IGBT gibi devre elemanlarında bu anahtarlama yöntemi alternatif akımın her iki periyodunda da iletim sağlayabilmektedir. Şekil 2.21.'de ayrıntılı gösterildiği gibi, köprü tip diyot grubunun ortasına yerleştirilmiş olan IGBT üzerinden geçen akım, alternatif akımın her iki periyodunda da aynı yönde geçer. Bundan dolayı IGBT tek yönlü anahtar olarak sorunsuz bir şekilde alternatif akımda dahi çalışabilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu anahtarlama modelini tek bir paket halinde (IXYS firmasının FIO 50-12BD elemanı) imal eden firmalarda vardır.



Şekil 2.21. İki yönlü anahtarlama güç devresinin akım akış şeması

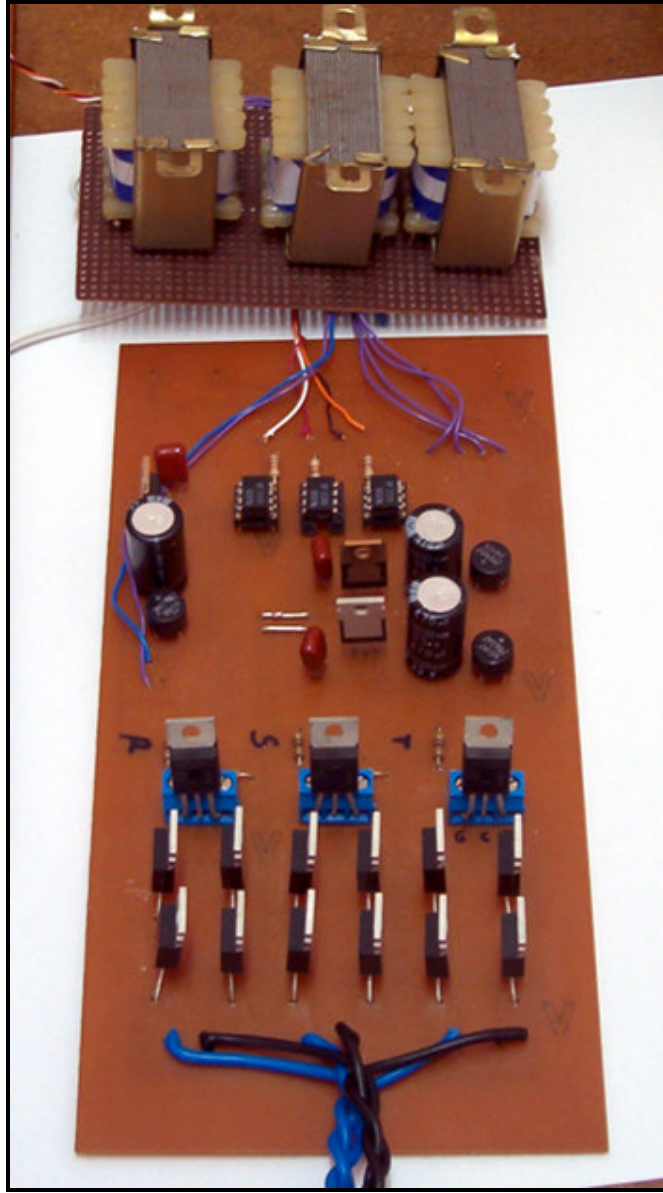
Şekil 2.21.'de ki iki yönlü anahtarlama parçasının; 1 numaralı ucuna faz girişi, 2 numaralı ucuna motor sargı uçları ve 5 numaralı ucuna da TLP 2200 entegresinden gelen tetikleme işareti bağlanır. 1 numaralı uç boşta kalır, 4 numaralı uç ise her bir iki yönlü anahtar devresini sürmek için kullanılan TLP 2200 entegresinin yalıtımdan sonraki kısmını besleyen +15V'luk kaynağın toprağına bağlanır. Tasarlanan güç devresinin baskı devre şeması Şekil 2.22.'de görülmektedir.



Şekil 2.22. Güç ünitesi baskı devre şeması

**Sistemin genel amacı; başlangıçta ayarlanmış anahtarlama açısı kadar sonra motora yol vermek ve motorun dinamik davranışını incelemektir.** Bundan dolayı sistemin her bir bileşeni gecikme oluşturmaksızın motora yol vermeli ki, asenkron makinenin istenilen anahtarlama açıları için dinamik davranışı gözlenebilsin. Bu amaç göz önünde tutularak seçilen IGBT'ler ( IXDH 30N120 D1) 100 ns'de, diyotlar (DSEI 12-

12A) ise 50 ns'de iletme geçebilmektedirler. Her iki elemanın iletme geçme süreleri, 20 ms olan alternatif akımın bir periyotunun oluşma süresinin yanında çok küçüktür. Dolayısıyla sistemin genel davranışına göre çok hızlı olduklarından, anahtarlama açılarında oluşturdukları gecikmeler yaklaşık  $10^{-5}$  kadardır ve buda ihmal edilecek düzeydedir. Mikrodenetleyicinin tetikleme işaretlerinin girdiği, ayrı ayrı besleme kısımlarınca beslenen, yalıtım ve sürme kısımlarına sahip olan güç devresinin resmi Şekil 2.23'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.23. Güç devresi resmi

## 2.6. Motor Parametrelerinin Belirlenmesi

Stator direnci, doğru akım ile beslenen bir Ommetre ile ölçülerek, elde edilen değer alternatif akım için deri olayından dolayı 1.2 katsayısı ile çarpılmıştır. Boşta çalışma ve kilitli rotor deneyleri ile stator ve rotor parametreleri belirlenmiş olup eylemsizlik moment katsayısı yavaşlama deneyi ile elde edilmiştir ve Tablo 2.2.'de ki motor parametreleri tespit edilmiştir.

