



**ISITMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SİRKÜLASYON  
POMPALARI KONTROLÜNÜN ENERJİ VERİMLİLİĞİ  
BAKIMINDAN ANALİTİK İNCELENMESİ**

**Dursun CAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2014  
ANKARA**

Dursun CAN tarafından hazırlanan “İSITMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SİRKÜLASYON POMPALARI KONTROLÜNÜN ENERJİ VERİMLİLİĞİ BAKIMINDAN ANALİTİK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:**Prof.Dr.M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU  
Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

.....

**Başkan :**Doç.Dr. Murat Hüsnü SAZLI  
Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

.....

**Üye :**Yrd.Doç.Dr. Mehmet DEMİRTAŞ  
Elektrik Elektronik Mühendisliği , Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 13/05/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Dursun CAN

13/05/2014

ISITMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SİRKÜLASYON  
POMPALARI KONTROLÜNÜN ENERJİ VERİMLİLİĞİ  
BAKIMINDAN ANALİTİK İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Dursun CAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 2014

ÖZET

Elektrik makineleri, günümüzde, başta sanayi olmak üzere pek çok sektörde kullanılan ana tahrik cihazlarıdır. Bu makineler sirkülasyon pompalarında da temel tahrik cihazı olarak kullanılırlar. Kullanılan makineler çoğunlukla kısa devre rotorlu asenkron makinelerdir. Güç elektroniğindeki gelişmeler asenkron makinelerin de hassas denetimine imkân sağlamıştır. Buna paralel olarak, sirkülasyon pompalarının da hassas denetiminin yapılması kullanımda büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu tezde, merkezi ısıtma sisteminde kullanılan sirkülasyon pompalarının, sirkülasyon hattında daralma olması durumunda, hız denetimlerinin enerji tüketimi ile makine parametrelerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu maksatla, sirkülasyon yapılan boru hattında, kesit azalma durumlarında, makine hızının denetlenmesi ve analizi yapılmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.033  
Anahtar Kelimeler : Isıtma sistemleri, sirkülasyon pompaları, enerji verimliliği  
Sayfa Adedi : 108  
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

HEATING SYSTEMS USED IN CIRCULATION PUMPS CONTROL IN TERMS OF  
ENERGY EFFICIENCY IN ANALYTICAL INVESTIGATION

(M.Sc. Thesis)

Dursun CAN

GAZİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2014

ABSTRACT

Electrical machines nowadays, frequently using in many sectors, particularly industry, including main propulsion devices. These machines are used as the main propulsion device in the circulation pumps. The machines mostly used are squirrel cage rotor induction machine. Developments in power electronics allow a precise control of asynchronous machines. In this thesis, circulation pumps used in central heating systems, the in case there is a contraction in the circulation loop. The effect of speed control aimed to investigate energy consumption and the machine parameters. For this purpose, circulating in the pipeline, decreasing cross-section, the effect of reducing the speed of the machine is analysed.

Science Code : 905.1.033  
Key Words : Heating Systems, Circulation Pumps, Energy Efficiency  
Page Number : 108  
Supervisor : Prof.Dr.M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, ayrıca test sırasında gerekli çalışma ve ölçümleri yapmamda yardımcı olan Kerim Elektromotor şirketine, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Sevilay CAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                             | iv    |
| ABSTRACT.....                                                          | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                          | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                      | vii   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                | xi    |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                              | xiv   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                           | xv    |
| <br>1. GİRİŞ .....                                                     | <br>1 |
| 2. MERKEZİ ISITMA SİSTEMLERİ .....                                     | 3     |
| 2.1. Merkezi Isıtma Sisteminin Çalışması .....                         | 3     |
| 2.2. Kapalı Devre Isıtma Sisteminde Bulunan Suyun Sirkülasyonu .....   | 3     |
| 2.3. Termostatik Vana.....                                             | 4     |
| 2.4. Sistemde Akışkanlar Mekanik Prensibi.....                         | 5     |
| 2.5. Debi, Basınç, Kaviteasyon ve Su Çekici .....                      | 5     |
| 2.6. Sürtünmeli Akışlar İçin Devir Sayısı Basınç İlişkisi .....        | 6     |
| 2.7. Sirkülasyon Pompalarının Seçimi .....                             | 8     |
| 2.8. Sirkülasyon Pompalarında Elektrik Makineleri .....                | 8     |
| 3. ASENKRON MAKİNELER .....                                            | 9     |
| 3.1. Asenkron Makinelerin Genel Yapıları .....                         | 9     |
| 3.2. Asenkron Makinelerin Doğru Akım Makinelere Göre Üstünlükleri..... | 10    |
| 3.3. Asenkron Makine Çeşitleri .....                                   | 10    |
| 3.3.1. Kısa devre rotorlu (sincap kafesli) asenkron makineler .....    | 10    |
| 3.3.2. Sargılı rotorlu (bilezikli) asenkron makineler.....             | 11    |

|                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.4. Asenkron Makine Rotorunun Dönmesi .....                                     | 11           |
| 3.5. Kısa Devre Rotorlu Asenkron Makinenin Sürekli Çalışması ve Kayma.....       | 12           |
| 3.5.1. Asenkron hız .....                                                        | 13           |
| 3.5.2. Kayma.....                                                                | 13           |
| 3.6. Asenkron Makine Stator Sargılarında İndüklenen EMK.....                     | 15           |
| 3.6.1. Zıt EMK.....                                                              | 15           |
| 3.6.2. Stator manyetik indüksiyonu .....                                         | 15           |
| 3.7. Asenkron Makine Eşdeğer Devresi .....                                       | 15           |
| 3.7.1. Asenkron makinenin rotor eşdeğer devresi .....                            | 16           |
| 3.7.2. Rotor eşdeğer devresinin statora indirgenmesi.....                        | 18           |
| 3.7.3. Komple eşdeğer devrenin elde edilmesi .....                               | 19           |
| 3.8. Asenkron Makinenin Kısa Devre Çalışması.....                                | 19           |
| 3.9. Asenkron Makinenin Boşta Çalışması.....                                     | 20           |
| 3.10. Asenkron Makinede Kalkış Akımı .....                                       | 22           |
| 3.10.1. Makinenin yüklendikçe fazla akım çekmesinin nedenleri.....               | 23           |
| 3.10.2. Rotor empedansı ve rotorun endüktif reaktansının artışı ve etkileri..... | 24           |
| 3.11. Asenkron Makinenin Momenti .....                                           | 24           |
| 3.12. Asenkron Makinede Verim.....                                               | 26           |
| 3.12.1. Eşdeğer devrede verim .....                                              | 27           |
| 3.12.2. Eşdeğer devrede makine giriş gücü .....                                  | 28           |
| 3.12.3. Rotor giriş gücü, rotor bakır kaybı ve rotor çıkış gücü.....             | 28           |
| 4. ELEKTRİK MAKİNALARINDA HIZ KONTROL SÜRECİ.....                                | 31           |
| 4.1. Hız Kontrol Sürecinin Genel Prensibi .....                                  | 31           |

|                                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2. Hız Kontrol Cihazlarının Genel Yapısı .....                                             | 32           |
| 4.2.1. Hız Kontrol cihazlarının frenlemesi.....                                              | 34           |
| 5. ASENKRON MAKİNEİN HIZ KONTROLÜ.....                                                       | 37           |
| 5.1. Asenkron Makinede Hız Bağlantıları .....                                                | 37           |
| 5.1.1. Kutup sayısının, sarım sayısı ve kesit alanının değiştirilmesi ile hız Kontrolü ..... | 37           |
| 5.1.2. Kaymanın değiştirilmesi ile hız kontrolü.....                                         | 38           |
| 5.1.3. Giriş geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü.....                                | 39           |
| 5.1.4. Giriş frekansının değiştirilmesi ile hız kontrolü .....                               | 40           |
| 5.1.5. $V/f$ Sabit tutularak hız kontrolü.....                                               | 41           |
| 6. GÜÇ ELEKTRONİĞİ İLE YAPILAN SKALER VE VEKTÖREL KONTROLLER.....                            | 45           |
| 6.1. Skaler Kontrol Yöntemleri .....                                                         | 45           |
| 6.1.1. Stator gerilim kontrolü .....                                                         | 45           |
| 6.1.2. Kayma gücü kontrolü.....                                                              | 46           |
| 6.1.3. Değişken gerilim değişken frekans yöntemi .....                                       | 46           |
| <u>PWM yöntemi</u> .....                                                                     | 46           |
| <u>Ölü zamanın belirlenmesi</u> .....                                                        | 47           |
| <u>PWM inverter sürücü</u> .....                                                             | 48           |
| 6.2. Vektörel Kontrol Yöntemleri .....                                                       | 49           |
| 6.2.1. Kısadevre rotorlu asenkron makinenin dinamik modeli .....                             | 51           |
| 6.2.2. Alfa ve beta dönüşümleri .....                                                        | 54           |
| 6.2.3. d ve q Dönüşümleri .....                                                              | 57           |
| 6.2.4. İleri geri Clarke dönüşümleri .....                                                   | 61           |
| 6.2.5. İleri geri Park dönüşümleri.....                                                      | 63           |

|                                                                                                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 6.2.6. Vektör kontrolünün gerçekleştirilmesi.....                                                                                                      | 63           |
| 6.2.7. Doğrudan vektör kontrolü .....                                                                                                                  | 67           |
| 6.2.8.Dolaylı vektör kontrolü .....                                                                                                                    | 69           |
| 6.2.9.Doğrudan moment kontrolü .....                                                                                                                   | 71           |
| <b>7. SİRKÜLASYON POMPALARININ DREKT ŞEBEKEDEN<br/>ENERJİLENMESİ VE HIZ KONTROL CİHAZI ÜZERİNDEN<br/>ENERJİLENMESİNİN KARŞILAŞTIRMASI DENEYİ .....</b> | <b>79</b>    |
| 7.1. Test Düzeneği.....                                                                                                                                | 79           |
| 7.1.1. Sistemde kullanılan ana cihazlar .....                                                                                                          | 79           |
| 7.2. Sistemin Çalışma Prensibi.....                                                                                                                    | 80           |
| 7.2.1. Direkt şebeke üzerinden enerjilenme modu .....                                                                                                  | 82           |
| 7.2.2. İnverter üzerinden enerjilenme modu .....                                                                                                       | 82           |
| 7.3. Verilerin Elde Edilmesi.....                                                                                                                      | 83           |
| 7.3.1. Fiziksel olarak oluşturulan sistemde yapılan ölçüm sonuçları .....                                                                              | 85           |
| 7.4. Sistemin Simülasyonu ve İnceleme .....                                                                                                            | 86           |
| 7.4.1. Direkt kaynaktan enerjilenme simülasyonu .....                                                                                                  | 86           |
| 7.4.2. Hız kontrol sistemi üzerinden enerjilenme simülasyonu .....                                                                                     | 93           |
| <b>8. DEĞERLENDİRME SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                                                                                         | <b>101</b>   |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                                                 | <b>105</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                                                                  | <b>107</b>   |
| <b>DİZİN.....</b>                                                                                                                                      | <b>108</b>   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Merkezi ısıtma sistemi temel şeması .....                                 | 3     |
| Şekil 2.2. Termostatik vana kesiti .....                                             | 4     |
| Şekil 2.3. Basınç hız ilişkisi .....                                                 | 6     |
| Şekil 3.1. Asenkron makine dikey kesiti .....                                        | 9     |
| Şekil 3.2. Kısa devre rotorlu asenkron makinenin rotor yapısı .....                  | 11    |
| Şekil 3.3. Rotor eşdeğer devresi .....                                               | 16    |
| Şekil 3.4. Yük direnci eklenmiş rotor eşdeğer devresi .....                          | 17    |
| Şekil 3.5. Stator ve rotorun birleştirildiği eşdeğer devre .....                     | 18    |
| Şekil 3.6. Stator ve rotor devreleri birleştirilerek elde edilen eşdeğer devre ..... | 19    |
| Şekil 3.7. Asenkron makinenin bir fazının komple eşdeğer devresi .....               | 19    |
| Şekil 3.8. Rotoru kilitlenmiş asenkron makinenin eşdeğer devresi .....               | 20    |
| Şekil 3.9. Asenkron makinenin boştaki çalışma vektör diyagramı .....                 | 21    |
| Şekil 3.10. Asenkron makinenin kalkış anındaki eşdeğer devresi .....                 | 22    |
| Şekil 3.11. Eşdeğer devrede thevenin eşdeğer empedansı .....                         | 25    |
| Şekil 3.12. Asenkron makinenin kaymaya bağlı moment değişimi .....                   | 26    |
| Şekil 3.13. Asenkron makine bir faz eşdeğer devresi .....                            | 27    |
| Şekil 3.14. Asenkron makinede verim diyagramı .....                                  | 29    |
| Şekil 4.1. Sürücü sistem elemanların temel şeması .....                              | 31    |
| Şekil 4.2. Makine sürme sistemleri genel blok diyagramı .....                        | 32    |
| Şekil 4.3. Hız kontrol cihazı temel şeması .....                                     | 32    |
| Şekil 4.4. Doğrultucu temel çalışma prensibi .....                                   | 33    |
| Şekil 4.5. Evirici temel çalışma prensibi .....                                      | 33    |
| Şekil 4.6. Hız kontrol cihazlarının genel algoritması .....                          | 34    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.1. Stator geriliminin değişimine bağlı olarak moment değişimi.....                                                                                   | 39           |
| Şekil 5.2. AC Kıyıcı devresi prensip şeması.....                                                                                                             | 40           |
| Şekil 5.3. Vf/F Kontrol gerilim – frekans grafiği .....                                                                                                      | 42           |
| Şekil 5.4. Vf/F Kontrol gerilim – frekans değişim eğrisi .....                                                                                               | 43           |
| Şekil 6.1. Giriş geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü ve pompa, fan yükü moment grafiği.....                                                          | 45           |
| Şekil 6.2. Sinüs-üçgen karşılaştırması temel prensibi .....                                                                                                  | 46           |
| Şekil 6.3. Ölü zaman belirlemesi .....                                                                                                                       | 48           |
| Şekil 6.4. Asenkron makine basitleştirilmiş eşdeğer devresi.....                                                                                             | 48           |
| Şekil 6.5. Vf/F Sürücünün SPWM inverter ile prensip şeması.....                                                                                              | 49           |
| Şekil 6.6. Kısa devre rotorlu 3 fazlı asenkron makine eşdeğeri.....                                                                                          | 51           |
| Şekil 6.7. Asenkron motor bağıntılarının d ve q eksenlerine indirgenmesi fazör diyagramı .....                                                               | 57           |
| Şekil 6.8. İleri ve geri Clarke dönüşümleri vektör diyagramı.....                                                                                            | 62           |
| Şekil 6.9. Makinenin d-q eksen takımındaki giriş ve durum değişkenleri ile d-q eksen takımının $\alpha - \beta$ ve A-B-C eksen takımına göre konumları ..... | 65           |
| Şekil 6.10. Statora yerleştirilmiş hall Sondaları kullanarak $\Psi_{m\alpha}$ ve $\Psi_{m\beta}$ yardımıyla doğrudan vektör kontrolü.....                    | 68           |
| Şekil 6.11. d Eksen rotor akı referansı ile d eksen stator akım referansı ilişkisi .....                                                                     | 69           |
| Şekil 6.12. Akım kontrollü gerilim ara devreli dolaylı vektör kontrol sistemi blok Şeması.....                                                               | 71           |
| Şekil 6.13. Sinüs üçgen karşılaştırmalı dolaylı vektör kontrol sistemi blok şeması.....                                                                      | 71           |
| Şekil 6.14. Doğrudan vektör kontrolünde kullanılan güç devresi .....                                                                                         | 72           |
| Şekil 6.15. Doğrudan moment kontrolünde kullanılan akı moment gözlemleyicisi.....                                                                            | 74           |
| Şekil 6.16. Anahtarlama konumları .....                                                                                                                      | 75           |
| Şekil 6.17. Akı hatasının uygulandığı histerezis blok şeması.....                                                                                            | 76           |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                 | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.18. Moment hatasının uygulandığı histerezis blok şeması .....                                                                                                                                                                                                 | 76    |
| Şekil 6.19. Doğrudan moment kontrolüne ilişkin prensip şeması .....                                                                                                                                                                                                   | 77    |
| Şekil 7.1. Sistemin mekaniki bağlantı şeması.....                                                                                                                                                                                                                     | 81    |
| Şekil 7.2. Sistemin ana tek hat şeması .....                                                                                                                                                                                                                          | 82    |
| Şekil 7.3. Fiziksel olarak kurulan sistemin ana ekipmanları .....                                                                                                                                                                                                     | 83    |
| Şekil 7.4. Direkt kaynaktan enerjilenme simülasyonu.....                                                                                                                                                                                                              | 87    |
| Şekil 7.5. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında<br>Tm=0 Nm iken simülasyon sonuçları .....                                                                                                                                                          | 90    |
| Şekil 7.6. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında<br>Tm=10 Nm iken simülasyon sonuçları .....                                                                                                                                                         | 91    |
| Şekil 7.7. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-7 Sn arasında makineye<br>$\begin{bmatrix} Ts \\ Tm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 Sn \\ 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 10 Nm \end{bmatrix}$ yük momentinin uygulanması .....           | 92    |
| Şekil 7.8. İnverter üzerinden hız kontrolü simülasyonu .....                                                                                                                                                                                                          | 94    |
| Şekil 7.9. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında<br>Tm=0 Nm iken simülasyon sonuçları .....                                                                                                                                                | 97    |
| Şekil 7.10. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında<br>Tm=10 Nm iken simülasyon sonuçları .....                                                                                                                                              | 98    |
| Şekil 7.11. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-7 Sn arasında<br>makineye $\begin{bmatrix} Ts \\ Tm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 Sn \\ 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 10 Nm \end{bmatrix}$ yük momentinin uygulanması .... | 99    |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                             | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Asenkron makinenin kayma değerlerine göre çalışma şekli .....                                                          | 14    |
| Çizelge 6.1 .Stator akısının konumunun belirlenmesi .....                                                                           | 76    |
| Çizelge 6.2 .Saat ibrelerinin tersi yönü için anahtarlama dizisi.....                                                               | 77    |
| Çizelge 7.1. Fiziksel olarak oluşturulan sistemde yapılan ölçüm sonuçları .....                                                     | 85    |
| Çizelge 7.2. Simülasyonu yapılan sistemde ölçüm sonuçları .....                                                                     | 98    |
| Çizelge 7.3. Simülasyonu yapılan sistemde makineye yük momenti uygulanmaması durumunda tüketilen güç miktarları .....               | 101   |
| Çizelge 7.4. Simülasyonu yapılan sistemde makineye 10 Nm sabit moment uygulanması durumunda tüketilen güç miktarları .....          | 102   |
| Çizelge 7.5. Simülasyonu yapılan sistemde makineye 10-20-30 Nm değişken moment uygulanması durumunda tüketilen güç miktarları ..... | 104   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler                                           | Açıklama                                                               |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $A$                                                | Boru içerisindeki sıvının dikey kesit alanı, $br^2$                    |
| $B$                                                | Stator boyu, cm                                                        |
| $B$                                                | Makine miline indirgenmiş toplam sürtünme katsayısı, N.m.s.            |
| $D$                                                | Asenkron makinede rotor sargı katsayısı                                |
| $E_1, E_2$                                         | $h_1, h_2$ Yüksekliğindeki sıvının toplam enerjisi                     |
| $\Delta E$                                         | Yükseklik farkı bulunan sıvıların toplam enerji farkı                  |
| $E_{kr}$                                           | Rotorda indüklenen kilitli faz EMK'sı, Volt                            |
| $e_1$                                              | Asenkron makinede indüklenen EMK                                       |
| $F_1, F_2$                                         | $A_1, A_2$ kesitinde sıvının $P_1, P_2$ basıncı ile oluşturduğu kuvvet |
| $f$                                                | Asenkron makine giriş frekansı, Hz                                     |
| $g$                                                | Yerçekimi ivmesi, $m/s^2$                                              |
| $\rho$                                             | Boru içerisinde hareket eden sıvının yoğunluğu                         |
| $h$                                                | Sıvının yerden yüksekliği                                              |
| $I_r$                                              | Kilitli rotor faz akımı, A                                             |
| $i$                                                | Akım, Amper                                                            |
| $I_0$                                              | Boşta çalışma akımı, Amper                                             |
| $I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}, I_{r\beta}$ | $\alpha$ ve $\beta$ Eksen takımında stator ve rotor akımı, Amper       |
| $I_{r\alpha}^s, I_{r\beta}^s$                      | Stator eksen takımına indirgenmiş rotor akımları, Amper                |
| $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$                   | d ve q Eksen takımında stator ve rotor akımı, Amper                    |
| $i_f$                                              | Doğru akım makinesi uyarma devesi akımı, Amper                         |
| $J$                                                | Makine miline indirgenmiş toplam eylemsizlik momenti,                  |
| $K_1, K_2$                                         | $h_1, h_2$ Yüksekliğindeki V hızlı sıvının kinetik enerjisi            |

| <b>Simgeler</b>      | <b>Açıklama</b>                                       |
|----------------------|-------------------------------------------------------|
| $K_{w1}, K_{w2}$     | Asenkron makinede stator sargı katsayısı              |
| $K_s, K_r$           | Stator ve rotor sargı faktörleri                      |
| $L$                  | Stator iç çapı, cm                                    |
| $L_s$                | Stator endüktansı, H                                  |
| $L_r$                | Rotor endüktansı, H                                   |
| $L_f$                | Doğru akım makinesi uyarma devesi endüktansı, H       |
| $m$                  | Sıvı kütlesi                                          |
| $M$                  | Asenkron makine momenti                               |
| $m_a$                | PWM modülasyon genliği                                |
| $M_{rr}$             | Rotor çubukları arası manyetik endüktans, H           |
| $M_{sr}(\theta)$     | Stator ve rotor arasın manyetik endüktans, H          |
| $M_{rs}(\theta)$     | Rotor ve stator arasın manyetik endüktans, H          |
| $M_{ss}$             | Stator çubukları arası ortak endüktans, H             |
| $n_r$                | Asenkron hız, d/dak                                   |
| $n_s$                | Asenkron makine senkron hızı, d/dak                   |
| $N_s, N_r$           | Stator ve rotor faz sargıları sarım sayıları          |
| $\eta$               | Asenkron makine verimi                                |
| $\theta$             | Makine mili dönme açısı,                              |
| $\theta_s, \theta_2$ | Stator ve rotorun döner manyetik akı yoğunluğu, Weber |
| $P$                  | Asenkron makinede kutup çifti sayısı                  |
| $P_m$                | Rotor milinden alınan mekanik güç                     |
| $P_{in}$             | Makine giriş gücü, Watt                               |
| $P_G$                | Rotor giriş gücü, Watt                                |
| $P_{RCL}$            | Rotor bakır kayıpları, Watt                           |
| $R_r$                | Rotor çubuk direnci, $\Omega$                         |
| $R_h$                | Rotor çubukları arasındaki halka direnci, $\Omega$    |

| Simgeler                                                       | Açıklama                                                           |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $R_R$                                                          | Rotor omik direnç matrisi                                          |
| $R'_r$                                                         | Rotorun etkin faz direnci, $\Omega$                                |
| $R_y$                                                          | Asenkron makine yükünü temsil eden direnç, $\Omega$                |
| $R_f$                                                          | Doğru akım makinesi uyarma devesi direnci, $\Omega$                |
| $S$                                                            | Kayma                                                              |
| $U_1, U_2$                                                     | $h_1, h_2$ Yüksekliğindeki sıvının potansiyel enerjisi             |
| $a$                                                            | Stator ve rotor sargıları arası dönüştürme oranı                   |
| $X_{kr}$                                                       | Kilitli rotor kaçak faz reaktansı, $\Omega$                        |
| $v$                                                            | P basıncı ile hareket eden sıvının hızı                            |
| $V_f$                                                          | Doğru akım makinesi uyarma devesi gerilimi, Volt                   |
| $V$                                                            | Hacim                                                              |
| $V_{an}$                                                       | PWM çıkış gerilimi temel bileşeni, Volt                            |
| $V_{dc}$                                                       | Hız kontrol cihazı doğrultucu çıkış gerilimi değeri, Volt          |
| $V_{s\alpha}, V_{s\beta}, V_{r\alpha}, V_{r\beta}$             | $\alpha$ ve $\beta$ Eksen takımında stator ve rotor gerilimi, Volt |
| $W_s$                                                          | Stator manyetik alan çizgileri dönüş hızı, Rad/Sn                  |
| $W$                                                            | m kütleindeki sıvıyı hareket ettirmek için yapılan iş              |
| $X_1, X_2$                                                     | $A_1$ kesitinde sıvının $P_1$ basıncı ile aldığı yol               |
| $V_{sd}, V_{sq}$                                               | d ve q Eksen takımında stator gerilimi, Volt                       |
| $W_r, w$                                                       | Rotor akımları hızı, rotor mili dönüş hızı                         |
| $\Delta W$                                                     | F Kuvveti ile m kütleli sıvıya X yolunu aldırmada yapılan iş       |
| $Z_r$                                                          | Rotor empedansı, $\Omega$                                          |
| $\psi$                                                         | Akı, Maxwell                                                       |
| $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ | $\alpha$ ve $\beta$ Eksen takımında stator ve rotor akısı, Maxwell |
| $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$                   | d ve q Eksen takımında stator ve rotor akısı, Maxwell              |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                        |
|--------------------|----------------------------------------|
| <b>AC</b>          | Alternatif akım                        |
| <b>AOS</b>         | Anahtarlı otomatik sigorta             |
| <b>ASM</b>         | Asenkron makine                        |
| <b>DC</b>          | Doğru akım                             |
| <b>DSP</b>         | Dijital sinyal işleyici                |
| <b>DTC</b>         | Doğrudan moment kontrolü               |
| <b>DY</b>          | Üçgen yıldız bağlantı                  |
| <b>EMK</b>         | Elektro motor kuvvet                   |
| <b>PWM</b>         | Darbe genişlik modülasyonu             |
| <b>SVMPWM</b>      | Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu |
| <b>VAR</b>         | Reaktif güç                            |

## 1. GİRİŞ

Merkezi ısıtma ve sıhhi sıcak su sistemlerinde su çoğunlukla kısa devre rotorlu asenkron makine vasıtasıyla tahrik edilen sirkülasyon pompası ile devir daim edilir. Sirküle olacak su kütlesinin önünde herhangi bir engel oluşması durumunda veya boru kesitinin daralması durumunda devamlı olarak çalışan pompalar vasıtasıyla basma hattı basıncı artar. Bu basınç asenkron makinelerin yük momentini arttırır ve pompaların gereksiz yere fazla elektrik tüketmesine sebep olur, aynı zamanda makineye zarar verebilir. Bu olumsuz basınç etkilerinin yok edilmesi için asenkron makinenin hızının denetlenmesi ve hızın set edilen basınç değerine göre ayarlanarak sistemin optimum basınç değerinde çalışması gerekmektedir.

14 Nisan 2008 Tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan ”Merkezi Isıtma ve Sıhhi Sıcak Su Sistemlerinde Isınma ve Sıhhi Sıcak Su Giderlerinin Paylaştırılmasına İlişkin yönetmelik” gereği ısının ve sıhhi sıcak suyun, bağımsız bölümlerce kullanım giderlerinin, kullanıcılara paylaştırılması ve her kullanıcının tükettiği enerji kadar ücret ödemesi hükmüne bağlanmıştır. Bu hüküm doğrultusunda merkezi kazan sistemi ile ısınan konutlarda ısı pay ölçer ve termostatik vana kullanımına geçilmiştir. Termostatik vana, radyatörün girişine monte edilmekte ve ayarlanan oda sıcaklığına gelindiğinde radyatöre su girişini engellemektedir. Bu durumda çalışır durumda olan sirkülasyon pompalarının karşı hidrolik basıncı artmaktadır. Bu basıncı en uygun seviyede tutmak için pompanın hızının denetimi yapılarak sistem basıncının ayarlanması gerekir.

Sirkülasyon pompalarını tahrik eden asenkron makinelerin hız denetimi konusunda Öztürk (2006), Elmas (2006), Semizoğlu (2007), Yıldız (2008) ve Bulut (2008) tarafından çalışmalar yapılmıştır[7,9-12]. Ayrıca, Önder (2010) tarafından yapılan çalışmada, hız denetimi ve güç elektroniği uygulamalarında sıklıkla kullanılan eviriciler ele alınmıştır[20]. Sumper ve Baggini (2012) değişken hızlı sürücülerin motor koruma cihazı olarak da kullanıldığını belirtmiştir[21].

Taşkan (2011) tarafından yapılan çalışmada, boru içerisinde hareket eden sıvının hız, debi ve basıncı arasındaki bağıntıya değinilmiştir[1]. Akış kontrol sistemi ile ilgili Axin, Eriksson ve Krus (2013) tarafından yapılan çalışmada, ”sirkülasyon sisteminde akış

kontrol sistemi (pompa hız denetimi) kullanılmasının enerji tasarruf potansiyelinin olduğu” görülmüştür[17].

Choi, Young ve Park (2010) termostatik vanaların akıllı kontrol sistemi ile denetimi üzerine çalışma yapmış ve ”vanaların hassas denetimlerinin yakıt tüketim değerlerinde % 11 ile % 30 arasında tasarruf sağlandığı” tespit edilmiştir[18]. Cheon ve Yeob (2009) Tarafından yapılan çalışmada, otomatik kontrol edilen termostatik vanaların ısıtma sistemine etkisi analiz edilmiş ve ”otomatik termostatik vana ile sıcaklık kontrolünün yüksek enerji tasarruf potansiyeli olduğu” tespit edilmiştir[19]. Termostatik vanaların sıhhi sıcak su sistemlerinde kullanımı ile ilgili Phillips, Humphreys ve Kendrick (2011) tarafından yapılan araştırmada ”akıllı termostatik vana kullanımının özellikle sıhhi sıcak su kullanımında aşırı sıcak su ile yaralanmaları engellediği ve kamuda tasarruf sağladığı” tanımlanmıştır[16].

Yumurtacı ve Sarıgül (2011) tarafından yapılan çalışmada, değişken debi gerektiren sistemlerde, toplam maliyetlerine ve elektrik tasarruflarına bakıldığında frekans konvertörü uygulaması uygun çözüm olarak ortaya çıkmaktadır[8].

Bu güne kadar yapılmış olan çalışmalar, asenkron makinelerin hız denetiminin yapılması ve termostatik vanaların enerji tasarrufuna etkileri şeklinde sayılabilir.

Bu tezde, sirkülasyon pompalarının suyu pompaladığı sirkülasyon hattında, termostatik vana marifetiyle kesit daralması veya vana ile suyun kısılması durumunda, sirkülasyon pompasını tahrik eden asenkron makinenin hız denetimi ile debinin düşürülerek, basıncın azaltılmasının enerji tüketimine ve makine parametrelerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla pompayı tahrik etmekte kullanılan kısa devre rotorlu asenkron makinenin direkt olarak şebekeden enerjilendirilmesi ve inverter üzerinden hız denetimi yapılması modları için makine parametreleri ve enerji tüketimlerinin analizi yapılmıştır.

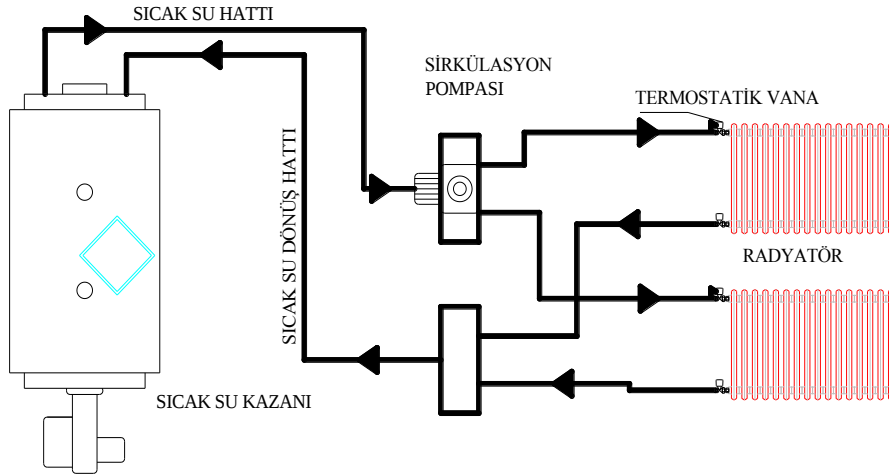
## 2. MERKEZİ ISITMA SİSTEMLERİ

### 2.1. Merkezi Isıtma Sisteminin Çalışması

Merkezi ısıtma sistemleri kazan, su boruları, sirkülasyon pompaları, radyatör veya ısı transfer cihazları, vanalardan oluşmaktadır. Isınma merkezi olarak çalışan ve tüm bağımsız bölümlerin ısınma kapasitesini sağlayan merkezi bir kazan vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sistemde ısının iletilmesi için su kullanılır. Suyun sirkülasyonu genellikle bir asenkron makine ile tahrik edilen sirkülasyon pompası ile sağlanır. Isınan su, radyatörler veya ısı transfer cihazları vasıtasıyla ortama veya başka bir sisteme aktarılır.

### 2.2. Kapalı Devre Isıtma Sisteminde Bulunan Suyun Sirkülasyonu

Kazan içerisinde ısıtılan su sirkülasyon pompaları vasıtasıyla (kapalı çevrim sistemde) boru hatları ile radyatörlere ulaştırılmaktadır. Radyatörlerde soğuyan sıcak su kazana döner ve ısıtılarak tekrar su devrine katılır. Şekil 2.1' de ısıtma sisteminin temel prensip şeması görülmektedir.



Şekil 2.1. Merkezi ısıtma sistemi temel şeması

Normal durumda sirkülasyon pompaları kazandan alınan ısı verisine göre çalışır, ısınmış olan suyu pompalayarak tüm radyatörlere ısıyı eşit bir şekilde dağıtır ve suyun devir daimi sağlanır.

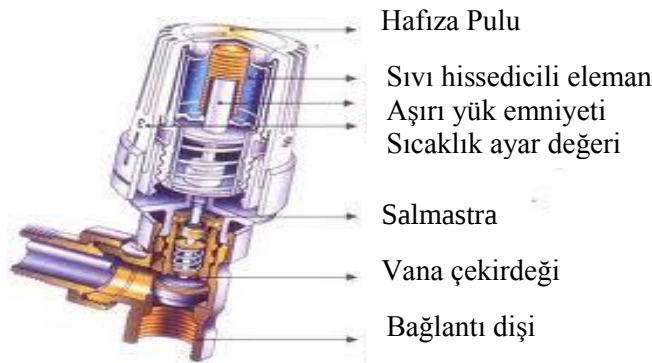
2008 yılında yürürlüğe giren Merkezi Isıtma ve Sıhhi Sıcak Su Sistemlerinde Isınma ve Sıhhi Sıcak Su Giderlerinin Paylaştırılmasına İlişkin Yönetmelik gereği her bağımsız bölümün kendi tükettiği ısı miktarının belirlenmesi ve her bağımsız tüketicinin tükettiği enerji kadar bedel ödemesi zorunlu hale getirilmiştir.

Bunun sonucunda her tüketici kedisine ait bölümün gereksiz yüksek ısıda bulunmaması ve radyatör bulunan bölümün sabit sıcaklık değerine yakın seviyede tutulması için termostatik vana kullanımına geçmiştir.

### 2.3. Termostatik Vana

Termostatik vana termostat ve gövdeden oluşur. Radyatörün sıcak su girişine takılır. Tesisata önce gövde bağlanır. Boru bağlantı işi bittikten sonra termostat gövdenin üzerine takılır.

Termostat içindeki sıvı dolgu algılama elemanı sıcaklığa hassastır. Sıcaklık arttığında genişler ve gövde milini iterek vananın kapanmasını sağlar. Radyatöre su girişi engellenir. Sıcaklık düştüğünde ise büzülür, gövde içinde bulunan ve sıkışmış olan yay milini geri iter ve vana açılarak su girişi sağlanır. Böylece sadece ayarlanan oda sıcaklığını korumak için gereken su miktarının radyatöre girmesi sağlanmış olur. Şekil 2.2’de termostatik vananın kesiti görülmektedir.



Şekil 2.2. Termostatik vana kesiti

Termostatik vananın istenilen oda sıcaklığını ayarlamak maksadıyla belirli bir değerde tutulması durumunda, oda sıcaklığı istenilen değerin üzerine çıktığında; vana radyatör

sıcak su girişini kapatır ve su sirkülasyonunu oda sıcaklığı istenilen düzeye gelinceye kadar engeller.

Sistem üzerinde her bölümde birden fazla radyatör bulunacağı varsayıldığında radyatörlerde bulunan termostatik vanalar aynı anda aynı sıcaklık değerlerinde bulunmayacağından gerçekte sistem ana kolon hatlarında dolaşan suyun sirkülasyonu tamamen engellenmez. Ancak suyun geçtiği kesit azalması pompanın çalışma karşı basıncını artırır.

#### **2.4. Sistemde Akışkanlar Mekaniği Prensibi**

Akışkanlarla ilgili bilinen ilk çalışmalar Archimedes (MÖ 285-212) tarafından yapılmıştır. Archimedes suyun kaldırma kuvvetinden hareketle, akışkanlar için bir akım hesaplama yöntemleri geliştirmiştir. Ancak, akışkanlarla ilgili esas gelişmeler Rönesans'tan sonra olmuştur. Newton'un yerçekimi kanununu bulmasından sonra yerçekimi ivmesi de hesaplara katılmıştır. Sürtünmesiz akışlarda en önemli gelişmeleri Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonard Euler, Joseph-Louis Lagrange ve Pier Simon Laplace yapmışlardır. Halen Makine, Kimya ve Fizik Mühendisliğinin önemli ve ders olarak okutulan temel bir bilim konusudur.

#### **2.5. Debi, Basıncı, Kavite ve Su Çekici**

Debi, bir akışkanın aktığı kısmın herhangi bir kesitinden birim zamanda geçen akışkan hacmidir.

Birim yüzeye dik olarak etki eden kuvvete basınç denir.

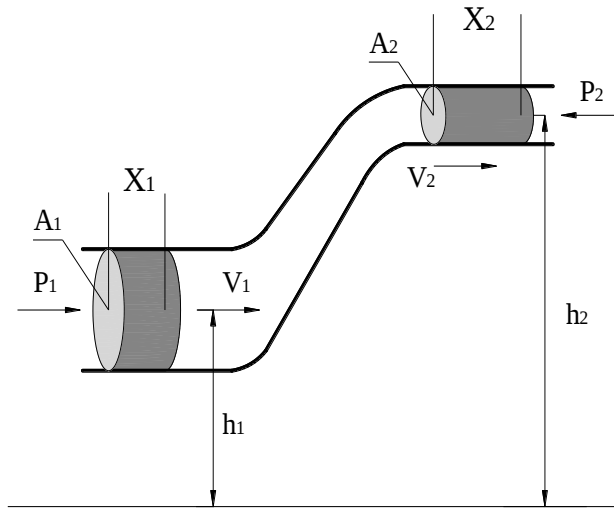
Kavite ise çarkın (rotorun) kanatları arasından hızla geçen sıvının basıncının aniden düşmesi durumunda bu noktalardaki sıvı - oda sıcaklığında olmasına rağmen- kaynayıp buharlaşır ve buhar kabarcıkları oluşur. Pompanın emme tarafındaki vakum çok fazla olduğunda, çarkın tüm yüzeyinde meydana gelen buhar kabarcıkları, yüksek basınç bölgesine doğru hareket ettikçe aniden yok olarak, büyük miktarda enerjinin ortaya çıkmasına ve çarka zarar vermesine yol açarlar. Bu olaya kavite adı verilir.

