



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FAYDALI FRENLEME SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Turhan ALAGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı

Haziran-2013
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FAYDALI FRENLEME SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Turhan ALAGÖZ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Abdullah ÜRKMEZ

2013, 140 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Osman BİLGİN
Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ
Doç. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

Ülkemizde büyük şehirlerde ki trafik sorunları, fosil artığı yakıtlardan kaynaklanan çevre sorunları ve bunlarla bağlantılı olan ekonomik sıkıntılar büyük bir sorun haline geldi. Bu sorunu çözmek için önümüzdeki senelerde metro, hafif raylı sistem ve tramvay gibi raylı ulaşım sistemlerinin giderek artan bir yoğunlukla toplu taşımacılıkta kullanılması zorunlu hale gelmektedir. İlk yatırım maliyetleri son derece yüksek olan raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği çalışmaları büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda faydalı frenleme enerjisinin elde edilmesi ve hattaki diğer vasıtalarda kullanılmasını inceleyen bir eğitim seti tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu sette vasıtanın motoru olarak raylı sistemlerde en çok kullanılan motor çeşitleri olan doğru akım motoru ve 3 fazlı asenkron motor tercih edilmiştir. Doğru akım motorunun sürücü devresi PWM tekniği kullanılarak PIC 16F628A mikrodenetleyici ile yapılmıştır. 3 Fazlı asenkron motorun sürücü devresi ise sinüs-PWM kullanılarak V/f kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Gerekli sinyaller de MC3PHAC entegresi tarafından üretilmiştir. Bu çalışmada elektrikli araç frenlemeye geçtiğinde uygun sürme tekniği sayesinde tahrik motoru hattan ayrılmadan generatör olarak çalışmakta ve ürettiği enerjiyi aynı hattaki başka bir vasıta kullanmaktadır. Kullanılan bu faydalı frenleme enerjisi incelendiğinde, işletme maliyetlerini önemli oranda azaltabilmesi yanında önemli enerji tasarrufu sağlayacağı sonucuna da varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eğitim seti, Elektrikli raylı ulaşım, Faydalı frenleme, İnverter, Generatör, Tahrik sistemleri.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGNING AND REALIZATION OF REGENERATİVE BRAKING SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES

Turhan ALAGÖZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah ÜRKMEZ

2013, 140 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Osman BİLGİN
Assoc. Prof. Dr. Abdullah ÜRKMEZ
Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

Unbearable traffic problems in the large cities of our country, environmental problems resulting from fossil fuels, and economic problems related with them have recently been a big challenge. Accordingly, with the purpose of finding a solution to these problems, it has been an obligation to make an increasing use of such rail transportation systems as metro, tram and light rail systems in public transport in the years to come. In rail transportation systems with high initial investment costs, studies of energy productivity carry utmost importance.

In this study, an education set was designed and implemented with the purpose of acquiring regenerative braking energy in hybrid vehicles and its use in the other vehicles on the line. In this set, the most widely used motor types in rail systems, i.e. d.c. motor and three-phase asynchronous motor were preferred. Driver circuit of d.c. motor was formed with PIC 16F628A microcontroller by using PWM technique. Driver circuit of three-phase asynchronous motor was produced by v/f control process with the use of sinus-PWM. The necessary signals were also produced by mc3phac integrated. In this study, when the hybrid vehicle starts breaking, thanks to the appropritate driving technique, propulsion motor funtions as a generator without leaving the line and another vehicle on the same line uses the energy it has produced. As a result of the scrutiny into this regenerative braking energy used, it was concluded that it decreases operating costs considerably and also helps to save energy.

Keywords: Education set, Electric rail transport, Regenerative braking, Inverter, Generator, propulsion systems.

ÖNSÖZ

Çalışmamda bana her zaman destek veren, bilgilerini, yardımlarını ve tecrübesini benden esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ'e, Selçuk Üniversitesi Ilgın Meslek Yüksek Okulundaki mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ediyorum.

Bilhassa kendilerine ayırmam gereken zamandan fedakârlık gösterip maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşime, oğullarım Mustafacan ve Efekan'a en kalbî teşekkürlerimi sunarım.

Turhan ALAGÖZ
KONYA-2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

3. FAYDALI FRENLEME İLE ENERJİNİN GERİ KAZANIMI **8**

3.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Genel Yapısı 8
3.1.1. Cer sistemleri 9
3.1.2 Yardımcı güç sistemleri 10
3.2. Faydalı Frenleme ve Çeşitleri 11
3.2.1. Faydalı frenleme enerjisinin araç üzerinde depolanması 12
3.2.2. Faydalı frenleme enerjisinin hatta verilmesi 15
3.2.3. Faydalı frenleme enerjisinin şehir şebekesine verilmesi 15
3.2.4. Faydalı frenleme enerjisinin dirençlerle ısı enerjisine dönüştürülmesi 16
3.3. Elektrikli Araçlar İçin Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması 16
3.3.1. A.A. Raylı işletmelerinde doğru akım motoru ile tahrik sistemleri 17
3.3.1.1. Diyotlu tahrik sistemi 17
3.3.1.2. Tristörlü tahrik sistemi 19
3.3.2. D.A. Raylı işletmelerinde doğru akım motoru ile tahrik sistemleri 22
3.3.2.1. Direk motor tahrik sistemi 22
3.3.2.1. Tristörlü tahrik sistemi 23
3.3.3. A.A. Raylı işletmelerinde 3 fazlı ASM ile tahrik sistemleri 24
3.3.4. D.A. Raylı işletmelerinde 3 fazlı ASM ile tahrik sistemleri 26
3.4. Asenkron Makinenin Motor ve Generatör Olarak Çalışması 27
3.4.1 Kendinden (şebekeden) uyartımlı asenkron generatör 28
3.4.2. Kondansatör Uyartımlı Asenkron Generatör 31
3.5. Doğru Akım Makinesinin Motor ve Generatör Olarak Çalışması 33