Tablo 2.2. LEYBOLD marka 0,37 kW'lık sincap kafesli ASM'nin parametreleri

| Parametreler | $R_s$ ( $\Omega$ ) | $R_r$ ( $\Omega$ ) | $L_{ls}$ (H) | $L_{lr}$ (H) | $L_m$ (H) | P | j<br>( $\text{kgm}^2$ ) |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|-----------|---|-------------------------|
| Değerleri    | 82,5               | 24,5               | 0,0384       | 0,116        | 2,4       | 4 | 0,005                   |

## 2.7. Momentin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Moment ölçümünde kullanılan temel ilke açısal hızın türevini almaktır. Makinenin **hareket denklemini**;

$$M_e = M_i + M_s + M_y \quad (2.40)$$

yani;

$$M_e = j \frac{d\omega}{dt} + f\omega + M_y \quad (2.41)$$

biçimindedir. Mikroişlemcilerin henüz geliştirilmediği dönemlerde kullanılan analog hesaplayıcılardan yararlanılarak bu hareket denkleminin çözümü Şekil 2.24.'de ki devre ile yapılabilir.

Bu durumda;

$$M_e = \frac{R_4}{R_2} \left( \frac{1}{R_7 C_4} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_3}{R_1} \omega + M_y \right) \quad (2.42)$$

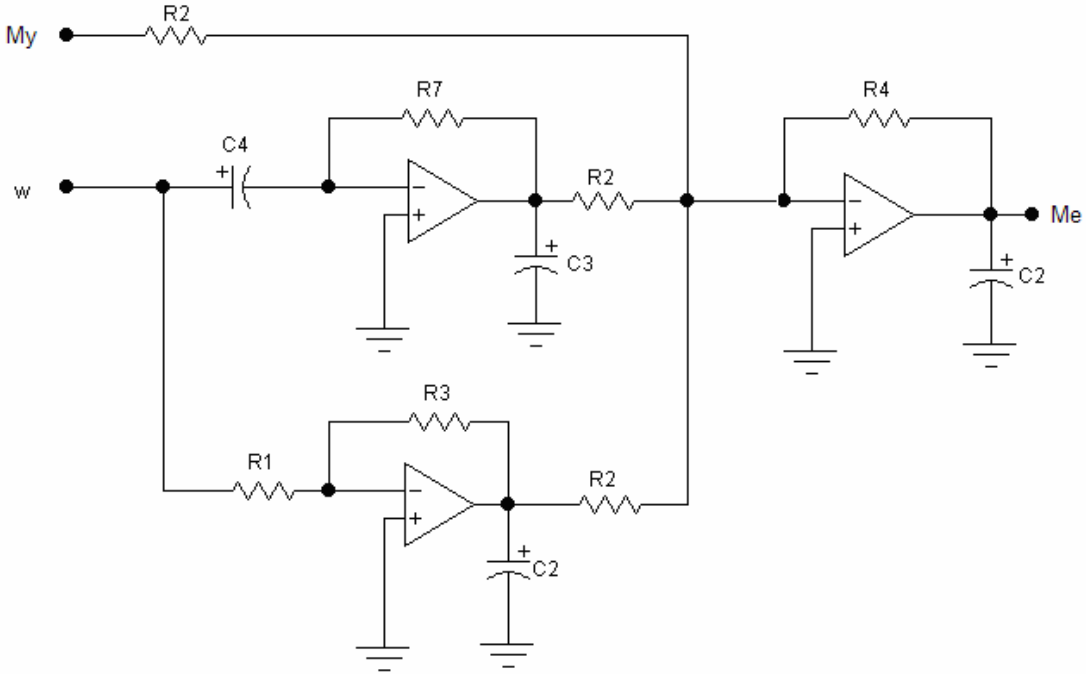
olacaktır.

Böylelikle;

$$j = \frac{R_4}{R_2 R_7 C_4} \quad (2.43)$$

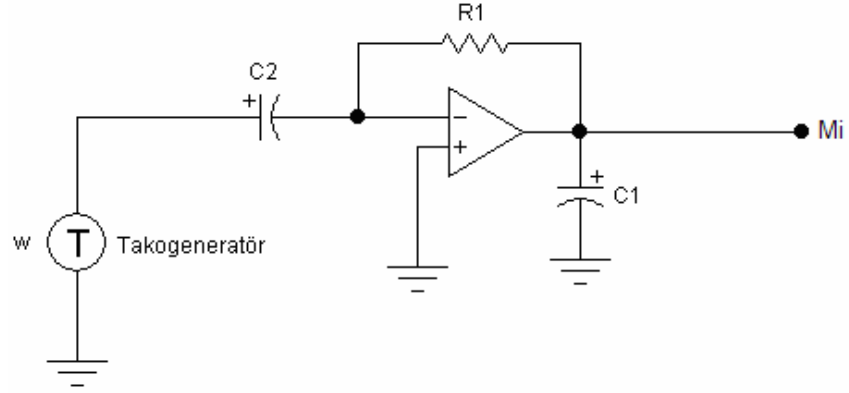
$$f = \frac{R_4 R_3}{R_2 R_1} \quad (2.44)$$

olacak şekilde dirençler ayarlanır [14].



Şekil 2.24. Momentin analog benzetim devresi

Eğer  $M_s \ll M_i$  ve  $M_y$  yok kabul edilirse moment ölçülürken de Şekil 2.25.'de gösterilen devre kullanılabilir.



Şekil 2.25. Moment analog benzetim devresinin sürtünme ihmal edilmiş boşa çalışırken ki bağlantı şeması

Yeni bağıntımız ise;

$$M_i = R_1 C_2 \frac{d\omega}{dt} \quad (2.45)$$

olarak elde edilir.

### 3. BULGULAR

Deneyler **R** fazı, referans faz olarak kabul edilerek yapılmıştır. Her bir faz için en düşük olarak 30 derecelik değişimler göz önünde tutulmuştur. **R** fazı referans alınarak yapılan deneylerdeki açılar şu şekilde seçilmiştir;

- Her fazın referans fazla aynı kapatıldığı kabullenerek,
- İkinci fazın referans fazla aynı, üçüncü fazın geri olduğu kabullenerek,
- Üçüncü fazın referans fazla aynı, ikinci fazın geri olduğu kabullenerek,
- İkinci faz referans fazdan geride, üçüncü faz ikinci fazdan da geri olduğu kabullenerek
- Üçüncü faz referans fazdan geride, ikinci faz üçüncü fazdan da geri olduğu kabullenerek
- Her iki fazında referans faza göre geri olduğu kabullenerek,
- İkinci fazın referans fazla aynı, üçüncü fazın ileri olduğu kabullenerek,
- Üçüncü fazın referans fazla aynı, ikinci fazın ileri olduğu kabullenerek,
- İkinci faz referans fazdan ileride, üçüncü faz ikinci fazdan da ileri olduğu kabullenerek
- Üçüncü faz referans fazdan ileride, ikinci faz üçüncü fazdan da ileri olduğu kabullenerek
- Her iki fazında referans faza göre ileri olduğu kabullenerek.