Pompadan çıkan suyun akışı aniden engellendiğinde oluşan enerji bir dalga halinde pompaya geri döner. Pompa suyu çok uzak bir mesafeye pompalarken borunun ucu "kritik süre" den daha kısa bir sürede kapatılırsa enerji geri dönerek pompa gövdesindeki basıncın aniden çok artmasına yol açar. Bu olaya su çekici denir. Basma borusunun çok uzun olduğu durumlarda su-çekici meydana gelmesi daha muhtemeldir.

## 2.6. Sürtünmeli Akışlar İçin Devir Sayısı Basınç İlişkisi

Basınç, hız ve ivme arasındaki ilişki ilk kez Bernoulli(1815) ve Euler(1816) tarafından geliştirildiği için bu denklemler Bernoulli denklemi olarak adlandırılır[1].

Zeminden  $h_1$  yükseklikte  $V_1$  hızlı akışkanın basıncı  $P_1$ ,  $h_2$  yükseklikte  $V_2$  hızlı aynı akışkanın basıncı  $P_2$  ise bu durumda Bernoulli denklemi Eş.2.1’de ifade edilmektedir;



Şekil 2.3.Basınç hız ilişkisi

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (U_2 + K_2) - (U_1 + K_1) \quad (2.1)$$

$$\Delta E = (mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2) - (mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2) \quad (2.2)$$

Aynı zamanda sistemde yapılan iş Eş.2.3’te ifade edildiği gibidir.

$$W = W_1 - W_2 = F_1 \cdot X_1 - F_2 \cdot X_2 \quad (2.3)$$

$W_1$  işi  $A_1$  alanına etkiyen  $P_1$  basıncının oluşturduğu  $F_1$  kuvveti ile  $m$  kütledeki sıvının  $X_1$  kadar yol almasıyla oluşan iştir.  $W_2$  işi ise  $A_2$  alanına etkiyen  $P_2$  basıncının oluşturduğu  $F_2$  Kuvveti ile  $m$  kütledeki sıvının  $X_2$  kadar yol almasıyla oluşan iştir.  $V$  hacmi ve  $P$  basıncı denklemde kullanılırsa Eş.2.4 ve Eş.2.5 elde edilir.

$$\Delta W = P_1 A_1 X_1 - P_2 A_2 X_2 \quad (2.4)$$

$$\Delta W = (P_1 - P_2) V \quad (2.5)$$

Sistemde yapılan iş sistemde harcanan enerji değişimine eşit olduğundan, Eş.2.2 denkleminin her iki yanı  $V$  hacmine bölünürse Eş.2.6 elde edilir.

$$P_1 - P_2 = (\rho g h_2 + \frac{1}{2} g v_2^2) - (\rho g h_1 + \frac{1}{2} g v_1^2) \quad (2.6)$$

Eş.2.6'da bu formülde  $\rho$  akışkan yoğunluğudur. Termodinamiğin birinci kanununa göre, bir sisteme dışarıdan bir ısı ( $Q$ ) veriliyor ve sistem tarafından bir iş ( $W$ ) üretiliyorsa, sistemin iç enerjisi ( $E$ ) bunlar arasındaki fark kadar bir değişime uğrar. Sistem tarafından üretilen iş ( $W$ ), basınç kuvvetleri tarafından yapılan iş ( $W_b$ ), viskoz kuvvetler tarafından yapılan iş ( $W_v$ ) ve sistemdeki pompa, türbin, fan...vs tarafından yapılan ( $W_s$ ) işlerin toplamıdır.

Bir pompaya bağlı akışkan (su) için Bernoulli denklemi, pompa tarafından yapılan iş

$W_s$ , basınç kaybı  $\Delta P_k$  olmak üzere basınçlar ve yapılan işler arasındaki ilişki Eş.2.7'de görüldüğü gibi oluşur[2].

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + W_s + \Delta P_k \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde bahsi geçen büyüklükler arasındaki bağıntı benzerlik kanunları aracılığıyla ifade edilebilir[8].

$$\frac{Q_n}{Q} \approx \frac{n_n}{n_x}; \frac{P_n}{P} \approx \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^2 \quad (2.8)$$

Bu kanunlardan, debinin hız (devir) ile doğru orantılı olarak arttığı ve basıncın da hızın karesi ile orantılı olarak arttığı görülmektedir[8]. Ayrıca kapalı çevrim sistemlerde pompaların güç gereksinimi yaklaşık olarak hızın 3.derecesi ile orantılı değişir[8].

## **2.7. Sirkülasyon Pompalarının Seçimi**

Sirkülasyon sistemlerinde; her pompa belirli tasarım değerleri için hesaplanır. Temel tasarım değerleri belirli bir pompa devri için (  $n_p$  ), pompanın manometrik basma yüksekliği (  $H_m$  ) ve debisi olmaktadır (  $Q$  ). Tasarım noktasında, kayıpların en az, verimin en yüksek olmasına çalışılır[4]. Çoğu uygulamada basma yüksekliği ve debide yapılan hesaplamalar sonucunda, seçilen pompa debi değeri hesaplanan değerlerden %25 daha fazla iken, basma yüksekliği değeri ise %10 daha fazla olmaktadır[8].

## **2.8. Sirkülasyon Pompalarında Elektrik Makineleri**

Özel sistemler hariç merkezi ısıtma sistemi ve bunun gibi su sirkülasyonu gerektiren her uygulamada ayrıca temiz su sirkülasyonu v.b. sistemlerde kullanılan elektrik makinelerinin tamamına yakını indüksiyon veya asenkron makine olarak da bilinen makinelerdir. Bu durum benimsenmiş olan, nispeten uygun fiyatlı, az bir bakım masrafı gerektirmeleri ve yüksek oranda güvenilir olmasına dayanmaktadır.

### 3. ASENKRON MAKİNELER

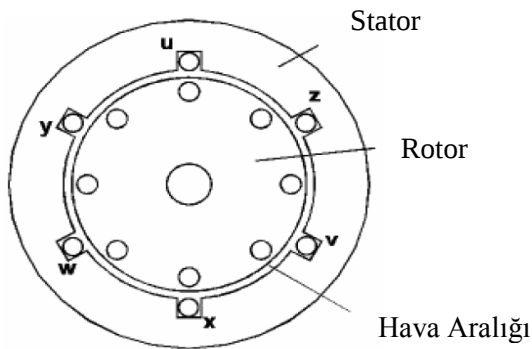
#### 3.1. Asenkron Makinelerin Genel Yapıları

Asenkron makineler fiziksel olarak en genel şekilde; Stator, Rotor, Gövde, Yataklar, Kapaklar ve pervaneden oluşur. Makinede yapısı itibariyle iki adet sargı vardır. Bu sargılardan birinin görevi manyetik akıyı yaratmak, diğerinin görevi ise hareketi sağlayacak kuvveti üretmektir. Makinenin temel itibariyle dönme hareketi oluşturması amaçlandığından, tasarımı da bu isteğe uygun olmaktadır.

Makinenin duran kısmına stator denilir. Duran kısmın içerisinde dönen kısım yani rotor bulunur. Rotor ve stator arasında bulunan hava boşluğu, hava aralığında sarf edilen akımın küçük olması için olabilecek minimum şekilde tasarlanır.

Makine içerisinde bulunan iletkenlerin dönme sonucu oluşan merkezkaç kuvvetinin etkisi ile dağılmasının önlenmesi için, stator ve rotor saç levhalarının içerisine açılan oluk şeklindeki kanallara yerleştirilir. Bu kanalların şekli istenilen makine özelliklerine göre değişiklik gösterebilir.

Stator; Manyetik alanın meydana geldiği sabit (duran) kısmıdır. Silisyumlu özel saç gövdelerin üzerine açılmış oluklara yerleştirilen iletken malzemelerden meydana gelir. Genel olarak oluklar açık veya kapalı olabilir. Olukların şekli ve büyüklüğü değiştiğinde makinenin empedansı(reaktansı) dolayısıyla akım, moment, devir parametreleri değişir. Şekil 3.1’de asenkron makinenin kesiti görülmektedir.



Şekil 3.1. Asenkron makine dikey kesiti[7]

Rotor; asenkron makinenin dönen kısmıdır. Statorun benzeri şekilde imal edilir. İletkenlerin birbirlerine bağlanış şekillerine göre sincap kafesli ve bilezikli olmak üzere iki şekilde imal edilirler.

### **3.2. Asenkron Makinelerin Doğru Akım Makinelerine Göre Üstünlükleri**

Asenkron makineler endüstride en fazla kullanılan motorlardır. Doğru akım makinelerine göre;

Daha ucuzdur, bakıma daha az ihtiyaç gösterirler,(Kollektör, Fırça, Yataklar sürekli arıza yapabilecek parçalardır), çalışması sırasında ark yapmaz, bir ve üç fazlı olarak yapılırlar, birkaç Wattan 35000 kWatt'a kadar imal edilebilirler, momentleri yüksektir, DC makinelerinde büyük sınırlar içerisinde devir değiştirilebilmektedir. Bununla birlikte güç elektroniğinin gelişmesi ile AC makinelerinde de Frekans ve gerilim değiştirilerek istenilen devir sayısı elde edilebilir[3].

### **3.3. Asenkron Makine Çeşitleri**

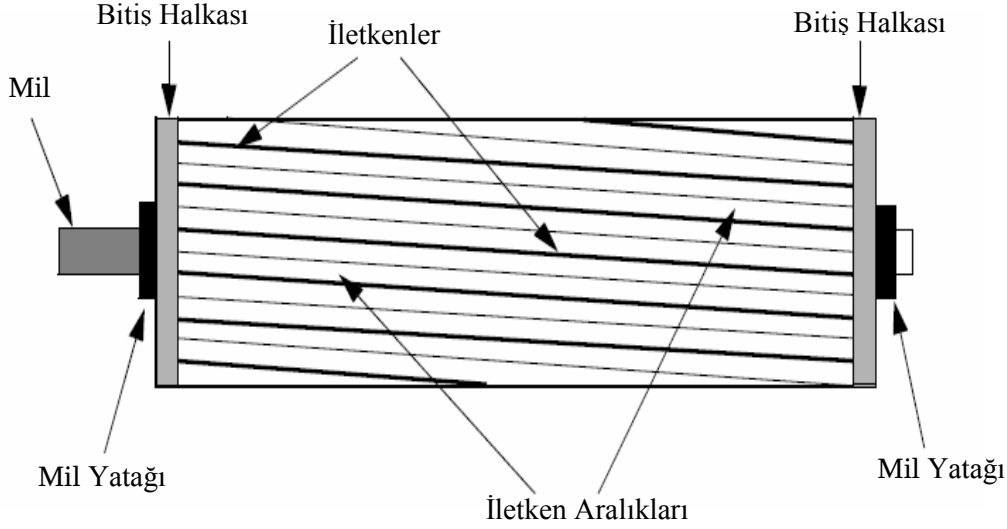
Asenkron makineler imal edilişlerine göre

Kısa devre rotorlu (sincap kafesli) asenkron makineler;

Bilezikli (sargılı rotorlu) asenkron makineler; olmak üzere ikiye ayrılırlar:

#### **3.3.1. Kısa devre rotorlu (sincap kafesli) asenkron makineler**

Rotor devresinde saç manyetik malzeme pres edildikten sonra açılan oluklara yerleştirilen iletkenin uçlarının birbiri ile kısa devre edilmesi sonucu meydana gelir. 3 fazlı sincap kafesli asenkron makinelerin yapısı basittir. Az bakıma ihtiyaç gösterir. Bu tip makinelerin ölçüleri aynı güçteki diğer makinelere göre daha küçüktür. Değişik yüklerdeki hız regülasyonu çok iyidir. Fiyatının ucuz olması, sağlamlığı, istenilen çalışma özelliğine sahip oluşu yüzünden sanayide çok kullanılırlar. Şekil 3.2'de kısa devre rotorlu asenkron makinenin rotoru görülmektedir[3].



Şekil 3.2. Kısa devre rotorlu asenkron makinenin rotor yapısı

### 3.3.2. Sargılı rotorlu (bilezikli) asenkron makineler

Bu tip makinenin statoru ile sargının yerleştirilmesi sincap kafesli makineler ile aynıdır. Rotor çelik saçlardan yapılmış silindirik bir göbektir. 120 derece aralıklı 3 adet tek fazlı kalıp sargısını yerleştirmek için rotor üzerine oyuklar açılmıştır. İzoleli rotor bölümleri stator kutup sayısına eşit kutup sayısı elde edecek şekilde gruplandırılmıştır. 3 tek fazlı rotor sargısı aralarında yıldız (Y) bağlanarak çıkış uçları rotor mili üzerindeki üç bileziğe irtibatlandırılır. Bilezikler üzerine temas eden fırça uçları hız kontrolörüne bağlanır[3].

### 3.4. Asenkron Makine Rotorunun Dönmesi

Asenkron makinelerde stator sargıları üniform hava boşluğu, üç fazlı simetrik dağıtılmış aralarında  $120^\circ$  açı ile ayarlanmış boşluklarda bulunan stator sarımlarından oluşur.

Asenkron makinenin statoruna uygulanan alternatif gerilim statorun yapısı gereği dönen manyetik alan meydana getirir. Dönen alanın meydana getirdiği manyetik akı çizgileri ( $\Psi$ ), makinenin çevresinde döner[5].

Manyetik alanın dönme hızına senkron hız denir ve  $n_s$  ile ifade edilir. Bu hız Eş.3.1’de görüldüğü gibi frekansla doğru, kutup çifti sayısı ile ters orantılıdır.

$$n_s = \frac{60.f}{P} \text{ (d/dak)} \quad (3.1)$$

Manyetik alan çizgilerinin elektriksel dönüş hızı;

$$\omega_s = 2\pi.f \text{ (rad/sn) ile ifade edilir.} \quad (3.2)$$

Bu hızla dönen manyetik alan vektörü hareketli durumda bulunan rotora göre  $n_s$  hızı ile rotor iletken düzlemlerinin arasından geçer. Ve faraday yasasına göre bu iletkende  $e$  EMK'sını indükler[5].

$$e = -N_2 \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.3)$$

Rotor sargısının uçları kısa devre edilmiş, bir direnç veya bir empedans üzerinden birbirine bağlanarak kapalı çevrim oluşturmuş ise bu sargıdan rotor akımı akar, ve kuvvet üretilir. Bu kuvvet sayesinde rotor kendiliğinden hareket eder ve dönmeye başlar[5].

### 3.5. Kısa Devre Rotorlu Asenkron Makinenin Sürekli Çalışması ve Kayma

Asenkron makinelerde sargılardan geçirilen akımlar sayesinde döner alan elde edilir. Elde edilen döner alan senkron hızla hareket ederek durmakta olan kısa devre edilmiş rotor iletkenlerini keser ve rotor akımlarını indükler. İndüklenen akım ile oluşan kuvvetler duran rotorun üzerinde dönme kuvveti oluşmasına sebep olur ve rotor dönme hareketine başlar. Rotor kendisine etki eden kuvvetin etkisi ile büyük bir ivme ile hızlanır.

Statora verilen gerilim kalkış esnasında rotor henüz hareketsiz durumda iken rotor tarafında da aynı frekansta ve değiştirme oranı kadar farklı gerilim indüklemesine sebep olur. Bu esnadan itibaren hızlanan rotor ile döner alan arasındaki hız farkı yavaş yavaş azalır. Dönmekte olan manyetik alan vektörü rotorun iletken düzlemlerinden birim zaman içerisinde daha seyrek geçmeye başlar. Bunun sonucu olarak rotorda indüklenen gerilim azalır ve rotor iletkenlerinden akan akımlar küçülür. Rotora etkiyen kuvvetler akımın karesi ile doğru orantılı olduğundan daha da küçülür[5]. İlk kalkış anındaki ivme azalır ancak yine hızlanma devam eder. Hızlanma esnasında üretilen kuvvetler sürtünme kuvvetini yenmek zorundadır. Burada sürtünme kuvvetleri, yataklardaki sürtünme kuvveti

ile rotorun hareketi esnasında hava ile olan sürtünmeden kaynaklanır. Rotor hızlandıkça sürtünme kuvvetleri artarken rotoru döndürmeye çalışan kuvvetler küçülür. Karşıt kuvvetlerin birbirlerine eşit olduğu anda rotorun ivmelenmesi sıfır olur. Sonrasında hız sürekli olarak aynı değerde kalır.

Bu durum incelendiğinde, rotor hızının senkron hıza çok yakın bir değerde, fakat senkron hızdan küçük olduğu görülür. Bu esnada döner alan ve rotor hızı arasındaki fark çok küçük olur. Senkron hızla dönmekte olan döner alan rotor iletkenlerini çok daha az sıklıkla kestiğinden, indüklenen gerilim, akım ve kuvvet hep birlikte küçülür. Bu noktadaki çalışma makinenin sürekli çalışma noktasıdır. Makineye etki eden frenleyici ve tahrik edici kuvvetler dengeye ulaşmıştır. Rotor hızı hiçbir şekilde kendiliğinden döner alan hızına erişemez.

Fiziksel olarak rotorun hareketi ve sürekli çalışma durumu yukarıda açıklandığı gibidir.

### 3.5.1. Asenkron hız

Rotor hızına asenkron hız veya asenkron devir sayısı denir.  $n_r$  ile gösterilir. Rotor hızı hiçbir zaman döner alan devir sayısına ( $n_s$ ) eşit olamaz.

### 3.5.2. Kayma

Senkron hız ile rotorun dönme hızı arasındaki farkın, senkron hıza göre oranı kayma olarak adlandırılır ve ''S'' harfi ile sembolize edilir.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.4)$$

Yüzde olarak kayma;

$$\%S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Rotorun dönme hızı ise Eş.3.6'da görüldüğü şekilde ifade edilir.

$$n_r = \frac{60.f_2}{p} \text{ (d/dak)} \quad (3.6)$$

Makinenin stator ve rotorunda manyetik akıyı oluşturan I akımı;

$$\dot{I} = \dot{I}_m \cdot \cos \omega t \text{ (A)} \quad (3.7)$$

Manyetik Akı;

$$\Psi = \Psi_m \cdot \cos \omega t \text{ (Maxwell)} \quad (3.8)$$

Olur. Stator sargısının sarım sayısı  $N_1$  ise statorda indüklenen gerilim;

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.9)$$

Bu şekilde akının değeri yerine yazılır ve gerilimin etkin değeri alınır. Eş.3.10 ve Eş.3.11’de görüldüğü gibi indüklenen gerilimler bulunur[5].

$$e_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot K_{w1} \cdot f_1 \cdot \Psi_m \cdot 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (3.10)$$

$$e_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot K_{w2} \cdot f_2 \cdot \Psi_m \cdot 10^{-8} \text{ (Volt)} \quad (3.11)$$

Burada  $f_2 = 0$  olursa  $e_2 = 0$  olur ve rotor sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile yavaşlar. Asenkron makinelerde döner alanın dengeli olabilmesi için bir fazın bobinleri aynı oluğa sarılmayarak birkaç oluğa dağıtılır. Bu durumdaki bobinlerin EMK toplamı bobinlerin dağıtılmadığı durumdakinden küçüktür. Bobinlerin dağıtıldığı durumdaki EMK değerini bulmak için Eş.3.10 ve 3.11’de yer alan dağıtım katsayısı  $K_{w1}$  ve  $K_{w2}$  değeri kullanılır.

Asenkron makinenin kayma değerlerine göre çalışma şekilleri Çizelge 3.1’de görülmektedir[5].

Çizelge 3.1.Asenkron makinenin kayma değerlerine göre çalışma şekli

| ns  | n        | s           | Çalışma Şekli     |
|-----|----------|-------------|-------------------|
| ns  | $n < ns$ | $0 < s < 1$ | Motor Çalışma     |
| ns  | $n > ns$ | $s < 0$     | Generatör Çalışma |
| -ns | n        | $s > +1$    | Fren Çalışma      |
| ns  | $n = ns$ | $s = 0$     | Boşta Çalışma     |
| ns  | $n = 0$  | $s = 1$     | Kısadevre Çalışma |

### 3.6. Asenkron Makine Stator Sargılarında İndüklenen EMK

#### 3.6.1. Zıt EMK

Döner alanın 1., 2. ve 3. faz sargılarında indüklediği EMK bu faz sargılarına uygulanan şebekenin RST faz EMK'lerine zıt yöndedir. Döner alanın indüklediği bu zıt yöndeki EMK'ne zıt EMK denir.

#### 3.6.2. Stator manyetik indüksiyonu

Stator hava aralığında oluşan manyetik akı Eş.3.12'te ifade edilmiştir.

$$\Psi_t = \pi \cdot D \cdot L \cdot B \quad (\text{Maxwell}) \quad (3.12)$$

Döner alanın bir kutbunun manyetik akısı Eş.3.13'de ifade edildiği gibidir.

$$\Psi = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot B}{p} \quad (\text{Maxwell}) \quad (3.13)$$

Şebeke frekansı Eş.3.14'te olduğu gibidir.

$$f = \frac{P \cdot n_s}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (3.14)$$

### 3.7. Asenkron Makine Eşdeğer Devresi

Asenkron makine çalışma ilkesi ve temel yapısı itibariyle transformatöre benzemektedir. Makinenin karmaşık yapısı dikkate alınarak her türlü çalışma şeklinin olduğu durumlarda

Makinenin kararlı hal davranışlarının hesaplanması ve oluşacak etkilerin izlenmesi ve tahmini için, makinenin eşdeğeri kullanılır. Eşdeğer devre yardımı ile stator ve rotor akımlarını, momentini, güçleri, kayıpları v.b. büyüklükleri hesaplamak daha kolaydır. Eşdeğer devre kullanılmaması ve faz sayısının artması durumunda büyük güçler de hesap hatalarının yapılması muhtemeldir[5].

Eşdeğer devrelerin oluşturulmasında temel olarak makinenin transformatöre benzerliği düşünülebilir. Eşdeğer devrede yalnızca bir faza ait devre kullanılır. Devrenin matematiksel modeli çıkartılırken bazı kabullerin yapılması gerekir. Öncelikle sistemin lineer olarak çalışması, hava aralığında bulunan manyetik akının sinüzoidal biçimde değişmesi, faz sargılarının birbirine tamamen ve her koşulda eşit olması, hava aralığının stator ve rotor çevresinde eşit üniform olması gibi kabullerdir[5].

Asenkron makinenin eşdeğer devresinin çizimi ve kayıpların bulunması için statorun etkin (efektif) direncinin bulunması deneyi, makineyi boşa çalıştırma deneyi, kilitli rotor kısa devre deneyi aynı şekilde trafolarla olduğu gibi yapılır[3].

### 3.7.1. Asenkron makinenin rotor eşdeğer devresi

Rotor eşdeğer devresinin bulunması için Rotorda indüklenen kilitli rotor faz akımı Eş.3.15'te görüldüğü şekilde bulunur.

$$I_r = \frac{E_{kr}}{\sqrt{(R_r'^2 + X_{kr}^2)}} \quad (3.15)$$

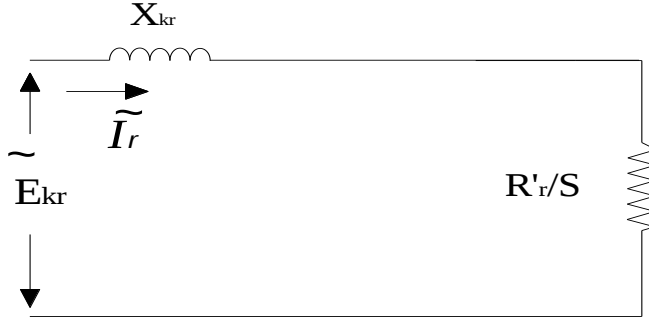
Makine çalışırken faz akımı;

$$I_r = \frac{S \cdot E_{kr}}{R_r' + (jS X_{kr})} \quad (3.16)$$

S kayma ile çalışan bir asenkron makinenin rotor empedansı;

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R_r'}{S}\right)^2 + (X_{kr})^2} \quad (3.17)$$

Eş.3.17’den yararlanılarak oluşan rotor devresi aşağıdaki gibidir.



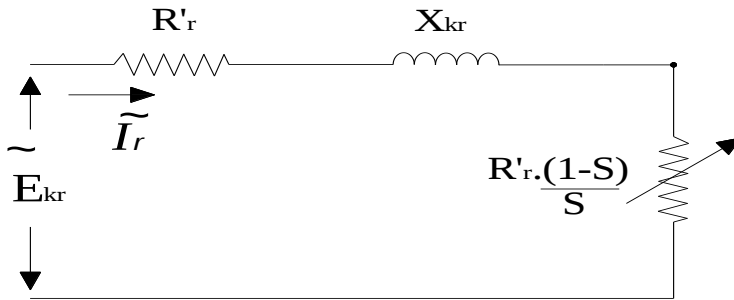
Şekil 3.3. Rotor eşdeğer devresi

Rotor eşdeğer devresindeki  $\frac{R'_r}{S}$  direnci kayma ile değişen bir omik dirençtir.  $\frac{R'_r}{S}$  direncine  $R'_r$  direnci eklenip çıkartılırsa;

$$\frac{R'_r}{S} = \frac{R'_r}{S} - R'_r + R'_r \quad (3.18)$$

$$\frac{R'_r}{S} = \frac{(1-S)}{S} R'_r + R'_r \quad (3.19)$$

Rotor bir fazının eşdeğer devresindeki  $\frac{R'_r}{S}$  yerine yukarıdaki eşitliğin koyulması ile Şekil 3.4’te görülen eşdeğer devre elde edilir.



Şekil 3.4. Yük direnci eklenmiş rotor eşdeğer devresi

Rotor eşdeğer devresindeki kayma ile değişen omik direnç Eş.3.20’da görüldüğü gibidir. Ve rotor milindeki yükün bir faz elektrik eşdeğeridir.

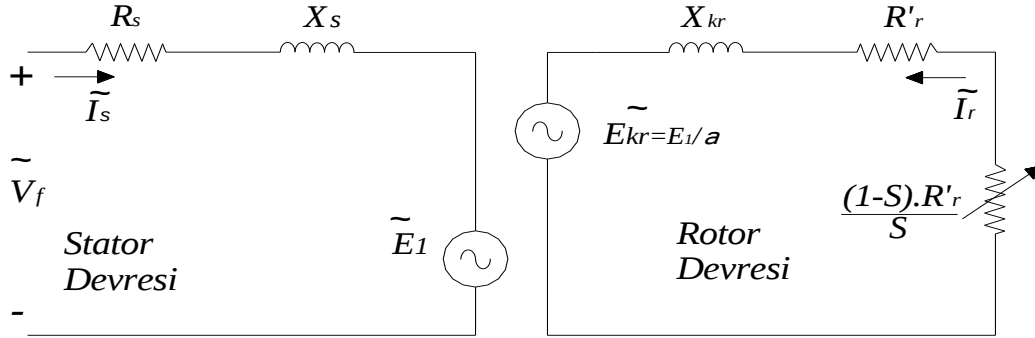
$$\frac{(1-S)}{S} \cdot R'_r \quad (3.20)$$

Şekil.3.5'te  $R'_r$  faz etkin direncinde kaybolan güç Eş.3.21'de görülmektedir ki bu faz başına rotor bakır kaybını verir.

$$R'_r \cdot I_r^2 \quad (3.21)$$

$$P_{mil} = \frac{(1-S)}{S} R'_r \cdot I_r^2 \quad (3.22)$$

Eş.3.22'de hesaplanan güç faz başına rotor milinden alınan mekanik gücü verir. Rotor eşdeğer devresi ile stator eşdeğer devresi birleştirilerek makinenin eşdeğer devresi bulunur. Üç fazlı bir statorda bir fazın etkin direnci  $R_s$ , Kaçak reaktansıda  $X_s$ 'dir. Asenkron makine trafo gibi düşünülerek aşağıdaki eşdeğer devre elde edilir.



Şekil 3.5. Stator ve rotorun birleştirildiği eşdeğer devre

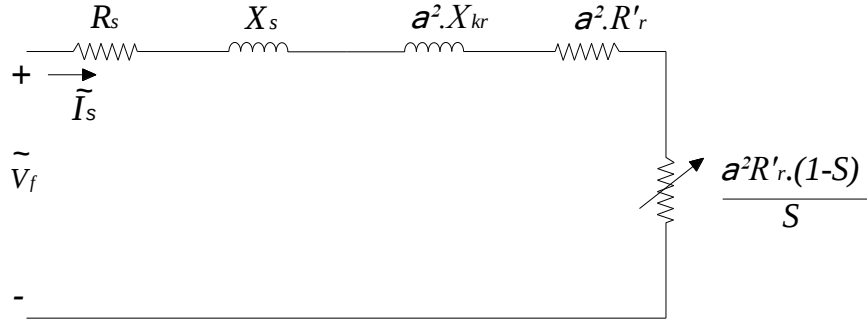
### 3.7.2. Rotor eşdeğer devresinin statora indirgenmesi

Stator ve rotor sargıları arasındaki dönüştürme oranının  $a$  olduğu düşünülürse, bu durumda rotor eşdeğer devresi terimleri stator terimleri cinsinden yazılabilir. Rotor terimleri Eş.3.23, Eş.3.24 ve Eş.3.25 aracılığıyla statora indirgenerek birleştirildiğinde Şekil 3.6'da görülen eşdeğer devre elde edilir.

$$E_{kr} = \sqrt{\left(\frac{R'_r}{S}\right)^2 + (X_{kr})^2} \cdot I_r \quad (3.23)$$

$$\frac{E_1}{a} = \sqrt{\left(\frac{R'_r}{S}\right)^2 + (X_{kr})^2} \cdot a \cdot I_s \quad (3.24)$$

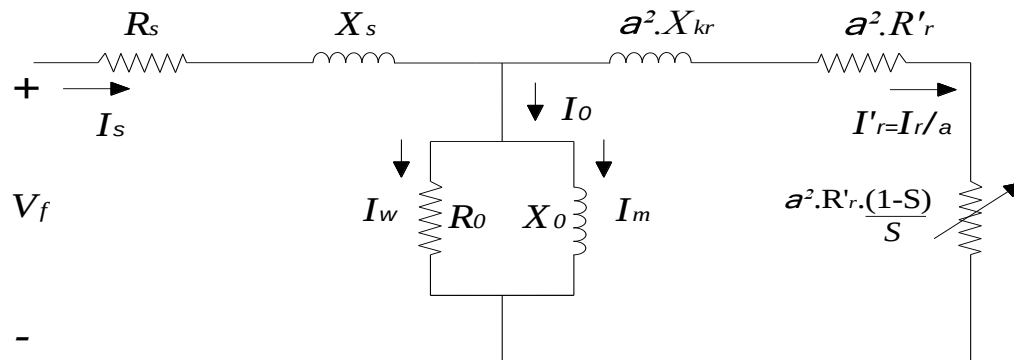
$$E_1 = \sqrt{\left(\frac{a^2 R'_r}{S}\right)^2 + (a^2 X_{kr})^2} \cdot I_s \quad (3.25)$$



Şekil 3.6. Stator ve rotor devreleri birleştirilerek elde edilen eşdeğer devre

### 3.7.3. Komple eşdeğer devrenin elde edilmesi

Makine boşa çalışırken çektiği güç statorda meydana gelen demir kayıplarından ve rotorun sürtünme kayıplarından oluşur. Bundan dolayı makine  $I_0$  akımını çeker. Tam yükte çalışırken  $I_0$  akımını çektiği gibi, yükü taşımak içinde şebekeden bir akım çeker. Eşdeğer devreye boşa çalışmada çekilen güçten kaynaklı bileşenlerde eklenirse Şekil 3.7'de görülen eşdeğer devre elde edilir.



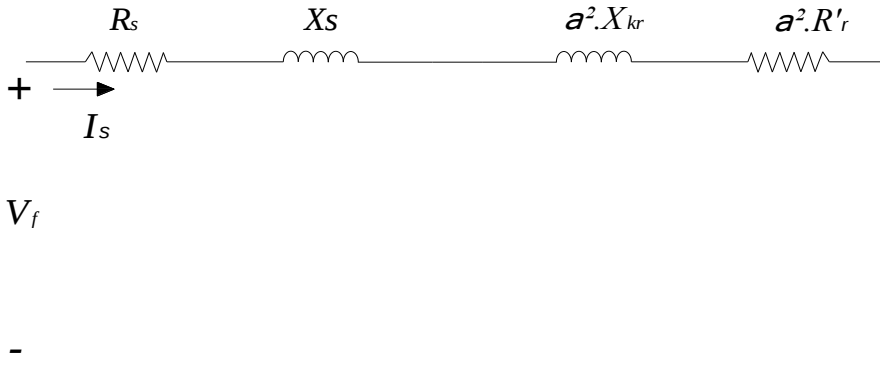
Şekil 3.7. Asenkron makinenin bir fazının komple eşdeğer devresi

### 3.8. Asenkron Makinenin Kısa Devre Çalışması

Asenkron makine rotorunun mekanik bir düzen yardımı ile bloke edilerek stator uçlarına gerilim uygulandığında, yaklaşık olarak boşa çalışma değerinin yarısına yakın bir EMK oluşur. Bu durumda mıknatıslanma akımı ihmal edilebilecek kadar küçük olup, rotor akımı çok büyük değere ulaşır[3].

Stator akımı  $R_s$  ve  $X_s$  ile  $a^2 R'_r$  ve  $a^2 X_{kr}$  dirençlerince sınırlanır. Statorun kaynaktan çektiği aktif güç  $R_s \cdot I_s^2$  bakır kayıpları ile dağılma kayıplarından oluşur. Rotoru mekanik olarak kilitlenen bir asenkron makinede;  $n_r = 0$  olacağından  $S=1$  olur.

Yukarıdaki eşdeğer devrede  $a^2 R'_r \cdot \frac{(1-S)}{S}$  değeri,  $S=1$  olur ise (0) olur.  $X_0$  direnci diğer dirençlere nazaran çok büyük olduğundan bu koldan akan akım ihmal edilebilir. Sonuç olarak daha öncede kilitli rotor deneyinde elde edilen Şekil 3.8'de görülen bir faz eşdeğer devresi elde edilir.



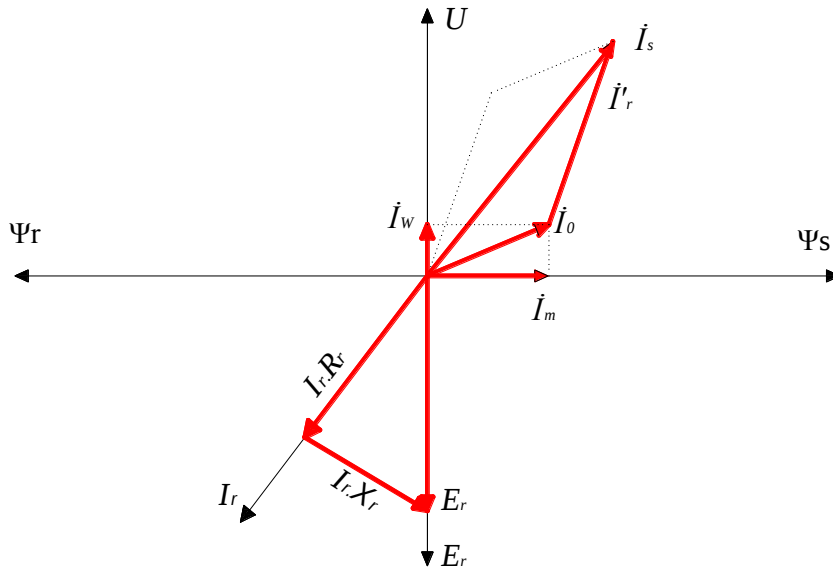
Şekil 3.8. Rotoru kilitlenmiş asenkron makinenin eşdeğer devresi

### 3.9. Asenkron Makinenin Boşa Çalışması

Bir asenkron makinenin statoruna üç fazlı alternatif gerilim uygulandığında rotoru yüksüz halde serbestçe döndürebiliyorsa bu çalışmaya boşa çalışma denilir. Stator döner alan hızına senkron hız denilmekte olup, bu hız  $n_s$  ile gösterilmekte idi. Rotor hızı ise  $n_r$  ile gösterilir. Boşa çalışma durumunda rotor hızı, makinede yük olmadığından senkron hıza yaklaşıp. Fakat sürtünme ve stator bakır kayıpları ile demir kayıplarından dolayı hiçbir zaman kendiliğinden senkron hıza ulaşmaz (senkron hızında) %1 kadar daha düşük devirle döner. Yani kayma yaklaşık %1 olur[3].

Stator ve rotor arasındaki hava aralığından dolayı asenkron makine büyük bir mıknatıslanma akımı çeker. Makine şebekeden statorun demir ve bakır ile rotorun sürtünme kayıpları kadar bir aktif güç çeker. Bu esnada şebekeden çekilen reaktif güç aktif güçten daha büyüktür. Dolayısıyla makinenin güç faktörü de 0,1-0,3 değerleri arasında değişir.

Makinenin boşa çalışma vektör diyagramı Şekil 3.9’da görüldüğü gibi çizilebilir.



Şekil 3.9. Asenkron makinenin boşa çalışma vektör diyagramı

Sonuç olarak;

$I_r \cdot R_r$  : Rotor omik direncinde düşen gerilim,

$I_r \cdot X_r$  : Rotor reaktif direncinde düşen gerilim,

$I_s \cdot R_s$  : Statorun omik faz direncinde düşen gerilim,

$I_s \cdot X_s$  : Statorun faz reaktansında düşen gerilim değerini gösterir.

Mıknatıslanma akımının daha büyük olmasından dolayı asenkron makinenin boşa çalışmada şebekeden çektiği akım nominal akımın %20-50 si mertebesinde değişir.

Şekil.3.7’de bir fazın toplam eşdeğer devresinde görüldüğü gibi boşa çalışmada  $R_r \cdot \frac{(1-S)}{S}$

direnci,  $s=0.01$  civarında olduğundan yaklaşık 100 kat değerine ulaşır ve rotor devresinden

çok küçük bir  $I_r$  akımı akar bu akım boşta çalışmanın yalnızca sürtünme (hava, yatak sürtünmeleri v.b.) ve demir kayıplarına karşılık gelen ve oldukça küçük olan akımdır. Bu durumda rotor sargısında indüklenen EMK'da küçük olur.

Rotor devresinde boşta çalışmada  $E_r = E_{kr} \cdot S$  olup,  $I_r$  akımının çok küçük olması nedeni ile  $E_r$  ve bununla birlikte  $S$  de küçüktür. Kaymanın küçük olması devir sayısının senkron devirden çok az olması anlamına gelmektedir[3].

Rotor sargılarından geçen  $I_r$  faz akımının meydana getirdiği manyetik akının etkisini karşılamak için stator devresinden, şebekeden  $I_r$  akımı çekilir. Makinenin şebekeden çektiği faz akımı  $I_s$ ,  $I_r$  ve  $I_0$  akımlarının vektörel toplamına eşittir.