4.ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ **36**

4.1. AC/DC Dönüştürücü 36
4.1.1. Bir fazlı yarım dalga doğrultucu 36
4.1.2. Bir fazlı tam dalga doğrultucu 37
4.1.2.1. Kontrolsüz tam dalga doğrultucu 37
4.1.2.2. Yarı kontrollü tam dalga doğrultucu 38
4.1.2.3. Tam kontrollü tam dalga doğrultucu 40
4.1.3. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu 41

4.1.4. Üç fazlı tam dalga doğrultucu 42
4.1.4.1. Kontrolsüz tam dalga doğrultucu 42
4.1.4.2. Yarı kontrollü tam dalga doğrultucu 43
4.1.4.3. Tam kontrollü tam dalga doğrultucu 45
4.2. DC/AC Dönüştürücü 47
4.2.1. Push-Pull Dönüştürücüler 47
4.2.2. Yarı köprü (Half-Bridge) dönüştürücüler 48
4.2.3. Köprü (Full-Bridge) dönüştürücüler 49
4.2.4. Üç fazlı DC/AC dönüştürücüler 50
4.3. DC/DC Dönüştürücü 55
4.3.1. Gerilim azaltan (Buck) dönüştürücüler 55
4.3.2. Gerilim artıran (Boost) dönüştürücüler 56
4.3.3. Yön çeviren (Buck-Boost) dönüştürücüler 58
4.4. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) 59
4.4.1. Tek pals genlik modülasyonu 60
4.4.2. Çoklu pals genlik modülasyonu 61
4.4.3. Sinüsoidal pals genlik modülasyonu 62
4.4.4. Modifiye sinüsoidal pals genlik modülasyonu 63
4.4.5. Üç fazlı sinüsoidal PWM 64
4.5. İnvertör İle Yapılan Asenkron Motorların Hız Kontrolü 65
4.5.1. Giriş 66
4.5.2. V/f kontrol 67
4.5.3. Vektör kontrol 68
4.5.3.1. Kapalı çevrim vektör kontrol 70
4.5.3.2. Açık çevrim vektör kontrol 71
4.6. Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolü 72
4.6.1. Endüvi devresi direncinin değiştirilmesi ile hız kontrolü 72
4.6.2. Uyarma akımının değiştirilmesi ile hız kontrolü 73
4.6.3. Motor terminal geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü 73

5. FAYDALI FRENLEME SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ 76

5.1. Tasarımın Amacı ve Faydalı Frenleme Sisteminin Çalışma Prensibi 76
5.2. Tasarlanan Faydalı Frenleme Sisteminin Kısımları 77
5.2.1. Üç Fazlı Asenkron Makine Sürücü Devresi 78
5.2.1.1. Giriş 78
5.2.1.2. Besleme katı 79
5.2.1.3. Kontrol katı 81
5.2.1.4. Güç Sürücü (İnverter) katı 83
5.2.2. PWM Tekniği ile yapılan Doğru Akım Makinesi Sürücü Devresi 87
5.2.2.1. Giriş 87
5.2.2.2. Besleme katı 87
5.2.2.3. Kontrol ve sürme katı 89
5.3. Faydalı Frenlemenin Ölçüm Yöntemi 90
5.3.1. Giriş 90
5.3.2. Araçta doğru akım motoru kullanıldığında ki ölçüm yöntemi 91
5.3.2.1. İvmelenme modunda çalışma ilkesi 92
5.3.2.2. Frenlenme modunda çalışma ilkesi 93
5.3.3. Araçta 3 fazlı ASM kullanıldığında ki ölçüm yöntemi 94

5.4. Deneysel Sonuçlar 95
5.4.1. Araçta doğru akım motoru kullanıldığında faydalı frenleme uygulaması 95
5.4.2. Araçta 3 fazlı ASM kullanıldığında faydalı frenleme uygulaması 100

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 104

6.1. Sonuçlar 104
6.2. Öneriler 105

KAYNAKLAR 107

EKLER 110

ÖZGEÇMİŞ 129

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_f : Taşıt ön alanı (m^2)
C : Kapasite (Farad)
C_d : Hava sürtünme katsayısı
Ea : Endüvi gerilimi (V)
f : Frekans (Hz)
fm : Referans dalga frekansı (Hz)
f_r : Sürtünme katsayısı
fs : Üçgen taşıyıcı dalga frekansı (Hz)
g : Yer çekimi kuvveti (m/s^2)
I : Akım (A)
I_f : Uyarma akımı (A)
L : Endüktans (Henry)
m : Taşıt külesi (kg)
n : Devir sayısı (d/d)
n_s : Senkron devir sayısı (d/d)
N : Nötr
p : Çift kutup sayısı
P_a : Hava kütlesel yoğunluğu (kg/m^3)
R : Direnç (Ω)
Ra : Endüvi devresi direnci (Ω)
s : Kayma
t_{on} : İletim zaman aralığı (s)
X_c : Kapasitif reaktans (Ω)
v : Çizgisel hız (m/s)
V : Gerilim (V)
δ : Dairesel atalet faktörü
ω : Açısal hız (rad/s)
ϕ : Manyetik akı (Wb)
ϕ_f : Uyartım akısı
K_1 : Endüvi sargısının yapılışına bağlı olan katsayı