Bu açıların benzetim programındaki ve deneysel çalışmalardaki sonuçlarına göre aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

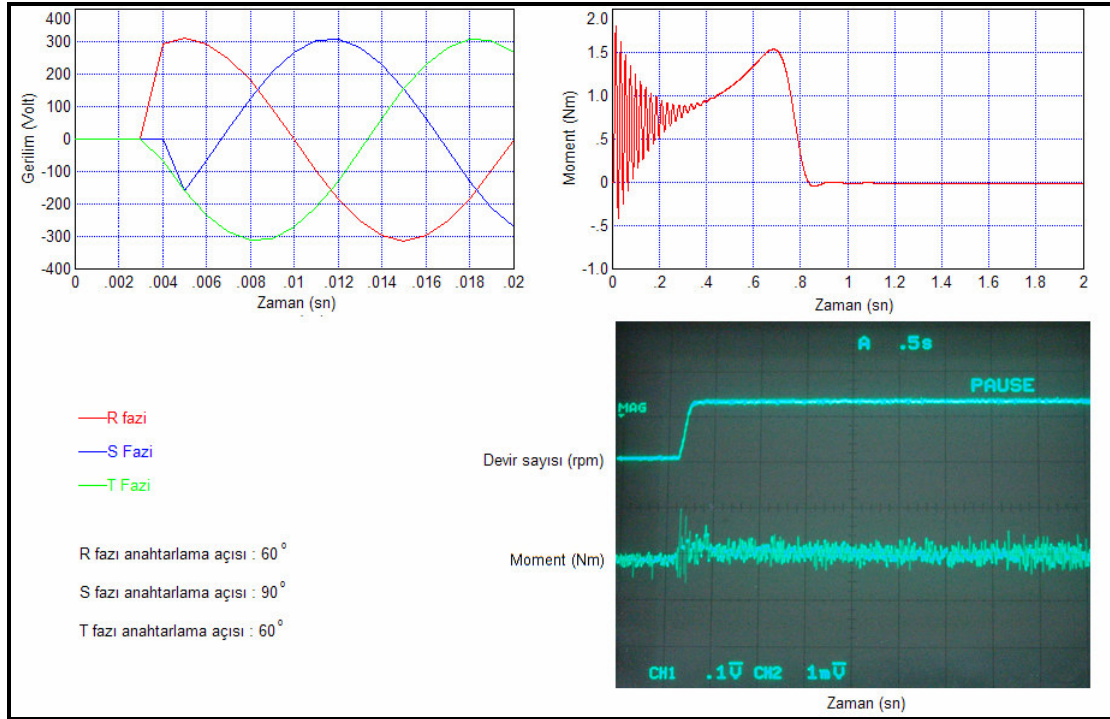
Tablo 3.1. En fazla negatif moment salınımları olan anahtarlama açıları

| Sıra no | R Fazi | S Fazi | T fazi |
|---------|--------|--------|--------|
| 1       | 0      | 30     | 60     |
| 2       | 60     | 90     | 60     |
| 3       | 60     | 90     | 90     |
| 4       | 120    | 90     | 60     |
| 5       | 150    | 180    | 210    |
| 6       | 180    | 150    | 180    |
| 7       | 180    | 210    | 240    |
| 8       | 330    | 300    | 270    |

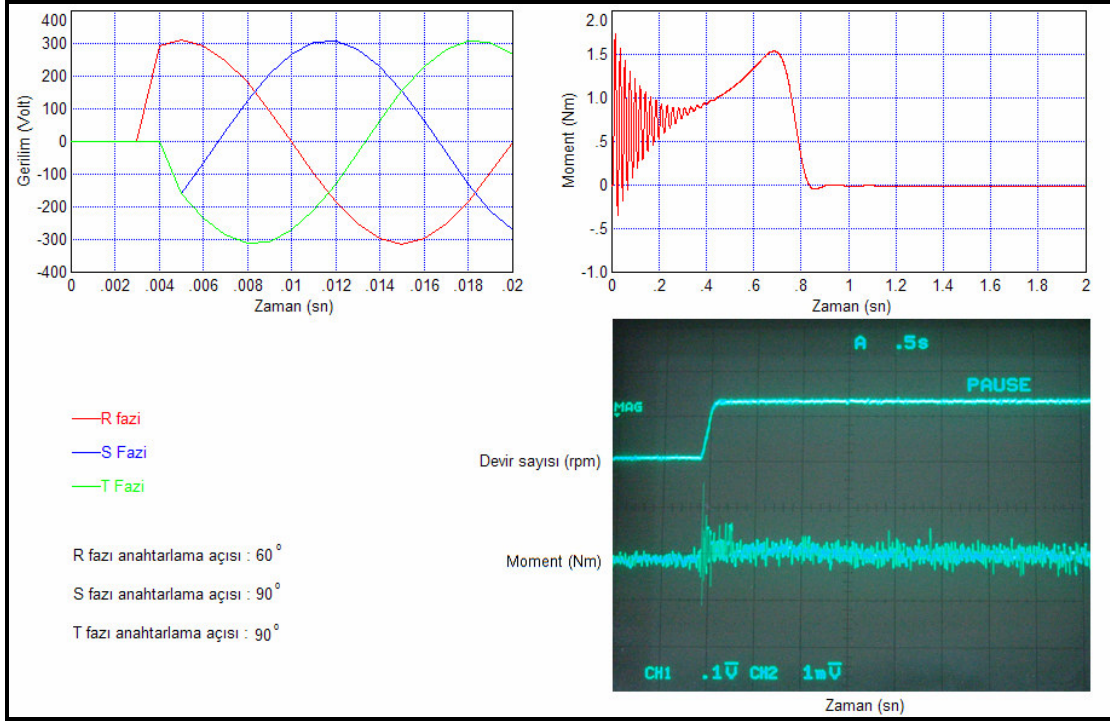
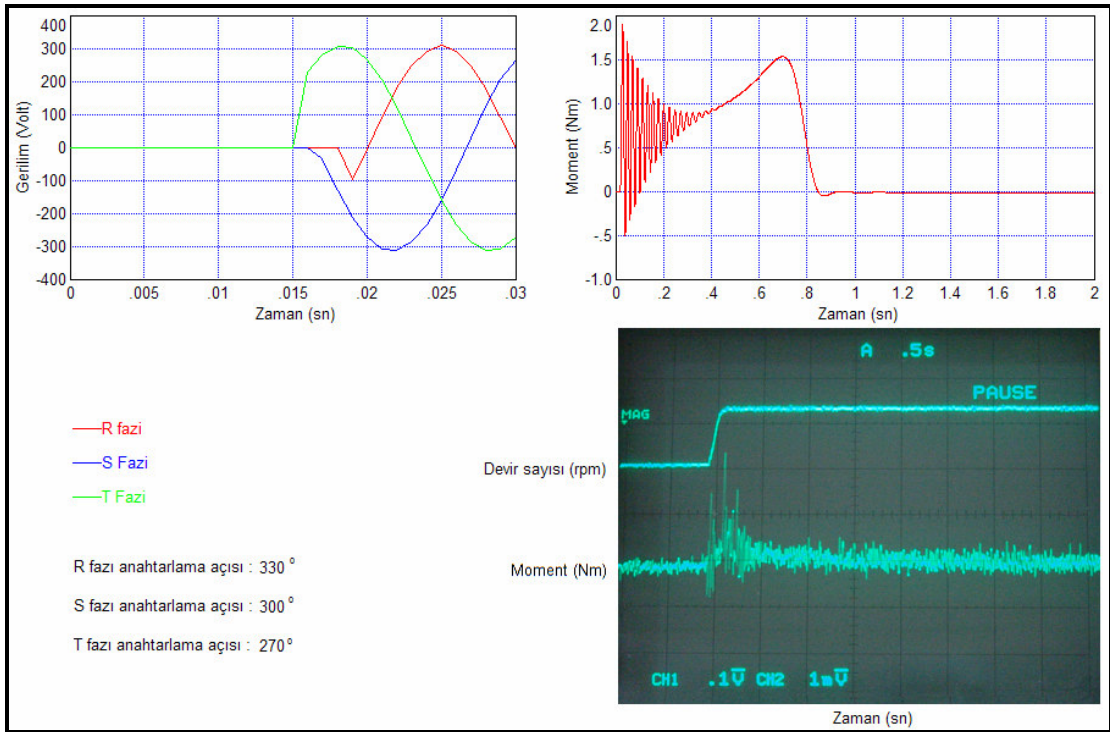
Tablo 3.2. En az negatif moment salınımları olan anahtarlama açıları