### 3.10. Asenkron Makinede Kalkış Akımı

Asenkron makineler kalkış anında yüksek akım çekerler bu akıma kalkış akımı veya yol alma akımı denilir. İlk hareket anında makine mili durduğundan rotor hızı  $n_r = 0$  olur ve kayma  $S=1$ 'dir.

Makine milindeki yükü temsil eden direnç  $R_y$ , Eş.3.26'da görüldüğü gibidir.

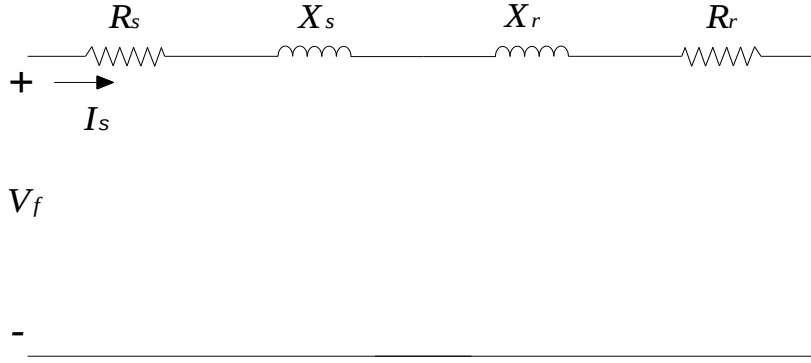
$$R_y = R_r \cdot \frac{(1-S)}{S} \quad (3.26)$$

Kalkış anında  $S=1$  olacağından,

$R_y = 0$  olur. Şekil.3.10'da görülen  $X_0$  direnci diğer dirençlerden çok büyük olduğundan bu koldan akan akım ihmal edilebilir.

Bu durumda asenkron makinenin eşdeğer devresi Şekil 3.10'da görüldüğü gibi olur ve şebekeden çekilen akım Eş.3.27'de görüldüğü gibi olur.

$$I_s = \frac{V_f}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (3.27)$$



Şekil 3.10. Asenkron makinenin kalkış anındaki eşdeğer devresi

Duran makinenin harekete geçmesi ile  $S$ , 0 ile 1 arasında olacağından  $\frac{R_r}{S}$  büyür. Ve şebekeden çekilen akım Eş.3.28’de görüldüğü gibi toplam empedansın artması ile azalır.

$$I_s = \frac{V_f}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{S})^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (3.28)$$

$S=1$  anında, payda;  $\frac{R_r}{S}$  direncinin  $R_r$  direncine eşit olması sebebiyle küçülür. Ve şebekeden çekilen  $I_s$  akımı büyük olur. Başka bir ifadeyle; rotor çubuklarını kesen manyetik akı en büyük değerde olduğundan rotorda indüklenen akım ve rotor alanı en büyüktür. Rotor alanının stator alanına etkisi çok olacağından, stator manyetik akısı ve stator sargılarının zıt EMK’sı en küçük değerde olur. Şebekeden de en büyük akımı çeker.

Rotor harekete başlayınca rotor hızı artar, rotorun manyetik alan hızı azalır. Ve stator zıt EMK’sı artacağından makinenin şebekeden çektiği akım azalmaya başlar.

### 3.10.1. Makinenin yüklendikçe fazla akım çekmesinin nedenleri

Boşta çalışma durumunda yaklaşık %1 kayma ile çalışan makine miline yük bindiğinde makine hızı düşer yani devri azalır. Devir sayısının azalması ile kayma artar. Dolayısıyla rotorda indüklenen EMK’ artar. Yük altındaki  $S$  kaymasına göre rotor gerilimi Eş.3.29’da görüldüğü gibi idi;

$$E_r = E_{kr} \cdot S \quad (3.29)$$

$S$  kayması arttıkça  $E_r$ ’de artar. Rotor empedansı Eş.3.30’dan;

$$Z_r = \sqrt{(R_r^2 + (SX_{kr})^2)} \quad (3.30)$$

Rotor faz akımı;

$$I_r = \frac{S.E_{kr}}{\sqrt{(R_r^2 + (SX_{kr})^2)}} \quad (3.31)$$

$E_r$  değeri büyük olduğunda otomatik olarak  $I_r$  değeri de büyük olur. Rotor faz akımları büyük olacağından rotorun manyetik akısı da artar. Rotor kutupları döner alan kutuplarının oluşturduğu manyetik akıları daha fazla zayıflatır. Stator sargılarında indüklenen zıt EMK küçülür. Böylece makine şebekeden çektiği akımda artmış olur[3].

### 3.10.2. Rotor empedansı ve rotorun endüktif reaktansının artışı ve etkileri

Rotor empedansı ve rotorun endüktif reaktansının artışı durumunda güç katsayısı azalır ve rotor akımı ile gerilimi arasındaki açı artar. Stator alanı maksimuma erişir fazla yükün etkisi ile stator ve rotor akımları artar. Fakat bunların alanları arasındaki açı arttığı için karşılıklı etkileri azalır ve dönme momenti de azalır.

İkinci etki ise rotorun endüktif reaktansı ile empedansın artışı rotor akımının kaymaya bağlı olarak artış hızını azaltır. Bu iki etki sebebiyle sincap kafesli asenkron makinenin dönme momenti artışı yavaşlar. Yaklaşık %20 kaymada maksimum değerine ulaşır[3].

### 3.11. Asenkron Makinenin Momenti

Asenkron makinenin milindeki döndürme momenti Eş.3.32, Eş.3.33’de görülen bağıntı ile bulunur;

$$M = \frac{P_m \cdot 716}{n_r} \quad P_m(\text{HP}), M(\text{kg.m}) \quad (3.32)$$

$$M = \frac{P_m \cdot 975}{n_r} \quad P_m(\text{kW}), M(\text{kg.m})$$

(3.33)

Makineden alınan güç (watt) rotorun açısal hızına bölünürse Eş.3.34'te görülen Newton-Metre olarak döndürme momenti bulunur.

$$M = \frac{P_m}{W_r} = \frac{P_m \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_r} \quad (3.34)$$

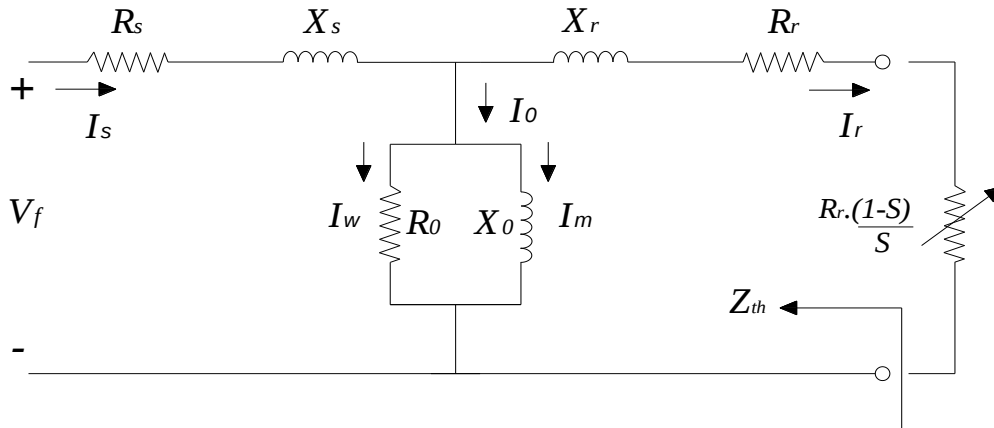
Makinenin rotorundan alınan güç; rotor milindeki yükün elektriksel ifadesi olan ve Eş.3.26'da ifade edilen dirençteki harcanan güç ile bulunabilir. Rotor devresinde akan akım  $I_r$  'nin karesi ile rotor yük direncinin çarpımı bir fazda rotor milinden alınan gücü gösterir. Dolayısıyla Eş.3.35 rotor milinden alınan mekanik gücü ifade eder.

$$P_m = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (3.35)$$

Bu eşitlik Eş.3.35'de yerine konulursa Eş.3.36 elde edilir.

$$M = \frac{3 \cdot R_r \cdot I_r^2}{W_r} \quad (3.36)$$

Momentin bulunmasında öncelikle rotor akımının bulunması gereklidir. Rotor akımı eşdeğer devre yardımıyla bulunur. Şekil 3.11'de Thevenin eşdeğer empedansı bulunarak rotor akım bulunabilir.



Şekil 3.11. Eşdeğer devrede Thevenin eşdeğer empedansı

Eşdeğer devreden Thevenin eşdeğer empedansı ve Thevenin gerilimi bulunarak devre basitleştirilebilir bunun için Eş.3.37, Eş.3.38 ‘de görülen eşdeğer empedans ile Eş.3.39’de görülen eşdeğer gerilim bulunur.

$$R_0//jX_0 \quad \text{ve} \quad (R_0//jX_0)/(R_s + jX_s) \quad \text{ve} \quad [(R_0//jX_0)/(R_s + jX_s)] + (R_r + jX_r) \quad (3.37)$$

Thevenin eşdeğer empedansı;

$$Z_{th} = [(R_0//jX_0)/(R_s + jX_s)] + (R_r + jX_r) \quad (3.38)$$

Thevenin gerilimi;

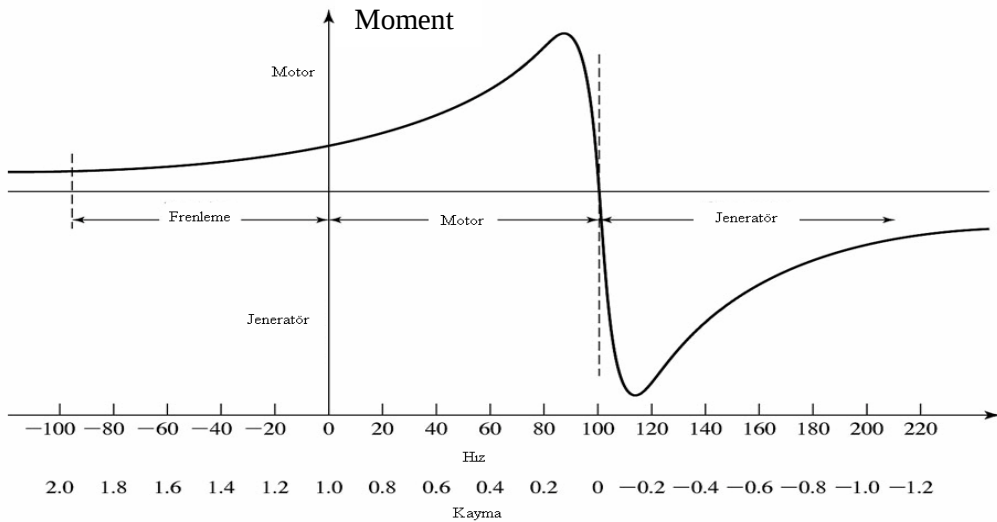
$$V_{th} = (R_0//jX_0)V_f / [(R_0//jX_0) + (R_s + jX_s)] \quad (3.39)$$

Bu durumda  $R_y$  yük direnci üzerinden geçen  $I_r$  akımı Eş.3.40’da görüldüğü gibi bulunabilir.

$$I_r = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_y}$$

(3.40)

Bulunan akım değeri ile Eş 3.36’da gösterilen formülden moment değeri bulunabilir. Momentin kayma ve hız ile değişimi Şekil 3.12’de şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Asenkron makinenin kaymaya bağlı moment değişimi

### 3.12. Asenkron Makinede Verim

Asenkron makinenin milinden alınan gücün şebekeden çekilen güce oranına verim denir. Asenkron makinenin stator sargısı şebekeden  $P_{IN}$  gücünü çekmektedir. Stator sargısının bakır kaybı  $P_{SCL}$  ve stator demir kaybı  $P_{FL}$  olmaktadır. Bu durumda statordan rotora aktarılan güç Eş.3.41’de görülmektedir.

$$P_G = P_{IN} - (P_{SCL} + P_{FL}) = P_{IN} - P_{K1} \quad (3.41)$$

Rotor direncinden dolayı rotorda bakır kayıpların oluşmaktadır. Rotor bakır kayıpları hesaba katılırsa rotor milindeki toplam güç rotora aktarılan güçten rotor kayıplarının çıkartılması ile bulunur.

Rotor sargılarında indüklenen kayıp elektrik gücü  $P_{RCL}$  olur.

$$P_{MII} = P_G - P_{RCL} \quad (3.42)$$

İndüklenen bu güçten rotorun sürtünme ve vantilasyon kayıpları karşılandıktan sonra kalan güç mile bağlı yüke verilir.

$$P_2 = P_{MII} - P_{SRT} \quad (3.43)$$

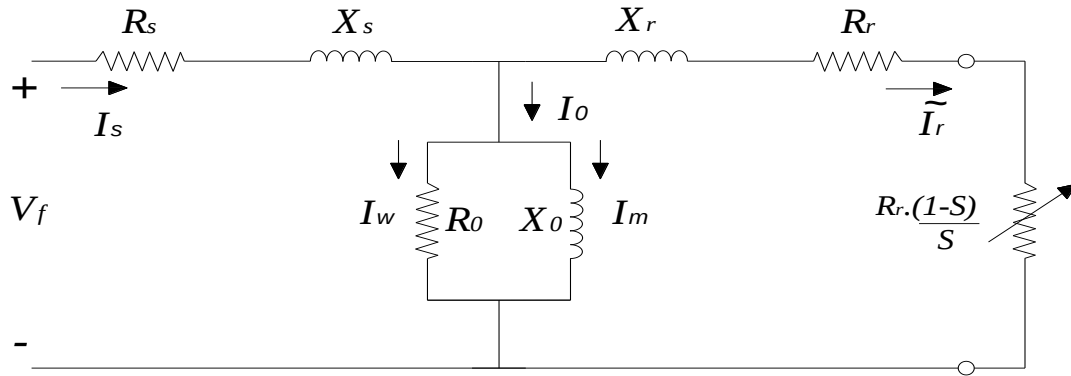
Buradan makine verimi:

$$\eta = \frac{P_{ALINAN}}{P_{VERILEN}} = \frac{P_2}{P_{IN}} \quad (3.44)$$

olmaktadır.

#### 3.12.1. Eşdeğer devrede verim

Asenkron makine statora indirgenmiş eşdeğer devresine göre; rotorun etkin faz direnci  $a^2 R'_r$  yerine  $R_r$ , kaçak faz reaktansı  $a^2 X_{kr}$  yerine  $X_r$  yazılır ise asenkron makine eşdeğer devresi Şekil 3.13’de görüldüğü gibi olur.



Şekil 3.13. Asenkron makine bir faz eşdeğer devresi

Bu devrede uygulanan gerilim  $V_f$  faz gerilimidir. Hesaplamalarda bulunan değer de faz değeridir.

### 3.12.2. Eşdeğer devrede makine giriş gücü

3 fazlı asenkron makineye uygulanan 3 fazlı şebekenin fazlar arası gerilim  $U$  ve faz gerilimi  $V_f$  (volt), makinenin şebekeden çektiği hat akımı  $I_s$  ve güç katsayısı da  $\cos\varphi$  olduğuna göre makinenin şebekeden çektiği güç Eş.3.45'te görüldüğü gibi hesaplanır.

$$P_{IN} = \sqrt{3}.U.I_s.\cos\varphi \text{ Watt,} \quad (3.45)$$

### 3.12.3. Rotor giriş gücü, rotor bakır kaybı ve rotor çıkış gücü

Makinenin şebekeden çektiği güçten, stator bakır ve demir kayıplarını çıkartır isek geriye kalan güç rotor giriş gücüdür.  $S$ =kayma ile milindeki yükü taşıyan bir asenkron makinede rotor giriş gücü Eş.3.41'de görüldüğü gibi idi. Şekil 3.13'de görülen eşdeğer devrede empedans Eş.3.46'dan hesaplanabilir.

$$Z_e = [(R_r + \frac{1-S}{S} R_r + jX_r) // (R_0 // X_0)] + (R_s + jX_s) \quad (3.46)$$

ve akım;

$$I_s = \frac{V_f}{[(R_r + \frac{1-S}{S} R_r + jX_r) // (R_0 // X_0)] + (R_s + jX_s)} = \frac{V_f}{Z_e} \quad (3.47)$$

Tek faz için rotor giriş gücü;

$$P_G = \frac{R_r}{S} \cdot I_r^2 \quad (3.48)$$

$$\frac{R_r}{S} = R_r + \frac{1-S}{S} R_r \quad (3.49)$$

Eş.3.49, Eş.3.48'de yerine yazılırsa Eş.3.51 elde edilir.

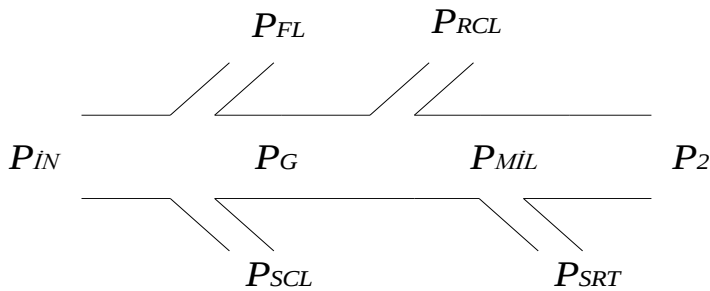
$$P_G = (R_r + \frac{1-S}{S} R_r) I_r^2 \quad (3.50)$$

$$P_G = R_r I_r^2 + \frac{1-S}{S} R_r I_r^2 \quad (3.51)$$

$P_{MIL} = P_G - P_{RCL}$  olduğuna göre Eş.3.51'de  $R_r I_r^2$  rotor bakır kayıplarını,  $\frac{1-S}{S} R_r I_r^2$  ise makine milinden alınan gücü verir. Makine milinden alınan güç ifadesinde  $\frac{R_r}{S} \cdot I_r^2$  yerine  $P_G$  yazarsak Eş.3.52 elde edilir.

$$P_{MIL} = (1-S) P_G \quad (W/faz) \quad (3.52)$$

Rotor giriş gücünden rotor çıkış gücü çıkarıldığında rotor bakır kayıpları elde edileceğinden rotor bakır kayıpları  $S \cdot P_G$  ifadesi ile bulunur. Eğer eşdeğer empedans yardımı ile bulunan akım değerinden yararlanılırsa mil gücü bulunur. Mil gücünden sürtünme kayıplarının çıkartılmasıyla elde edilen Çıkış gücünün ( $P_2$ ) giriş gücüne ( $P_{IN}$ ) oranından verim bulunabilir.



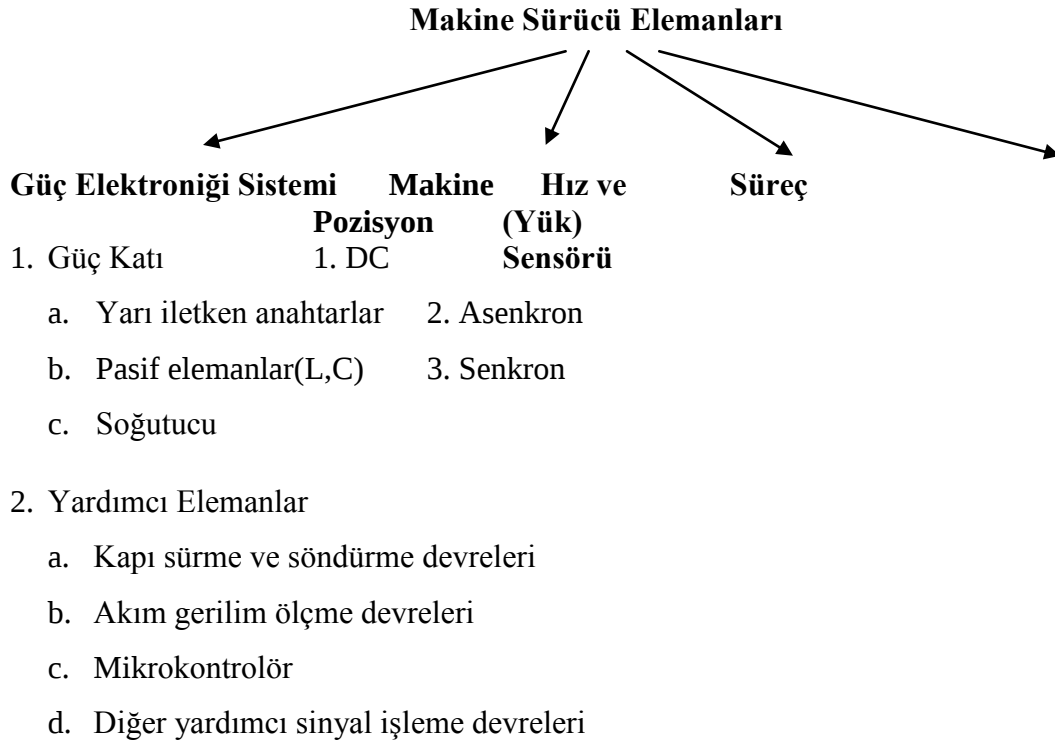
Şekil 3.14. Asenkron makinede verim diyagramı



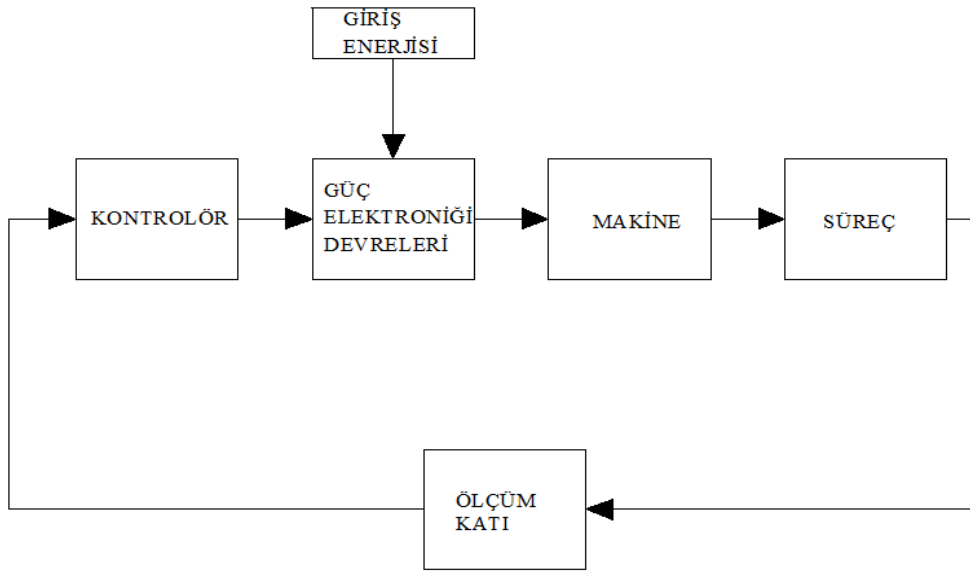
## 4. ELEKTRİK MAKİNALARINDA HIZ KONTROL SÜRECİ

### 4.1. Hız Kontrol Sürecinin Genel Prensibi

Elektrik makinelerinin hızlarının, momentlerinin, ve konumlarının ayarlanmasında başlıca güç elektroniğine dayalı sürücü sistemleri kullanılmaktadır. Genellikle sensör vasıtasıyla ölçülen büyüklükler istenilen referans değerler ile karşılaştırılır ve oluşan hata sinyali ile makine sürücü devreleri kontrol edilir. Şekil 4.1’de sürücü sistem elemanların temel yapısı Şekil 4.2’de ise Makine sürme sistemleri genel blok diyagramı yer almaktadır.



Şekil 4.1. Sürücü sistem elemanların temel şeması



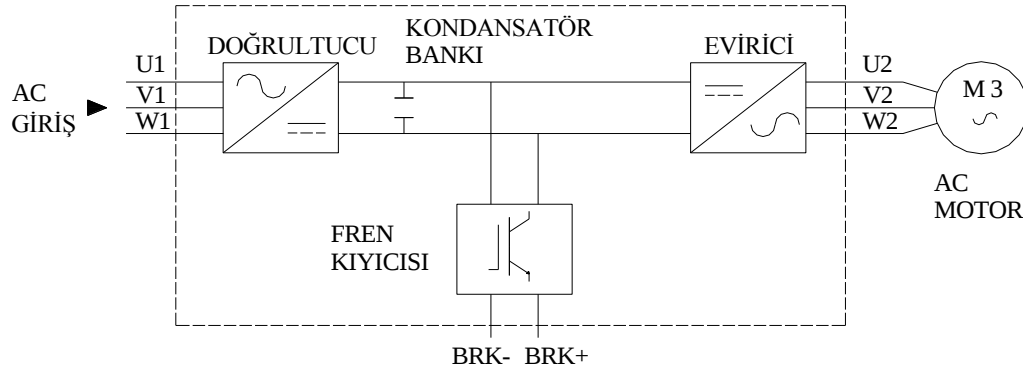
Şekil 4.2. Makine sürme sistemleri genel blok diyagramı

#### 4.2. Hız Kontrol Cihazlarının Genel Yapısı

Son on beş yıl içerisinde hız kontrol cihazları teknolojiye paralel olarak birçok gelişme sağlamıştır. Yeni nesil hız kontrol cihazları çok geniş kontrol ve koruma özelliklerini sunmakta ve günümüzde birçok sistemde kullanılmaktadır[7].

Genel olarak bir sürücüyü oluşturan elemanlar doğrultucu, DC hat (kapasitör ve frenleme transistor sistemi) ve eviricidir.

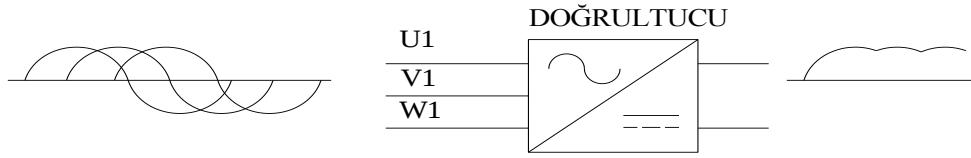
Hız kontrol cihazlarının temel yapısı (sabit gerilim kaynaklı sürücüler için) üretici firma gözetmeksizin aşağıdaki basitleştirilmiş temel şemaya dayanır.



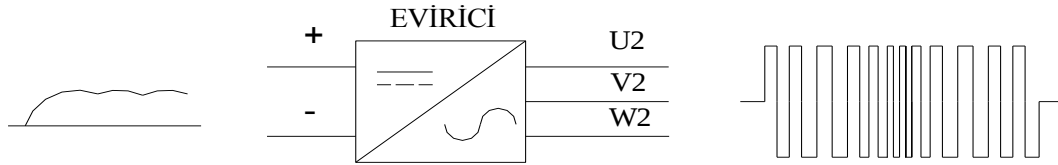
Şekil 4.3. Hız kontrol cihazı temel şeması

Bu sistemde doğrultucu üç fazlı alternatif gerilimi doğru gerilime çevirir. Genellikle bir diyot modülünden oluşmaktadır. Bu kısımda alternatif sinyal tam dalga doğrultucu ile DC gerilime çevrilir. Ara devrede yer alan kondansatör grubu ile gerilim sabitlenir. Ve eviriciyi beslemek için daha düzgün bir gerilim elde edilmiş olur.

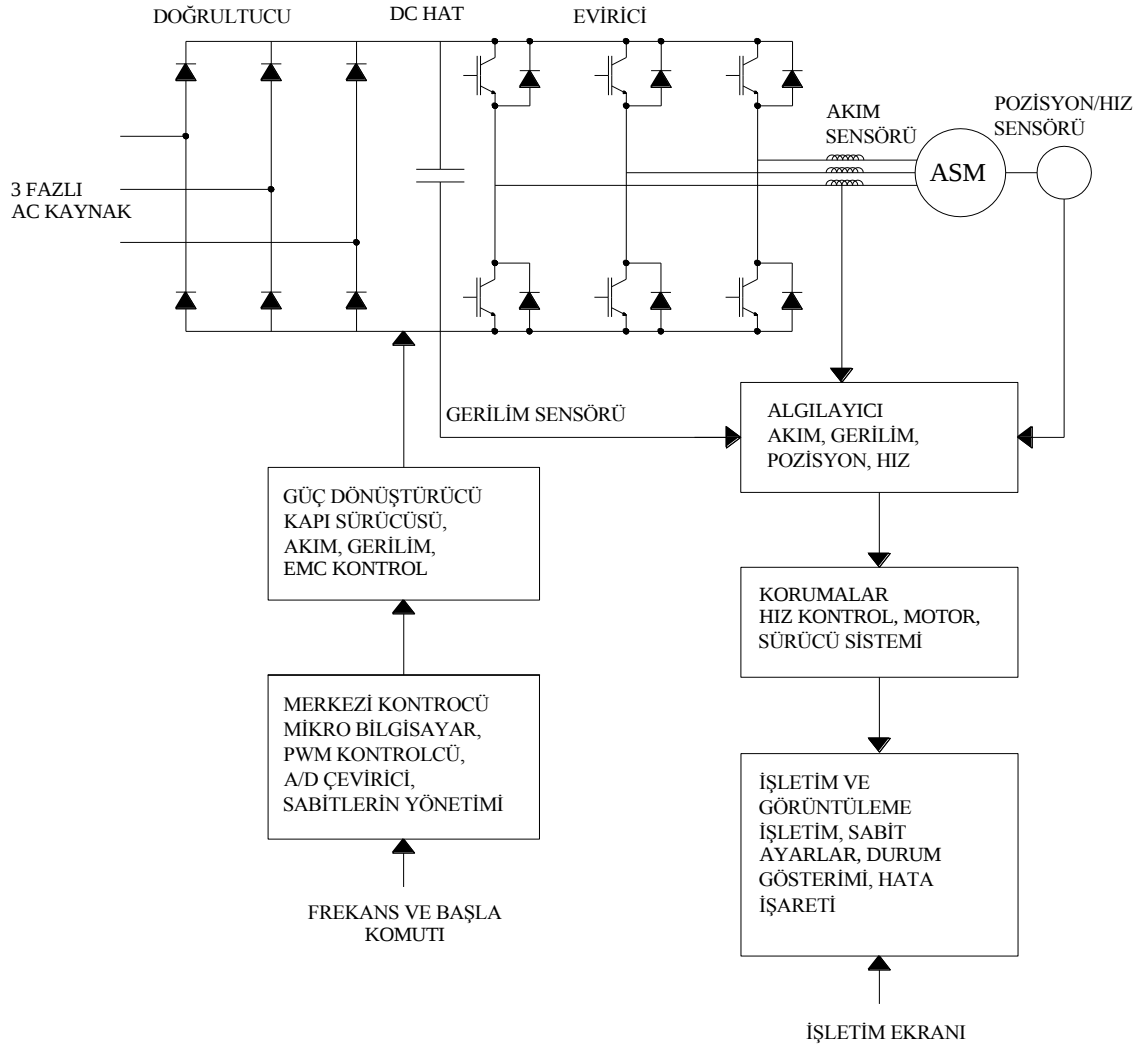
Eviriciler doğru akımı alternatif akıma çeviren “DC-AC dönüştürücü” lerdir. Bir eviricinin görevi girişindeki bir doğru gerilimi, çıkışında istenen genlik ve frekansta simetrik bir alternatif gerilime dönüştürmektir. Çıkışta elde edilen gerilim ve frekans değerleri sabit veya değişken olabilir[9]. Fren kıyıcı devredeki gerilim maksimum değeri aştığında harici fren direncini DC devresine bağlar.



Şekil 4.4. Doğrultucu temel çalışma prensibi



Şekil 4.5. Evirici temel çalışma prensibi



Şekil 4.6. Hız kontrol cihazlarının genel algoritması[7]

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi enerji kaynağı açıldığında diyot modülü ve akım sınırlayıcı üzerinden geçen AC güç, sabit DC güce çevrilir. DC güç, güç kondansatörlerinde depo edilir. Depo edilerek düzeltilen enerji PWM (pulse width modulation-darbe genişlik modülasyonu) formunda makineye verilir.

#### 4.2.1. Hız Kontrol cihazlarının frenlemesi

Yükün ataleti büyük olduğunda evirici frekansının düşürülmesi ile makinenin senkron hızı da düşecektir. Aynı anda atalet enerjisi makine veya yüke ait olan elektrik enerjisine dönüşecek, böylece motor jeneratör gibi çalışacak ve geri yönde hız kontrol cihazını besleyecektir. Bunun anlamı da motor frenlenecek ve hız düşecektir. Makinenin

frenlendiđi ve frekansın dūřūrūldūđı bu metot regenerative frenleme olarak adlandırılır ve oldukça etkili bir yōntemdir[7].

Dūřūk hız aralıđında makineye DC akım uygulayarak sabit bir manyetik alan oluřturulur. Bu durumda rotor manyetik akısının kesilmesi sebebiyle yūksek akım ile yūklenecek ve frenleme gerēekleřecektir. Bu yōntem dinamik frenleme olarak adlandırılır. Bu esnada atalet enerjisi makinede ısı olarak tūkutilir[7].

Frekans ēevirici sistemler kullanılırken yavařlama sūresi ēok kūēūk seēilirse rotor hızı statorun dōnen alan hızından ani olarak būyūk olacađından makine bir jeneratōr davranıřı gōsterecek ve geri yōnde makineden hız kontrol cihazını beslemeye bařlayacaktır. Bu durumda gūē kondansatōrlerindeki gerilim seviyeleri kritik seviyelere ulařıp cihazlara zarar verebilir[7].

Bu gibi durumlarda sistemi istenen sūrede durdurmak iēin fazla gerilimin bir řekilde dıřarı atılması gerekir. Frenleme direnē ya da modūlleri frenleme transistōrū aracılıđı ile devreye girerek, fazla gerilimin sisteme zarar vermeden kendi ūzerinden ısı yolu ile atılmasını sađlar[7].



## 5. ASENKRON MAKİNEİN HIZ KONTROLÜ

### 5.1. Asenkron Makinede Hız Bağlılıları

Asenkron makinenin senkron hız bağıntısı Eş.5.1’de görüldüğü gibiydi.

$$n_s = \frac{60.f}{P} \quad (5.1)$$

Statorda indüklenen gerilim Eş.5.2 ile bulunmaktaydı.

$$e_1 = 4,44.N_1.K_{w1}.f_1.\phi_M.10^{-8} \quad (5.2)$$

Rotor hızı ise Eş.5.3’de görüldüğü gibi bulunmaktadır.

$$n_r = (1-S).n_s \quad (5.3)$$

Bu Eşitliklerden asenkron makinenin hızının;

Kutup sayısının, sarım sayısı veya kesit alanının değiştirilmesi ile,

Sargılı rotorlu makinede dışarıdan direnç ilave ederek,

Kaymanın değiştirilmesi ile,

Giriş geriliminin değiştirilmesi ile

Giriş frekansının değiştirilmesi ile,

$V_f/F$  sabit tutularak frekans ve gerilimin değiştirilmesi ile değiştirilebildiği anlaşılır.

#### 5.1.1. Kutup sayısının, sarım sayısı ve kesit alanının değiştirilmesi ile hız kontrolü

Asenkron makinelerde sarım sayısı ve kesit alanı makine imalatı sırasında bir daha değiştirilemeyecek şekilde olduğundan bu parametrelerin değiştirilmesi mümkün değildir ve bu şekilde hız kontrolü yapılamaz. Ancak çift kutup sayısı  $P$  değiştirilerek kademeli devir ayarı sağlanması mümkündür.

Küçük güçlü makinelerde genel olarak değişik çift kutup sayısında birkaç sargı kullanılır.

Büyük makinelerde ise çift kutup sayısı değiştirilebilen özel sargılar kullanılır. Bu

durumda her bir sargının çift kutup sayısı sabit şebeke frekansında bir senkron devre tekabül eder.

Eş 5.1.'de görüldüğü gibi 50 Hz frekansta  $P=1$  olması durumunda  $n_s = 3000$  d/dak olur.  $P=2$  olması durumunda  $n_s = 1500$  d/dak.dır. Normal olarak asenkron makinelerde aynı faza ait yan yana bobin grupları birbirinin aksi işaretli kutup meydana getirecek şekilde bağlanırlar. Bu bağlantıya normal kutup bağlantısı denir. Diğer bir bağlantıda ise yan yana bobin grupları birbirinin aynı kutup oluşturacak şekilde bağlanır. Bu tür bağlantıya Dahlander sargılı bağlantı denir.

Bir bobin grubuna hem normal hem dahlander bağlantı yapacak şekilde imalat yapılırsa dahlander sargı yapılmış olur. Bu şekilde 2/4 veya 4/8 kutup elde edilmektedir. Bununla birlikte elektronik esaslı hız kontrol cihazlarının gelişmesi ile kutup sayısının değiştirilmesi ile hız kontrol yöntemi ve dışarıdan direnç eklenmesi ile hız kontrolü özel durumlar hariç kullanılmaz[3].

### 5.1.2. Kaymanın değiştirilmesi ile hız kontrolü

Kayma Eş.5.5 ile ifade edilmekte idi;

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (5.4)$$

Stator geriliminin düşürülmesi ile kritik kaymaya kadar hız değişimi sağlanabilir. Kayma sabit kalırken, moment gerilimin karesiyle değişecektir. Standart makinelerde kritik kayma değerleri düşük olduğundan bu yöntem de hız değişimi aralığı kısıtlı olmaktadır. Standart makineler için bu yöntemle hız kontrol aralığı %10 civarındadır[7].

Diğer bir kaymaya bağlı hız kontrolü ise bilezikli asenkron makinenin rotor geriliminin değiştirilmesi ile yapılan uygulamadır. Bu uygulamada rotor terminalleri rotor gerilimini doğrultan diyot köprülü trifaze doğrultucuya bağlanır. Doğrultucu çıkışında rotor giriş gerilimini oluşturmak için bir inverter bulunur. Bu tezde yer alan uygulamada sincap kafesli asenkron makineler kullanıldığından bu yöntem üzerinde durulmamıştır.

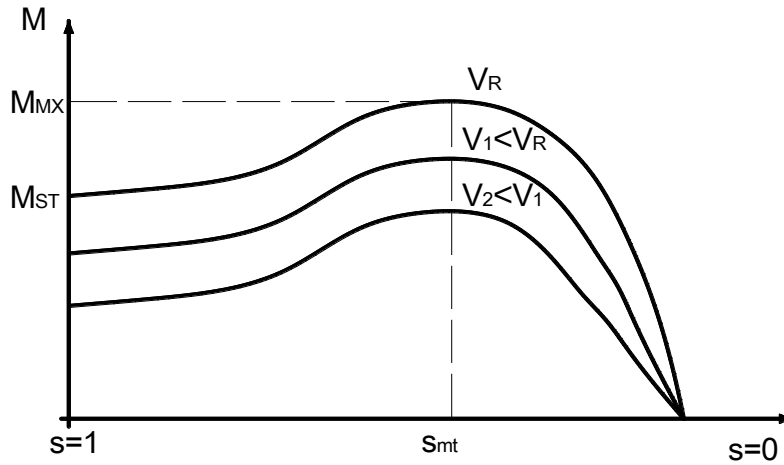
### 5.1.3. Giriş geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü

Moment ifadesi Eş.5.5 ile ifade edilmekte idi.

$$M = \frac{3 \cdot R_Y \cdot I_r^2}{W_r} = \frac{3}{W_r} \cdot \frac{1-S}{S} R_r \cdot I_r^2 \quad (5.5)$$

$$I_r = \frac{V}{Z} \quad (5.6)$$

Olduğundan sabit frekansta moment, değişken stator geriliminin karesi ile orantılı olarak değişir. Stator geriliminin değiştirilmesi ile gerekli olan moment değerine kadar istenilen hız elde edilebilmektedir. Bu kontrol yönteminde genellikle tristör köprüsü ile AC kıyıcı devresi kullanılır. Yalnız normal anma hızının altında ayarlama yapılır. Şekil 5.1’de stator geriliminin değiştirilmesi ile maksimum momentin elde edildiği kayma değerinin değişmediği ancak momentin gerilimin karesi ile orantılı olarak değiştiği görülür.