Kısaltmalar

GWh	: Gigavatsaat
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
km	: Kilometre
kWh	: Kilowattsaat
AC	: Alternatif gerilim
DC	: Doğru gerilim
IZT	: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
KE	: Kinetik enerji
TAS	: Trenler arası süre
EDS	: Enerji depolama sistemleri
LRV	: Light Rail Vehicle (Hafif raylı araç)
SMES	: Superconductive Magnet Energy Storage (Süper iletken manyetik enerji depolayıcıları)
ASM	: Asenkron motor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör)
SPWM	: Sinusoidal PWM (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu)
DSP	: Dijital Signal Procesing (Sayısal sinyal işlemciler)
IGBT	: Yalıtılmış Kapılı Bipolar Transistör
s	: Saniye

1. GİRİŞ

Ülkelerin ve kentlerin yaşamında vazgeçilmez bir olgu olan ulaşımın amacı, insanları bir yerden başka bir yere en kısa sürede en az maliyet ile en güvenli ve rahat bir şekilde ulaştırmaktır. Kentleşme yani kentteki insanların sayılarının artması ile birlikte ulaşım sorunu ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde büyük şehirlerde dayanılmaz hale gelen trafik sorunları, fosil artığı yakıtlardan kaynaklanan çevre sorunları ve bunlarla bağlantılı olan ekonomik sorunlar önümüzdeki senelerde metro, hafif raylı sistem ve tramvay gibi raylı ulaşım sistemlerinin giderek artan bir yoğunlukla toplu taşımacılıkta kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Gelişmiş ülkelere bakıldığında raylı ulaşım sistemlerinin toplu taşımacılıkta ana unsur olduğu, diğer taşıma sistemlerinin ise hizmeti tamamlayıcı yardımcı unsurlar olduğu görülmektedir. Ülkemizde gittikçe artan bir hızda elektrikli ulaşım sistemleri büyük şehirlerimizde kentsel ulaşım sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmektedir. Ülkemizde İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Adana, Konya, Samsun, Antalya, Gaziantep, Eskişehir ve Kayseri gibi kentlerimizde bu tür sistemler kullanılmakta, bazı şehirlerimizde ise çalışmalar çeşitli aşamalarda devam etmektedir.

Raylı ulaşım sistemleri araç ve inşaat maliyetleri açısından pahalı, elektrik enerjisi tüketimi yüksek olan sistemlerdir. Yatırım maliyetlerine metro sistemlerindeki tünel inşaat maliyeti de eklendiğinde toplam maliyet oldukça yükselmekte ve projenin geri dönüş süresini uzatmaktadır. Yatırım kararlarının daha kolay alınabilmesi için proje geri dönüş süresinin kısa olması önemlidir. Dolayısıyla proje geri dönüş süresini kısaltıcı yöntemler önem kazanmaktadır. İşletme maliyetlerinde sağlanacak tasarruflar, bu imkânı, elde edilecek tasarruf oranında artırabilecektir. İşletme maliyetlerini oluşturan en önemli kalemlerden biri ise elektrik enerji tüketimidir. Araştırmalar göstermiştir ki, raylı sistem hatları uzun olan şehirlerdeki işletmeci firmalar, tükettikleri enerji açısından o şehrin elektrik dağıtım şirketinin en büyük müşterileridir. Bu bakımdan, raylı sistem işletmecileri tarafından enerji ile yapılacak optimizasyon çalışmaları, çok büyük oranlarda enerji tasarrufuna sebep olacaktır. Bu sayede, hem işletme için daha kârlı olacaktır, hem de küresel ısınmanın etkilerinin daha çok hissedildiği günümüzde çevreye büyük fayda sağlayacaktır.

Günümüzde küresel ısınmanın etkisi ile daha da fazla önem kazanan enerji tasarrufu, kamuya hizmet veren sistemlerde uygulanması zorunlu bir hal almaktadır. Bu bağlamda, raylı sistem altyapısı gelişmiş olan metropollerde raylı sistem için kullanılan enerjinin de verimli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir. Londra metrosunun

2006 yılı itibari ile 1173 GWh enerji tüketerek Londra'nın en büyük enerji tüketicisi konumunda olması raylı sistemlerde enerji tüketim oranının ne kadar büyük olduğunu bize göstermektedir.

Raylı sistemlerde enerji tasarrufu için pek çok uygulama hayata geçirilmiştir. Bu uygulamalardan en önemli olanı ortam şartları sağlanması koşulu ile şüphesiz faydalı frenlemedir. Faydalı frenlemede raylı sistem aracının motorlarının, frenleme durumunda generatör olarak çalışması nedeniyle vasıtanın kinetik enerjisi elektrik enerjisine tekrar çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, enerji iletim hatları yardımı ile (katener, rijit katener, üçüncü ray v.b.) sisteme geri besleme ile tekrar verilir. Bu olay faydalı frenleme olarak bilinir ve çoğunlukla raylı sistemlerde kullanılır. Bu enerjinin kullanılmayan kısmı araçlar üzerinde var olan frenleme dirençleri üzerinde harcanmaktadır. Faydalı frenleme enerjisinin kullanım oranı birçok parametreye bağlıdır. Ana parametrelerden biri olarak işletme sıklığı ön plana çıkmaktadır.