| Sıra no | R Fazi | S Fazi | T fazi |
|---------|--------|--------|--------|
| 1       | 60     | 30     | 0      |
| 2       | 60     | 90     | 120    |
| 3       | 90     | 60     | 30     |
| 4       | 90     | 90     | 90     |
| 5       | 90     | 120    | 150    |
| 6       | 90     | 150    | 120    |
| 7       | 120    | 60     | 90     |
| 8       | 120    | 180    | 150    |
| 9       | 180    | 210    | 180    |
| 10      | 180    | 210    | 150    |
| 11      | 270    | 240    | 270    |
| 12      | 300    | 330    | 330    |
| 13      | 300    | 360    | 360    |

### 3.1. En Fazla Negatif Moment Salınımları Olan Anahtarlama Açılı

Şekil 3.1.  $60^\circ, 90^\circ$  ve  $60^\circ$ 'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı

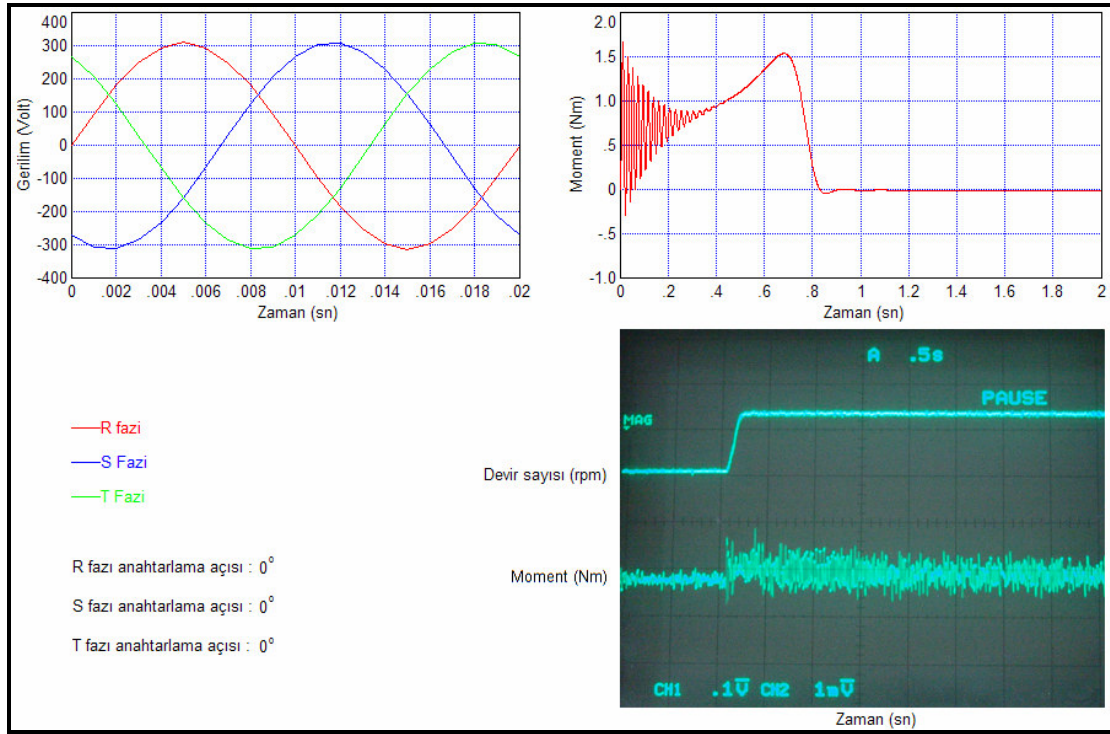


Şekil 3.2.  $60^\circ, 90^\circ$  ve  $90^\circ$  lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışıŞekil 3.3.  $330^\circ, 300^\circ$  ve  $270^\circ$  lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı

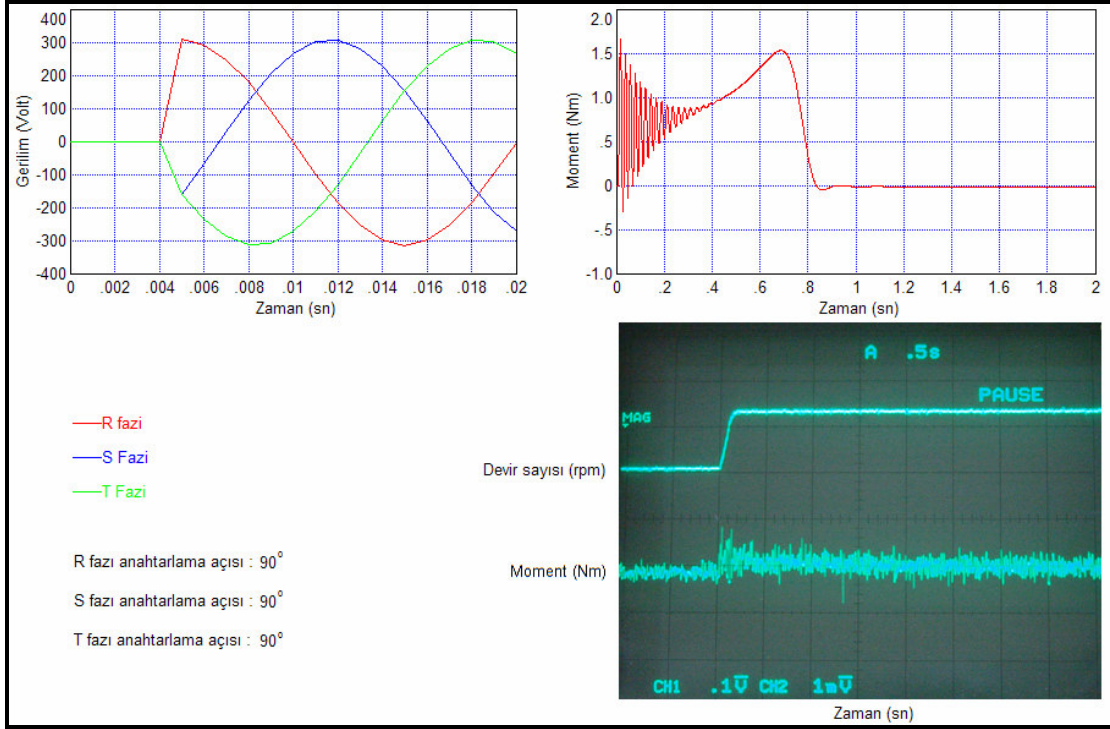
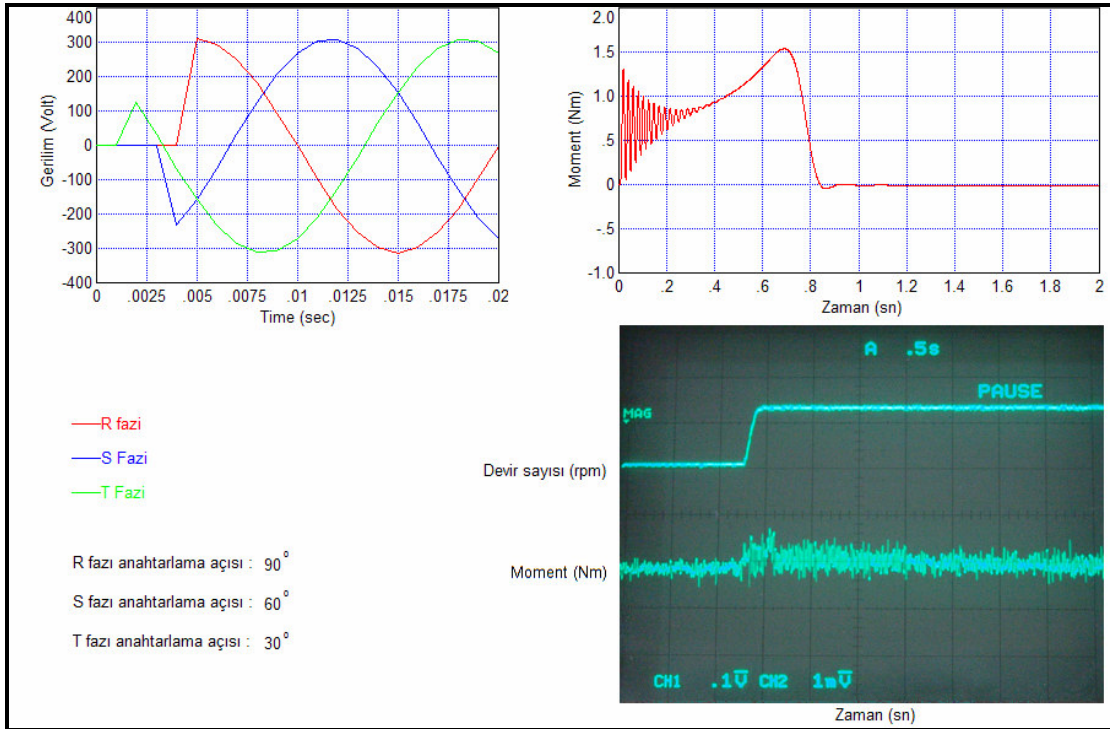
Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3.'de görülebileceği gibi asenkron motora öncelikli olarak pozitif gerilim daha sonrada, sırası ile negatif gerilim uyguladığımızda, negatif salınımlar oluşmaktadır. Oluşan salınımlar Şekil 3.3'de görülebileceği gibi motorun kararlı hale geçme süresini de uzatmaktadır.

### 3.2. En Az Negatif Moment Salınımları Olan Anahtarlama Açılıarı

Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da görülebileceği gibi asenkron motora verilen gerilim genliklerinin dengeli olması durumunda negatif moment daha az oluşmaktadır.