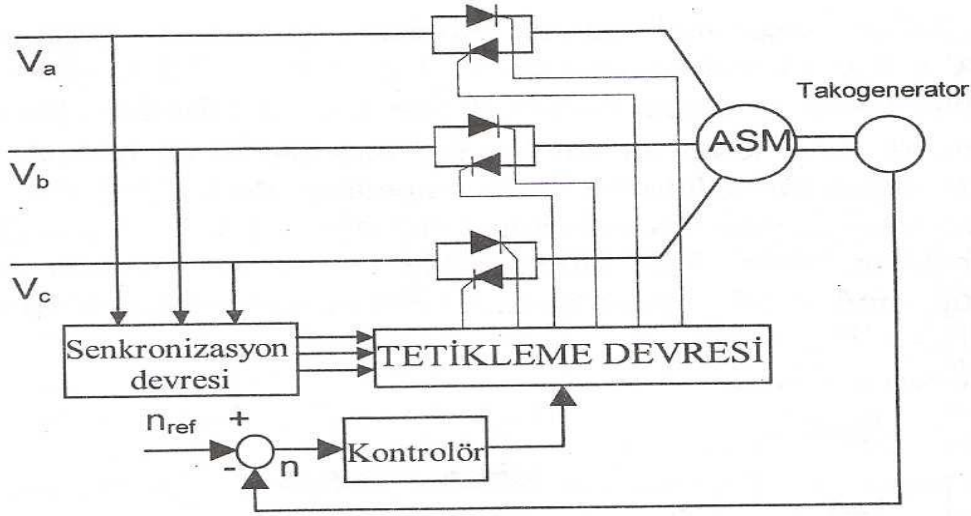


Şekil 5.1. Stator geriliminin değişimine bağlı olarak moment değişimi

Stator geriliminin değişimine dayanan bu yöntemde hız makinenin sabit nominal yükü ile yüklenmesi durumunda gerilimin frekansı ile belirlenen senkron hız değeri ile devrilme momentine karşı düşen hız değeri arasında değiştirilebilir. Bu aralık oldukça dardır. Yani hız senkron hız ile bu hızın yalnızca %10'u arasında değiştirilebilir. Bu yöntemin diğer bir sakıncası da maksimum ve yol alma momentinin dışında tüm momentin gerilimin karesi ile orantılı olarak değişmesidir[15].

Gerilimin değiştirilmesi maksimum momentin olduğu kayma değerini ve senkron hızı değiştirmez. Stator geriliminin değiştirilmesi ile yapılan hız kontrolü, hız kontrol aralığının dar olması nedeniyle sabit yük momenti karakteristiğine sahip yüklerin değişken hızlı tahrikine uygun değildir[15].

Stator genliğinin değiştirilmesi için kullanılabilecek en temel devre AC kıyıcı devresidir. Bu devrenin prensip şeması Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2. AC kıyıcı devresi prensip şeması

#### 5.1.4. Giriş frekansının değiştirilmesi ile hız kontrolü

$$n_s = \frac{60.f}{p} \quad (5.7)$$

Asenkron makinede Eş.5.7’deki formül senkron hızın bulunması için direkt olarak stator gerilimi frekansının etkili olduğunu gösterir.

$$e_1 = 4,44.N_1.K_{w1}.f_1.\varnothing_M.10^{-8} \quad (5.8)$$

$$\varnothing_M = \frac{e_1}{4,44.N_1.K_{w1}.f_1.10^{-8}} \quad (5.9)$$

Eş.5.9 ile frekansın düşmesi durumunda akı yoğunluğunun arttığı görülür. Akı yoğunluğunun belirli bir değerin altına düşmesi durumunda makine doyuma ereceğinden

aynı anda moment düşer ve bu durumda momentin düşmesinin engellenmesi maksadıyla gerilim değeri de orantılı olarak düşürülür.

$$X_L = j\omega L = 2\pi fL \quad (5.10)$$

$$Z_s = X_s + R_s \quad (5.11)$$

Esas olarak eşdeğer devreden ve Eş.5.10'dan de anlaşılacağı üzere stator empedansı ve rotor empedansı frekans ile doğru orantılıdır. Stator direnci; frekansın anma değerlerinde ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Sabit moment bölgesinde kalmak şartıyla frekansın düşürülmesi durumunda empedans değerleri düşer ve bir süre sonra stator direnci ihmal edilemez duruma gelir. Bu durumda frekans düşürülürken gerilimde düşürülmelidir.

Kaynak frekansının artması toplam sargı empedansının artmasına neden olur. Sabit gerilimde bu durum akımın ve dolayısıyla çıkış gücünün azalması demektir. Kaynak frekansının azalmasıyla da sargı empedansı azalacağından sabit gerilimde bu durum makinenin stator akımında bir artışa neden olacaktır. Akımdaki artış aynı zamanda çıkış momentinin artışı demek olduğundan, bu durum manyetik devrenin saturasyonuna, sargıların ısınmasına ve sargıların zarar görmesine neden olabilecektir. Pratikte, akımın kaynak frekansı ile bu şekilde değişimi makinenin gerilim-frekans oranının sabit tutulmasıyla engellenir.

Eş.5.8 ve Eş.5.11 aynı anda göz önüne alınırsa senkron devir sayısının değişmesini sağlamak için kaynak frekansının değiştirilmesi, momentin sabit tutulması için de stator gerilim genliğinin frekansla orantılı olarak değiştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu yöntem Günümüzde elektroniğin ve güç elektroniğinin gelişmesi ile birlikte en çok kullanılan hız kontrol yöntemi arasında yer almaktadır[7].

#### 5.1.5. $V/f$ Sabit tutularak hız kontrolü

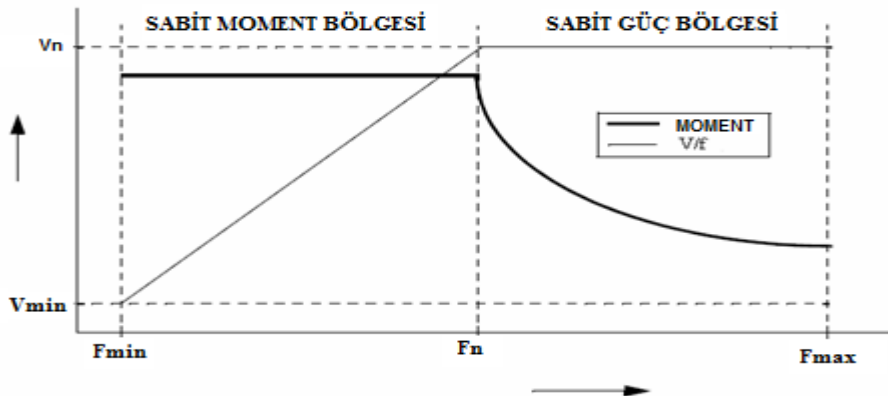
Skaler hız kontrol yönteminde, motorun sürekli durum modeli kullanılır ve gerilimin frekansa oranı ( $V/f$ ) sabit tutularak hız denetimi yapılır. Ancak bu hız denetiminde, makinenin elektriksel ve mekanik dinamiği arasındaki doğrusal olmayan kenetleme etkisi nedeniyle yüksek başarımlar elde edilmesi oldukça güçtür[12].

Giriş frekansının değiştirilmesi makine besleme frekansı değiştirilerek yapılabilir. Günümüzde besleme gerilimini ve frekansını değiştirme olanağı veren ve endüstride inverter olarak bilinen cihazlar geliştirilmiştir. Bu yöntemlerle makinenin hızı istenilen değerler arasında değiştirilebilmektedir.

Bir asenkron makinenin imal edildiği frekans dışındaki frekanslarda kullanılması durumunda diğer çalışma faktörlerini de göz önünde bulundurmamak gerekir. Bu faktörlerden en önemlisi stator sargı empedansının kaynak frekansı ile değişmesidir.

Eğer frekans ile orantılı olarak gerilim de değiştirilirse bunun sonucunda sabit bir makine akımı elde edilir. Bu oran aynı zamanda hava aralığı akısının bir ifadesi olduğundan sonuçta sabit  $V_f/F$  ile çalışma makinenin sabit bir moment üretmesine sebep olacaktır. Yüksek frekanslarda makineye uygulanabilecek maksimum gerilimin üzerine çıkılacağından dolayı  $V_f/F$  oranı sabit tutulamaz. Örnek olarak 50 Hz'lik bir makinenin çalışma gerilimi 380 V iken bu makinenin frekansı 75 Hz'e (1.5kat) çıkarıldığında gerilimi de  $V_f/F$  sabit tutmak için 1.5 kat artırılmaz. Arttırıldığı takdirde makine izolasyonu zarar görür.

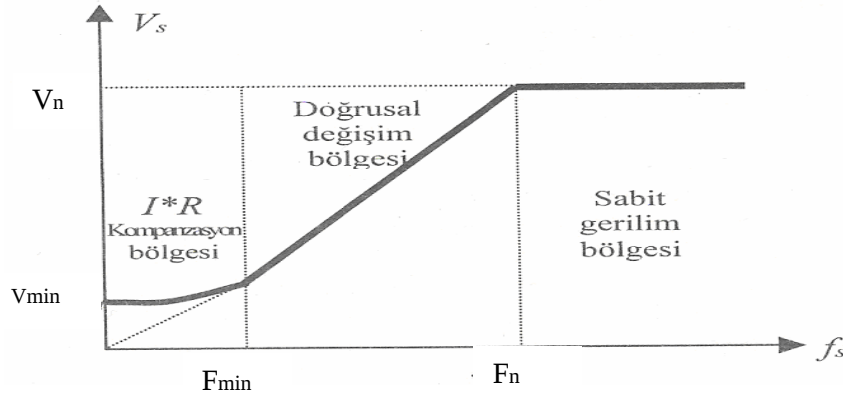
Makinenin zarar görmesini engellemek için gerilim frekans ile aynı oranda yükseltilemeyeceğinden yüksek frekanslarda  $V_f/F$  oranı düşer, makineye sağlanan akım azalır ve dolayısıyla makinenin üreteceği moment de azalır. Diğer bir deyişle makine hızı senkron hızın üzerine çıktığında, makinenin çalışması sabit moment bölgesinden sabit güç bölgesine kayacaktır.



Şekil 5.3.  $V_f/F$  Kontrol gerilim – frekans grafiği

İkinci bir faktör ise, düşük frekanslarda makineye uygulanan gerilim,  $V_f/F$  oranını sabit tutmak için azaltılacağından  $R_s$  stator sargı direnci üzerindeki gerilim düşümü ( $I \cdot R_s$ ) makineye uygulanan gerilimin yanında ihmal edilemeyecek bir seviyeye ulaşır. Bu da sağlanan akımı azaltacağından makinenin performansını etkileyecektir. Düşük hızlardaki bu dezavantajı gidermek için makineye uygulanan gerilim stator sargı direncindeki gerilim düşümünü kompanze edecek oranda arttırılır.

Gerilimin ve frekansın değiştirilmesi yöntemi sinüzoidal modülasyonlu inverterler ile yapılmaktadır.  $V_f/F$  oranını sabit tutarak kontrol skaler ve vektörel kontrol yöntemleri uygulanarak yapılmaktadır. Bu yöntemde gerilim ve frekans değişim eğrisi Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4.  $V_f/F$  Kontrol gerilim – frekans değişim eğrisi



## 6. GÜÇ ELEKTRONİĞİ İLE YAPILAN SKALER VE VEKTÖREL KONTROLLER

### 6.1. Skaler Kontrol Yöntemleri

Skaler kontrol metotları aşağıdaki şekilde yapılmaktaydı;

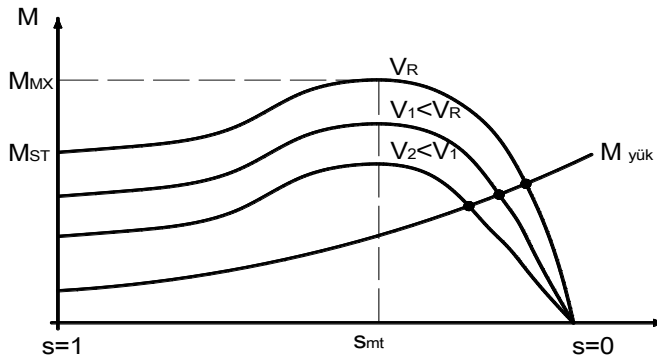
Stator gerilimi kontrolü,

Kayma gücü kontrolü,

Değişken gerilim, değişken frekans ( $V_f/F$ ) kontrolü,

#### 6.1.1. Stator gerilim kontrolü

Stator gerilimi kontrolü daha evvel 5.1.3'üncü maddede açıklandığı şekilde gerçekleştirilir. Bu metoda kullanılan yegane devre AC kıyıcı devresidir. Ve paralel olarak çalışan tristörlerden meydana gelir. Temel prensip şeması Şekil 5.2'de görülmektedir. Bu devrede momentin giriş geriliminin karesi ile orantılı olarak değişmekte olduğu ve buna bağlı olarak fan ve çark tipi moment ihtiyacı hız ile artan yükler için uygun olduğu anlaşılr. Bu tür yüklerde hız ve moment ihtiyacı oldukça geniş aralıktadır. Bu yöntemde tristör tetiklenmesi ve harmonikler olumsuz etkilerdir. Şekil 6.1'de fan, çark tipi moment ihtiyacı olan yükün makine momentine göre kıyaslanması görülmektedir[13].



Şekil 6.1. Giriş geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü ve pompa, fan yükü moment grafiği

### 6.1.2. Kayma gücü kontrolü

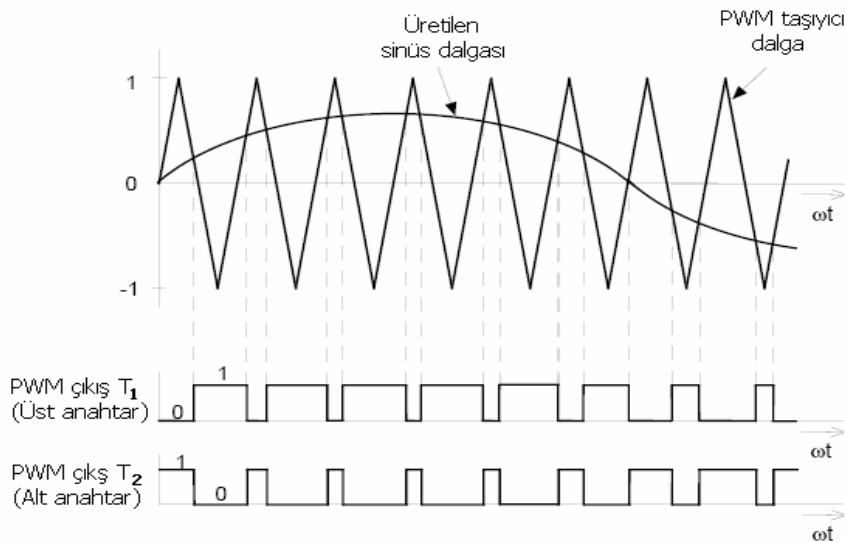
Bu yöntem daha çok bilezikli asenkron makinelerde kullanılır. Rotor gerilimi doğrultularak ve inverter vasıtasıyla ayarlanarak hız denetimi sağlanır.

### 6.1.3. Değişken gerilim değişken frekans yöntemi

#### PWM yöntemi

Değişken gerilim ve değişken frekans yönteminin temelinde  $V_t/F$  sabit tutularak hız kontrolü yapmakta olduğu daha önceki bölümde açıklanmıştır. PWM eviriciler genelde sabit DC gerilimden beslenirler. Bu yöntemde eviricinin çıkışındaki hem frekans hem de gerilim ayarlanır. Darbelerin sönüm ve var olma süreleri değişken miktarda uygulanarak istenilen etkin değerde sinyal elde edilir.

PWM yöntemiyle sinyal üretilirken sinyali mümkün olduğu kadar sinüs formatına benzetmeli ayrıca moment harmoniklerini de sönümlememiz gerekir. En çok kullanılan PWM sinyal üretme yöntemi Sinüs – Üçgen karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırma yönteminde frekansı kHz' ler mertebesindeki üçgen dalga ile istenilen frekans ve genlikteki referans sinüs dalgası karşılaştırılarak kesiştiği noktalarda anahtarlara tetik sinyalleri gönderilir. Şekil 6.2'de sinüs üçgen karşılaştırma ve oluşan darbeler prensip şeması şeklinde görülmektedir.



Şekil 6.2. Sinüs-üçgen karşılaştırması temel prensibi[7]

Üçgen dalganın frekansının büyük seçilmesi evirici çıkışındaki sinyalin sinüse o kadar yakın olmasını sağlayacaktır, fakat bu durumda anahtarlama sayıları artacağından kayıplar artacak ısınma artacak ve sistemin etrafa yaydığı gürültü artacaktır. Bu sebeplerden dolayı üçgen dalganın frekansı optimum seviyelerde seçilir. Günümüz sürücü sistemlerinde üçgen dalganın frekansı diğer bir tanımıyla anahtarlama frekansı ayarlanabilmekle beraber 8 – 10 kHz seviyelerindedir[7].

PWM evirici ile yapılmış bir sinüs işareti hiçbir zaman saf bir sinüs gibi olamayacak ve temel frekansla orantılı frekanslarda harmonikler içerecektir.  $m_a$  modülasyon genliği olmak üzere Eş.6.1’de ifade edildiği gibidir.

$$m_a = \frac{V_{KONTROL}}{V_{ÜÇGEN}} \quad (6.1)$$

$m_f$  frekans modülasyonu olmak üzere Eş.6.2’de görüldüğü gibi tanımlanır.

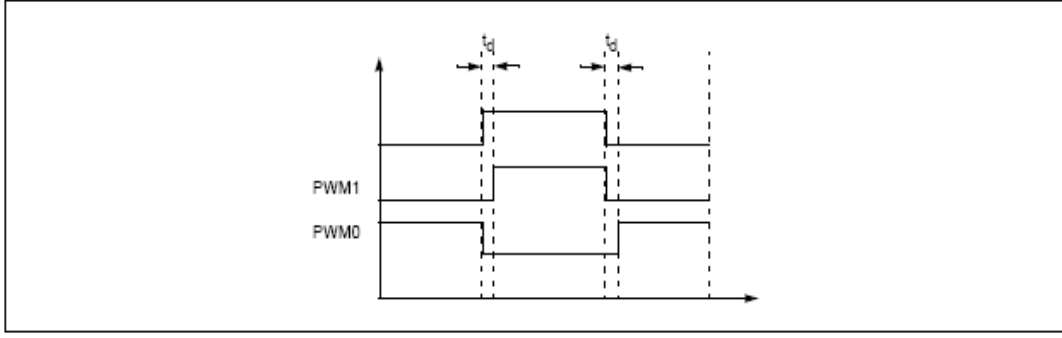
$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (6.2)$$

Modülasyon frekansın 1.0 dan küçük olduğu lineer çalışma bölgesinde PWM çıkışındaki gerilimin temel bileşeninin değeri EŞ.6.3’te görüldüğü gibi ifade edilir.

$$V_{an} = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (6.3)$$

### Ölü zamanın belirlenmesi

PWM uygulaması sırasında aynı kol üzerindeki anahtarlama elemanlarının aynı anda ilettime girmesi DC bara geriliminin o kol üzerinden kısa devre olmasına neden olacaktır. Tamamlayıcı Mod olarak tanımlanan PWM uygulamasında, aynı koldaki anahtarlardan biri iletimdeyken diğeri kesimde olur. Şekil 6.3’ de ölü zaman eklenmesi gösterilmektedir[11].

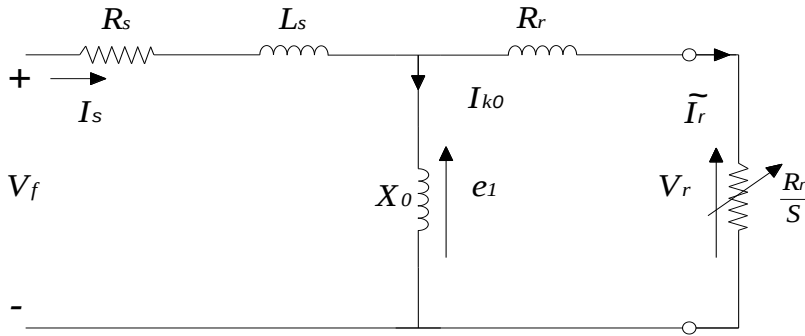


Şekil 6.3. Ölü zaman belirlemesi

### PWM inverter sürücü

Asenkron makineler ideal AC gerilim kaynağından beslenirken rotor hızı statorun frekansı ve kutup sayısı ile orantılı olan senkron hızından yaklaşık %5 daha düşük hız ile dönmektedir.

Sinüzoidal modülasyon ile hız değişimi kolayca sağlanabilmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında  $R_o$  direncinin  $X_o$  empedansı yanında ihmal edilmesi ile Şekil 6.4'teki eşdeğer devre kullanılarak;



Şekil 6.4. Asenkron makine basitleştirilmiş eşdeğer devresi

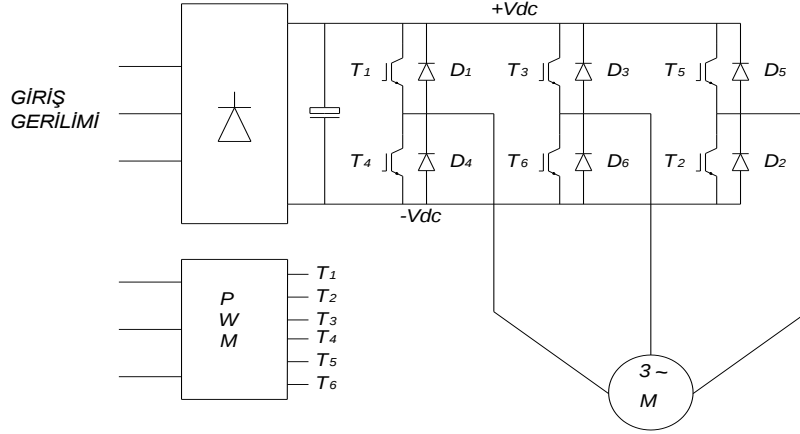
Rotor devresi gücü;

$$e_1 = \omega_1 \cdot L_0 \cdot I_{k0} = \omega_1 \cdot \lambda_0 \quad (6.4)$$

Eğer stator empedansı ihmal edilirse;

$$V_r \approx e_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot \lambda_0 \quad (6.5)$$

Eşitliği oluşur. Burada anma hava aralığı akısı sabit tutulursa, besleme gerilimi  $V_f$  'in giriş frekansı ile orantılı olduğu görülür.  $V_f/f$  sürücünün SPWM inverter ile enerjilenmesini içeren prensip şeması Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.5.  $V_f/f$  sürücünün SPWM inverter ile prensip şeması

## 6.2. Vektörel Kontrol Yöntemleri

Daha önceki konularda işlenen skaler kontrol yöntemleri ayarlanabilir hız için uygun çözümler yaratmaktadır. Maliyeti vektör kontrolüne göre daha azdır. Bununla birlikte anlık olarak frekans kontrolü ile makine hız pozisyon kontrolü yapılamadığından anlık olarak moment kontrolü de yapılamaz[13]. Vektörel olarak kontrol yapan sistem sayesinde akım, gerilim, frekans v.b. değerlerin anlık değişimleri ve sonuç olarak motordan istenen hız, moment, pozisyon gibi büyüklüklerin kontrolü anlık olarak daha net sağlanabilir. Vektör kontrolünün temel prensibi, moment ve akı üretimini üstlenen akımın/gerilimin bileşenlerine ayrılmasına ve bunların bağımsız olarak kontrol edilmesine dayanır.

Vektör kontrol metodu uygulanırken öncelikle makinenin eşdeğer devresi yardımı ile dinamik tanımlaması yapılır. Eşdeğer devrelerin yanında meseleyi daha basit açıklamak için uzay vektörü kavramı kullanılır.

Bu tanımlamalar yapılırken;

Stator sargılarının stator çevresine düzgün yayıldığı ve hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olduğu, üç fazlı stator sargılarının  $120^\circ$  lik elektriksel açı ile düzgün olarak

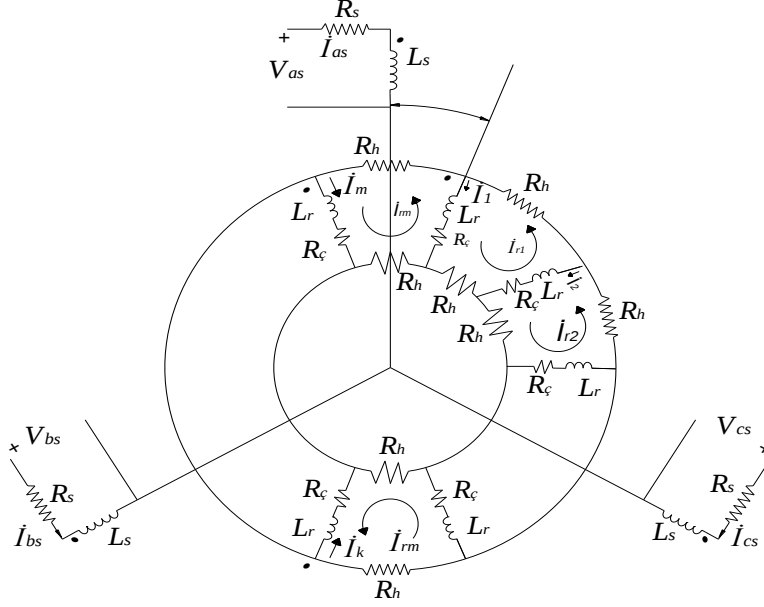
yerleştirildiği, doyma, oluk ve diş etkilerinin ihmal edildiği, histerisiz ve fuko kayıplarının ihmal edildiği varsayılır, magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılır, deri olayı ihmal edilir, rotor çubuklarının simetrik yayıldığı varsayılır, direnç ve endüktansların sıcaklık ve frekansla değişmediği kabul edilir, rotorun her çubuğu bir rotor faz sargısı olarak kabul edilir.

Makine stator, rotor ve karşılıklı indüklenmeden meydana gelmektedir. Senkron makinelerde vektör kontrolü nispeten kolaydır. Bunun sebebi, rotorda bulunan alan devresi ayrı olarak beslenir ve bağımsız şekilde ayarlanabilir. Rotorla ilgili alan akısı sabittir ve devir sayısı ile değişmez. Kısa devre rotorlu asenkron makinelerde moment ve stator giriş akımlarını bileşenlerine ayırmak daha zordur. Üstelik AC akım taşıyan rotor ve rotor alanı (rotor hareketine göre) sabit değildir. Bu da vektör kontrolünün asenkron makinelerde senkron makinelerle göre daha karmaşık olduğunu gösterir. Fakat kısa devre rotorlu asenkron makineler, sürücü uygulamaları açısından daha fazla tercih edilmektedir. Bunun nedeni, daha önceki bölümlerde bahsi geçen kısa devre rotorlu asenkron makinelerin ucuzluğu, mekanik yapısının sağlam olması ve bakım masraflarının az olması v.b. gibi avantajlarıdır. İncelediğimiz pompa fan v.b. sistemlerde de esas olarak sincap kafesli asenkron makineler kullanıldığından bu bölümde yalnızca sincap kafesli asenkron makinelerin vektörel kontrolü üzerinde durulmuştur.

Vektör kontrol yöntemi aynı zamanda “alan yönlendirmeli kontrol”, “akı yönlendirmeli kontrol” ya da “dolaylı moment kontrolü” olarak da bilinir. Alan yönlendirmeyi kullanırken, 3 fazlı akım vektörleri, 3 boyutlu sabit referans eksen ekseninden 2 boyutlu dönel referans eksenine (d-q) çevrilir (Clarke-Park dönüşümü). “d”, stator akımının akı üreten kısmını, “q” ise moment üreten kısmı tanımlar. Bu birbirinden ayrılmış iki bileşen, ayrı PI kontrolörler ile birbirlerinden bağımsız kontrol edilebilirler. Uygun anahtarlama tablosu, SVM PWM modülasyon tekniği ile sağlanır. Bu yöntem, DC makinede olduğu gibi mükemmel bir moment-hız cevabı sağlar[11].

### 6.2.1. Kısa devre rotorlu asenkron makinenin dinamik modeli

Vektör kontrolü sırasında yapılan dönüşüm ve işlemlerin nedeninin daha iyi anlaşılması için makinenin oldukça karmaşık olan dinamik modeline değinmek gereklidir.



Şekil 6.6. Kısa devre rotorlu 3 fazlı asenkron makine eşdeğeri

$R_c$ ; rotor çubuk direncini ve  $R_h$ ; rotor çubukları arasındaki halka direncini göstermek üzere bu modeli stator ve rotor devresindeki akım, gerilim, endüktans, direnç olarak matris formunda yazarsak aşağıdaki eşitlikler elde edilir;

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_s & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_s \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_h + R_c) & -R_c & 0 & 0 & -R_c \\ -R_c & 2(R_h + R_c) & -R_c & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_c & 0 & 0 & R_c & 2(R_h + R_c) \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$[L_R] = \begin{bmatrix} L_R & M_{rr} & . & . & M_{rr} \\ M_{rr} & L_R & . & . & M_{rr} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ M_{rr} & . & . & . & L_R \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Statordan bakıldığında ortak endüktans rotor ve statorun konumlarının değişimi ile manyetik akı miktarının dolayısıyla endüktansın da değiştiği göz önüne alınarak Eş.6.10'da görüldüğü gibi tanımlanır[10].

$$[M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos p\theta & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{m}) & .... & \cos(p\theta + \frac{2\pi(m-1)}{m}) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}) & .... & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi(m-1)}{m}) \\ \cos(p\theta + \frac{2\pi}{m}) & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}) & .... & \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi(m-1)}{m}) \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Rotordan bakıldığında ortak endüktans Eş.6.11'de görüldüğü gibi olur;

$$[M_{rs}(\theta)] = [M_{sr}(\theta)]^T \quad (6.11)$$

Tüm endüktansların bir arada toplam endüktans şeklinde gösterilmesi Eş.6.12'te görüldüğü gibidir.

$$L_{SR}(\theta) = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Akı, akım ve gerilimler aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ I_{rm} \end{bmatrix}, [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix}, [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \psi_{r2} \\ \vdots \\ \psi_{rm} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Manyetik akılar endüktanslar cinsinden Eş.6.14'de görüldüğü gibidir;

$$\begin{aligned} [\psi_s] &= [L_s][I_s] + [M_{sr}(\theta)][I_r] \\ [\psi_r] &= [L_r][I_r] + [M_{rs}(\theta)][I_s] \end{aligned} \quad (6.14)$$

Stator ve rotor için gerilim ifadeleri aşağıdaki gibidir;

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s]$$

(6.15)

$$[O] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Psi_r] \quad (6.16)$$

Makinede değişken akı ve akımlardan dolayı stator ve rotorda ortak endüktanslar oluşmaktadır. Stator ve rotordaki manyetik akılar endüktanslar ve akımlar türünden yazılarak gerilim ifadeleri tekrar düzenlendiğinde Eş.6.17 ve Eş.6.18’de görülen formu alır[15].

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_s][I_s] + [M_{sr}(\theta)][I_r]) \quad (6.17)$$

$$[O] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_r][I_r] + [M_{rs}(\theta)][I_s]) \quad (6.18)$$

Makinede elektromekanik hareket denklemi de aşağıdaki gibidir[10].

$$M = \frac{1}{2} [[I_s]^T \cdot [I_r]^T] \frac{d}{d\theta} [L_{sr}(\theta)] \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (6.19)$$

Denklem takımları incelendiğinde sincap kafesli asenkron makinenin toplu parametrelili modeli 3 adet statoru, m adet rotoru ve 1 adet mekanik kısmı olan diferansiyel denklemden oluşmuştur. Bu yapıdaki modelin lineer olmaması ve karşıt endüklem katsayısının  $\theta$ ’ya bağlı olması, Modelin doğrusal olmayan pek çok diferansiyel denklemden oluşması matematiksel analiz ve bilgisayar simülasyonları için kullanılmasını güçleştirir[15]. Modelin uygun dönüşümler kullanılarak sadeleştirilmesi gerekir[10].

Vektör kontrolü, aynı zamanda “alan yönlendirmeli kontrol”, “akı yönlendirmeli kontrol” ya da “dolaylı moment kontrolü” olarak da bilinir. Alan yönlendirmeyi kullanırken, 3 fazlı akım vektörleri, 3 boyutlu sabit referans eksen ekseninden 2 boyutlu dönel referans eksenine (d-q) çevrilir (Clarke-Park dönüşümü). “d”, stator akımının akı üreten kısmını, “q” ise moment üreten kısmı tanımlar. Bu birbirinden ayrılmış iki bileşen, ayrı PI kontrolörler ile birbirlerinden bağımsız kontrol edilebilirler. Uygun anahtarlama tablosu,

SVMPWM modülasyon tekniği ile sağlanır. Bu yöntem, DC Makine makinede olduğu gibi mükemmel bir moment-hız cevabı sağlar[11].

### 6.2.2. Alfa ve beta dönüşümleri

Makinenin dinamik modelinden  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımındaki modeline geçiş yapmak için öncelikle rotor sargılarının rotorda sabit kısımda stator sargılarının sabit kısımda olduğu halin denklemleri Eş.6.20'de olduğu gibi elde edilir. Bu denklemlerin elde edilmesinde simetrik bileşenlerin  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımından simetrik bileşenlere dönüşüm matrisi kullanılır.

$$M_e = \frac{1}{2} p h M_{sr} \left[ (I_{r\alpha}^r I_{S\beta}^s - I_{r\beta}^r I_{S\alpha}^s) \cos p\theta - (I_{r\alpha}^r I_{S\beta}^s + I_{r\beta}^r I_{S\alpha}^s) \sin p\theta \right] \quad (6.20)$$

$$h = \frac{\sqrt{3m}}{2} \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{s\alpha}^s \\ V_{s\beta}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha}^s \\ I_{s\beta}^s \\ I_{r\alpha}^r \\ I_{r\beta}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{s\alpha} & 0 & hM_{sr} \cos p\theta & -hM_{sr} \sin p\theta \\ 0 & L_{s\beta} & hM_{sr} \sin p\theta & hM_{sr} \cos p\theta \\ hM_{sr} \cos p\theta & hM_{sr} \sin p\theta & L_{r\alpha} & 0 \\ hM_{sr} \sin p\theta & hM_{sr} \cos p\theta & 0 & L_{r\beta} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s\alpha}^s \\ I_{s\beta}^s \\ I_{r\alpha}^r \\ I_{r\beta}^r \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d\theta}{dt} p h M_{sr} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin p\theta & -\cos p\theta \\ 0 & 0 & \cos p\theta & -\sin p\theta \\ -\sin p\theta & \cos p\theta & 0 & 0 \\ -\cos p\theta & -\sin p\theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha}^s \\ I_{s\beta}^s \\ I_{r\alpha}^r \\ I_{r\beta}^r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Bu denklemlerin elde edilmesinde Bu modelde yer alan ortak endüktanslar  $\theta$ 'ya bağlı olarak sinüzoidal değişmektedir.  $\theta$ 'lı terimler, stator sargılarının duran kısımda ve rotor sargılarının hareketli kısımda olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu model yerine daha kullanışlı olan hem rotor hem de statorun statorda sabit duran  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımına indirgenmiş modeli elde edilir[15].

Rotor eksen takımındaki akımlar aşağıdaki şekilde stator eksen takımına indirgenir;

$$\begin{bmatrix} I_{r\alpha}^s \\ I_{r\beta}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos p\theta & -\sin p\theta \\ \sin p\theta & \cos p\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r\alpha}^r \\ I_{r\beta}^r \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Tüm büyüklüklerin sabit duran stator eksen takımında tanımlanması ile oluşan sistemin statora indirgenmiş  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımındaki modeli Eş.6.25'te görüldüğü gibi olur[10].

Moment ifadesi için Eş.6.24 kullanılabilir;

$$M_e = L_m (I_{r\alpha} I_{s\beta} - I_{r\beta} I_{s\alpha}) \quad (6.24)$$

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R'_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L'_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L'_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_s & L_m & 0 \\ L_s & 0 & 0 & L_m \\ L_m & 0 & 0 & -L'_r \\ 0 & L_m & L'_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \end{bmatrix} \cdot p\omega \quad (6.25)$$

Rotorda sabit duran eksen takımında tanımlı rotor değişkenleri statorda sabit eksen takımına indirgendikten sonra transformatörde yapıldığı gibi stator ile rotor arasındaki indirgenme oranı göz önüne alınarak, rotordaki büyüklüklerin statora indirgenme işlemi yapılabilir.

Bu ifadelerde rotora ait büyüklükler statora Eş.6.26 ile Eş.6.29 arasında görülen  $a = \frac{K_s \cdot N_s}{K_r \cdot N_r}$

katsayısı ile indirgenebilir.

$$I_{r\alpha} = \frac{I_{r\alpha}^r}{a}, I_{r\beta} = \frac{I_{r\beta}^r}{a} \quad (6.26)$$

$$\mathbf{R}_r = a^2 \mathbf{R}_{rr} \quad (6.27)$$

$$\mathbf{L}_r = a^2 \mathbf{L}_{rr} \quad (6.28)$$

$$\mathbf{L}_m = a^2 h \mathbf{M}_{sr} \quad (6.29)$$

Asenkron makinenin  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımındaki durum uzay modeli belirlenen durum değişkenleri için diferansiyel denklemler düzenlendiğinde aşağıdaki şekli alır[15];

$$\frac{d\mathbf{I}_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \mathbf{L}_s} \left\{ \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \left( \frac{\mathbf{R}_r'}{\mathbf{L}_r} \Psi_{r\alpha} + p \mathbf{w} \Psi_{r\beta} \right) - \mathbf{R}_E \mathbf{I}_{s\alpha} + \mathbf{V}_{s\alpha} \right\} \quad (6.30)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \mathbf{L}_s} \left\{ \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \left( \frac{\mathbf{R}_r'}{\mathbf{L}_r} \Psi_{r\beta} + p \mathbf{w} \Psi_{r\alpha} \right) - \mathbf{R}_E \mathbf{I}_{s\beta} + \mathbf{V}_{s\beta} \right\} \quad (6.31)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{\mathbf{R}_r'}{\mathbf{L}_r} \Psi_{r\alpha} - p \mathbf{w} \Psi_{r\beta} + \frac{\mathbf{R}_r' \mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \mathbf{I}_{s\alpha} \quad (6.32)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{\mathbf{R}_r'}{\mathbf{L}_r} \Psi_{r\beta} - p \mathbf{w} \Psi_{r\alpha} + \frac{\mathbf{R}_r' \mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} \mathbf{I}_{s\beta} \quad (6.33)$$

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt} = \frac{p}{j} \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} (\Psi_{r\alpha} \mathbf{I}_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \mathbf{I}_{s\alpha}) - \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{J}} \mathbf{w} + \frac{1}{\mathbf{J}} \mathbf{T}_L \quad (6.34)$$

Bu eşitlikte  $\mathbf{R}_E = \mathbf{R}_s + \frac{\mathbf{R}_r' \mathbf{L}_m^2}{\mathbf{L}_r^2}$  ve  $\sigma = 1 - \frac{\mathbf{L}_m^2}{\mathbf{L}_s \mathbf{L}_r}$  dir. Moment durum değişkenleri

kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\mathbf{M}_e = p \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_r} (\mathbf{I}_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \mathbf{I}_{s\alpha} \Psi_{r\beta}) \quad (6.35)$$

Elde edilen modelde rotora ait tüm büyüklükler statora indirgenmiştir. Ayrıca modelin son hali  $\theta$ 'dan bağımsızdır[10].