Raylı sistemi besleme merkezlerinde ki ekipmanlar genel olarak kontrolsüz doğrultucu tipinde olup tek yönlü iletime izin verirler. Bunun anlamı trenlerin frenleme anında elektrik enerjisine dönüşen kinetik enerjilerinin ana şebekeye geri verilememesi demektir. Bu açığa çıkan frenleme enerjisi hatta bulunan diğer trenler tarafından kullanılır veya frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülerek harcanır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki teorik olarak hatta kullanılan toplam enerjinin tren işletme sıklığına bağlı olarak yaklaşık %40'ı frenleme enerjisinin geri kazanımından sağlanabilir. Trenlerin 3 dakika ve altındaki sıklıkta işletildiği hatlarda frenleme esnasında üretilen enerjinin neredeyse tamamının (%85 - %95) hattaki diğer trenler tarafından kullanılmakta olduğu öngörülmektedir.

Faydalı frenlemenin kullanılması, mekanik frenlerin bakım ve yıpranmasını azaltır. Hatta mekanik frenlerin karmaşıklığını, maliyetini ve ağırlığını da azaltabilir. Faydalı frenleme sürtünmesiz olduğu için parçalarda yıpranma olmayacaktır.

Bu çalışma da raylı ulaşım sistemlerinde enerji tasarrufuna yönelik yapılan frenleme enerjisinin elde edilmesi ve hattaki diğer vasıtalar tarafından kullanılmasını incelemek için bir eğitim seti tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan eğitim setinde 3 fazlı asenkron motorun ve yabancı uyartımlı doğru akım motorunun milleri esnek bir kavrama ile birbirine akuple edilmiştir. Her iki motor içinde hız kontrol devreleri tasarlanmıştır. Bu motorlardan biri vasıtanın tahrik motoru olduğunda diğer motor frenleme süresince hızını sıfıra doğru yavaşlatır. Böylece vasıtanın kütlesinden dolayı hızı yavaş yavaş azalarak, belirli bir süre sonra durma olayı gerçekleşmiş olur.

Birinci bölümde, elektrikli araçlarda faydalı frenleme sistemine genel bir giriş yapılarak tez çalışmasının amacı ve önemi verilmiştir.

İkinci bölümde, tez çalışmasında konu edinilen faydalı frenleme sisteminin tasarımına ilişkin olan önceki çalışmalar ele alınmıştır. Bu çalışmaların amaçlarının ne olduğu, çalışmalarda izlenen yöntemler ve alınan sonuçlar belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde, raylı ulaşım sistemlerinin genel yapısı, faydalı frenleme çeşitleri, elektrikli araçlar için tahrik sistemlerinin sınıflandırılması, asenkron ve doğru akım makinelerinin motor ve generatör olarak çalışması hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, elektrikli araçlarda kullanılan güç dönüşüm sistemlerini oluşturan temel kısımlar incelenmiştir. Bu kısımlar dönüştürücüler, darbe genişlik modülasyonu (PWM), asenkron ve doğru akım motorların hız kontrolleridir.

Beşinci bölümde faydalı frenleme sisteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Gerçekleştirilen sisteme ilişkin devre şemaları ve çalışma prensipleri ayrıntılı olarak açıklanmış, elde edilen sonuçlar çizelgeler ile sunulmuştur.

Altıncı bölümde bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve konuyla ilgili çalışma yapmak isteyebilecek araştırmacılar için öneriler yer almaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Flinders ve ark. (1995), tarafından yapılan çalışmada, Avustralya Queensland' da ki raylı sistemde PWM teknolojisiyle mevcut faz kontrollü DC motor sürücüleri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda faydalı frenlemenin, dinamik frenlemenin yerine kullanımının önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayacağı kanaatine varılmıştır. Ayrıca bu iki topolojileri dinamik sistem simülasyon paketi "Simulink" kullanılarak modellenmiştir.

Bombardier (2003), tarafından yapılan çalışmada, Mitrac Energy Saver adı verilen ve enerji depolama birimi olarak EDLC kullanılan Almanya Manheim'de bir prototip araç geliştirilmiştir.

Alstom (2006), tarafından yapılan çalışmada, volan enerji depolama birimiyle Hollanda Rotterdam'da 750 Volt elektrikli hat üzerinde 2004'den beri uygulanmakta olan bir prototip geliştirilmiştir.

Düşmez (2011), tarafından yapılan çalışmada, faydalı frenleme enerjisinin daha iyi geri kazanımı için daha başarılı bir güç dönüştürme topolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Güncel çalışmalara bakıldığında, enerji depolama ünitelerinin çıkışlarında yaygın olarak yarım köprü dönüştürücünün kullanıldığı görülmektedir. Geliştirilecek bu topolojiyle, bir elektrikli taşıtın düşük hızlarda da faydalı frenleme enerjisini geri kazanılabilmesi hedeflenmektedir. Önerilen topolojinin frenleme enerjisi kazanımındaki üstünlüğünü doğrulamak amacıyla her iki dönüştürücü içinde 1kW'lık prototipler tasarlanmış olup, bu dönüştürücülere normalize edilmiş ECE-15'i de içeren üç farklı sürüş çevrimi uygulanarak, dönüştürücülerin frenleme enerjisi kazanım performansları irdelenmiştir.