Şekil 3.4.  $0^\circ, 0^\circ$  ve  $0^\circ$ 'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı

Şekil 3.5.  $90^\circ, 90^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışıŞekil 3.6.  $90^\circ, 60^\circ$  ve  $30^\circ$ 'lik kapama açısına göre asenkron motorun dinamik davranışı

#### 4. SONUÇLAR

İnşaat, makine ve daha birçok mühendislik dallarında ilgilenilen burulma momenti elektrik motorlarında da önemli bir yer kaplar. İndüklenen moment, motora yol verirken mili burarak kırmaya çalışan kuvvete burulma momenti denir. Yol alma anında oluşabilecek negatif momentlerin sıklıkları ve büyüklükleri bahsedilen mil zorlamaları için burulma momentini oluşturan nedendir.

Bulgular bölümünde de belirttiğimiz gibi, anahtarlama anında önce pozitif sonra kapama açısının durumuna göre sırası ile negatif genlikler uygulanacak olursa negatif moment salınımları normalden daha fazla oluşmaktadır. Bu ise motor milini burulma momenti yönünden zorlamakta ve yol alma süresini uzatmaktadır.

Motora uygulanan gerilimler dengeli ya da eşit oranda geciktirilmiş olması durumunda ise bu negatif momentlerin azaldığı hem benzetim programı ile gösterilmiş, hem de deneysel çalışma ile de desteklenmiştir. İyi bir yol alma oluşturmak için negatif momentleri azaltmak yeterli olmaz. Pozitif momentlerinde olabildiğince küçültülmesi gerekir. Çünkü pozitif momentlerde aşırı akım çekilmesine neden olmaktadır.

Giriş bölümünde de ifade edildiği gibi asenkron motorların, doğrudan enerjilendirilmesi esnasında besleme kaynağının anahtarlama anındaki faz gerilimi geçiş durumları makinenin dinamik davranışını etkilemektedir. Bu çalışmada da besleme kaynağının faz gerilimi anlık durumlarına göre anahtarlama açıları bağımsız değiştirilerek, kumanda sistemlerinde muhtemel oluşabilecek gecikmeler ve anlık anahtarlama etkileri dinamik olarak incelenerek deneysel olarak gösterilmiştir.

## 5. ÖNERİLER

Bu çalışma asenkron motorların yol alma anındaki anahtarlama açısının dinamik davranışı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Olumsuz etkiler kapama açısının doğru seçilmesi ile ortadan kalmaktadır.

Motor parametrelerini de dikkate almak şartı ile optimal kapama açısı seçebilen, mikrodenetleyici destekli ve geri beslemeli bir kontrol modeli geliştirilebilir. Bu model yine bir PIC ile gerçekleştirilebileceği gibi, kestirilmesi gereken parametreler ve koşturulması gereken olası program büyüklüğünden dolayı daha hızlı ve ileri düzey bir mikrodenetleyici türü olan sayısal işaret işlemci ile gerçekleştirmek daha iyi bir çözüm olabilir.

Bu çalışmada ki kabullenme, gerilimlerin dengeli olmasıdır. Gerilim genliklerinin dengesiz ve harmonikli olması durumu için ise, gerilim algılayıcıları ile dengesiz gerilim geçişleri algılanıp sayısal işaret işlemcide en iyi anahtarlama açısı yeniden değerlendirilebilir. Sayısal işaret işlemci veri tabanında farklı besleme gerilimi durumları ve farklı yük durumlarına göre anahtarlama açısı kestirim tablosu oluşturulabilir. Motor parametrelerinden bağımsız bir anahtarlama fonksiyonu geliştirilebilir.