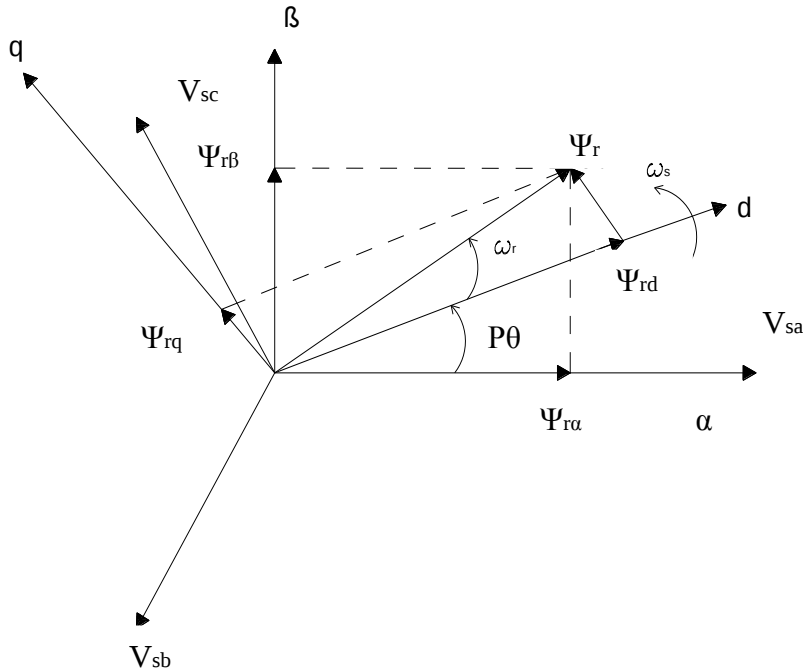
Makinenin giriş büyüklükleri stator faz gerilimleri statorda birbirinden  $120^\circ$  faz farklı A-B-C eksen takımında tanımlıdır. Bu eksen takımı ile  $\alpha$ - $\beta$  eksen takımı arasında aşağıdaki şekilde dönüşüm yapılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

### 6.2.3. d ve q Dönüşümleri

Elde edilen denklemlerde makinenin üç fazlı modelinden iki fazlı modeline geçiş yapılmış ve bu model üzerinde yapılan dönüşüm ile tüm rotor büyüklükleri statora indirgenmiştir. Ancak bu model dahi stator frekansının etkisi altındadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için asenkron makine duran  $\alpha, \beta$  eksen takımından senkron hızla dönen d ve q eksen takımına dönüştürülür.

d ve q eksen modeli statora göre senkron hızla dönen bir eksen takımında elde edildiği için, akım, gerilim ve akı gibi değişkenler doğru akım büyüklükleri şeklinde olur. Bu modelin bir avantajı asenkron motorun bir serbest uyarımlı doğru akım makinesi gibi modellenmesine imkan sağlamasıdır[15].



Şekil 6.7. Asenkron motor bağıntılarının d ve q eksenlerine indirgenmesi fazör Diyagramı

Daha önce  $\alpha$  ve  $\beta$  eksen takımında elde edilen model d-q eksen takımına aşağıdaki matris kullanılarak indirgenir. Akım büyüklüklerinin d-q eksen takımına dönüştürülebilmesi için de aynı matris kullanılır.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s \\ \sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

Yukarıdaki dönüşüm matrisi  $\alpha - \beta$  eksen takımında elde edilen modele uygulanarak d-q eksen takımındaki modeli Eş.6.38’de görüldüğü gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R'_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L'_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L'_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -w_s L_s & w_s L_m & 0 \\ w_s L_s & 0 & 0 & w_s L_m \\ w_r L_m & 0 & 0 & -w_r L_r \\ 0 & w_r L_m & w_r L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

Bu durumda motorun moment ifadesi Eş.6.39’da görüldüğü şekilde oluşur;

$$M = pL_m(I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq}) = j \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (6.39)$$

Burada;

$$w_s = w_r + p\omega \quad (6.40)$$

$$w_s = \frac{d\theta}{dt} = 2\pi \frac{n_s}{60} \quad (6.41)$$

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (6.42)$$

Akım ve akı bağıntıları  $\alpha$  -  $\beta$  eksen takımındaki şekline benzer aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\Psi_{sd} = L_s \vec{I}_{sd} + L_m \vec{I}_{rd} \quad (6.43)$$

$$\Psi_{sq} = L_s \vec{I}_{sq} + L_m \vec{I}_{rq} \quad (6.44)$$

$$\Psi_{rd} = L'_r \vec{I}_{rd} + L_m \vec{I}_{sd} \quad (6.45)$$

$$\Psi_{rq} = L_r \vec{I}_{rq} + L_m \vec{I}_{sq} \quad (6.46)$$

Aynı zamanda a-b-c eksen takımından d-q eksen takımına dönüşüm yapılabilir. Bu dönüşüm için Eş.6.47 ve Eş.6.48'de görülen matris kullanılır.

$$\begin{bmatrix} V_{s0} \\ V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta_s & -\sin\theta_s \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (6.48)$$

Makinenin bu şekilde ifade edilen rotor akımları yerine kontrol algoritmalarında çoğunlukla rotor akıları kullanılır[15]. Daha önce elde edilen akı ifadelerinde rotor akımları yerine rotor akıları yazılarak aşağıdaki Eşitliklerde görülen akı bağıntıları elde edilir.

$$\Psi_{sd} = L_s \vec{I}_{sd} + L_m \vec{I}_{rd} = (L_s - \frac{L_m^2}{L'_r}) I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \quad (6.49)$$

$$\Psi_{sq} = L_s \vec{I}_{sq} + L_m \vec{I}_{rq} = (L_s - \frac{L_m^2}{L'_r}) I_{sq} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} \quad (6.50)$$

$$\Psi_{rd} = L'_r \vec{I}_{rd} + L_m \vec{I}_{sd} \Rightarrow I_{rd} = \frac{1}{L'_r} \Psi_{rd} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sd} \quad (6.51)$$

$$\Psi_{rq} = L'_r \vec{I}_{rq} + L_m \vec{I}_{sq} \Rightarrow I'_{rq} = \frac{1}{L'_r} \Psi'_{rq} - \frac{M_m}{L'_r} I_{sq} \quad (6.52)$$

Makinenin matris formunda elde edilen modeli stator akımları ve rotor akılarına göre düzenlenirse aşağıdaki Eşitliklerde görüldüğü gibi olur[15].

$$V_{sd} = R_s I_{sd} - \omega_s \left[ \sigma L_s I_{sq} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] \quad (6.53)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma L_s I_{sq} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} \right] \quad (6.54)$$

$$0 = R'_r \left[ \frac{1}{L'_r} \Psi_{rd} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sd} \right] - \omega_r \Psi_{rq} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \quad (6.55)$$

$$0 = R'_r \left[ \frac{1}{L'_r} \Psi_{rq} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sq} \right] + \omega_r \Psi_{rd} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \quad (6.56)$$

$$M_e = p \frac{L_m}{L'_r} (I_{sq} \Psi_{rd} - I_{sd} \Psi_{rq}) = j \frac{dw}{dt} + Bw \quad (6.57)$$

Buna göre sistemin stator ve rotor eksen takımlarına göre durum uzay modeli aşağıdaki Eşitliklerde görüldüğü şekilde verilebilir.

$$\frac{d\vec{I}_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_E I_{sd} + \sigma L_s \omega_s I_{sq} + \frac{L_m R'_r}{L'^2_r} \Psi_{rd} + p \omega \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} + V_{sd} \right] \quad (6.58)$$

$$\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_E I_{sq} + \sigma L_s \omega_s I_{sd} + p\omega \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} + \frac{L_m R'_r}{L'^2_r} \Psi_{rq} + V_{sq} \right] \quad (6.59)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m R'_r}{L'_r} I_{sd} - \frac{R'_r}{L'_r} \Psi_{rd} + \omega_r \Psi_{rq} \quad (6.60)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m R'_r}{L'_r} I_{sq} - \omega_r \Psi_{rd} + \frac{R'_r}{L'_r} \Psi_{rq} \quad (6.61)$$

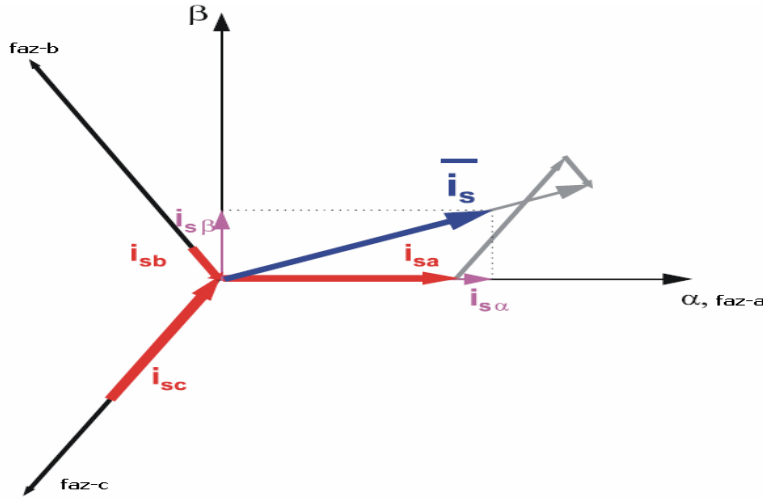
$$M_e = p \frac{L_m}{L'_r} (I_{sq} \Psi_{rd} - I_{sd} \Psi_{rq}) = j \frac{dw}{dt} + Bw \quad (6.62)$$

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L'_r}$  kaçak faktörü olarak tanımlanır.  $R_E = R_s + \frac{R'_r L_m^2}{L'^2_r}$  eşdeğer direnç olarak tanımlanır.

Son olarak elde edilen model 5 adet durum denkleminde oluşmaktadır. Sistem denklemlerine dikkat edilecek olursa, durum değişkeni olan makinenin açısal hızı ile diğer durum değişkenlerinin çarpımını içerdiği anlaşılır. Bu durumda model lineer olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Buradan asenkron makinenin durum modelinin durum değişkenlerinin çarpımlarını içeren lineer olmayan 5 adet denklemden oluştuğu ortaya çıkar[15].

#### 6.2.4. İleri geri Clarke dönüşümleri

Motorun stator akımları 3 eksenli olarak ifade edildiği gibi gerekli dönüşümler yapılarak iki eksenli başka bir zamanla değişen koordinat sisteminde uzay vektörleri ile ifade edilebilir[10]. İleri Clarke dönüşümü 3 fazlı a,b,c sistemini 2 fazlı  $\alpha - \beta$  eksen takımına dönüştürür. Aşağıdaki şekilde vektörün grafiksel yapısı görülmektedir[7].



Şekil 6.8. İleri ve geri Clarke dönüşümleri vektör diyagramı

a ve  $\alpha$  eksenlerinin aynı yönde olduğunu farz edelim. Stator faz akımı  $I_{s\alpha}$  ve  $I_{s\beta}$  ile 3 fazlı stator akımları arasındaki bağıntı Eş.6.63'te görüldüğü gibidir.

$$I_{s\alpha} = k \left[ I_{sa} - \frac{1}{2} I_{sb} - \frac{1}{2} I_{sc} \right], \quad I_{s\beta} = k \frac{\sqrt{3}}{2} [I_{sb} - I_{sc}], \quad k = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (6.63)$$

Ters Clarke dönüşümü  $\alpha - \beta$  eksen takımından 3 fazlı sisteme dönüşümde kullanılır ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$I_{sa} = I_{s\alpha}, \quad I_{sb} = \frac{1}{2} I_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{s\beta}, \quad I_{sc} = \frac{1}{2} I_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{s\beta} \quad (6.64)$$

### 6.2.5. İleri geri Park dönüşümleri

Vektör kontrolü için kullanılacak bir diğer dönüşüm Park dönüşümüdür. Park dönüşümü ile motorun statoruna uygulanacak 3 fazlı stator geriliminin  $\alpha - \beta$  iki eksenli koordinat sistemindeki izdüşümü elde edilir. Bu izdüşümü vektörleri de stator faz akımının açısal frekansında dönen vektörlere dönüştürülür.

Bu şekilde d ve q ekseni oluşturulur. Böylece d ve q bileşenleri zamandan ve hızdan bağımsız olur.

d-q eksenini referans alınarak  $I_{sd}$  ve  $I_{sq}$  akımları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$I_{sd} = I_{s\alpha} \cos\theta_s + I_{s\beta} \sin\theta_s \quad (6.65)$$

$$I_{sq} = I_{s\alpha} \sin\theta_s + I_{s\beta} \cos\theta_s \quad (6.66)$$

$I_{sd}$  Bileşeni akı üreten bileşen olarak ve  $I_{sq}$  bileşeni moment üreten bileşen olarak adlandırılır. Aynı zamanda  $\sin\theta$  ve  $\cos\theta$  değerleri akılar cinsinden aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$\Psi_{rd} = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} \quad (6.67)$$

$$\sin\theta = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rd}} \quad (6.68)$$

$$\cos\theta = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{rd}} \quad (6.69)$$

d-q ekseninden  $\alpha - \beta$  eksenine dönüşüm ters Park dönüşümü formülleri ile aşağıdaki şekilde yapılır[7].

$$I_{s\alpha} = I_{sd} \cos\theta + I_{sq} \sin\theta \quad (6.70)$$

$$I_{s\beta} = I_{sd} \sin\theta + I_{sq} \cos\theta \quad (6.71)$$

#### 6.2.6. Vektör kontrolünün gerçekleştirilmesi

Asenkron makinenin karmaşık kontrol ve dönüşüm algoritmaları gerektirmesinin nedeni makinenin doğrusal olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Oysa serbest uyarımlı doğru akım makinesi doğrusal bir kontrol yapısına sahiptir. Bunun nedeni akıyı ve momenti oluşturan akım bileşenlerinin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir. Bu sayede akı sabit tutulduğunda, moment kendisini oluşturan akım ile doğrusal olarak kontrol edilmektedir. Momentin akım ile kontrolü moment değişimlerine hızlı cevap sağlar. Serbest uyarımlı doğru akım makinesinin endüvi reaksiyonu doyma ve histerezis akımları

ihmal edildiğinde uyarma devresi, endüvi devresi, uyarma akısı, elektromotor kuvveti ve moment ifadesi aşağıdaki Eşitliklerde görüldüğü gibidir[15];

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{d}{dt} I_f \quad (6.72)$$

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{d}{dt} I_a + e_b \quad (6.73)$$

$$\psi = L_f I_f \quad (6.74)$$

$$e_b = k'_b \psi \omega \quad (6.75)$$

$$M_e = k'_m \psi I_a = k'_m L_f I_f I_a = k_m I_f I_a \quad (6.76)$$

Bu denklemler incelendiğinde endüvi ve uyarma akımları uyarma akısı sabit tutularak birbirinden bağımsız hale getirilebilir. Uyarma ve endüvi eksenleri birbirine dik eksenlerdir ve asenkron makinede d ve q eksenlerine denk gelir. Burada  $I_f$  akıyı oluşturan akım olduğundan bu akımı sabit tutarak  $I_a$  akımının değiştirilmesi ile moment doğrusal olarak değiştirilebilir.

Asenkron makinede ise akıyı ve momenti ayrı ayrı kontrol edilebilecek iki akım bileşeni mevcut değildir. Sadece stator akımı vardır. Stator akımı sinüzoidal olması sebebiyle genlik, frekans ve faz bilgileri içerir. Asenkron makine söz konusu olduğunda kontrol edilmesi gereken büyüklük genliği, fazı ve frekansı tanımlanan akım vektörüdür. Bu kontrol işlemi literatürde vektör kontrolü olarak tanımlanmaktadır[15].

Bu yöntemde makinenin stator akım vektörü biri akıyı diğeri ise momenti kontrol eden iki akım vektörüne ayrılır. Baz alınacak akıya göre farklı akı oryantasyon yöntemleri mevcuttur. Akı, akıyı kontrol eden akım bileşeni ile sabit tutulup diğer bileşen ile moment kolayca kontrol edilebilir. Bu işlemin gerçekleşmesi için makinenin d-q eksen takımındaki modeli kullanılır. d-q eksen takımındaki model aşağıdaki Eşitliklerde olduğu gibi elde edilmiştir;

$$V_{sd} = R_s I_{sd} - \omega_s \left[ \sigma L_s I_{sq} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] \quad (6.77)$$

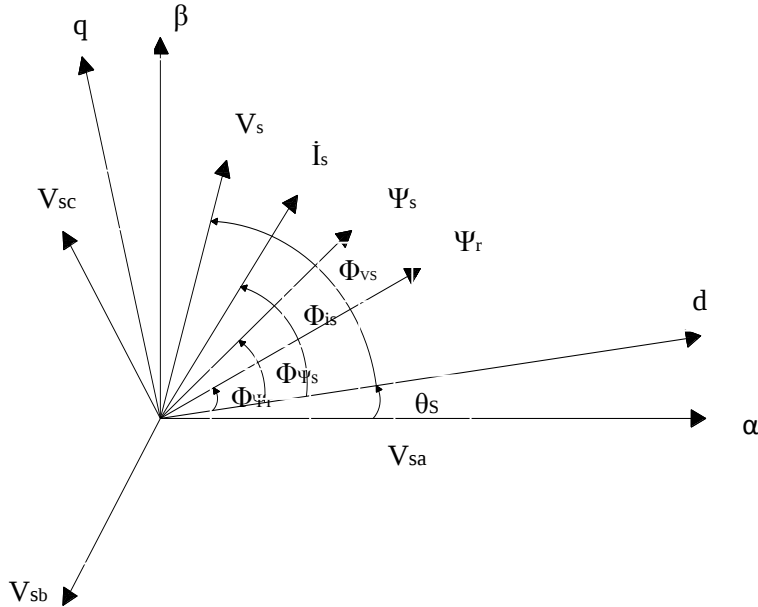
$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma L_s I_{sq} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rq} \right] \quad (6.78)$$

$$0 = R'_r \left[ \frac{1}{L'_r} \Psi_{rd} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sd} \right] - \omega_r \Psi_{rq} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \quad (6.79)$$

$$0 = R'_r \left[ \frac{1}{L'_r} \Psi_{rq} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sq} \right] + \omega_r \Psi_{rd} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \quad (6.80)$$

$$M_e = p \frac{L_m}{L'_r} (I_{sq} \Psi_{rd} - I_{sd} \Psi_{rq}) = j \frac{dw}{dt} + Bw \quad (6.81)$$

Bu modelde makine 5 adet doğrusal olmayan denklemden oluşmaktadır. Bu denklemlerin çözülmesi için oldukça ileri düzeyde DSP'ye gerek vardır. Bu değişkenlerin fazör diyagram üzerinde  $\alpha - \beta$  eksen takımına göre gösterilişi aşağıdaki şekildedir.



Şekil 6.9. Makinenin d-q eksen takımındaki giriş ve durum değişkenleri ile d-q eksen takımının  $\alpha - \beta$  ve A-B-C eksen takımına göre konumları

Bu tanımlamalarda sistemin yapısını daha basite indirgeme ve kontrol işlemini kolaylaştırma amacı bulunmaktadır. Şekil 6.9'da tüm büyüklükler bir baz eksen olan d-q eksenine göre tanımlanmıştır. Bu durumun daha da basitleştirilmesi için tüm büyüklüklerin keyfi eksen yerine baz olarak kabul edilen bir büyüklüğün bulunduğu eksene indirgenmesi durumunda daha da basit denklemler elde edilir. Denklemlere bakıldığında baz olarak

seçilecek en uygun değişkenin rotor akısı olduğu görülür. Bu duruma rotor akısından oryantasyonlu vektör kontrol sistemi denilir. Rotor akısı d ekseninde tanımlandığında, stator akım vektörü hem d, hem de q ekseninde tanımlanır. Bu durumda stator akım vektörünün d ekseninde yer alan bileşeni akıyı, q ekseninde yer alan bileşeni ise momenti kontrol eden bileşen olur.

Eğer rotor akısı d ekseninde kabul edilirse ve q ekseninde yer alan bileşeni sıfır olursa d ve q eksenine ait eşitlikler aşağıdaki şekle dönüşür[15].

$$V_{sd} = R_s I_{sd} - \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] \quad (6.82)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \left[ \sigma L_s I_{sd} + \frac{L_m}{L'_r} \Psi_{rd} \right] + \sigma L_s \frac{d}{dt} I_{sq} \quad (6.83)$$

$$0 = R'_r \left[ \frac{1}{L'_r} \Psi_{rd} - \frac{L_m}{L'_r} I_{sd} \right] + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \quad (6.84)$$

$$0 = R'_r \frac{L_m}{L'_r} I_{sq} + \omega_r \Psi_{rd} \quad (6.85)$$

$$M_e = p \frac{L_m}{L'_r} I_{sq} \Psi_{rd} = j \frac{dw}{dt} + Bw \quad (6.86)$$

Eş.6.84 incelendiğinde d ekseninde rotor akısının d ekseninde stator akımı ile kontrol edildiği görülür. Yukarıdaki Eş.6.82 ve Eş.6.86'den akının d ekseninde akımına, momentin ise q ekseninde yer alan bileşenine bağlı olduğu görülür[15]

Eş.6.87'den akının sürekli rejimdeki değerinin;

$$\Psi_{rd} = L_m I_{sd} \quad (6.87)$$

Olduğu görülür. Bu durumda akının  $\dot{I}_{sd}$  ile sabit tutulurken momentin  $\dot{I}_{sq}$  ile doğrusal olarak değiştirildiği sonucuna varılır. Rotor akısı baz alınarak oluşturulan bu yöntemde akının d ekseninde sabit tutulması için stator gerilimi genliği ve frekansının da hesaplanarak uygulanması gereklidir.

Rotor akısı baz alınarak oluşturulan kontrol yöntemleri bulunduğu gibi, stator akısı ve hava aralığı akısını da baz alarak oluşturulan kontrol yöntemleri bulunabilmektedir.

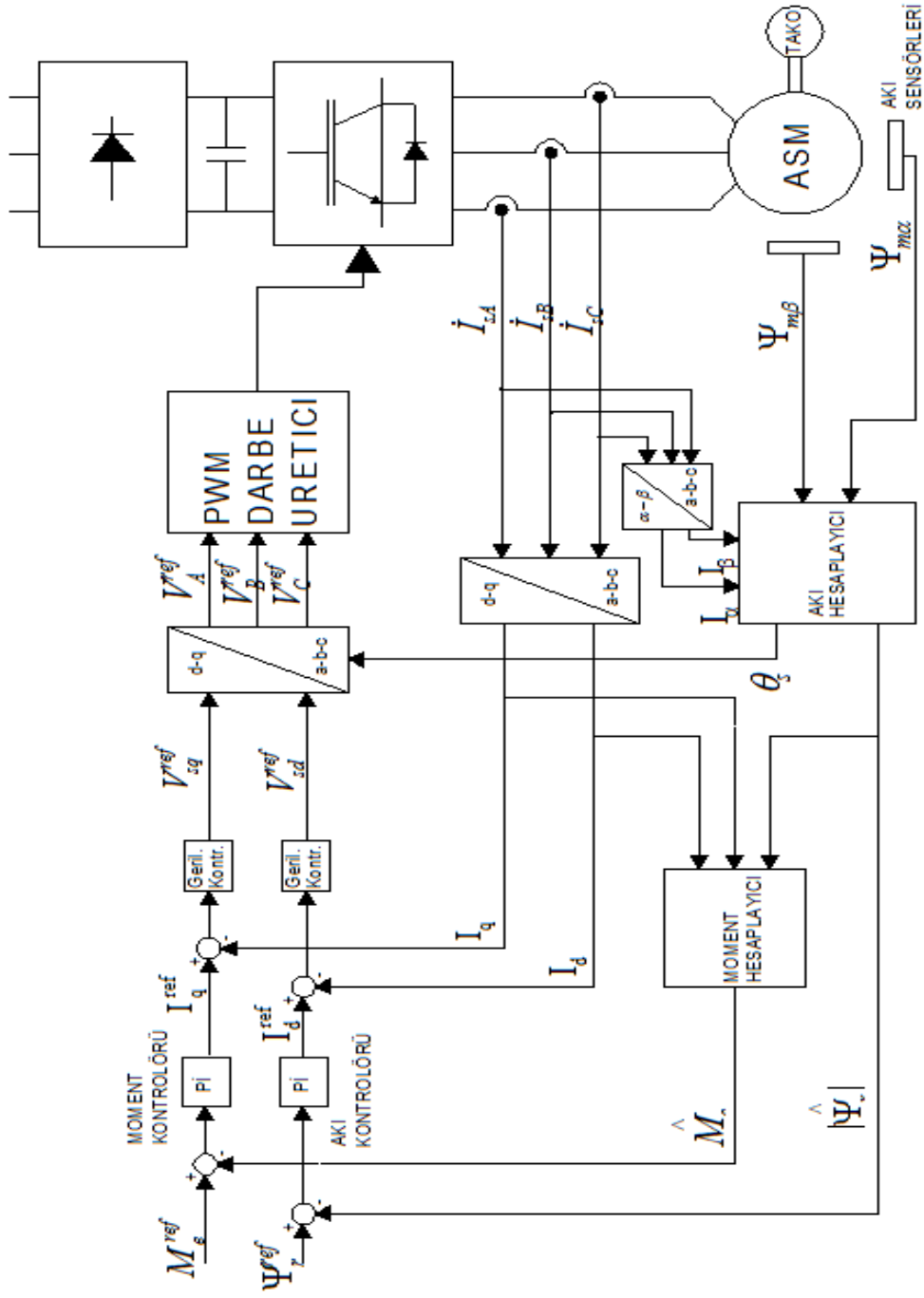
Vektör kontrol yöntemi dolaylı ve doğrudan vektör kontrol yöntemi olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Bu yöntemlerin dışında doğrudan moment ve akı kontrol yöntemi de kullanılmaktadır[15].

#### 6.2.7. Doğrudan vektör kontrolü

Doğrudan vektör kontrol yöntemi rotor akısı ve hava aralığı akısının sensörler yardımıyla ölçülmesi ile elde edilmektedir. Hava aralığı akı bileşenleri makinenin içerisine özel bir düzenek ile yerleştirilmiş birbirine dik ( $\alpha-\beta$ ) akı sensörleri ile ölçülmektedir. Ölçülen bu büyüklük yanında stator akımı ölçülerek a-b-c ekseninden  $\alpha-\beta$  eksenine ve  $\alpha-\beta$  ekseninden a-b-c eksenine dönüştürülmektedir[15].

Şekil 6.10'da akı sensörleri kullanılarak yapılan doğrudan vektör kontrolü görülmektedir. Şekilde hesaplanan rotor akı genliği ve moment, referans moment ve akı değerleri ile karşılaştırılmış ve oluşan akı ve moment hataları PI tipindeki akı ve moment kontrolörüne uygulanmıştır. Kontrolörün ürettiği kontrol işaretleri makinenin d-q akım bileşenlerinin referans büyüklükleri olarak kullanılmaktadır. Akı hesaplayıcısının ürettiği diğer bir büyüklükte dönüşüm açısıdır. Bu dönüşüm açısı kullanılarak makinenin d-q bileşen akımları referans akımlar ile karşılaştırılmak üzere makinenin stator faz akımlarından üretilir. Böylece referans ve gerçek d-q akım bileşenlerinin karşılaştırmaları sonucunda oluşan akım hataları akım kontrolörüne uygulanmakta ve d-q eksen takımındaki referans stator gerilim bileşenleri üretilmektedir. Bu gerilim bileşenleri de dönüşüm açısı kullanılarak PWM üreticisi için gerekli olan a-b-c eksen takımındaki referans gerilim büyüklüklerine dönüştürülmektedir[15].

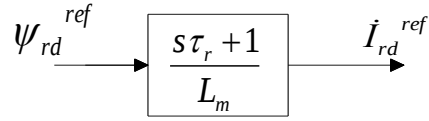
Uygulanan bu yöntemde; makinenin statoruna akı sensörleri yerleştirilmesi için özel düzenekler gerekmektedir. Dolayısıyla yalnızca özel olarak imal edilen makinelerde kullanılmaktadır. Bu durumu sebebiyle çok yaygın bir yöntem değildir[15].



Şekil 6.10. Statora yerleştirilmiş Hall Sondaları kullanarak  $\Psi_{m\alpha}$  ve  $\Psi_{m\beta}$  yardımıyla doğrudan vektör kontrolü[15].

### 6.2.8. Dolaylı vektör kontrolü

Bu kontrol yönteminin en yaygın olarak kullanılanı rotor akısından yararlanılarak geliştirilen yöntemdir. Bu yöntemde verilen bir  $\Psi_{rd}^{ref}$ , akı referans değerine karşılık  $\dot{I}_{sd}^{ref}$ , d eksenli referans akım değeri elde edilir. Söz konusu akı ve akım arasındaki ilişki Şekil 6.14'te görüldüğü gibidir[15].



Şekil 6.11. d eksenli rotor akı referansı ile d eksenli stator akım referansı ilişkisi.

Makinenin moment referans değeri ve rotor akımlarının açısal hızı arasındaki ilişki ise Eş.6.88'de görüldüğü gibidir.

$$M_e = p \frac{\Psi_{rd}^2}{R'_r} w_r \quad (6.88)$$

Makinenin rotor akısının referans değeri verildiğine göre moment ifadesinde rotor akısı yerine  $\Psi_{rd} = \Psi_{rd}^{ref}$  ifadesi ile referans değeri alınır. Ve  $w_r = w_s - pw$  tanımı kullanıldığında moment ifadesi ile makinenin hızı arasında aşağıdaki ifade yazılabilir[15].

$$M_e = p \frac{(\Psi_{rd}^{ref})^2}{R'_r} (w_s - pw) = K(w_s - pw) \quad (6.89)$$

Bu ifade de  $K = p \frac{(\Psi_{rd}^{ref})^2}{R'_r}$  dir. Yukarıdaki eşitlik kullanılarak momentin referans değeri

hız hatasından bulunabilir. Hız hatasının sadece bir kazanç ile çarpılması momentin referans değerini elde etmek için yeterli gibi görünse de makinenin yüklenmesi nedeniyle oluşabilecek hız hatasını kompanze edebilmek amacıyla kazanç terimine ilave olarak hız hatasının integralinin alındığı bir terim daha gerekli olur. Oran integral özelliğine sahip olan bir PI kontrolörün kullanılması ve bu kontrolöre hız hatasının uygulanması sonucunda

kontrolörün çıkışı vektör kontrolünü oluşturmak için gerekli olan moment referans değerini üretir[15].

$$M_e^{\text{ref}} = K_p(w_{\text{ref}} - w) + K_i \int (w_{\text{ref}} - w) dt \quad (6.90)$$

Bu elde edilen moment referans değerinden hareketle de  $i_{\text{sq}}^{\text{ref}}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$i_{\text{sq}}^{\text{ref}} = \frac{L_r'}{pL_m} \frac{1}{\psi_{\text{rd}}^{\text{ref}}} M_e^{\text{ref}} \quad (6.91)$$

Diğer kontrol girişi olan ve dönüşüm için kullanılan  $\theta_s$  açısı, rotor akımlarının açısal hızı  $w_r$  ve makinenin açısal hızı  $w$  yardımıyla elde edilebilir. Bunun için öncelikle rotor akımlarının açısal hızı elde edilir[15].

$$w_r = \frac{L_m}{\tau_r} \frac{i_{\text{sq}}^{\text{ref}}}{\psi_{\text{rd}}^{\text{ref}}} \quad (6.92)$$

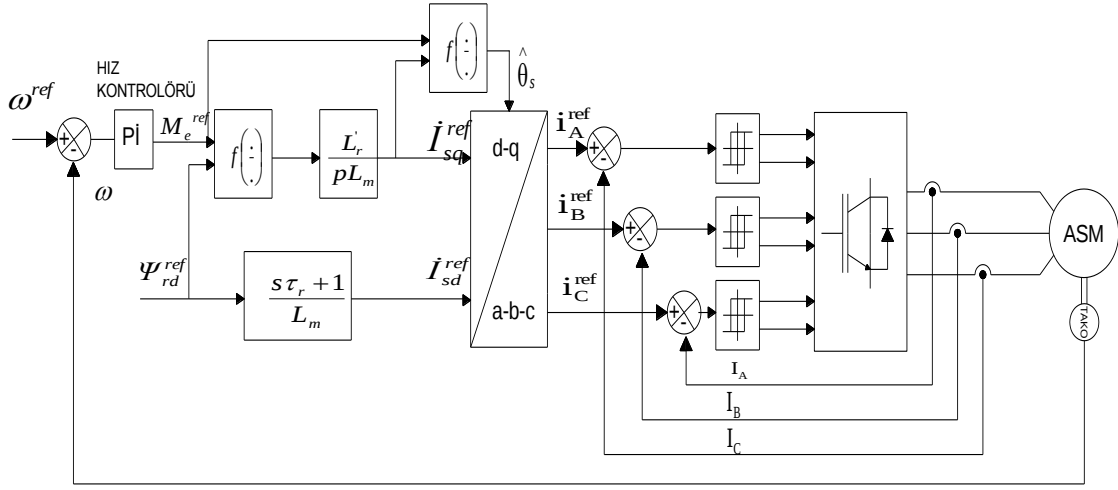
Motor milinin açısal hızı ise mile bağlı tako generatör yardımı ile ölçülüp elektriksel büyüklüğe dönüştürülmek üzere p, kutup çifti sayısı ile çarpılarak rotor akımlarının açısal hızı toplanır.

$$w_s = w_r + pw \quad (6.93)$$

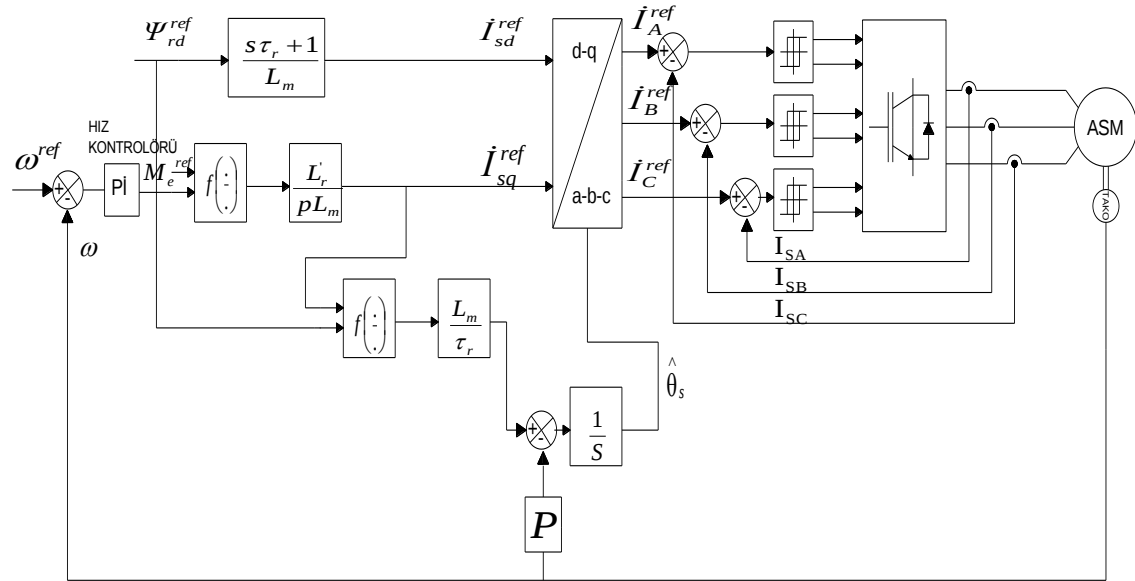
Bu şekilde elde edilen  $w_s$  senkron açısal hızdan  $\theta_s$  dönüşüm açısı elde edilir.

$$\theta_s = \int w_s dt \quad (6.94)$$

Dolaylı vektör kontrol yönteminde elde edilen d-q referans akım bileşenleri ve dönüşüm açısından hareketle, doğrudan vektör kontrol yönteminde olduğu gibi sinüs üçgen karşılaştırması ve histerezisli akım kontrol yöntemi ile PWM işaretleri üretilir. Sinüs üçgen karşılaştırması ile PWM üretilmesine dayalı vektör kontrol yöntemi Şekil 6.12'de histerezis akım kontrollü PWM üretilmesine dayalı dolaylı kontrol sistemi ise Şekil 6.13'de görülmektedir[15].



Şekil 6.12. Akım kontrollü gerilim ara devreli dolaylı vektör kontrol sistemi blok şeması.



Şekil 6.13. Sinüs üçgen karşılaştırmalı dolaylı vektör kontrol sistemi blok şeması.

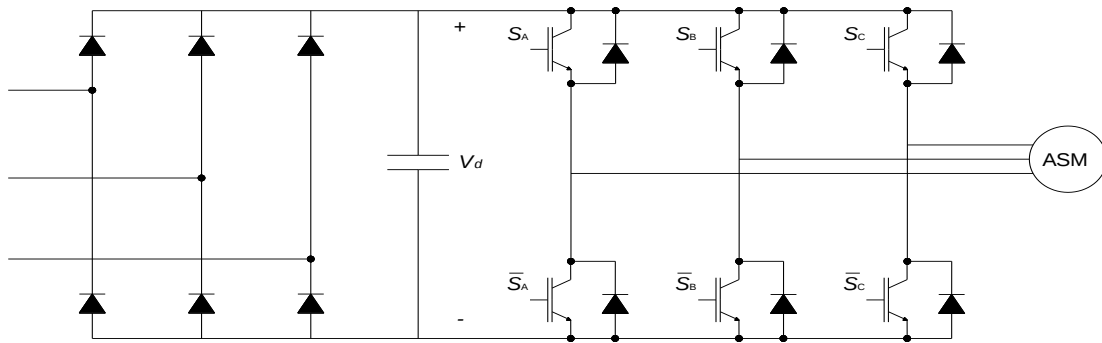
### 6.2.9. Doğrudan moment kontrolü

Doğrudan moment kontrolü (DTC) teorisinin ilk yayınlanması, 1971 yılı öncesine Alman mühendis Blaschke'e kadar uzanır. Doğrudan moment kontrollü sürücü, ABB firması tarafından geliştirilen yeni bir teknoloji olup AC, DC veya servo sürücü gibi çalışabilme yeteneğine sahip olan ilk universal sürücüdür ve 1995 yılının sonlarına doğru üretilmiştir.