Baran (2009), tarafından yapılan çalışmada, İstanbul'da İstanbul Ulaşım A.Ş. (İUAŞ) tarafından işletilen raylı sistem hatlarındaki enerji verileri ve enerji tüketim seviyeleri gösterilmiştir. Bunun dışında, faydalı frenlemeden elde edilecek frenleme enerjisinin oluşumu ile ilgili, bölgesel elektrik dağıtım firmasından alınan enerjinin istasyon içerisindeki elektrik ekipmanlarından enerji iletim sistemlerine ve buradan da İstanbul metrosunda 2009 yılı itibari ile kullanımına başlanan Hyundai-Rotem metro araçlarındaki motorlarda frenleme yapana kadar izlediği yol ve bu enerjinin faydalı enerjiye dönüşümü gösterilmiştir. Ayrıca, şehir içi raylı sistem işletmeciliğinde enerji tasarrufuna etki eden diğer yöntemler incelenmiş olup, sistemdeki hangi parametrelerin faydalı frenleme enerjisini nasıl etkilediği detaylı bir şekilde savunulmuştur. Son olarak,

faydalı frenleme enerjisine etki eden parametrelerin raylı sistem simülasyon yazılımı ile analiz edilip sonuçları değerlendirilmiştir.

Gemici (2006), tarafından yapılan çalışmada, enerji depolama sistemlerinin raylı ulaşım tesislerine uygulanabilirliği incelenmiştir. Ayrıca İstanbul kent içi ulaşımının önemli bir parçası olan LRT sistemi araçlarının faydalı enerji geri kazanım potansiyellerinin de incelenmesi yapılmıştır. Bu amaçla, LRT araçları tahrik yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Neticede elektrikli hafif raylı sistemlere uygulanacak enerji depolama sistemlerinin işletme maliyetlerini önemli oranda azaltabilmesi yanında yatırım maliyetlerinde de önemli tasarruflar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Dal ve Söyler (2007), tarafından yapılan çalışmada, elektrik enerjisi tüketiminin önemli bir kısmını oluşturduğu raylı ulaşım sistemlerinde enerjinin tasarrufu ve verimliliği incelenmiştir. Uygun enerji depolama yöntemi olarak ise süperkapasitör ile enerji depolama sistemi seçilmiş ve bu yöntemin avantajları-dezavantajları üzerine çalışılmıştır.

Brenna ve ark. (2007), tarafından yapılan çalışmada, raylı araçların çalışma döngüsünü karakterize eden, frenleme esnasında araçlarda ortaya çıkan enerjiyi kullanmak için metro işletmelerindeki elektrik tasarrufuna ve süperkapasitörler gibi mevcut gelişmekte olan yeni enerji depolama teknolojilerine odaklanılmıştır.

Altındemir (2008), tarafından yapılan çalışmada, bir hafif ticari hibrid elektrikli taşıtda, hidrolik, rejeneratif ve reostatik frenlemeler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Hidrolik fren devresi ile ilgili tüm hesaplar yapıldıktan sonra rejeneratif frenlemenin başarıyla yapılabilmesi ve rejeneratif frenden hidrolik frene başarıyla geçilebilmesi için iki farklı çözüm önerilmiştir: Yabancı Basınçlı Çözüm ve Reostatik Çözüm. Bu çözümlerde kullanılan elemanlar (pompa, akümlatör, direnç) hidrolik fren devresine uyumlu olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Daha sonra bu çözümler dört farklı frenleme modunda denenmiştir. Bu modlar, rejeneratif fren sırasında sürücünün ayağını frenden çektiği, rejeneratif fren sırasında akünün dolduğu, rejeneratif fren sırasında elektrik motorunun tork kapasitesinin yetmediği ve rejeneratif fren sırasında rejeneratif frenleme sınırları içerisinde olmayan bir frenleme ivmesi istendiği durumlardan oluşur. Yabancı Basınçlı ve Reostatik çözümlerin farklı çalışma modlarında nasıl davrandığı ayrıntılı bir şekilde anlatılmış, çözümlerin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

Bozkurt (2006), tarafından yapılan çalışmada, 3 fazlı motor ve generatör test metotları hem ulusal, hem de uluslararası standartlar açısından incelenmiş, Avrupa standart'ı IEC 34-2 3 fazlı asenkron motor test metotlarından dolaylı metot uygulaması

yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarında asenkron motor etiket değerleri ile asenkron generatör çalışmada elde edilen parametreler karşılaştırıldığında, güç ve verim açısından olumlu sonular elde edilmiştir.

Bae ve ark. (2007), tarafından yapılan çalışmada, Güney Kore Seul 2 nolu hat ve Gwangju 1 nolu hattaki iki istasyondaki faydalı enerjinin sonuçları incelenmiştir. Ayrıca, diğer hatlarda tüketilen faydalı enerji miktarı ve faydalı enerjinin yeniden kullanımıyla sağlanan ekonomik tasarruf hesaplanmıştır.