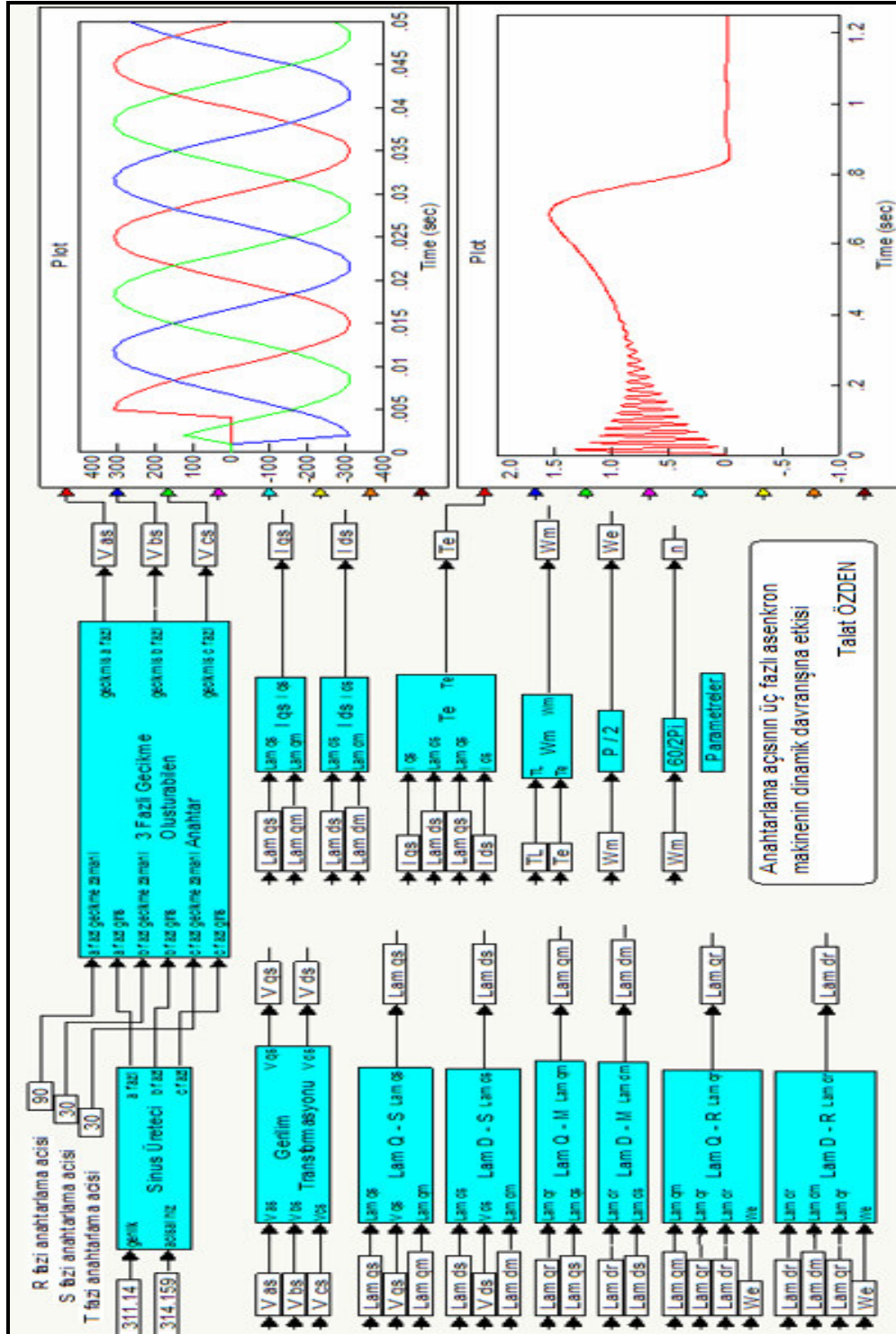
## 6. KAYNAKLAR

1. Ryff, P.F., Platnick, D., Karnas, J., A., Electrical Machines and Transformers: Principles and Applications, Printece- HAA,Inc.New Jersey,USA, 1987.
2. Baki, M., Bilezikler Üzerinden Gerilim Uygulaması Durumunda Üç Fazlı Asenkron Makinenin Dinamik Davranışının İncelenmesi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1999.
3. Deleroi, W., Wonudstra, J.B., and Fahim, A.A., Analysis and Application of Three-Phase Induction Motor Voltage Controller with Improved Transient Performance, IEEE Transactions on Industry Applications, 2 (1989) 280-286.
4. Oyama, J., Profumo F., Muljadi, E. and Lipo, T.A. Design and performance of a digitally based voltage controller for correcting phase unbalance in induction machines, IEEE Transactions on Industry Applications, 3 (1990) 425-430.
5. Sastry, V. V., Prasad, M.R. and Sivakumar T.V., Optimal Soft Starting of Voltage-Controller-Fed IM Drive Based on Voltage Across Thyristor, IEEE Transactions on Industry Applications, 6 (1997) 1041-1051.
6. Iyengar, R.S.J. and Sastry, V.V., Fuzzy Logic Based Soft-Start for Induction Motor Drivers, Industry Applications Conference, 1 (1995) 121-128.
7. Özen, A., Anahtarlama Açılarının Kapasitör Tip Tek Fazlı Asenkron Motorların Dinamik Davranışı Üzerine Etkisi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1998.
8. Subrahmanyam, V., Tristor Control of Electric Drives, Tata Mc Graw-Hill Publishing Co. New Delhi, India, 1988.
9. Krause, P.C., Analysis of Electrical Machinery, Mc Graw-Hill International Editions, Singapore, 1987.
10. Altınbaşak, O., Mikrodenetleyiciler ve PIC Programlama, Atlas yayıncılık ve Elektronik Tic. Ltd. Şti., İstanbul, 2005.
11. <http://www.altaskitap.com>, 04 Temmuz 2006.
12. <http://www.vissim.com/downloads/tutorials.html>, 06 Temmuz 2006.
13. [http://www.labcenter.co.uk/index\\_uk.htm](http://www.labcenter.co.uk/index_uk.htm), 06 Temmuz 2006.

14. Kesler, S., Tek Fazlı Şebekeden Beslenen Üç Fazlı Sincap Kafesli Asenkron Makinelerin Dinamik Davranışı, Lisans Tezi, K.T.Ü., M.M.F., Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1994.
15. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>, 09 Temmuz 2006.

## EKLER

### EK 1. Vissim paket programında hazırlanan asenkron makine benzetimi





## EK 2. Mikrodenetleyici için hazırlanan gömülü programın Basic komutları

### MicroCode Studio – Pic Basic Pro ile yazılmıştır

```

***** *
'* Name      : TALATTEZ.BAS *
'* Author    : [KTÜ Elektrik – Elektronik Mühendisliği] *
'* Notice    : Copyright (c) 2006 *
'*           : Bütün Haklar Saklıdır. [ All Rights Reserved ] *
'* Date      : 05.06.2006 *
'* Version   : 1.0 *
'* Notes     : *
'*           : *
***** *

```

```

Include "modedefs.bas"

```

```

OPTION_REG.7=1

```

```

DEFINE OSC 20

```

```

DEFINE BUTTON_PAUSE 200

```

```

DISABLE

```

```

DEFINE LCD_DREG PORTD

```

```

DEFINE LCD_DBIT 8

```

```

DEFINE LCD_RSREG PORTB

```

```

DEFINE LCD_RSBIT 0

```

```

DEFINE LCD_EREG PORTB

```

```

DEFINE LCD_EBIT 1

```

```

DEFINE LCD_BITS 8

```

```

DEFINE LCD_LINES 2

```

```

T          VAR   BYTE   'PERYOT DEĞİŞKENİ

```

```

RF         VAR   WORD   'LCD R FAZI sayacı

```

```

SF         VAR   WORD   'LCD S FAZI sayacı

```

```

TF         VAR   WORD   'LCD T FAZI sayacı

```

```

RFY        VAR   WORD

```

```

SFY        VAR   WORD

```

```

TFY        VAR   WORD

```

```

TY         VAR   WORD

```

```

K          VAR   BYTE

```

**EK.2'nin Devamı :**

```

SAYAC    VAR    WORD
ALINAN   VAR    BYTE
ALINAN1  VAR    BYTE
ALINAN2  VAR    BYTE
DS       VAR    BYTE    'KURSÖR KONUM SAYACI
I        VAR    WORD
C5       VAR    BYTE
C6       VAR    BYTE
C3       VAR    BYTE
C4       VAR    BYTE
B4       VAR    BYTE
B5       VAR    BYTE
TRISD=%00000000
TRISB=%00110011
TRISC=%11111000
GOTO    YENI

```

**YENI:**

```

PORTD=%00000000
PORTB=%00000000
PORTC=%10000000
RFY      = 0
SFY      = 0
TFY      = 0
TY       = 0
RF       = 0
SF       = 0
TF       = 0
DS       = 1
SAYAC    = 0
T        = 0
K        = 0