DTC'li sürücüde, elde edilen gerilim ve akım cevap verme süreleri tamamen motor tarafından belirlenir ve inverter artık bir kısıtlayıcı faktör olmaktan çıkar[14].

Bu yöntem makinenin akı ve momentinin, makine parametreleri ve ölçülebilen büyüklükler yardımı ile hesaplanmasını mümkün kıldığı için aynı zamanda bir doğrudan vektör kontrol yöntemidir. Bu yöntemde akımlar için herhangi bir dönüşüm yapılmaz ve sinüs üçgen karşılaştırmasına da ihtiyaç yoktur. Bu yöntemde referans hesaplanan akı vasıtasıyla momentte oluşacak hataları doğrudan giderecek nitelikte bir anahtarlama dizisinin eviricideki güç anahtar elemanlarına uygulanmasına dayanır[15].

DTC' de, akı ve momentin her ikisi de histerezis denetleyici ile kontrol edilir ve PWM modülatörü ile ilgili gecikmeler ortadan kalkar. PWM modülatörü yerine optimum anahtarlama mantığı kullanılır. Böylece, DC sürücünün sahip olduğu moment kontrol ve doğrudan akı kontrolü ile hızlı cevap verme gibi özellikler elde edilir[11].



Şekil 6.14. Doğrudan vektör kontrolünde kullanılan güç devresi

Doğrudan moment kontrolü stator akısından oryantasyonlu kontrol yöntemidir.  $\alpha - \beta$  eksen takımındaki makine modelinden hareketle gerçekleştirilir. Makinenin ölçülebilen akım ve gerilimleri yardımı ile stator akısı hesaplanır. Bu hesaplama  $\alpha - \beta$  eksen takımı modeli kullanılarak aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir[15].

$$V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{R'_r L_m^2}{L_r'^2} I_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{dI_{s\alpha}}{dt} - \frac{L_m}{L_r'} \left[ \frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\alpha} + p \omega \Psi_{r\beta} \right] \quad (6.95)$$

$$V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{R'_r L_m^2}{L_r'^2} I_{s\beta} + \sigma L_s \frac{dI_{s\beta}}{dt} - \frac{L_m}{L_r'} \left[ \frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\beta} + p\omega \Psi_{r\alpha} \right] \quad (6.96)$$

$$\Psi_{r\alpha} = \sigma L_s I_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_r'} \Psi_{r\alpha} \quad (6.97)$$

$$\Psi_{r\beta} = \sigma L_s I_{s\beta} + \frac{L_m}{L_r'} \Psi_{r\beta} \quad (6.98)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\alpha} - p\omega \Psi_{r\beta} + \frac{R'_r L_m}{L_r'} I_{s\alpha} \quad (6.99)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\beta} - p\omega \Psi_{r\alpha} + \frac{R'_r L_m}{L_r'} I_{s\beta} \quad (6.100)$$

Eş.6.97 ve Eş.6.98'un zamana göre türevi alınıp Eş.6.99 ve Eş.6.100 kullanıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = \frac{R'_r L_m^2}{L_r'^2} I_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{dI_{s\alpha}}{dt} - \frac{L_m}{L_r'} \left[ \frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\alpha} + p\omega \Psi_{r\beta} \right] \quad (6.101)$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = \frac{R'_r L_m^2}{L_r'^2} I_{s\beta} + \sigma L_s \frac{dI_{s\beta}}{dt} - \frac{L_m}{L_r'} \left[ \frac{R'_r}{L_r'} \Psi_{r\beta} + p\omega \Psi_{r\alpha} \right] \quad (6.102)$$

Bu denklemler Eş.6.95 ve Eş.6.96'da yerine konulursa;

$$V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} \quad (6.103)$$

$$V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \quad (6.104)$$

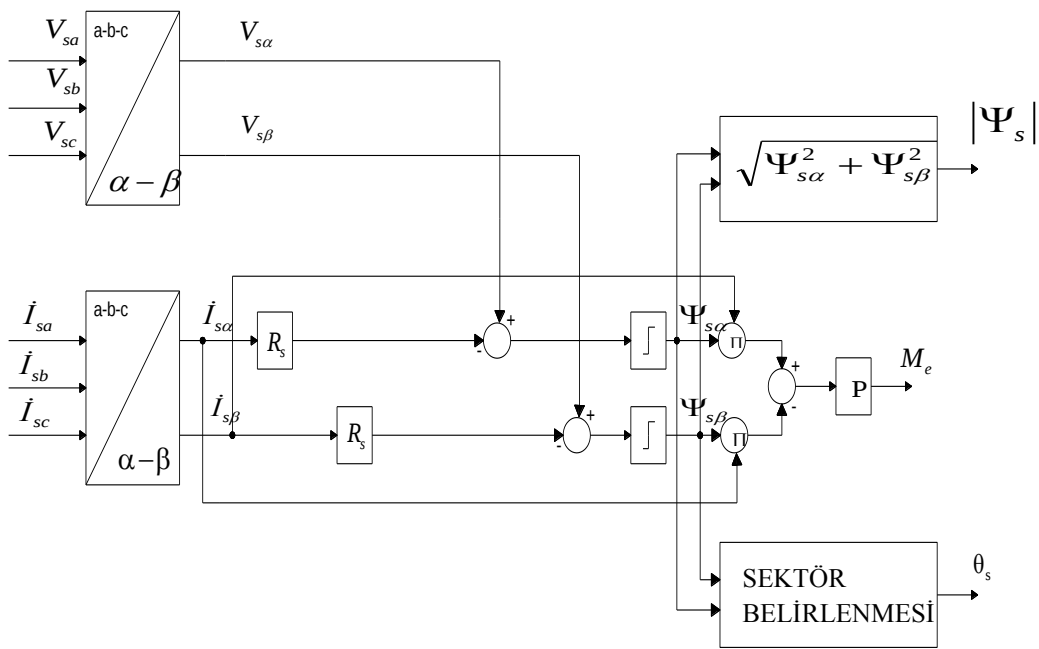
Eşitlikleri elde edilir. Moment denklemi ise statör akıları kullanılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$M_e = p(\Psi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (6.105)$$

Stator akıları E.6.103 ve Eş.6.104 kullanılarak bulunabilir. Hesaplanan değerler vasıtasıyla stator akısının genliği aşağıdaki Eş.6.106 ile bulunur[15].

$$|\Psi_s| = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2} \quad (6.106)$$

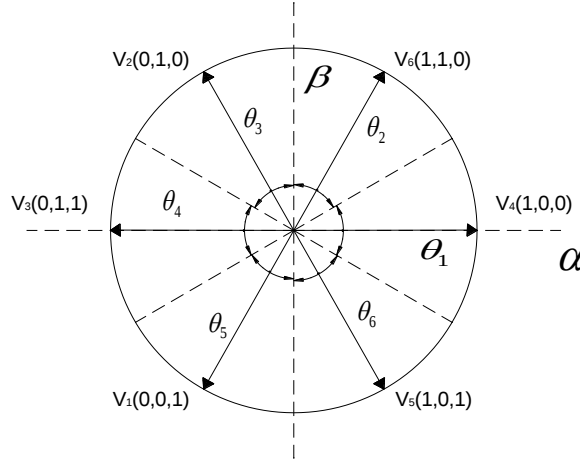
Makinenin  $\alpha - \beta$  eksen takımlarındaki bileşenleri a-b-c ekseninden  $\alpha - \beta$  eksen takımına İleri ve geri Clarke dönüşüm formülleri kullanılarak yapılır. Doğrudan moment kontrolüne ilişkin şema aşağıdaki şekilde gibi verilebilir[15].



Şekil 6.15. Doğrudan moment kontrolünde kullanılan akı moment gözlemleyicisi

Denklemeler yardımı ile hesaplanan moment ve stator akı vektörünün genliği ile bunların referans değerleri arasındaki farkın oluşturduğu moment ve akı hataları ile stator akı bileşenlerinden hesaplanan akının  $\Theta_s$  açısal konumu kullanılarak oluşturulan anahtarlama dizisi eviricide yer alan güç anahtar elemanına uygulanır.

Şekil 6.16’da görüldüğü gibi 8 ayrı anahtarlama dizisinden oluşan 8 farklı gerilim vektöründen biri kullanılarak anahtarlama işlemi uygulanır[15].



Şekil 6.16. Anahtarlama konumları

Bu yöntemde  $V_0(0,0,0)$  ile  $V_7(1,1,1)$  anahtarlama seviyelerinde,  $V_0$ 'da yalnızca alt anahtarlar,  $V_1$ 'de ise yalnızca üst anahtarlar kapalı durumdadır ve bu anahtarlama seviyelerinde sargılardan akım geçmez. Bir anahtarlama seviyesinden diğerine geçerken yalnızca bir anahtarın konumu değişir. Akı vektörünün hangi bölgede olduğu Çizelge 6.1'den yararlanılarak tespit edilebilir. Bu tabloda bölgenin tespit edilmesinde  $\Psi_{s\alpha}$  ve  $(\sqrt{3}|\Psi_{s\beta}| - |\Psi_{s\alpha}|)$  ifadesinin işaretine bakmak yeterlidir.

Moment ve akı hataları ise histerezis bloklarına uygulanarak bu blokların ürettiği işaretler anahtarlama tablosunun adreslemesinde kullanılır. Histerezis bant genişlikleri moment ve akının referans değerlerden ne kadar sapmasına izin verileceğini belirler.

$$e_{Me} = M_e^{\text{ref}} - M_e \quad (\text{Moment hataları}) \quad (6.107)$$

$$e_{\psi e} = \psi_s^{\text{ref}} - |\psi_s| \quad (\text{Akı hataları}) \quad (6.108)$$

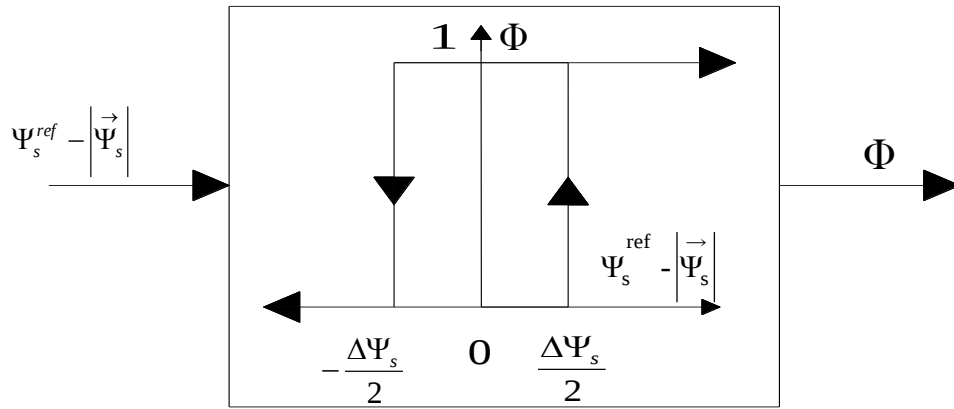
$\Delta\psi_s$  :Akı histerezis bant genişliği,

$\Delta M_e$  :Moment histerezis bant genişliğidir.

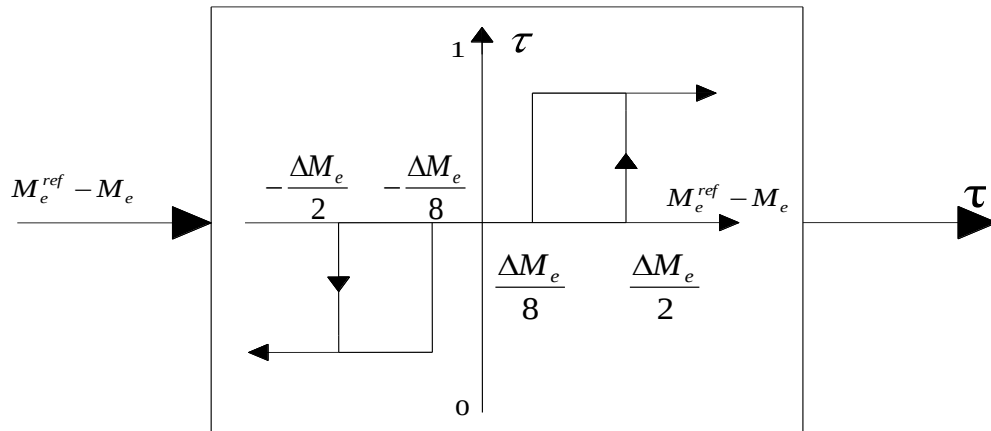
Stator akısının konumunun belirlenmesi için Çizelge 6.1 kullanılır.

Çizelge 6.1. Stator akısının konumunun belirlenmesi.

|                                                           |               |               |               |               |               |               |
|-----------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Psi_{s\alpha}$ 'nın işareti                             | +             | +             | -             | -             | -             | +             |
| $\Psi_{s\beta}$ 'nın işareti                              | +/-           | +             | +             | +/-           | -             | -             |
| $\sqrt{3} \Psi_{s\beta}  -  \Psi_{s\alpha} $ 'nın işareti | -             | +             | +             | -             | +             | +             |
| $\theta_s(i)$                                             | $\theta_s(1)$ | $\theta_s(2)$ | $\theta_s(3)$ | $\theta_s(4)$ | $\theta_s(5)$ | $\theta_s(6)$ |



Şekil 6.17. Akı hatasının uygulandığı histerezis blok şeması



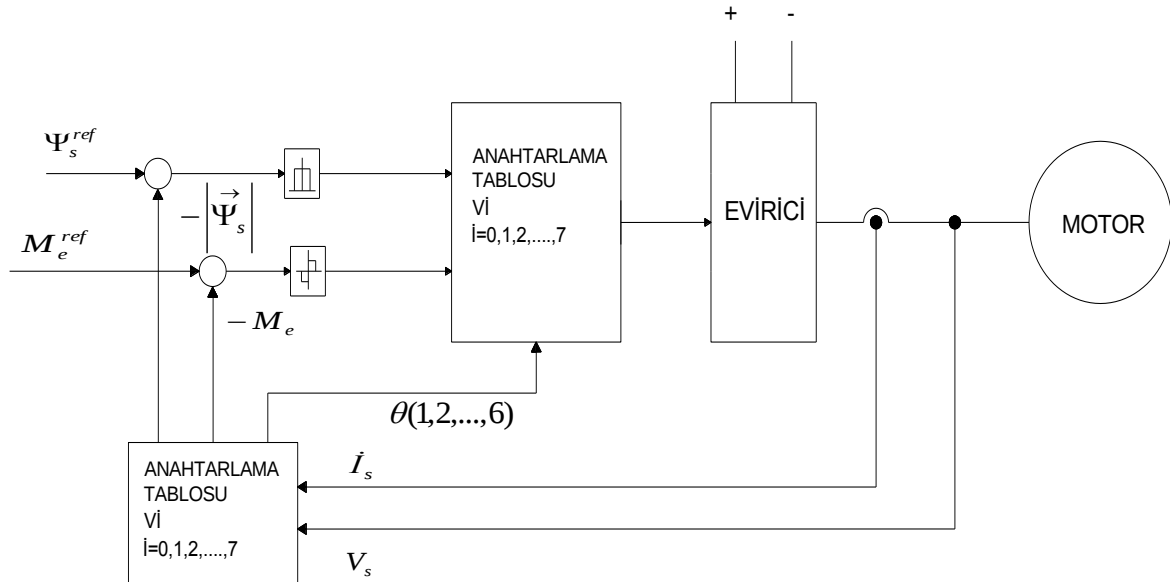
Şekil 6.18. Moment hatasının uygulandığı histerezis blok şeması.

Çizelge 6.1'den konum bilgisi ve histerezis bloklarının ürettiği işaretlerle motorun duran  $\alpha - \beta$  eksen takınma göre saat ibresi tersi yönde dönmesi için aşağıdaki anahtarlama dizisi uygulanır. Anahtar dizisinin seçiminde moment hatalarına verilen sınır değerleri içerisinde en hızlı cevap ve en yüksek verim sağlanacak şekilde uygulama yapılır[15].

Çizelge 6.2 .Saat ibrelerinin tersi yönü için anahtarlama dizisi

|  |             | $\theta_s(1)$  | $\theta_s(2)$  | $\theta_s(3)$  | $\theta_s(4)$  | $\theta_s(5)$  | $\theta_s(6)$  |
|--|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|  | $\tau = 1$  | V <sub>6</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> | V <sub>1</sub> | V <sub>5</sub> | V <sub>4</sub> |
|  | $\tau = 0$  | V <sub>7</sub> | V <sub>0</sub> | V <sub>7</sub> | V <sub>0</sub> | V <sub>7</sub> | V <sub>0</sub> |
|  | $\tau = -1$ | V <sub>5</sub> | V <sub>4</sub> | V <sub>6</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> | V <sub>1</sub> |
|  | $\tau = 1$  | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> | V <sub>1</sub> | V <sub>5</sub> | V <sub>4</sub> | V <sub>6</sub> |
|  | $\tau = 0$  | V <sub>0</sub> | V <sub>7</sub> | V <sub>0</sub> | V <sub>7</sub> | V <sub>0</sub> | V <sub>7</sub> |
|  | $\tau = -1$ | V <sub>1</sub> | V <sub>5</sub> | V <sub>4</sub> | V <sub>6</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> |

Doğrudan moment kontrolüne ilişkin prensip şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.19. Doğrudan moment kontrolüne ilişkin prensip şeması



## 7. SİRKÜLASYON POMPALARININ DREKT ŞEBEKEDEN ENERJİLENMESİ VE HIZ KONTROL CİHAZI ÜZERİNDEN ENERJİLENMESİNİN KARŞILAŞTIRMASI DENEYİ

Bu bölümde tezin uygulama çalışması olarak sirkülasyon pompalarının enerji tüketiminin ve davranışının incelenmesi amacıyla, makinenin direkt şebekeden enerjilenmesi durumunda ve makineye inverter üzerinden enerji vererek beslenmesi durumunda enerji tüketiminin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerde iki çalışma modu ile enerji tüketim değerleri incelenmiştir.

Aynı zamanda sistemin simülasyonu yapılarak, iki sistem arasındaki parametre farkları analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 7.1. Test Düzeneği

Sirkülasyon pompaları test düzeneği Şekil 7.1’de tek hat şemasında görüldüğü üzere pompa grubu, iki adet basınç sensörü, bu sensörlerden alınan veri ile çalışan inverter sistemi ve sistemin aktif, endüktif-reaktif ve kapasitif-reaktif enerji tüketimini ölçecek sayaçtan oluşmaktadır.

Fiziksel olarak kurulmuş olan bu sistemde mevcut makinenin davranışının daha net olarak izlenebilmesi amacıyla, benzer bir şekilde sistemin simülasyonu da yapılmıştır. Simülasyonda sincap kafesli asenkron makinenin miline uygulanan moment, sirkülasyon pompalarına benzer şekilde arttırılarak sistemin inverter aracılığı ile hız kontrolünün yapılması ve direkt olarak şebeke gerilimi ile beslenmesi durumunda etkileri incelenmiştir.

#### 7.1.1. Sistemde kullanılan ana cihazlar

##### Hız kontrol cihazı:

|                |            |
|----------------|------------|
| Markası        | : ABB      |
| Modeli         | : ACS310   |
| Anma gücü      | : 2,2 kW   |
| Gerilim        | : 3Ø 400 V |
| Giriş frekansı | : 48-63 Hz |

Çıkış frekansı : 0-500 Hz

### **Pompa özellikleri**

Markası : Standart pompa  
Modeli : SK9160  
Debisi : 65 m<sup>3</sup>/h  
Gücü : 3 Hp, 2,23 kW  
Hmp : 6 m  
Verim : %69  
Dönme sayısı : 1400 d/dak

### **Asenkron makine özellikleri**

Markası : GAMAK  
Modeli : AGM1014A  
Gerilimi :  $\Delta Y$  220/380 V  
Gücü : 3 Hp, 2,23 kW  
Devir sayısı : 1420 d/dak  
Frekans : 50 Hz  
Koruma sınıfı : IP44

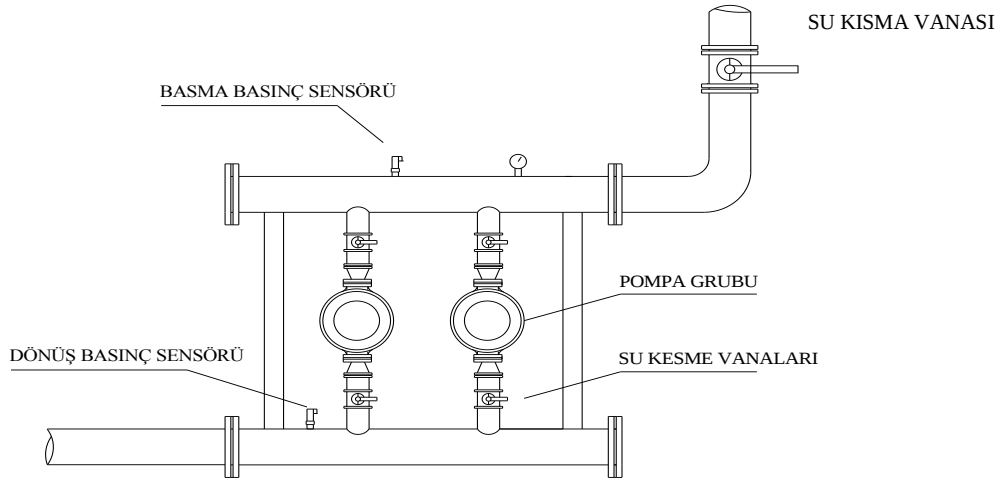
## **7.2. Sistemin Çalışma Prensibi**

Sirkülasyon pompaları, dönüş kolektöründen aldığı suyu basma kolektörüne sirküle eder. Basma kolektörüne gelen su basıncın etkisi ile borulardan iletilir ve radyatörlerin içerisinden geçerek ısı transferi yapar. Soğuyan su kazan içerisinde dolaşarak ısınır ve tekrar dönüş kolektörüne gelir.

Sistemin bu şekilde çalışması normal çalışma durumudur. Diğer olasılıkta ise, suyun basma kolektöründen pompalanması sonrasında radyatörlerden geçmesinin termostatik vana marifetiyle engellenmesi ve su önüne set oluşturmastır. Sonuç olarak, sirkülasyon

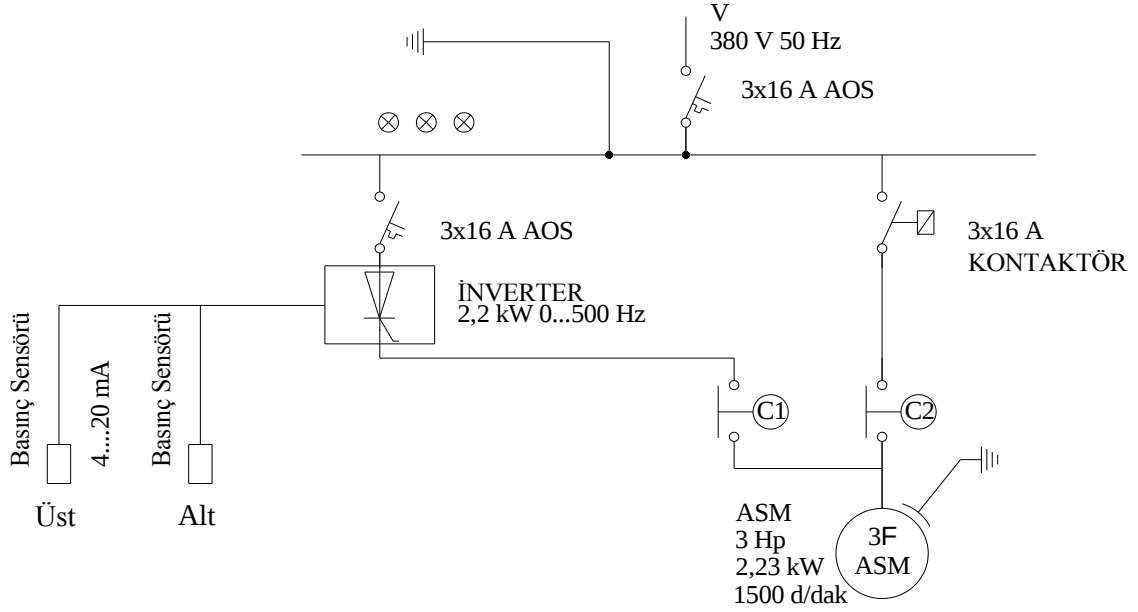
pompaları sürekli çalıştığından, boru içerisindeki basınç artacaktır. Bu basıncı dengelemek için inverter makine hızını düşürür ve aşırı basınç durumu engellenmiş olur.

Sistemin temel mekaniki bağlantı şeması; Şekil 7.1’de verilmiştir. Sistemde iki adet basınç sensörü, bir adet inverter cihazı, bir adet kısa devre rotorlu asenkron makine ile tahrik edilen sirkülasyon pompası ve sistemin güvenli çalışması için gerekli olan aşırı akım rölesi, sigorta vb. koruma ekipmanları mevcuttur.



Şekil 7.1. Sistemin mekaniki bağlantı şeması

Sistem şebekeden direkt enerjilenme ve inverter üzerinden enerjilenme olmak üzere kullanıcının seçimine bağlı ve Şekil 7.2’de görülen tek hat şemasına uygun olarak iki şekilde çalışır.



Şekil 7.2. Sistemin ana tek hat şeması

### 7.2.1. Direkt şebeke üzerinden enerjilenme modu

Bu çalışma modu hız kontrol cihazı üzerinden enerjilenmeyen ve çoğunlukla kullanılmakta olan sirkülasyon sisteminin çalışma modudur. Bu modda sistem direkt olarak kontaktör üzerinden şebeke gerilimi ve frekansı ile enerjilenir ve kazan sisteminden alınan veri ile sürekli çalışarak sistem üzerindeki suyu sirküle eder.

### 7.2.2. İnverter üzerinden enerjilenme modu

Bu çalışma modunda basma kolektörü ve dönüş kolektörü üzerinde bulunan basınç sensörlerinden alınan bilgi ile iki kolektör arasındaki basınç farkları karşılaştırılır. Kolektörlerde, set edilen basınç hatası üzerinde bir hata oluşması durumunda inverter makine hızını azaltarak oluşan basınç hatasını dengeler.

Sistemde basma ve dönüş kolektörü arasında nominal hızda çalışma durumunda basınç farkı ihmal edilecek kadar azdır ve basma kolektöründen çıkın su dönüş kolektörüne yaklaşık olarak aynı hız ve basınçta döner. Bununla birlikte suyun sirkülasyonuna engel olabilecek durumlarda pompalar sürekli olarak sirkülasyonda olduklarından basma yönünde basınç artar ve basınç hatası set edilen hata değerinin üzerine çıkar. Bu durumda inverter PID kontrolcü aracılığıyla veriyi değerlendirir ve basma kolektörlerindeki basınç

değerini düşürmek için makineyi yavaşlatır. Makine hızı, basma ve dönüş kolektöründeki basınç farkı değeri set edilen değerin altına düşünceye kadar azaltılır. Deneyde basma kolektöründe basıncın artması maksadıyla kolektör çıkışındaki vana kısılmış ve sistemde bulunan basıncın yükselmesi ile inverterin makine hızını yavaşlatması gözlenmiştir.



Şekil 7.3. Fiziksel olarak kurulan sistemin ana ekipmanları

### 7.3. Verilerin Elde Edilmesi

Sistem üzerinde bulunan üç konumlu pako şalter ile makineye direkt kontaktör üzerinden veya inverter üzerinden enerji verme özelliği seçilmiştir. İlk konumda direkt kontaktör üzerinden şebeke gerilimi ile motorun enerjilenmesi durumunda, aktif, endüktif-reaktif ve

kapasitif-reaktif güç ölçümleri yapılmıştır. İkinci konumda ise, makineye enerji inverter üzerinden verilmiş ve aynı şekilde sayaç endeksleri okunarak kayıt altına alınmıştır. Son olarak pompaların çıkışında bulunan vana üzerinden akan suyun debisi %50 oranında azaltılarak inverter üzerinden enerjilenme durumunda, sistemin davranışı ve enerji tüketim değerleri Çizelge 7.1’de görüldüğü gibi kayıt altına alınmıştır.

Benzer şekilde Şekil 7.4’te görülen simülasyon devresi ile sistemin direkt olarak şebeke gerilimi ile beslenmesi durumunda akım, gerilim, rotor hızı aktif ve reaktif güçler ve moment değerleri gözlenerek kayıt altına alınmıştır.

Şekil 7.8’de görülen simülasyonda ise makinenin vektör kontrollü inverter üzerinden hız ve moment kontrolü yapılmış ve sistemin çalışması, parametreleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

### 7.3.1. Fiziksel olarak oluşturulan sistemde yapılan ölçüm sonuçları

Çizelge 7.1. Fiziksel olarak oluşturulan sistemde yapılan ölçüm sonuçları

| DİREKT KAYNAKTAN ENERJİLENME DURUMUNDA ÖLÇÜMLER |                 |                       |                                     |                                          |                                              |
|-------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| SIRA<br>NU                                      | ÖLÇÜM<br>ZAMANI | DAKİKA<br>FARKI (DAK) | 1 SAATLİK AKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KWh | 1 SAATLİK ENDÜKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KVARh | 1 SAATLİK<br>KAPASİTİF GÜÇ<br>TÜKETİMİ KVARh |
| 1                                               | 17:03           | 12,00                 | 2,2500                              | 2,7500                                   | 0                                            |
| 2                                               | 17:15           | 7,00                  | 2,1429                              | 2,5714                                   | 0                                            |
| 3                                               | 17:22           | 11,00                 | 2,1818                              | 2,1818                                   | 0                                            |
| 4                                               | 17:33           | 10,00                 | 3,0000                              | 2,7000                                   | 0                                            |
| 5                                               | 17:43           | 10,00                 | 2,1000                              | 2,7000                                   | 0                                            |
| 6                                               | 17:53           | 7,00                  | 2,1429                              | 2,5714                                   | 0                                            |
| 7                                               | 18:00           | 11,00                 | 2,1818                              | 2,7273                                   | 0                                            |
| 8                                               | 18:11           | 9,00                  | 2,0000                              | 2,3333                                   | 0                                            |
| 9                                               | 18:20           | 11,00                 | 2,1818                              | 2,4545                                   | 0                                            |
| 10                                              | 18:31           | 0,00                  | 0,0000                              | 0,0000                                   | 0                                            |

| İNVERTER ÜZERİNDEN ENERJİLENME DURUMUNDA ÖLÇÜMLER |                 |                       |                                     |                                          |                                              |
|---------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| SIRA<br>NU                                        | ÖLÇÜM<br>ZAMANI | DAKİKA<br>FARKI (DAK) | 1 SAATLİK AKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KWh | 1 SAATLİK ENDÜKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KVARh | 1 SAATLİK<br>KAPASİTİF GÜÇ<br>TÜKETİMİ KVARh |
| 1                                                 | 18:45           | 10,00                 | 2,4000                              | 2,1000                                   | 0                                            |
| 2                                                 | 18:55           | 11,00                 | 2,1818                              | 1,9091                                   | 0                                            |
| 3                                                 | 19:06           | 9,00                  | 2,6667                              | 2,0000                                   | 0                                            |
| 4                                                 | 19:15           | 10,00                 | 2,4000                              | 1,8000                                   | 0                                            |
| 5                                                 | 19:25           | 11,00                 | 2,4545                              | 1,6364                                   | 0                                            |
| 6                                                 | 19:36           | 10,00                 | 2,4000                              | 2,1000                                   | 0                                            |
| 7                                                 | 19:46           | 9,00                  | 2,3333                              | 2,3333                                   | 0                                            |
| 8                                                 | 19:55           | 5,00                  | 2,4000                              | 1,8000                                   | 0                                            |
| 9                                                 | 20:00           | 0,00                  | 0,0000                              | 0,0000                                   | 0                                            |

| VANA KISILMASI DURUMUNDA İNVERTER ÜZERİNDEN ENERJİLENME SONUCU ÖLÇÜMLER |                 |                       |                                     |                                          |                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| SIRA<br>NU                                                              | ÖLÇÜM<br>ZAMANI | DAKİKA<br>FARKI (DAK) | 1 SAATLİK AKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KWh | 1 SAATLİK ENDÜKTİF<br>GÜÇ TÜKETİMİ KVARh | 1 SAATLİK<br>KAPASİTİF GÜÇ<br>TÜKETİMİ KVARh |
| 1                                                                       | 10:30           | 10,00                 | 2,1000                              | 0,6000                                   | 0                                            |
| 2                                                                       | 10:40           | 11,00                 | 2,1818                              | 0,2727                                   | 0                                            |
| 3                                                                       | 10:51           | 9,00                  | 2,0000                              | 0,6667                                   | 0                                            |
| 4                                                                       | 11:00           | 10,00                 | 2,1000                              | 0,6000                                   | 0                                            |
| 5                                                                       | 11:10           | 10,00                 | 1,8000                              | 0,3000                                   | 0                                            |
| 6                                                                       | 11:20           | 10,00                 | 1,5000                              | 0,3000                                   | 0                                            |
| 7                                                                       | 11:30           | 10,00                 | 1,5000                              | 0,6000                                   | 0                                            |
| 8                                                                       | 11:40           | 10,00                 | 2,7900                              | 0,3000                                   | 0                                            |
| 9                                                                       | 11:50           | 10,00                 | 0,0000                              | 0,0000                                   | 0                                            |

\*Deney sırasında sistemde sirküle edilen su sabit sıcaklıkta olup, ölçüm yapılan zaman diliminde ortam ve su sıcaklığının test sonuçlarına etkisi bulunmamaktadır.

#### 7.4. Sistemin Simülasyonu ve İnceleme

Fiziksel olarak kurulmuş olan sistemin simülasyonunun yapılması için aşağıda parametreleri bulunan kısa devre rotorlu asenkron makine, bu makineyi besleyecek enerji sistemi, inverter, gerekli ölçü elemanları ile makineye uygulanan momenti simüle edecek sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Sistemin tamamının MATLAB/SİMULİNK programında benzetimi yapılmıştır.

##### Asenkron makine özellikleri

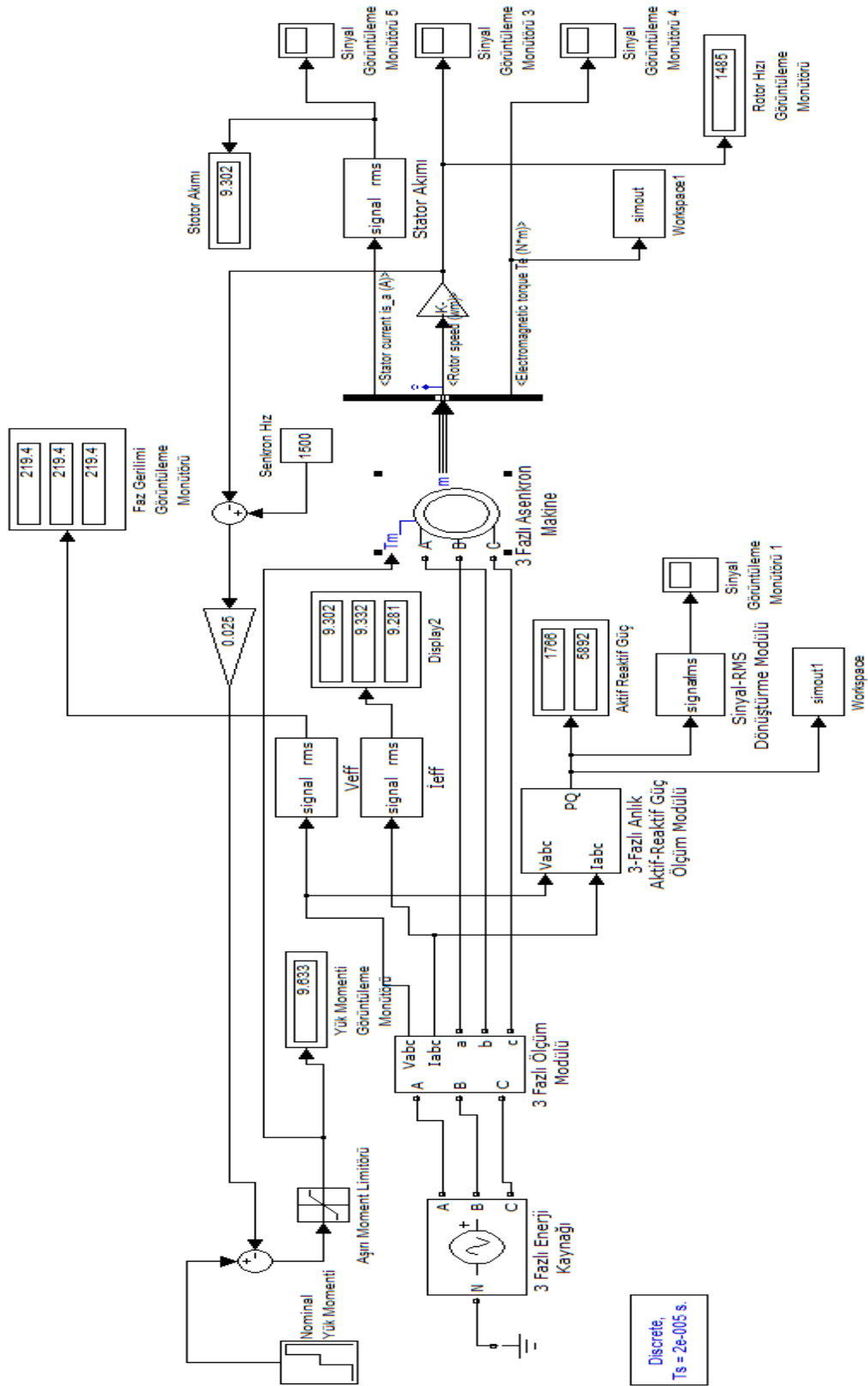
|                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| Anma gücü (P <sub>n</sub> )    | : 3 Hp, 2,23 kW           |
| Gerilim (F-F)                  | : 220 V                   |
| Giriş frekansı                 | : 60 Hz                   |
| Stator direnci                 | : 0,435 ohm               |
| Stator endüktansı              | : 0,002 H                 |
| Rotor direnci                  | : 0,816 ohm               |
| Rotor endüktansı               | : 0,002 H                 |
| Karşılıklı endüktans           | : 69.31 10 <sup>-3</sup>  |
| Kutup çifti sayısı, Faz sayısı | : 2, 3                    |
| Atalet momenti                 | : 0,089 kg.m <sup>2</sup> |
| Sürtünme katsayısı             | : 0,005 N.m.s.            |

##### Enerji kaynağı özellikleri

|               |         |
|---------------|---------|
| Gerilim (F-F) | : 220 V |
| Frekansı      | : 60 Hz |

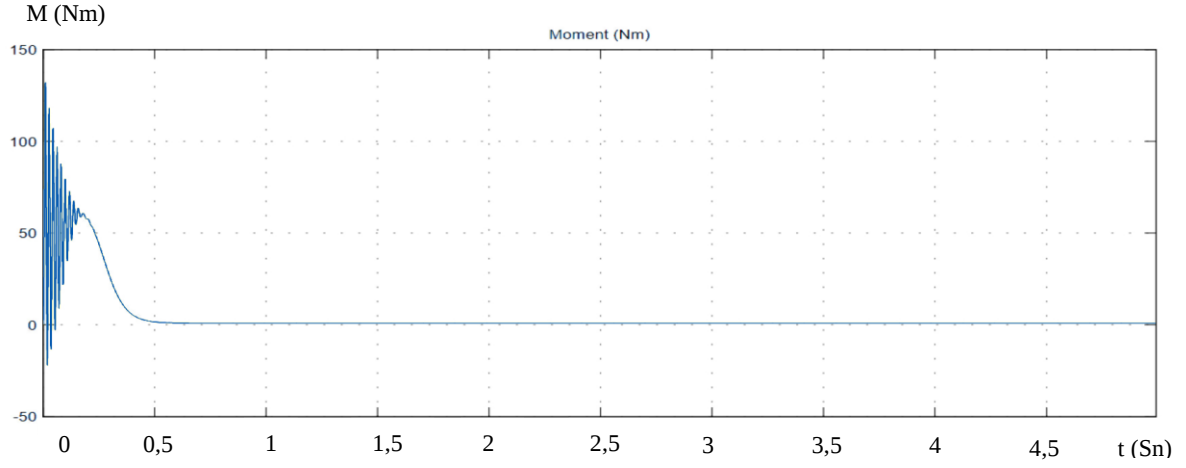
##### 7.4.1. Direkt kaynaktan enerjilenme simülasyonu

Bu simülasyonda, parametreleri yukarıda verilmiş olan kısa devre rotorlu asenkron makine, Şekil 7.4'te görüldüğü gibi direkt olarak 3 fazlı kaynaktan enerjilendirilerek simüle edilmiştir. Simülasyonda sistemdeki basınç değeri, makine hızı ile orantılı olduğundan bu hızın sistem basıncına etkisi ilave edilmiştir.