Demirci ve ark. (2008), tarafından yapılan çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinin önemi vurgulanıp, şebekeden bağımsız rüzgar enerjisi sistemlerinde kullanılması amaçlanan sığaç uyartımlı asenkron generatörün; programlanabilir mantık denetleyicili denetim sistemi yardımı ile elektrik enerjisi üretimine yönelik bir dizge verilmiştir. Çalışmada uygun rüzgâr hızlarında maksimum güç elde edilebilmesi için uygun sığaç değerleri deneysel çalışmalarla belirlenmiş, elde edilen güç uygun değerlikli yüklere aktarılmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler ile deney düzeneğinin sanal bir modeli, Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) YSA ile çıkarılmış, modelin test sonuçları verilen grafiklerle açıklanmıştır.

Park ve ark. (2007), tarafından yapılan çalışmada, faydalı enerjiden yararlanmak için elektrikli tren sisteminde kullanılan etkili bir çift yönlü DC/DC konverter kontrol algoritması tasarlamıştır. Prototip modelinin gerçekleştirilmesi dahilinde çift yönlü DC/DC konverterin verimliliği doğrulanmıştır.

L Yu ve ark. (2010), tarafından yapılan çalışmada, DC demir yolu sisteminde faydalı frenlemeye dair bir simülasyon yapılmıştır. PWM yöntemi kullanılarak yapılan DC-AC dönüştürücülü DC lokomotiv modeli Çin Pekin 5 numaralı metro hattına uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada faydalı frenleme akımlarının hesaplaması yapılmıştır. Yapılan hesaplama simülasyon programının doğruluğunu kanıtlamıştır.

Latkovskis ve Grigans (2008), tarafından yapılan çalışmada, şehir içi elektrikli ulaşım ağında kullanılmayan faydalı frenleme enerjisinin rezervlerini tahmin etmiştir. Kullanılmayan faydalı enerji miktarı Letonya Riga'daki iki elektrikli ulaşım ağında, T3A tramvayları için tanımlanan enerji ölçüm tekniğiyle hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, hem mevcut durumun, hem de faydalı frenleme enerjisi kullanımının ekonomik açıdan hesaplanması yapılmıştır.

Jisheng ve Xiaojing (2008), tarafından yapılan çalışmada, enerji depolama unsuru olarak ultrakapasitör kullanılan yeni bir faydalı frenleme sistemi sunmuştur. Sistemde ultra-kapasitör ve DC hat arasında çift yönlü konverter kullanılmıştır. Sonuç

olarak, hafif raylı araçlarda faydalı frenleme sistemini konvansiyonel frenleme sistemi olarak kullanımını uygun görmüştür. Ayrıca bu sistemin hafif raylı araçlarda enerji tüketimini azalttığı da tespit edilmiştir.

Nasri ve ark. (2010), tarafından yapılan çalışmada, elektrikli trenlerin faydalı frenlemeden en verimli şekilde yararlanması amacıyla tren seferlerinin optimize edilmiş tarifeleri sunulmuştur. Bu bağlamda örnek bir metro sistemi simüle edilmiş ve optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma kullanılmıştır.

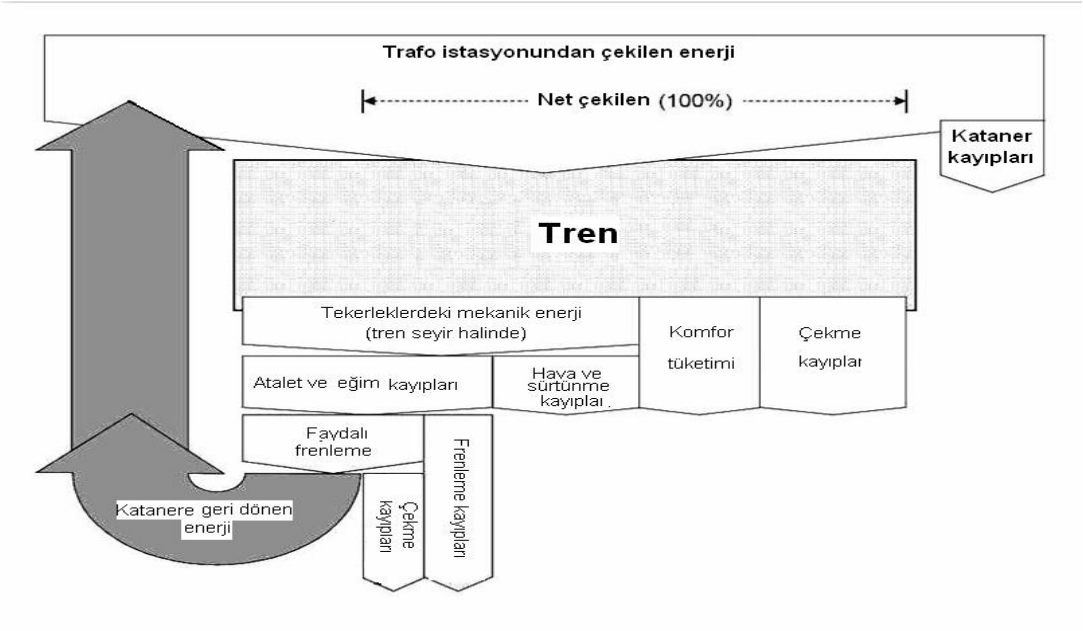
Tseng ve Shiao (2012), tarafından yapılan çalışmada, Tayvan Taipei hızlı raylı sistemlerinde kullanılan EMU faydalı ve faydasız frenleme modelleri arasındaki enerji değişimlerini kıyaslamıştır. Sonuç olarak ise ülkedeki diğer metro yetkililerine EMU'nun faydalı enerji özelliğine daha fazla ağırlık vermeleri gerektiği önerilmiştir.