```

**EK.2'nin Devamı :**

```
I      = 0
C5     = 0
C6     = 0
C3     = 0
C4     = 0
B4     = 0
B5     = 0
GOTO  ANA
```

**ANA:**

```
CALL  TEST
LCDOUT $FE,$0C

CALL  TEST
LCDOUT $FE,$80
CALL  TEST
LCDOUT "ACI GIRISI YAPINIZ :)"
CALL  TEST
LCDOUT $FE,$C0
CALL  TEST
LCDOUT "R="
CALL  TEST
LCDOUT $FE,$C7
CALL  TEST
LCDOUT "S="
CALL  TEST
LCDOUT $FE,$CE
CALL  TEST
LCDOUT "T="
CALL  TEST
```

**EK.2'nin Devamı :**

```
IF DS=1 THEN GOTO RFAZI
GOTO SS
```

**RFAZI:**

```
LCDOUT $FE,$C2
LCDOUT " "
LCDOUT $FE,$C2
LCDOUT #RF
```

**SS:**

```
IF DS=2 THEN GOTO SFAZI
GOTO TT
```

**SFAZI:**

```
LCDOUT $FE,$C9
LCDOUT " "
LCDOUT $FE,$C9
LCDOUT #SF
```

**TT:**

```
IF DS=3 THEN GOTO TFAZI
GOTO DEVAM
```

**TFAZI:**

```
LCDOUT $FE,$D0
LCDOUT " "
LCDOUT $FE,$D0
LCDOUT #TF
```

**DEVAM:**

```
LCDOUT $FE,$0E
CALL TEST
GOTO ANA
```

**EK.2'nin Devamı :****TEST:**

```
IF PORTC.3=1 THEN GOTO ALGILA1
IF PORTC.4=1 THEN GOTO ALGILA2
IF PORTC.5=1 THEN GOTO ALGILA3
IF PORTC.6=1 THEN GOTO ALGILA4
IF PORTB.4=1 THEN GOTO ALGILA5
RETURN
```

**ALGILA1:**

```
IF PORTC.3=1 THEN CALL YUKARI
```

**ALGILA2:**

```
IF PORTC.4=1 THEN CALL ASAGI
```

**ALGILA3:**

```
IF PORTC.5=1 THEN CALL SOLA
```

**ALGILA4:**

```
IF PORTC.6=1 THEN CALL SAGA
```

**ALGILA5:**

```
IF PORTB.4=1 THEN GOTO BASLA
GOTO ANA
```

**SAGA:**

```
DS=DS+1
IF DS>3 THEN DS=3
PAUSE 250
GOTO ANA
```

**EK.2'nin Devamı :****SOLA:**

```
DS=DS-1
IF DS<1 THEN DS=1
PAUSE 250
GOTO ANA
```

**YUKARI:**

```
IF DS=1 THEN RF=RF+5
IF DS=2 THEN SF=SF+5
IF DS=3 THEN TF=TF+5
IF RF>360 THEN RF=360
IF SF>360 THEN SF=360
IF TF>360 THEN TF=360
WRITE 1,RF
WRITE 2,SF
WRITE 3,TF
PAUSE 200
GOTO ANA
```

**ASAGI:**

```
IF RF=0 THEN GOTO ASAGIALT
IF DS=1 THEN RF=RF-5
IF SF=0 THEN GOTO ASAGIALT
IF DS=2 THEN SF=SF-5
IF TF=0 THEN GOTO ASAGIALT
IF DS=3 THEN TF=TF-5
GOTO ASAGIALT
```

**ASAGIALT:**

```
WRITE 1,RF
WRITE 2,SF
WRITE 3,TF
PAUSE 200
GOTO ANA
```

**EK.2'nin Devamı :****BASLA:**

```
IF PORTC.7=1 THEN GOTO YAK
GOTO BASLA
```

**YAK:**

```
SAYAC=SAYAC+1
IF PORTC.7=0 THEN GOTO HESAP
GOTO YAK
```

**HESAP:**

```
T=SAYAC*2
READ 1,RF
TY=T/72
RFY=TY*RF
READ 2,SF
SFY=TY*SF
READ 3,TF
TFY=TY*TF
FOR I=0 TO T
IF RFY=I THEN PORTC.0=1
IF SFY=I THEN PORTC.1=1
IF TFY=I THEN PORTC.2=1
NEXT I
LCDOUT $FE,1
LCDOUT $FE,$80
LCDOUT "SISTEM CALISIYOR..."
GOTO DUR
```

**DUR:**

```
IF PORTB.5=1 THEN GOTO ALGILADUR
GOTO DUR
```

**EK.2'nin Devamı :****ALGILADUR:**

```
PORTC=%00000000
PORTB.6=1
LCDOUT $FE,1
LCDOUT $FE,$80
LCDOUT "SISTEM DURDURULDU..."
PAUSE 1000
PAUSE 1000
PAUSE 1000
LCDOUT $FE,1
GOTO YENI
END
```



## ÖZGEÇMİŞ

Talat ÖZDEN, 1976 yılında Gümüşhane ilinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini 1982-1990 yılları arasında Gümüşhane Dumlupınar ilköğretim okulunda, 1990-1991 yılları arasındada Gümüşhane Endüstri Meslek Lisesi – Elektrik bölümünün birinci sınıfını okudu. 1991 yılında geçiş yaptığı Bursa Tophane Teknik Lisesi – Elektrik Bölümünü 1994’te tamamladı. Aynı yıl Marmara Üniversitesi – Teknik Eğitim Fakültesi – Elektrik Öğretmenliği Eğitimi Bölümüne girdi ve 1998 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni unvanı ile mezun oldu. 1998 yılında Milli Eğitim Bakanlığı – Şişli Anadolu Teknik, Teknik ve Endüstri Meslek Lisesine Elektronik Öğretmeni olarak atandı. 1999 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi – Mühendislik Fakültesi - Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde Yüksek lisans eğitimine başladı. İstanbul’da öğretmenlik mesleğine devam etme nedeni ile kaydını 1 yıl dondurdu. 2000 yılında Milli Eğitim Bakanlığı - Trabzon – Çarşıbaşı Çok Programlı Lisesine tayin oldu. 2001 yılında aynı okulun Elektronik Bölümünde Bölüm Şefi olarak görevlendirildi. 2002 yılında Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Lisansüstü eğitimine 2004-2005 yılları arasında ara verdi. 2005-2006 öğretim yılında yüksek lisansa yeniden başladı.