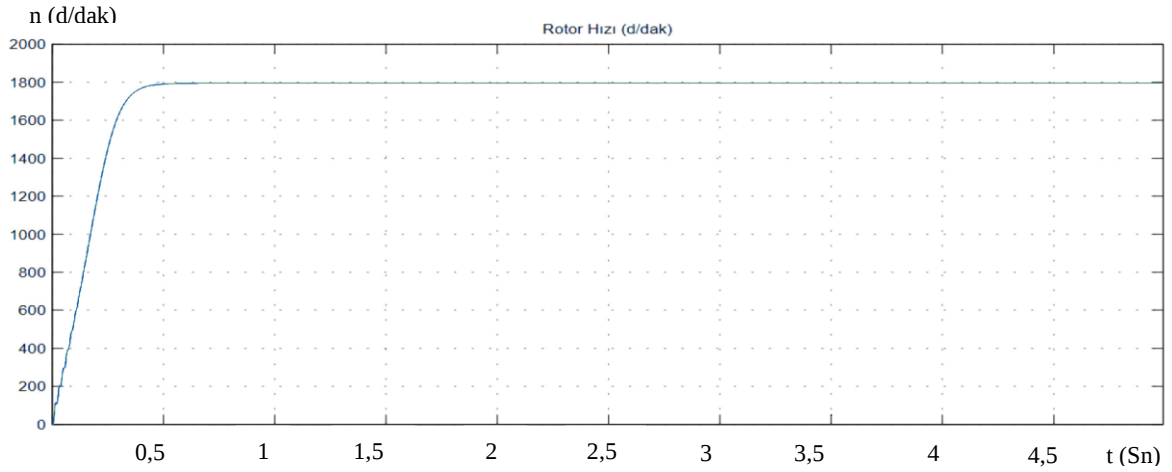


Şekil 7.4. Direkt kaynaktan enerjilenme simülasyonu

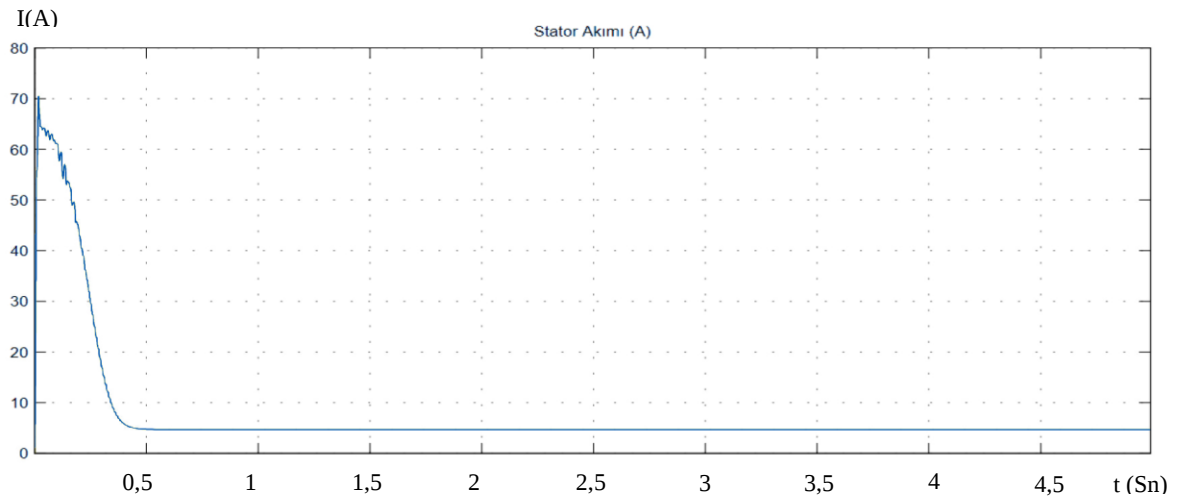
Şekil 7.4’de direkt kaynaktan enerjilenme durumunda simülasyon şeması görülen sistemde ilk olarak makineye moment uygulanmamıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de görülmektedir.



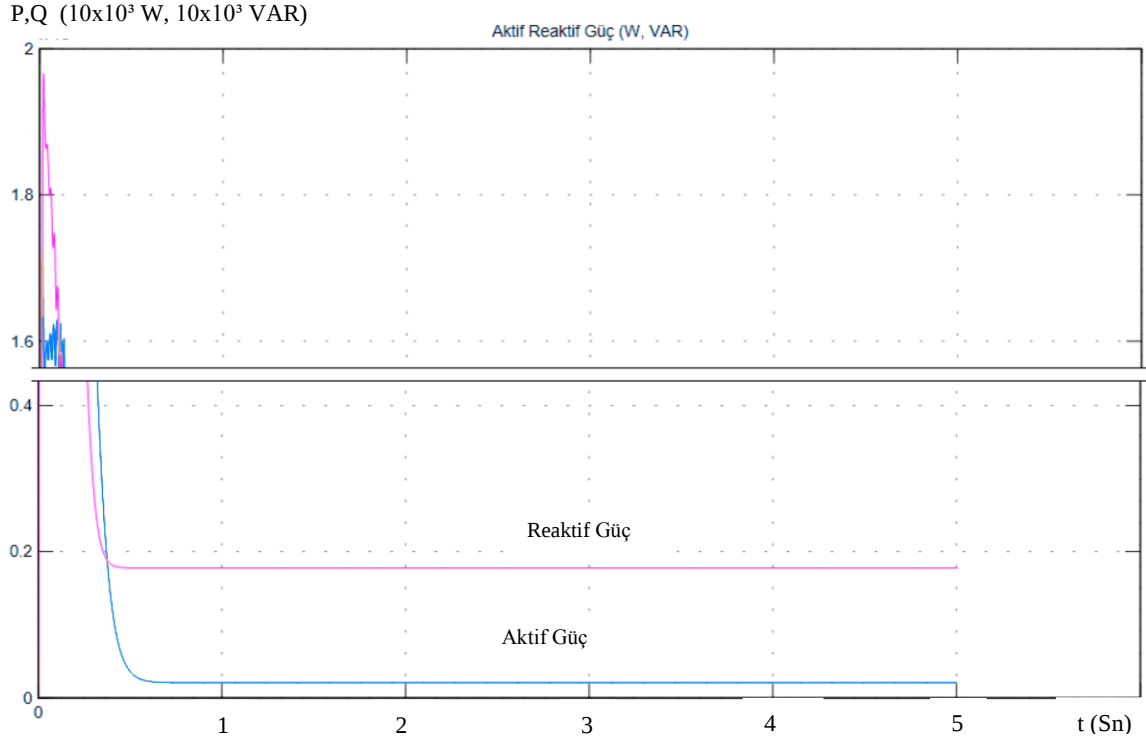
a. Moment değişimi (Nm)



b. Rotor hızı değişimi (d/dak)



c. Stator akımı değişimi (A)

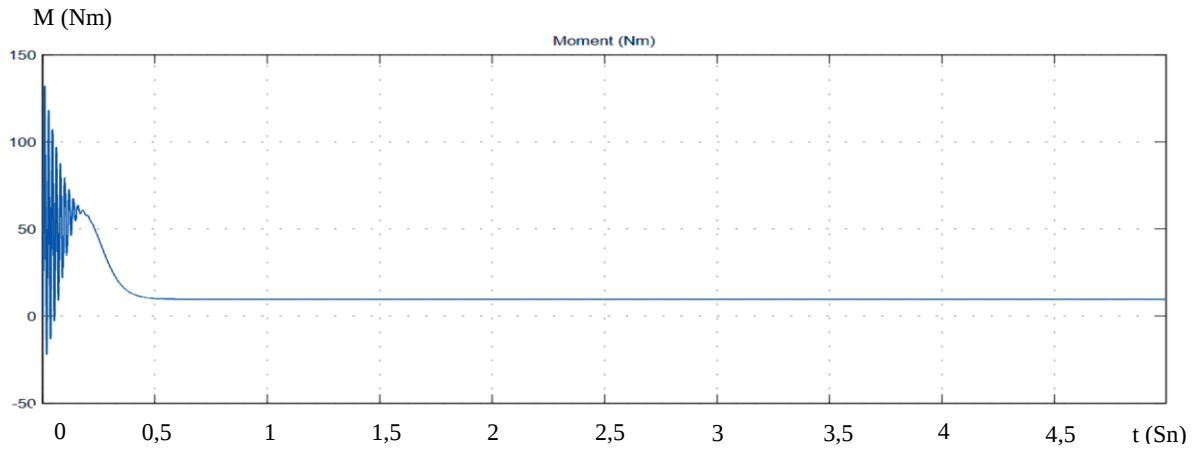


d. Aktif ve reaktif güç ( $110 \times 10^3$  W,  $10 \times 10^3$  VAR)

Şekil 7.5. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında  $T_m=0$  Nm iken simülasyon sonuçları

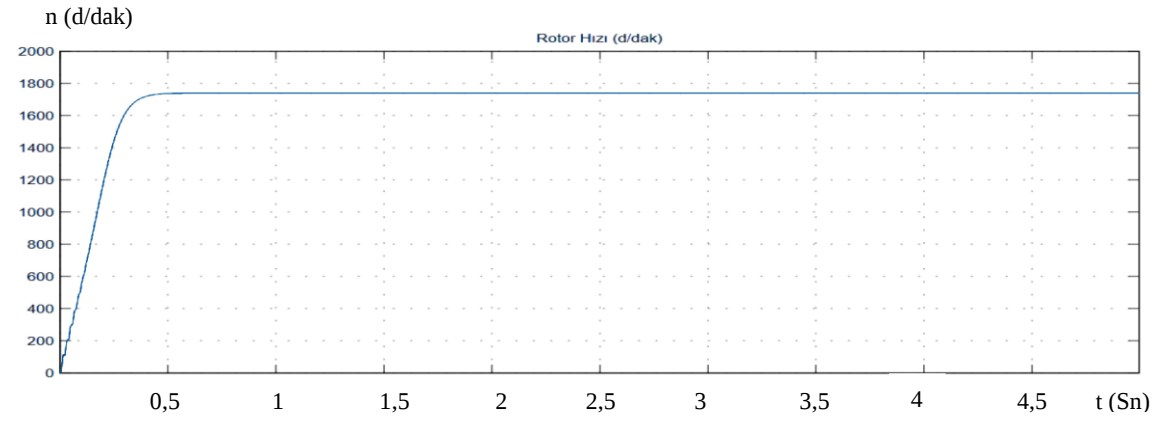
- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç ( $10 \times 10^3$  W,  $10 \times 10^3$  VAR)

İkinci durumda makineye nominal momentine yakın  $T_m=10$  Nm yük uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.6'da görülmektedir.

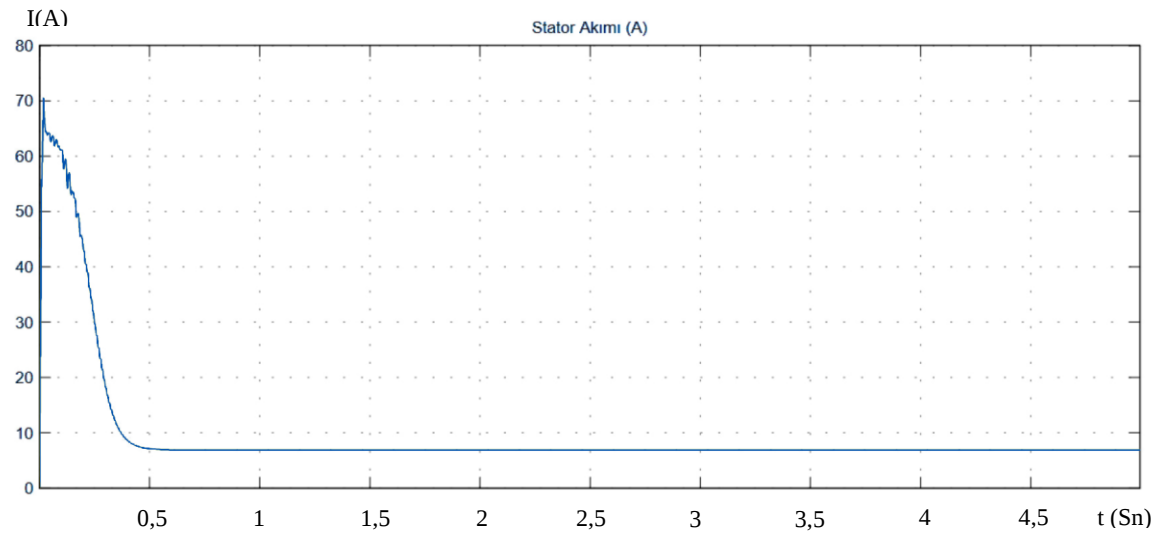


a. Moment değişimi (Nm)

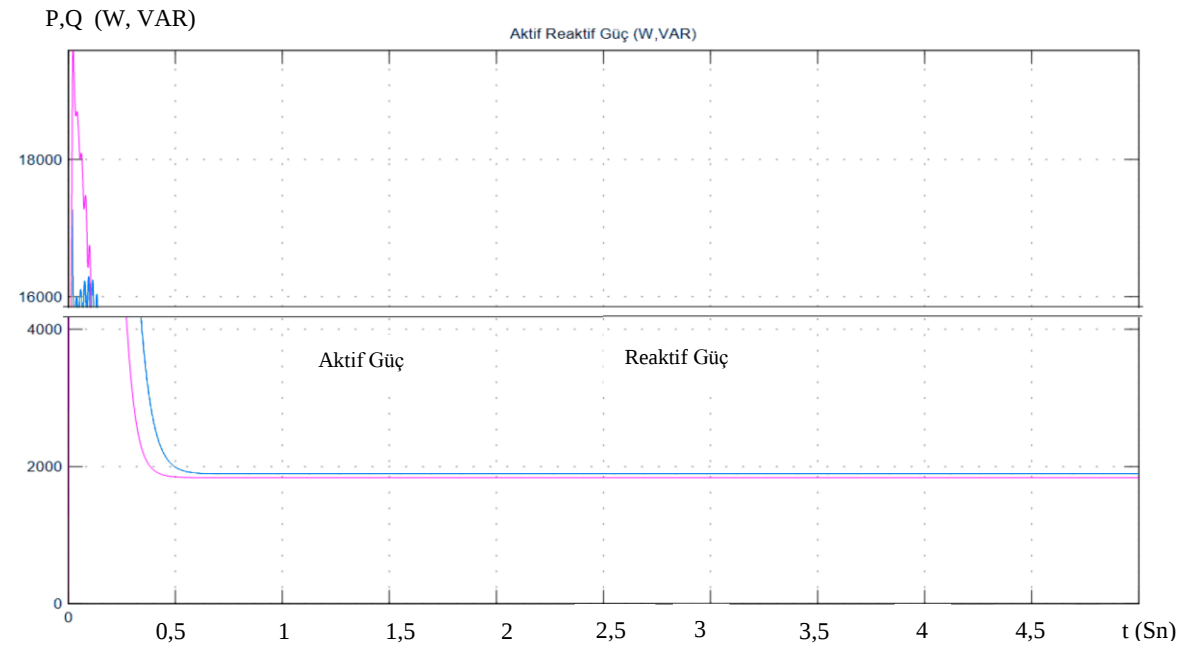
90



b. Rotor hızı değişimi (d/dak)



c. Stator akımı değişimi (A)

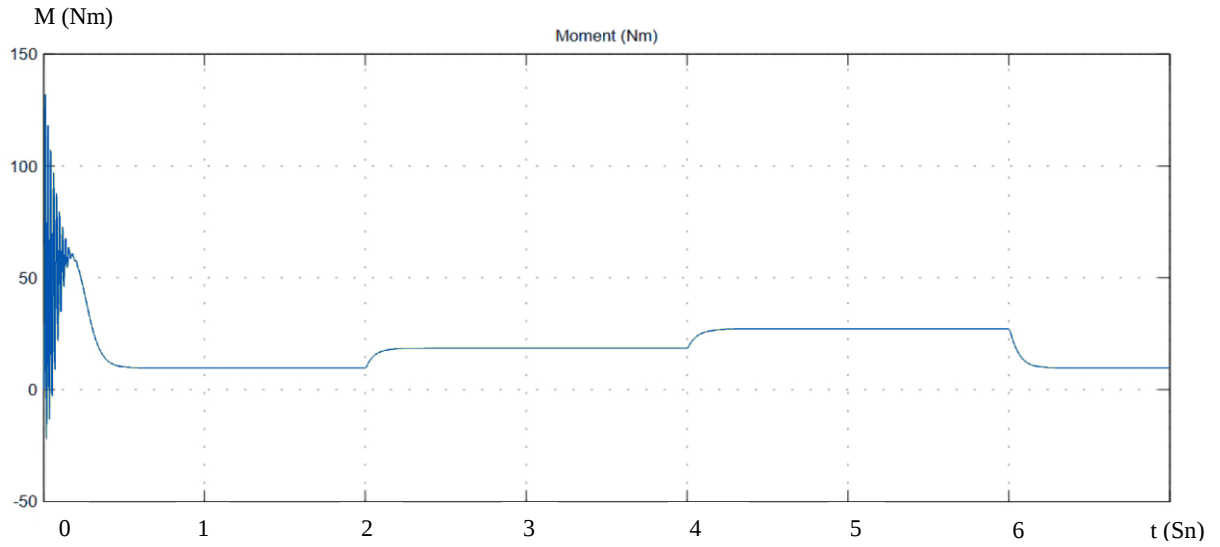


d. Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

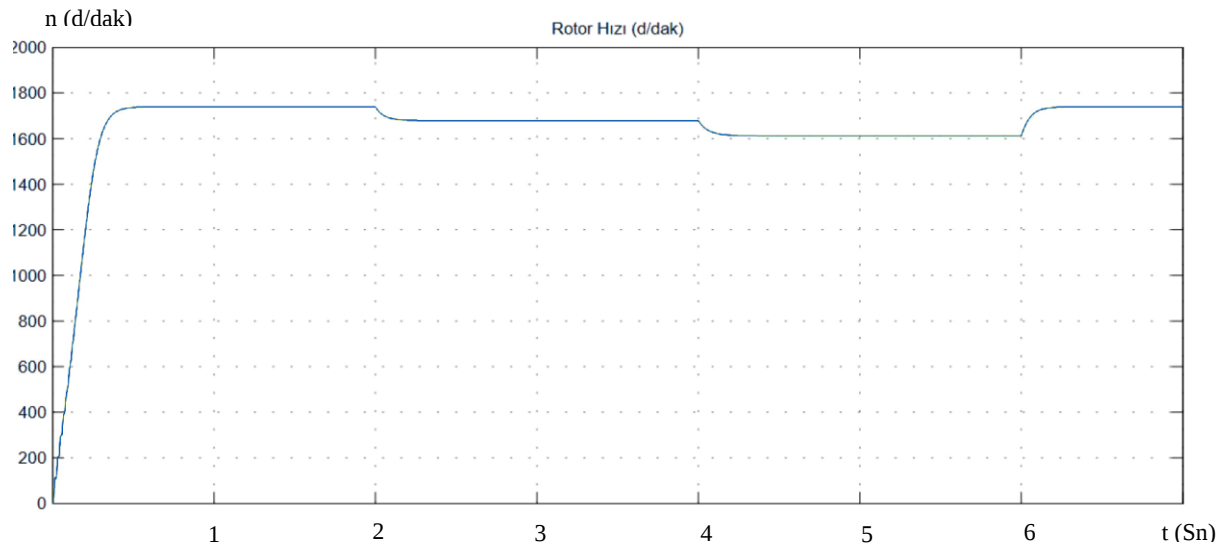
Şekil 7.6. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında  $T_m=10$  Nm iken simülasyon sonuçları

- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

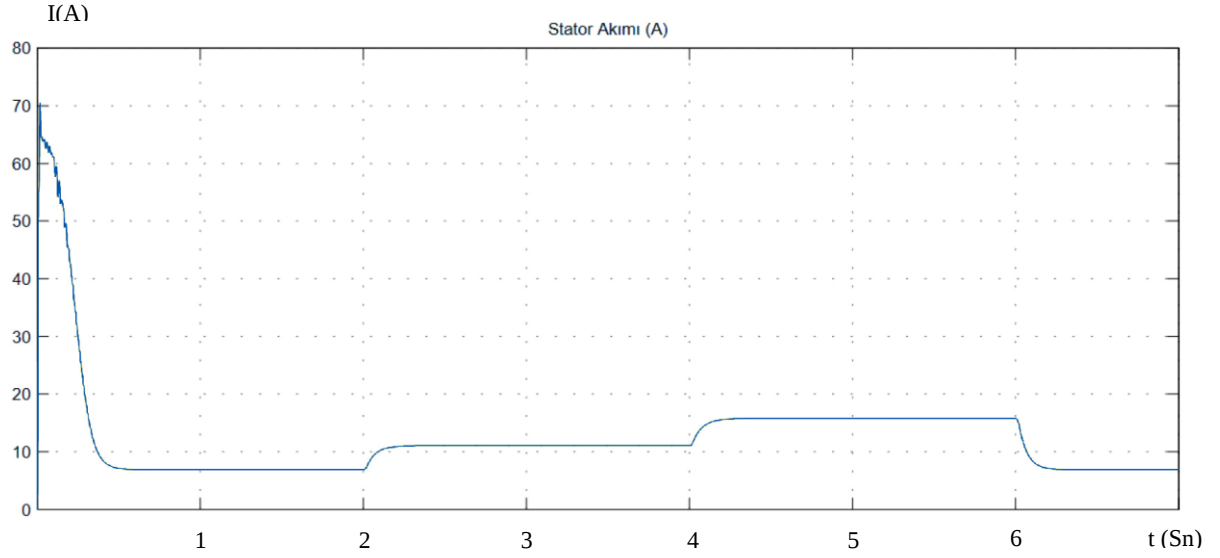
Son durumda makineye zamanla değişen  $\begin{bmatrix} T_s \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 10 \text{ Nm} \end{bmatrix}$  yük moment değerleri uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen çıktılar Şekil 7.7’de görülmektedir.



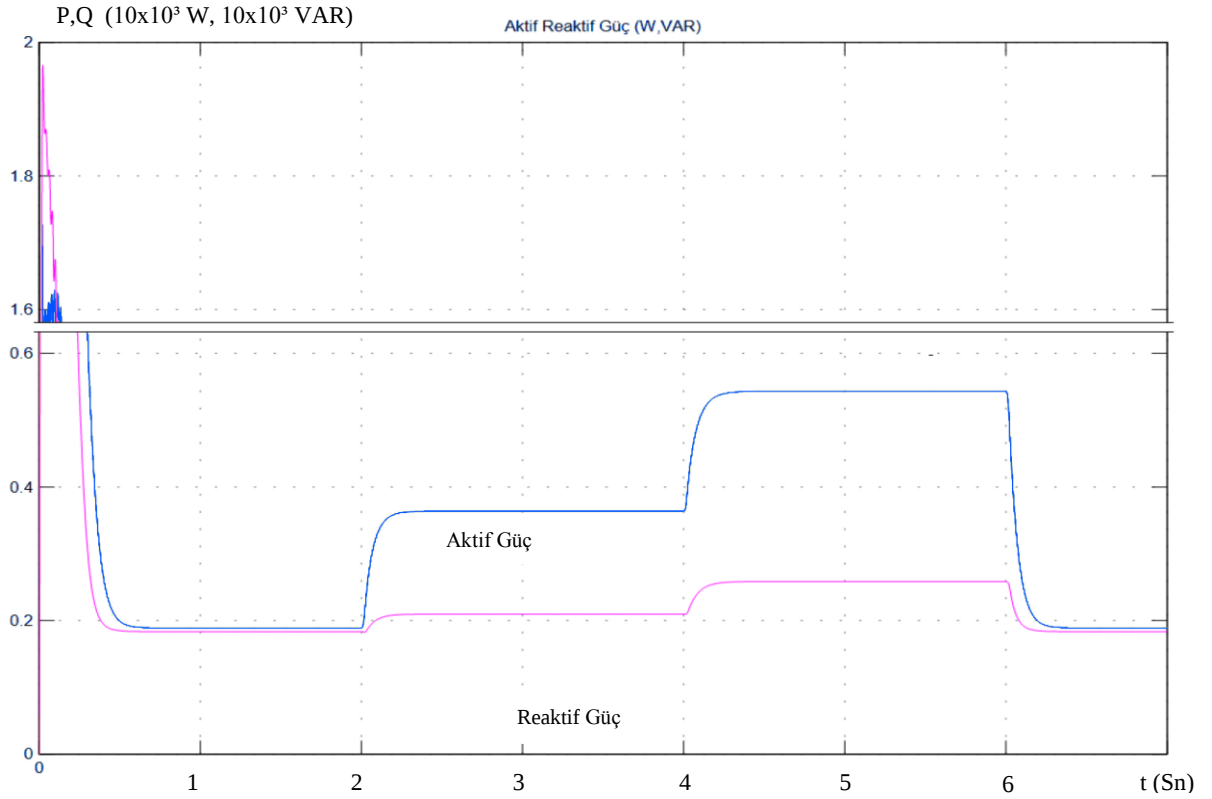
a. Moment değişimi (Nm)



b. Rotor hızı değişimi (d/dak)



c. Stator akımı değişimi (A)  $10 \times 10^3$  W,  $10 \times 10^3$  VAR



d. Aktif ve reaktif güç ( $10 \times 10^3$  W,  $10 \times 10^3$  VAR )

Şekil 7.7. Direkt kaynaktan enerjilenme durumunda 0-7 Sn arasında makineye

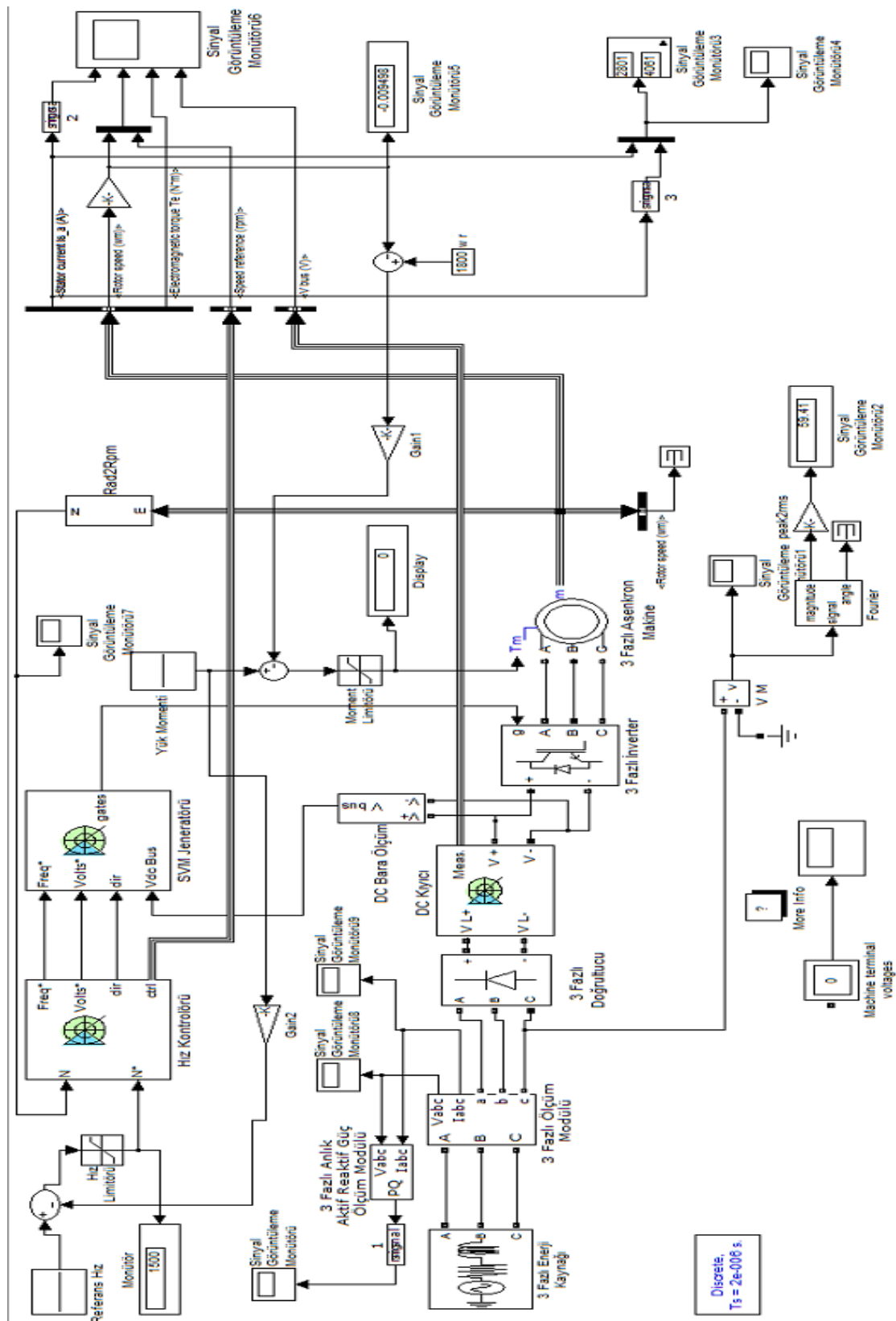
$$\begin{bmatrix} T_s \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \text{ Sn} \\ 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 10 \text{ Nm} \end{bmatrix} \text{momentinin uygulanması durumunda}$$

simülasyon sonuçları

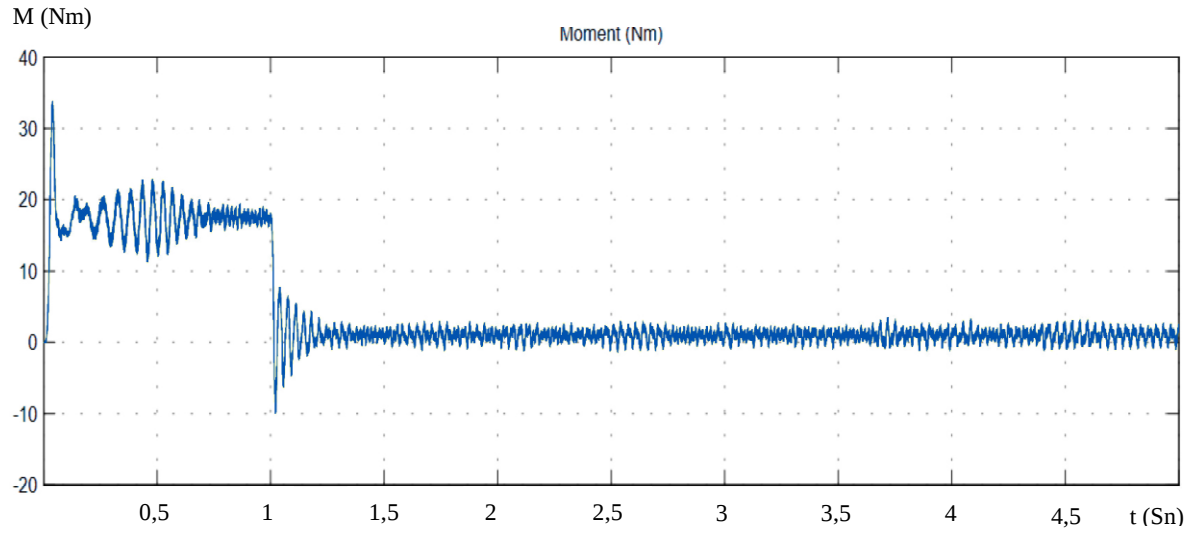
- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç ( $10 \times 10^3$  W,  $10 \times 10^3$  VAR)

#### 7.4.2. Hız kontrol sistemi üzerinden enerjilenme simülasyonu

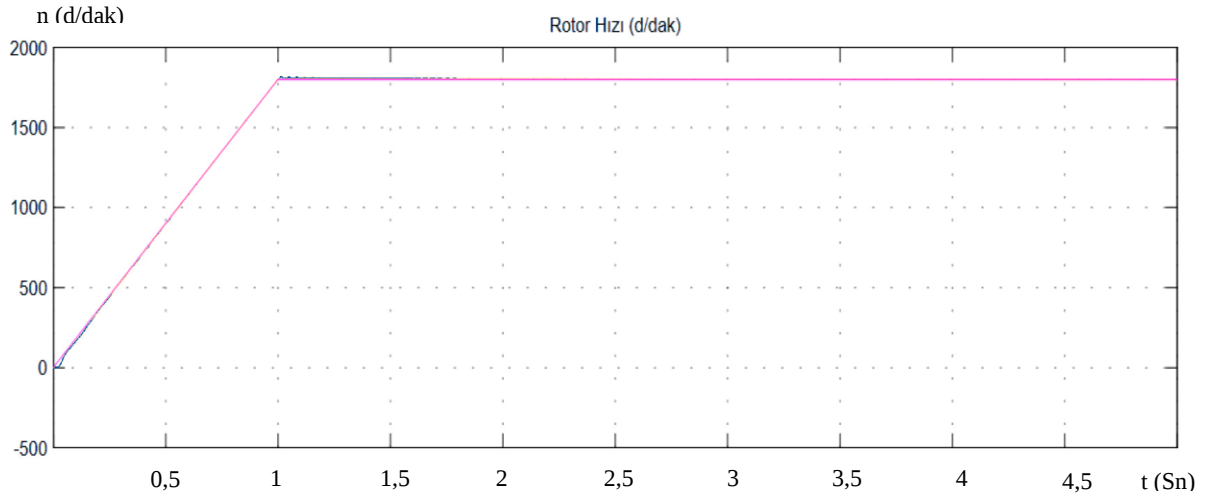
Bu simülasyon çalışmasında ise parametreleri daha önce verilmiş olan kısa devre rotorlu asenkron makine, Şekil 7.8’de görüldüğü gibi inverter sistemi üzerinden hız kontrolü yapılarak simüle edilmiştir. Bu simülasyon çalışmasında sistemdeki basınç değeri makine hızı ile orantılı olduğundan; bu hızın sistem basıncına etkisi ilave edilmiştir. Simülasyon şeması verilen sistemde ilk olarak makineye moment uygulanmamış ve yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler Şekil 7.9’de sunulmuştur. İkinci durum olarak makineye 10 Nm sabit yük uygulanmış ve son simülasyon çalışmasında ise yük momenti kademeli olarak ayarlanarak momentin artması ile motor hızının düşürülmesi yük momenti 10 Nm değerinde sabit kalacak durum için gözlenmiştir.