Dominguez ve ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada, istasyonlarda kullanılan enerjiyi minimize etmek amacıyla faydalı frenlemeyle elde edilen enerjiyi dikkate alarak metroların optimal ATO (Otomatik Tren İşletim Sistemleri) hız profilleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada ayrıca tren tarafından elde edilen enerjiyi tahmin etmek için kullanılan ağ modelinin yanı sıra on-board enerji depolama aygıtına sahip tren modeli de sunulmuştur. Farklı senaryolarla bu ATO hız profillerine en uygun tasarım tahmin edilmektedir.

Shen ve ark. (2013), tarafından yapılan çalışmada, yeni bir dizi konfigürasyon yöntemi sunulmuştur. Sonuç olarak önerilen P&C metoduyla süper kapasitör dizisi (OSA)'nın emilen frenleme enerjisinin etkili enerji iyileştirilmesi yapabileceği aktarılmıştır.

3. FAYDALI FRENLEME İLE ENERJİNİN GERİ KAZANIMI

Bir trenin hızlanabilmesi veya rampa çıkabilmesi için enerji kullanması gerekir. Şekil 3.1'de bir yolcu treninde trafo istasyonundan çekilen enerjinin dağılımı gösterilmiştir. Araç sebekeden alacağı enerjiyi kütlesinde kinetik ve potansiyel enerji olarak depolar. Elektrik motoru ile tahrik edilen araçlarda bu enerjinin büyük bir miktarı aracın frenlemesi anında motorun generator olarak çalıştırılması ile tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu yöntem faydalı frenleme olarak bilinmektir (IZT, 2003).



Şekil 3.1. Bir yolcu treninde kullanılan enerjinin dağılımı

3.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Genel Yapısı

Kentsel raylı ulaşım sistemlerini yapısal olarak sabit tesisler ve araçlar olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Sabit tesisler yolcu ve besleme istasyonlarını, rayları, kataner ve/veya 3. ray hattını, atölye ve merkezi kontrol binasını kapsamaktadır. Elektriksel olarak raylı ulaşım sistemleri 4 ana bölümden oluşur:

1. Cer Sistemleri
2. Yardımcı Güç Sistemleri
3. Tahrik Sistemi
4. Kontrol ve Denetleme Sistemleri

Yukarıda bahsi geçen bölümler birçok alt bölümden oluşmaktadır ve çalışma prensiplerini bilmek, sistemin temel yapısını ve işleyişini kavramak açısından önemlidir. Cer sistemleri, yardımcı güç sistemleri ve tahrik sistemleri bu bölümde verilmiş, kontrol ve denetleme sistemleri ileriki bölümlerde açıklanmıştır.

3.1.1. Cer sistemleri

Kataner olarak isimlendirilen havai hat ve 3. ray olmak üzere raylı ulaşım sistemlerinde besleme iki farklı yöntemle yapılır.

Kataner sistemi, demiryolu üzerine asılmış bulunan bir temas hattı, yol ekseni üzerinde hassas bir şekilde yatay olarak tutulan taşıyıcı bir kablo sisteminden oluşur. Kataner sistemi portör (konsolların ve izolatörlerin bağlandığı direkler üzerindeki esas taşıyıcı kablo), pandül (seyir telinin portöre bağlanmasını sağlayan kısım) ve seyir telinden oluşur. Seyir teli gerek elektriksel gerekse mekaniksel bir takım özelliklere sahip olmalıdır. Yani yerçekimi nedeniyle oluşacak gerilimleri karşılayabilecek kadar mekanik dayanıma sahip olması yanında, büyük gerilim düşümleri oluşturmayacak kadar da iyi iletken olmalıdır. Akımın portörden seyir teline akışı kolay olmalıdır. Genellikle kataner devamlı olarak mm^2'ye 4A akım yoğunluğuna ve 3 dakika süreyle de mm^2'ye 6A akım yoğunluğuna dayanabilmektedir (ABB Consortioum, 1989).

Raylı ulaşım sistemlerinde kataner sistemi beslemesi için 600, 650, 750, 1500, 3000 VDC genlikli gerilimler kullanılmaktadır. Genellikle tercih edilen gerilim seviyesi avantajları nedeniyle 1500 VDC'dir. Bu genlikte cer kontrolü daha iyidir. Fren enerjisi daha etkili kullanılır. Akım değerinin daha düşük olması nedeniyle gerilim düşümleri daha küçük olacak ve sistem daha az sayıda transformatör istasyonu gerektirecektir. Bu da kurulum ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

Cer gücünün üçüncü bir raydan taşındığı sistemler genel olarak 3. ray sistemler olarak isimlendirilir. Ray tipi olarak STR40 tipi kullanılmaktadır. Hat boyunca oluşabilecek ısıl genleşmeleri tolere edebilmek için derz noktaları bulunmaktadır. Herhangi bir arıza durumunda kontrolün sağlanması sırasında hayati tehlikeyi önlemek için PVC ile yalıtım sağlanmaktadır. Beton ve ahşap traverslerde kullanılmak üzere 2 tiptir. Hatta meydana gelebilecek bozulmalar ray düzeltme robotları ile düzeltilebilmektedir. Doğru akımla çalışan raylı sistemlerin isletme akımları transformatör istasyonlarının pozitif kutbundan 3. ray ve akım kolektörleri üzerinden sağlanmaktadır. Geri dönüş akımı raylar üzerinden alınmakta izole edilmiş iletkenlerle

doğrultucu transformatör merkezinin negatif kutbuna iletilmektedir (ABB Traction, 1989).