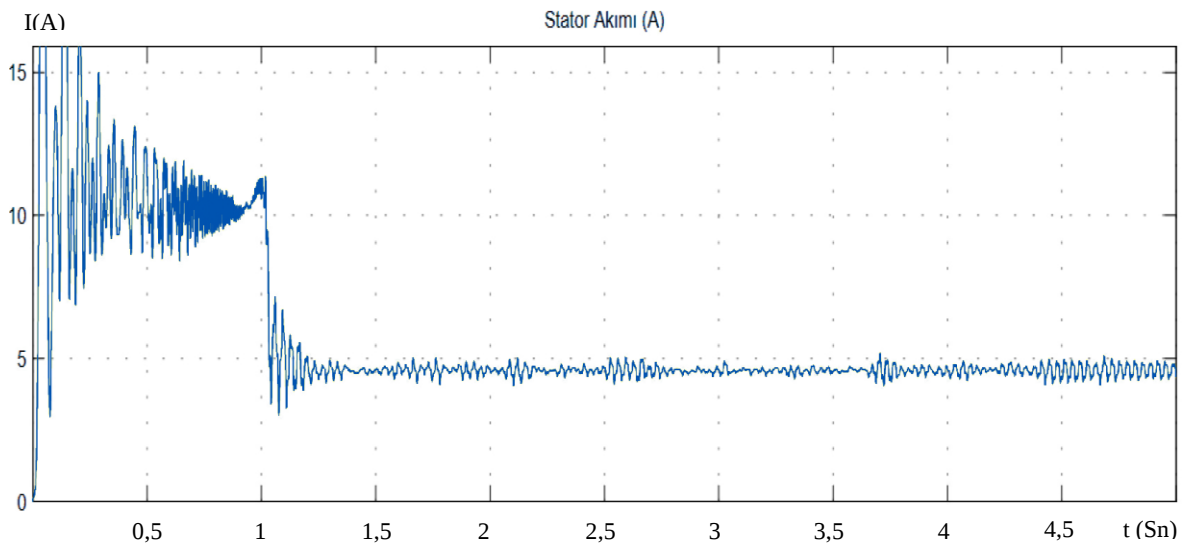
Şekil 7.8. İnverter üzerinden hız kontrolü simülasyonu



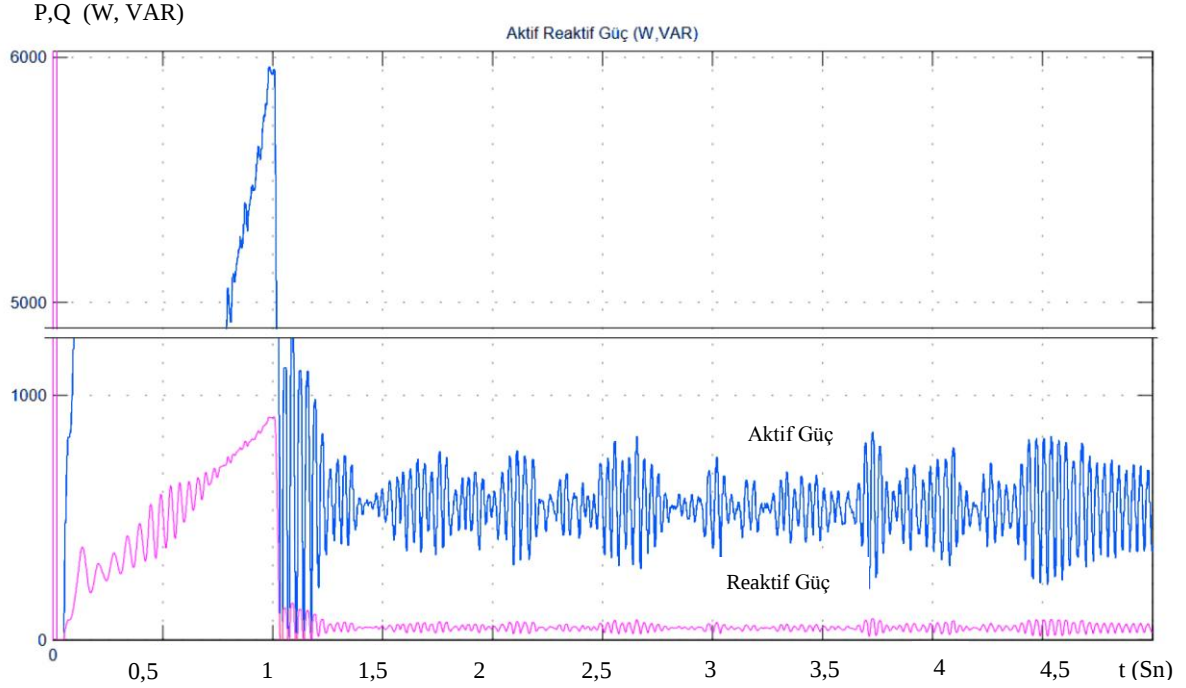
a. Moment değişimi (Nm)



b. Rotor hızı değişimi (d/dak)



c. Stator akımı değişimi (A)

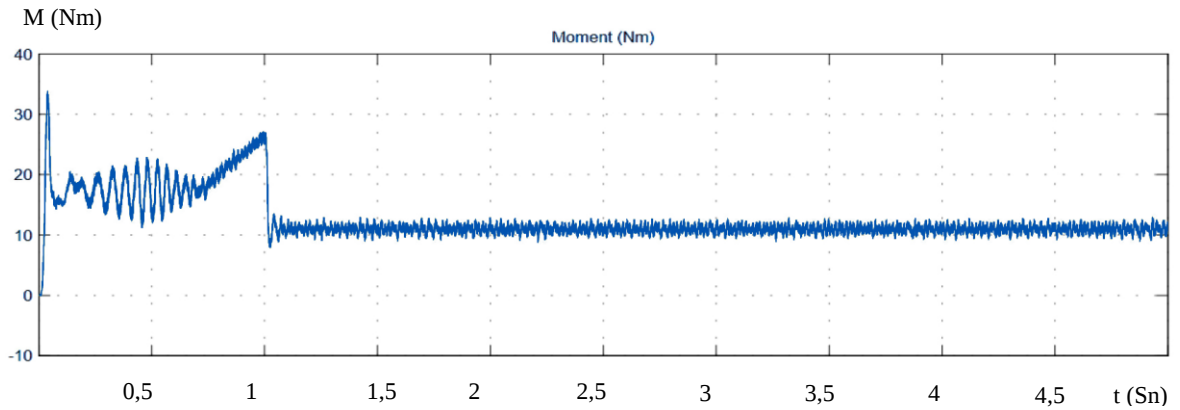


d. Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

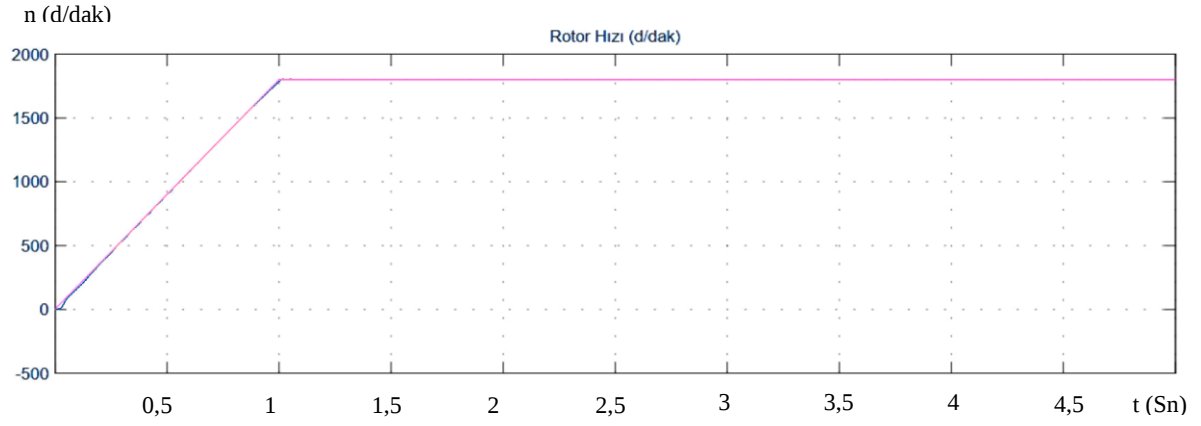
Şekil 7.9. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında  $T_m=0$  Nm iken simülasyon sonuçları

- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

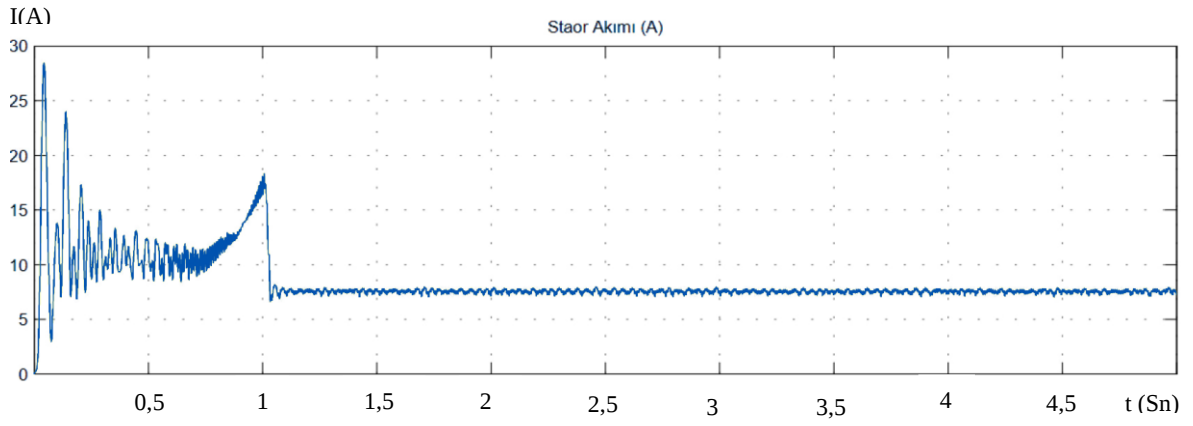
İkinci durumda makineye nominal momentine yakın  $T_m=10$  Nm yük uygulanmıştır. Uygulama sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.9’te görülmektedir.



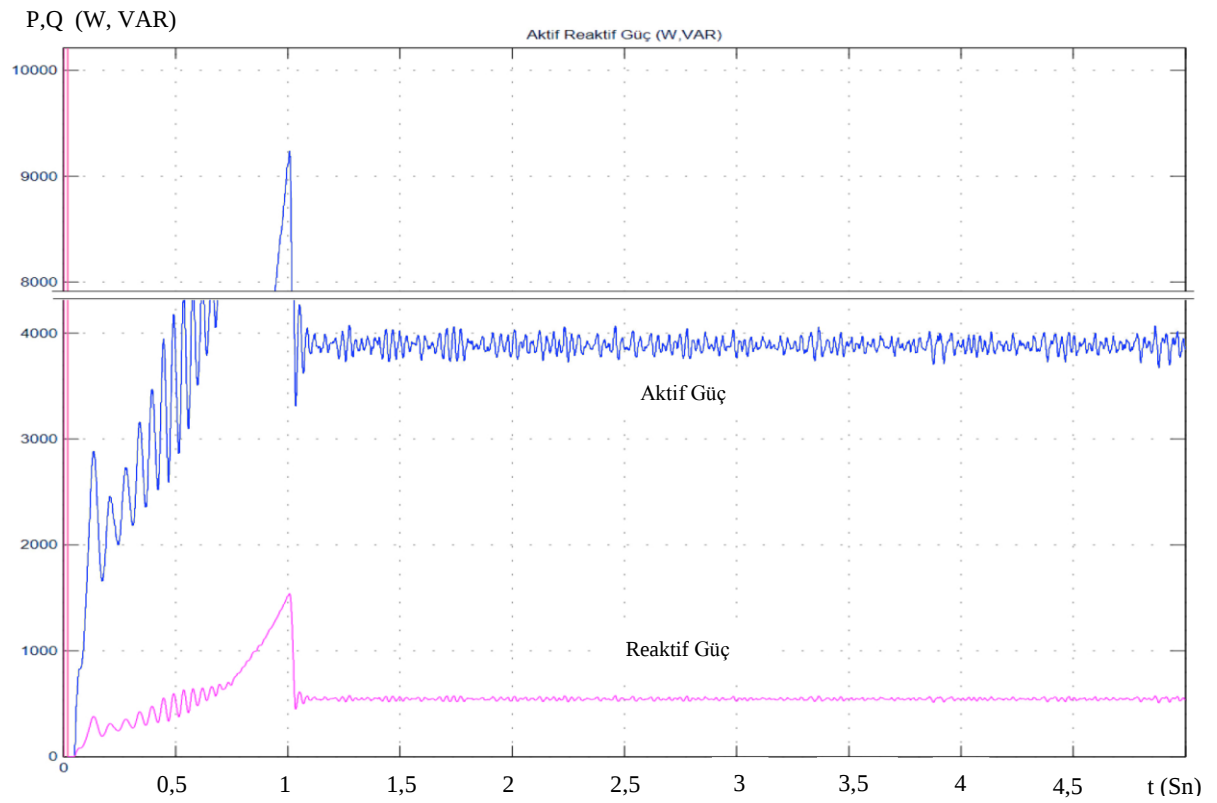
a. Moment değişimi (Nm)



b. Rotor hızı değişimi (d/dak)



d. Stator akımı değişimi (A)

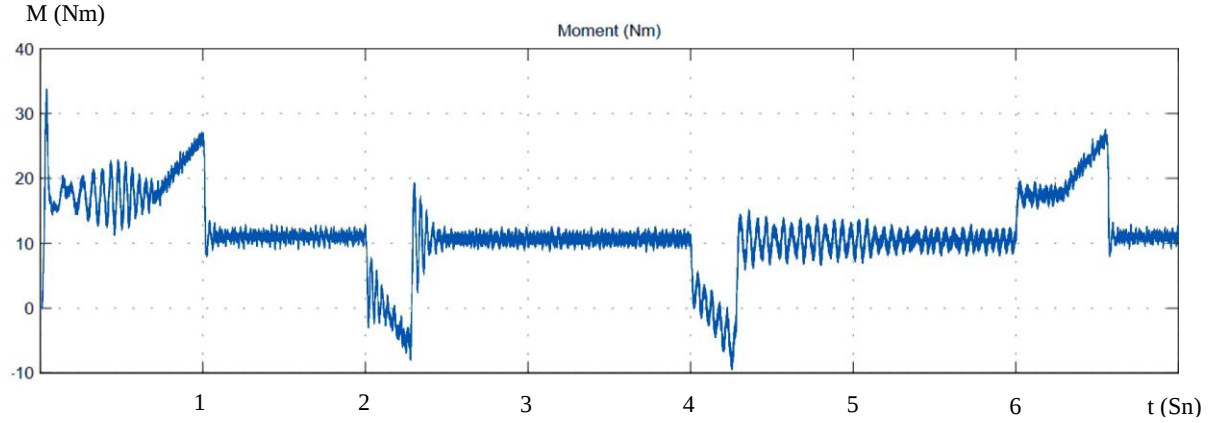


e. Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

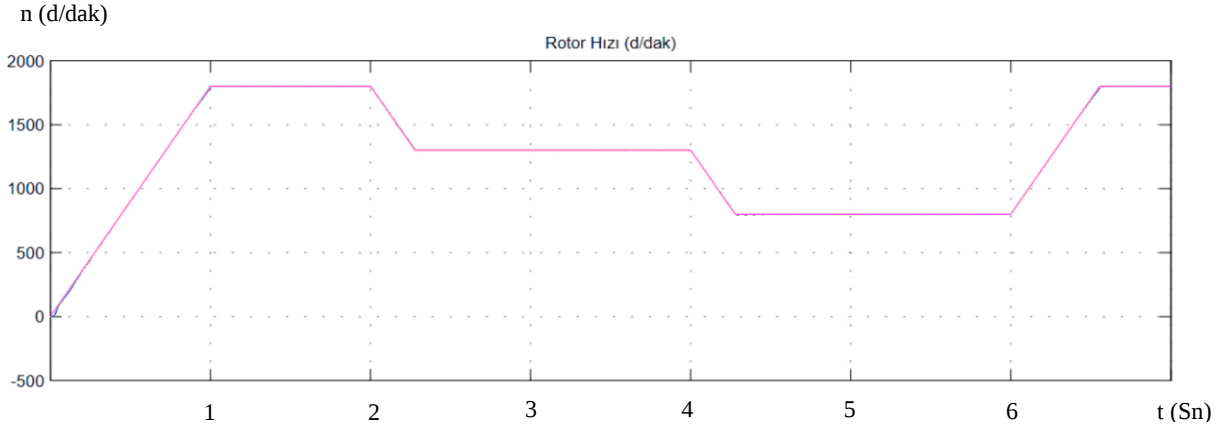
Şekil 7.10. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-5 Sn arasında  $T_m=10$  Nm iken simülasyon sonuçları

- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

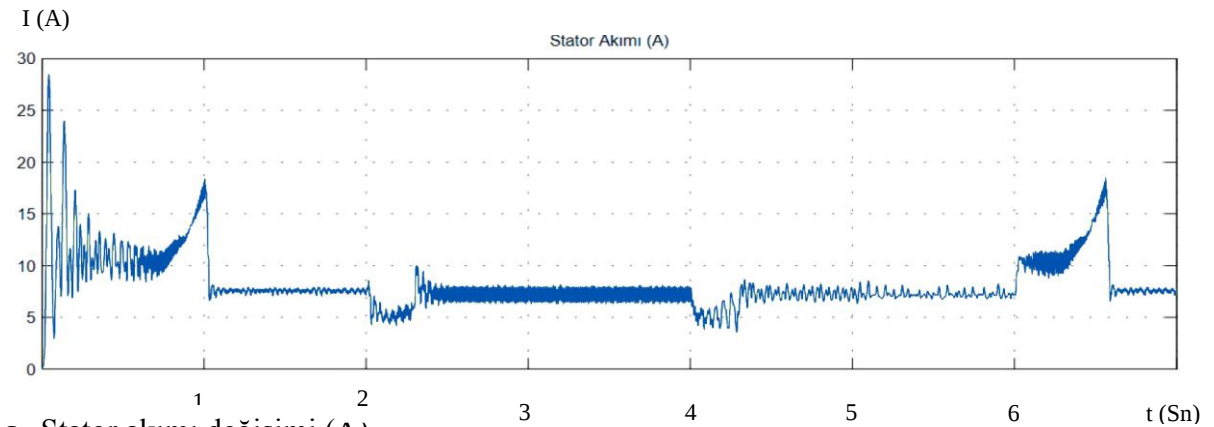
Son olarak, makineye  $T_m=10$ , 20, 30 Nm değişken moment uygulanarak elde edilen sonuçlar Şekil.7.11’de görülmektedir.



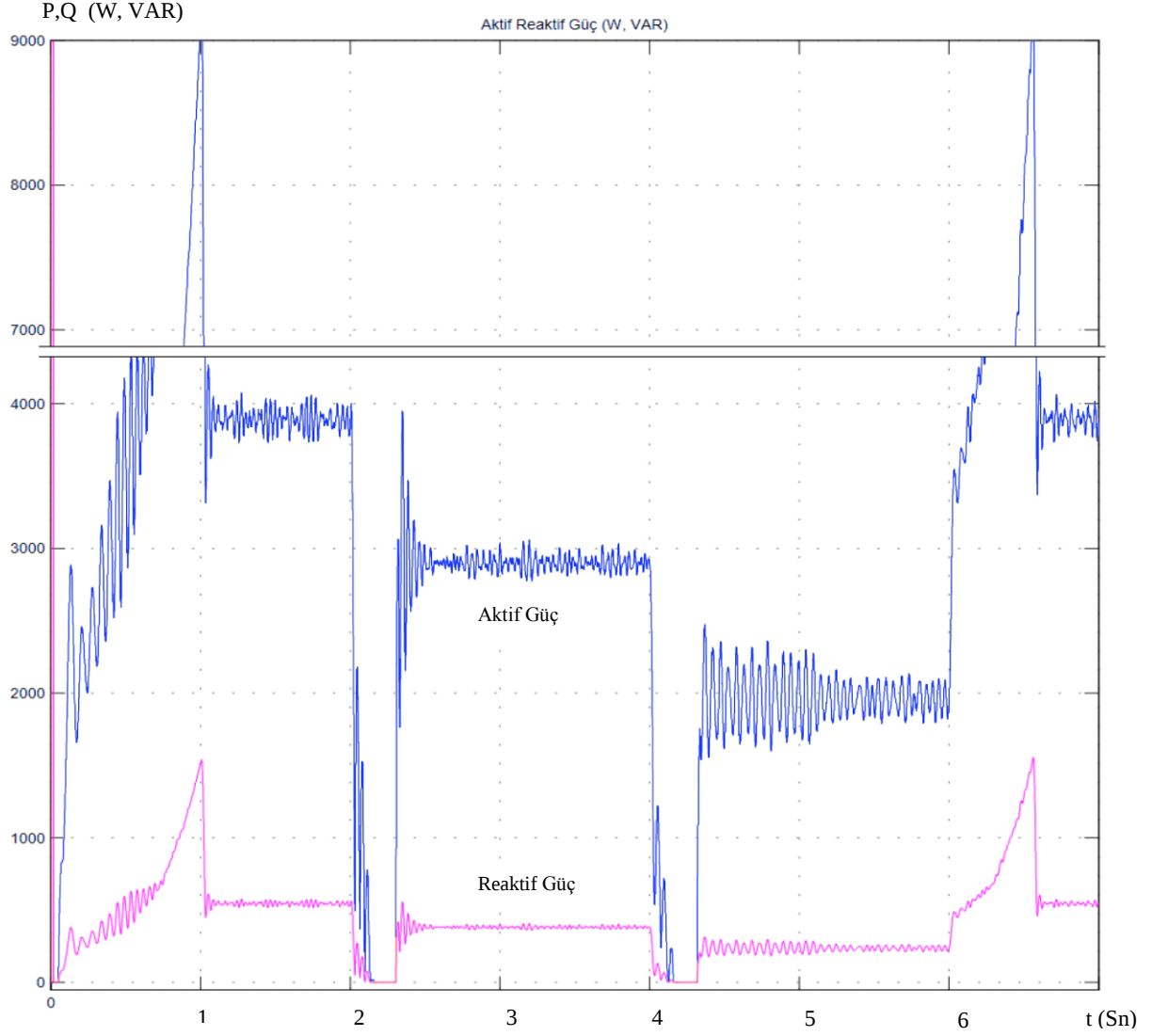
- Moment değişimi (Nm)



- Rotor hızı değişimi (d/dak)



- Stator akımı değişimi (A)



d. Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

Şekil 7.11. İnverter sistemi üzerinden enerjilenme durumunda 0-7 Sn arasında makineye

$$\begin{bmatrix} Ts \\ Tm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 10 \end{bmatrix} \text{ Nm}$$

momentinin uygulanması durumunda

simülasyon sonuçları

- Moment değişimi (Nm)
- Rotor hızı değişimi (d/dak)
- Stator akımı değişimi (A)
- Aktif ve reaktif güç (W, VAR)

Elde edilen simülasyon sonuçları makinenin kararlı hale geçmesinden itibaren daha net fikir verebilmesi maksadıyla Çizelge 7.2’de sunulmuştur.

Çizelge 7.2. Simülasyonu yapılan sistemde ölçüm sonuçları

| Makineye Uygulanan<br>Yük Momenti      | Herhangi Bir<br>Moment<br>Uygulanmadan<br>0 Nm | Sabit<br>Moment<br>Uygulanarak<br>10 Nm | Değişken Moment |            |            |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|------------|------------|
|                                        |                                                |                                         | 10 Nm           | 20 Nm      | 30 Nm      |
| Direk Yol Verme<br>Momenti             | 0,935 Nm                                       | 8,78 Nm                                 | 8,78 Nm         | 17,58 Nm   | 26,25 Nm   |
| Direk Yol Verme<br>Rotor Hızı          | 1794 d/dak                                     | 1737 d/dak                              | 1737 d/dak      | 1679 d/dak | 1613 d/dak |
| Direk Yol Verme<br>Stator/Kaynak Akımı | 4,687 A                                        | 6,907 A                                 | 6,9 A           | 11,1 A     | 15,74 A    |
| Direk Yol Verme<br>Aktif Gücü          | 205 W                                          | 1890 W                                  | 1890 W          | 3637 W     | 5431 W     |
| Direk Yol Verme<br>Reaktif Gücü        | 1774 VAR                                       | 1833 VAR                                | 1833 VAR        | 2093 VAR   | 2582 VAR   |
| Hız Kontrolü ile<br>Moment             | 1,05 Nm                                        | 8,703 Nm-10<br>Nm                       | 10 Nm           | 10 Nm      | 10 Nm      |
| Hız Kontrolü ile Rotor<br>Hızı         | 1799 d/dak                                     | 1735 d/dak-<br>1800 d/dak               | 1800 d/dak      | 1300 d/dak | 800 d/dak  |
| Hız Kontrolü ile<br>Kaynak Akımı       | 1,45 A                                         | 8,7 A-10,3 A                            | 11 A            | 7,6 A      | 5,2 A      |
| Hız Kontrolü ile<br>Stator Akımı       | 4,5 A                                          | 6,9 A-7,6 A                             | 7,5 A           | 7,2 A      | 5,1 A      |
| Hız Kontrolü ile Aktif<br>Gücü         | 500 W                                          | 3350 W-3870<br>W                        | 3870 W          | 2900 W     | 1970 W     |
| Hız Kontrolü ile<br>Reaktif Gücü       | 49 VAR                                         | 452 VAR-<br>545 VAR                     | 545 VAR         | 380 VAR    | 240 VAR    |

## 8. DEĞERLENDİRME SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada ilk olarak pompanın direkt şebeke gerilimi ile yol alması ile inverter üzerinden hızının kontrol edilmesi durumlarının arasındaki parametre farklarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu öncelikle makine miline hiç yük uygulanmadan direkt olarak şebekeden enerjilendirilmiş ve kaynaktan 4,687 A akım çektiği, 1794 d/dak hızla döndüğü görülmüştür. Boşta çalışmada, kaynaktan 205 W aktif güç, 1774 VAR reaktif güç çektiği gözlenmiştir. Aynı yük momenti koşullarında makine hızı inverter ile kontrol edilmiş ve referans hız 1800 d/dak ve  $T_n=0$  Nm iken; makinenin referans hız çevresinde 1799 d/dak hızla döndüğü, kaynaktan 1,45 A, statordan 4,5 A akım çekildiği, 500 W aktif, 49 VAR reaktif güç tüketimi olduğu gözlenmiştir. Elde edilen güç tüketim sonuçları Çizelge 7.3'te sunulmuştur. Bu sonuçlar incelendiğinde, makine milinde yük yok ise, inverter üzerinden hız denetimi yapılmasının enerji tüketiminde az miktarda azalma sağladığı görülmektedir.

Çizelge 7.3. Simülasyonu yapılan sistemde makineye yük momenti uygulanmaması durumunda tüketilen güç miktarları

|                      | Direk Yol Verme Durumu | İnverter İle Hız Denetimi Yapılması Durumu |
|----------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Aktif Güç Tüketimi   | 205 W                  | 500 W                                      |
| Reaktif Güç Tüketimi | 1774 VAR               | 49 VAR                                     |

Bu sistemde kullanılan makinenin anma momenti 11 Nm'dir. Nominal sistem basıncının ise 10 Nm yük momentine denk geldiği kabul edilmiştir. Simülasyonu yapılan sistemde, su hattında daralma veya kesinti olmadığı varsayımının, makineye nominal moment uygulanması olduğu değerlendirilmesi ile makine miline nominal moment değerine yakın olan 10 Nm yük momenti uygulanmıştır. Direkt olarak şebekeden enerjilenen durumda; makinenin 1737 d/dak hızla döndüğü görülmüş ve hızın nominal hızdan düşük olması sonucunda, sistemde oluşan negatif basınç etkisi ile yük momenti 8,78 Nm olmuştur. Bu çalışma durumunda şebekeden 6,907 A akım çekilmiş ve 1890 W aktif, 1833 VAR reaktif güç tüketildiği görülmüştür. Aynı yük momenti koşullarında makine hızı inverter ile kontrol

edilmiş ve referans hız 1800 d/dak ve  $T_n=10$  Nm iken, makinenin yaklaşık 1800 d/dak ile döndüğü, bu devrin etkisi ile makine miline yaklaşık 10 Nm moment uygulandığı, kaynaktan 10,3 A akım çekildiği, 3870 W aktif güç, 545 VAR reaktif güç tükettiği tespit edilmiştir.

Elde edilen güç tüketim sonuçları Çizelge 7.4'te görülmektedir. Bu sonuçlar makine miline nominal yük momentine yakın, sabit 10 Nm yük uygulandığında, inverter üzerinden hız denetimi yapılmasının, aktif ve reaktif güç tüketiminde herhangi bir tasarruf sağlamadığını göstermektedir. Bu sonuçlardan, termostatik vana kullanılmayan ve akışkanın basıncında herhangi bir değişiklik bulunmayan sistemde, hız kontrol sisteminin ilk yatırım maliyeti, bakım ve diğer maliyetleri göz önüne alınarak, maliyet etkin olmadığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.4. Simülasyonu yapılan sistemde makineye 10 Nm sabit moment uygulanması durumunda tüketilen güç miktarları

|                      | Direk Yol Verme Durumu | İnverter İle Hız Denetimi Yapılması Durumu |
|----------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Aktif Güç Tüketimi   | 1890 W                 | 3350 W                                     |
| Reaktif Güç Tüketimi | 1833 VAR               | 452 VAR                                    |

Yapılan bu simülasyonların fiziksel olarak gerçekleştirilen ölçümler ile benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Fiziksel olarak yapılan ölçümde de 1 saatte makinenin direk kaynaktan enerjilenmesi durumunda ortalama 2,24 kWh aktif ve 2,54 kVARh endüktif reaktif enerji tükettiği tespit edilmiştir. Hız kontrolü yapılması durumunda ise makinenin, hızı hız kontrol cihazı tarafından azaltılmadan, nominal hızda çalıştırıldığı ve sistemden bir saatte ortalama 2,4 kWh aktif 1,95 kVARh endüktif reaktif güç çektiği görülmüştür. Bunun sebebinin hız kontrolünde referans hızın nominal hız olarak seçilmesi, direkt olarak kaynaktan enerjilenen makinenin ise yüklendikçe hızının referans hızın altına düşmesi olduğu değerlendirilmiştir. Bu durumda da, enerji tüketiminde herhangi bir tasarruf söz konusu değildir.

Son olarak; sirkülasyon pompalarında hız kontrolü yapılmasının ana gayesi olarak; değerlendirilen makine hızının, değişen sistem basıncı ile orantılı olarak değiştirilmesi ve aşırı basınç yükselmelerini dengelemesi maksadıyla direkt olarak kaynaktan enerjilenen makineye 0-3 sn arasında 10 Nm, 3-5 sn arasında 20 Nm ve 5-7 sn arasında 30 Nm yük momenti uygulanmış, makine kaynaktan 10 Nm yükte 6,9 A, 20 Nm yükte 11,1 A, ve 30 Nm yükte 15,74 A akım çekmiştir. Bu durumda makine yüklendikçe hız düştüğünden, makine hızı sırasıyla 1737-1679-1613 d/dak olmuş ve sistemde sırasıyla 1890-3637-5431 W aktif güç tüketilmiştir. Simülasyonda kullanılan 30 Nm yük momentinin, gerçekte uygulananın çok üzerinde olduğu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte makinenin yüklendikçe daha fazla güç tüketeceği ve bu gücün miktarının izlenmesi bakımından bu yüksek değerlerin uygulanması faydalı olmuştur.

Değişken yük momentinin makineye direkt kaynaktan enerjilenme durumundakine benzer şekilde hız kontrolü yapılan simülasyonda da uygulanması ile, makine yüklendikçe inverterin makine hızını düşürdüğü, nominal momentin üzerinde yüklenmelerde hızın düşmesi sonucu momentin sürekli olarak 10 Nm değerine yakın değerlerde tutulabildiği görülmüştür. Bu durum fiziksel olarak kurulan sistem ile de benzerlik göstermektedir. Makinenin hız kontrolünde; referans hızı, yük momenti ile değişmekte ve moment arttıkça hız otomatik olarak düşürülmektedir. Referans hız, 10 Nm yük momentinde 1800 d/dak olarak belirlenmiş, yükün 20 Nm olması ile hız otomatik olarak yükü 10 Nm'ye düşürecek 1300 d/dak hıza gerilemiştir. Aynı şekilde, yük momenti 30 Nm değerinde uygulanırken referans hız 800 d/dak değerine düşmektedir. Bu durumda enerji tüketim değerleri de hızın düşürülmesi ile azalma göstermiş ve sırasıyla 3870-2900-1970 W aktif güç tüketilirken 545-380-240 VAR reaktif güç tüketilmiştir. Elde edilen güç tüketim sonuçları Çizelge 7.5'te görülmektedir.

Bu sonuçlar incelendiğinde; inverter ile hız denetimi yapılması modunda, makine hızı, yük momentinin yükselmesi durumunda azaltıldığından, enerji tüketimlerinde de ciddi bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda hızın azaltılarak momentin düşürülmemesi makinenin aşırı yük ile yüklenmesinin önüne geçerek arızalanmasını engelleyeceğinden değişken sistem basıncının bulunduğu sistemlerde hız denetimi yapılmasının gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.5. Simülasyonu yapılan sistemde makineye 10-20-30 Nm değişken moment uygulanması durumunda tüketilen güç miktarları

|                         | Direk Yol Verme Durumu<br>Değişken Moment |          |          | İnverter İle Hız Denetimi Yapılması<br>Durumu Değişken Moment |         |         |
|-------------------------|-------------------------------------------|----------|----------|---------------------------------------------------------------|---------|---------|
|                         | 10 Nm                                     | 20 Nm    | 30 Nm    | 10 Nm                                                         | 20 Nm   | 30 Nm   |
| Aktif Güç<br>Tüketimi   | 1890 W                                    | 3637 W   | 5431 W   | 3350 W                                                        | 2900 W  | 1970 W  |
| Reaktif Güç<br>Tüketimi | 1833 VAR                                  | 2093 VAR | 2582 VAR | 452 VAR                                                       | 380 VAR | 240 VAR |

Bununla birlikte sirkülasyon sistemlerinde birden fazla pompa kullanılması durumunda, pompaların ihtiyaç dahilinde devreye alınması senaryosunun günümüz sürücü devreleri ile gerçekleştirilebildiği bilinmekte olup, bu durumda ihtiyaç kadar makinenin devreye alınması ile daha fazla enerji tasarrufu yapılabileceği görülmektedir. Ayrıca ileriki çalışmaların konusu farklı güçteki ve özellikteki makinelerin bulunmaması durumunda mevcut makinelerin optimum güç, verim ve ekonomik değerde çalıştırılması ve değerlendirilmesi olabilir.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: Taşkan, M. (Ocak, 2011). *Akışkanlar Mekaniği*. Fizik, Vol. 1. URL: <http://www.fizikevreni.com/akiskanlarmekanigi.pdf>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2014.
2. Umur, H.(1998). *Akışkanlar Mekaniği*.İstanbul:Vipaş Yayınevi, 17-18
3. Altunsaçlı, A., Alacacı, M. (1999). *Alternatif Akım Elektrik Makineleri ve Laboratuvarı*.(1). İstanbul/T.C.:Bursa Teknik Kitapevi, 3-61.
4. Erol, O. (2007). *Deri İşletmelerinde Su Gereksinimin Karşıllanması: Santrifüj Pompaların Kullanımı ve Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 3-4.
5. Mergen, F.,A., Zorlu S. (2005). *Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler*.(1). İstanbul/T.C.:Birsen Yayın evi, İstanbul, 1-12,122-126,187-193.
6. İnternet: Bernier, M.A., Bourret, B. (12, 1999). Pumping Energy And Variable Frequency Drives. *Ashrae Journal*, Vol. 01. URL: <http://https://www.bookstore.ashrae.biz/>
7. Semizoğlu, H. (2007). *Asenkron Motorun Frekans Çeviricileri ile Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Ens. Mühendislik ve Fen Bilimleri Ens., Kocaeli, 3,23,25-26.
8. İnternet: Yumurtacı, Z., Sarıgül, A. (03, 2011). *Santrifüj Pompalarda Enerji Verimliliği ve Uyg.* M.M.O., Vol. 01. URL: <http://www.mmo.org.tr>, Son Erişim Tarihi: 13.05.2014.
9. Elmas, B. (2006). *Yüksek Frekans Anahtarlama Faz Kontrollü DC-AC invertör*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., İstanbul, 10-11.
10. Yıldız, C. (2008). *Genetik Algoritma Destekli Bulanık Denetim Kullanarak Vektör Esaslı Asenkron Motor Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 7-18.
11. Öztürk, M. (2006). *Uzay Vektör Modülasyonu ile Asenkron Motor Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-22, 34.
12. Bulut, B. (2008). *Üç Fazlı Asenkron Motorların Profibus Ağı Üzerinden Moment ve Hız Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 19-20.
13. Rashid, M., H. (2007). *Power Electronics Handbook*.(1). Burlington/USA:Elsevier Inc., 865-872.
14. Özçira, S. (2007). *Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2-3.
15. Sarioğlu, K., Gökaşan M., Boğosyan S. (2003). *Asenkron Makineler ve Kontrolü*.(1). İstanbul/T.C.:Birsen Yayınevi, 20-24-180-187,189-195,220-269.

16. Phillips, C., Humphreys, L., Kendrick, D. (2011). Preventing Bath Water Scalds: A Cost-Effectiveness Analysis Of Introducing Bath Thermostatic Mixer Valves In Social Housing. *Injury Prevention*, 1(1), 238-244.
17. İnternet: Axin, M., Eriksson, B., Krus, P.(Aralık, 2013). Flow Versus Pressure Control of Pumps İn Mobile Hydraulic Systems. *Institution of Mechanical Engineers*. URL: <http://pii.sagepub.com/content/early/2013/12/26/0959651813512820> Son Erişim Tarihi: 22.05.2014.
18. Choi, C., Young, T.K., Park, C. (2010). Development of Thermostatic Valve for the House Heating System using SMA and Remote Controller Design. *American İnstitute of physics*, 1(1), 197-200.
19. Cheon B., Yeob S. (2010). Control Characteristics and Heating Performance Analysis Of Automatic Thermostatic Valves for Radiant Slab Heating System in Residential Apartments. *Energy*, 1(1), 1615-1624.
20. Önder, H. (2010). *Basamaklı Çok Seviyeli Eviricilerin Asenkron Motorlarda Uygulanmasının Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, iv-v.
21. Sumper, A., Baghini, A. (2012). *Electrical Energy Efficiency Technologies and Applications*.(1). Hoboken, NJ,/ USA :Wiley, 264-265.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CAN, Dursun  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 11.03.1978 Kırşehir  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (555) 488 72 88  
 Faks : 0 (322) 352 13 57/4125  
 e-posta : drsnacan@yahoo.com.



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                      | Mezuniyet tarihi |
|---------------|------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi/E.E.M.B          | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Yıldız Teknik Üniversitesi/ E.M.B. | 2001             |
| Lise          | Kurtuluş Lisesi                    | 1996             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                                        | Görev          |
|-----------|--------------------------------------------|----------------|
| 2012-     | MSB Adana İnşaat Emlak Bölge Başkanlığı    | Kontrol Şefi   |
| 2003-2012 | MSB İstanbul İnşaat Emlak Bölge Başkanlığı | Kontrol Şefi   |
| 2001-2003 | Avrasya Mühendislik Ltd.Şti.               | Saha Mühendisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Yoktur

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, bisiklet sporu

## DİZİN

**A**

Akı · 11,15,22,40,50,53,57,64,67  
Akım · 5,9,12,19,23,25,34,49,57,  
63,67,69,70,99  
Akışkan · 5,7  
Aktif · 20,83,84,89,90,92,99  
Alternatif · 33,101

**B**

Bakır · 27,28,29  
Basınç · 1,5,6, 7,80-82,99  
Boşta · 7,19-23

**D**

Dalga · 5,33,46,47  
Dinamik · 35,49,51,54  
Doğrultucu · 32,33,38

**E**

Enerji · 1,5,6,7,34,79,83,86,99  
Eşdeğer · 14-21,25,26-28,48,49  
Evirici · 33,34,47

**F**

Faktör · 20,4,72  
Fren · 13,33

**G**

Gerilim · 1-14,19,21,25,28,32,35,  
41-48,51,53,57,67,71-  
74,79,84,86  
Güç · 10,17-20,24,26-  
29,31,34,35,  
41,4,45,72,74,89,90,92,95-  
97,99-100

**H**

Hareket · 5,12,2,23,53,80  
Hava ·  
9,11,13,15,16,20,21,42,49, 67  
Hız · 1-103

**I**

Isıtma · 1,3,4,8,

**İ**

İnverter · 1,38,41,46,48,72,79-  
86,92,99  
İş · 1,6,7  
İvme · 6,12

**K**

Kayıp · 21,27  
Kayma · 12,13,17,20,2,23,26,28,  
38-40,45  
Kaynak · 2,41,42,98  
Kısa devre · 1,10-1,16,19,47,50,  
51,81,86,  
Kontrol · 1-103  
Kutup · 11,24,37,38,48,70,86

**M**

Manyetik · 9-16,22-24,35,41,52,  
53  
Mıknatıslanma · 19,20,21  
Model · 51,54,57,58,61,64  
Moment · 1-103

**O**

Omik · 17,21  
Oran · 13,4,51

**P**

Pompa · 1,5-8,45,50,79,80,100

**R**

Radyatör · 3,4  
Reaktans · 24  
Reaktif · 20,21,24,79,83,84,90,92,  
95-100  
Rotor · i-103  
Röle · 81

**S**

Sarım · 14,37  
Senkron · 11-13,20,22,34,37-  
4,48,50,57,70  
Sensör · 31  
Simülasyon · 31,84, 86,88-  
90,92,95,9,99  
Skaler · 1,43,45,49  
Stator · 1-103  
Sürücü · 31,47,48,50,71,100

**Ş**

Şebeke · 5,20,38,79,82-84,9

**T**

Tahrik · 1,3,13,81  
Tekhat · 79,81  
Termostatik · 1,4,5,80

**V**

Vana · 1,3,4,5,80,82,83  
Ventilasyon · 4  
Vektör · 1-103,  
Verim · 8,26,27,29,77,80,101



*GAZİ GELECEKTİR..*