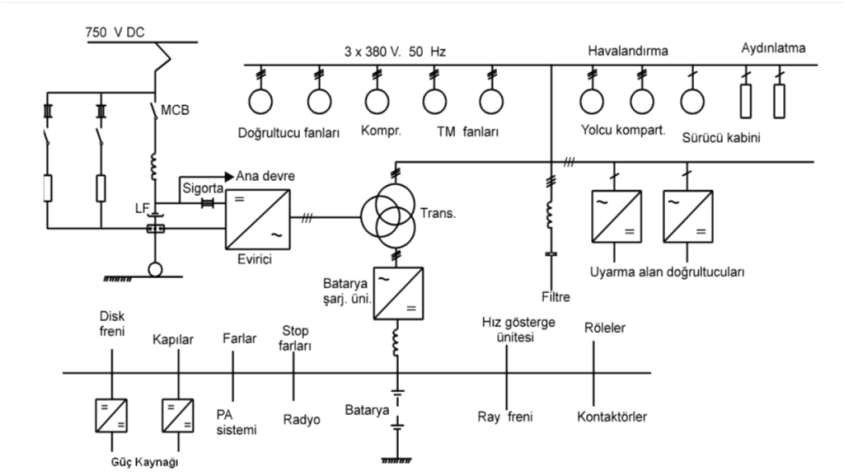
3. ray cer sistemleri maliyet ve avantaj bakımından kataner hattı sistemlerine göre daha avantajlı olmalarına rağmen arıza durumlarında sistem ve yolcu güvenliği açısından kataner sistemleri daha avantajlıdır (Gemici, 2006).

Günümüzde emniyet kuralları çerçevesinde 1200 VDC değerinin üzerindeki gerilim değerlerinde ve 100 km/h hızın üstünde işletme yapılan hatlarda 3. ray sistemi kullanılamamaktadır (Baran, 2009).

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan cer sistemi katanerdir. Sadece Ankara'daki metro sistemleri ve İstanbul metrosu 3. ray ile enerjilendirilmektedir.

3.1.2 Yardımcı güç sistemleri

Raylı ulaşım tesislerinde araçlara hareket verdiren sistemler haricinde elektrikli birçok ünite vardır. Bunlar yardımcı güç sistemi yüklerini oluşturur. Yardımcı güç sisteminin amacı, araçtaki yolcu konforu için kullanılan ısıtma/soğutma, aydınlatma, sürücü kabin sistemlerine ve 24 VDC gerilim devresine enerji sağlamaktır. İhtiyaç duyulan enerji kataner sistemi ya da 3. raydan temin edilmektedir. Sistem girişindeki DC/AC dönüştürücüyle AC gerilime çevrilmekte, 3 fazlı transformatörlerden 3x380 V, 50 Hz'lik gerilime dönüştürülerek bağlı bulunan yükleri beslemektedir. Şekil 3.2'de yardımcı güç sistem devresi gösterilmiştir. (ABB Consortioum, 1989).



Şekil 3.2. Yardımcı güç sistemi

3.2. Faydalı Frenleme ve Çeşitleri

Aracı tahrik eden elektrik motorlarının generatör olarak görev yapıp aracı frenlenmede kullanılmasına dinamik frenleme denir. Elektrik motorları akslardaki dönme hareketini kullanarak elektrik enerjisi üretirler.

Elektrikli raylı ulasım araçlarında frenleme esnasında frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülerek harcanan kinetik enerji, enerji etkinliğini ifade eden km/kWh değerini artırabilecek önemli bir potansiyele sahiptir. Frenleme anında ortaya çıkan enerji, kayıplar hesaba katılmadığında, saf kinetik enerji olarak tanımlanabilir. Bu enerji denklem 3.1 yardımı ile kolayca hesaplanabilir. Kayıplarda dahil edildiğinde, frenleme anında ortaya çıkan güç denklem 3.2 ile ifade edilebilir (Düşmez, 2011).

$$KE = \frac{1}{2} m v^2 \tag{3.1}$$

$$Pb = v(m\delta \left(\frac{d_v}{d_t}\right) - mgf_r - \frac{1}{2} \left(p_a C_D A_f v^2\right)) \tag{3.2}$$

Baran'ın (2009) RAILSIM simülasyon yazılımı ile İstanbul Raylı Sistem Hatları için yaptığı bir modellemede işletme sıklığının enerji talebine etkisi analiz edilmiştir. Bu analizlerde Çizelge 3.1'deki sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmada, 120 saniyeden başlayarak, otuzar saniyelik artışlarla, 330 saniyeye kadar, toplam 8 farklı trenler arası süre (TAS) için RAILSIM yardımı ile simulasyon testleri yapılmıştır. TAS'a bağlı olarak talep edilen enerjinin %46 sı rejeneratif enerjiye dönüşebilmektedir.

Çizelge 3.1. 4'lü tren seti için değişik TAS (trenler arası süre) deki talep ettiği enerji ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı.

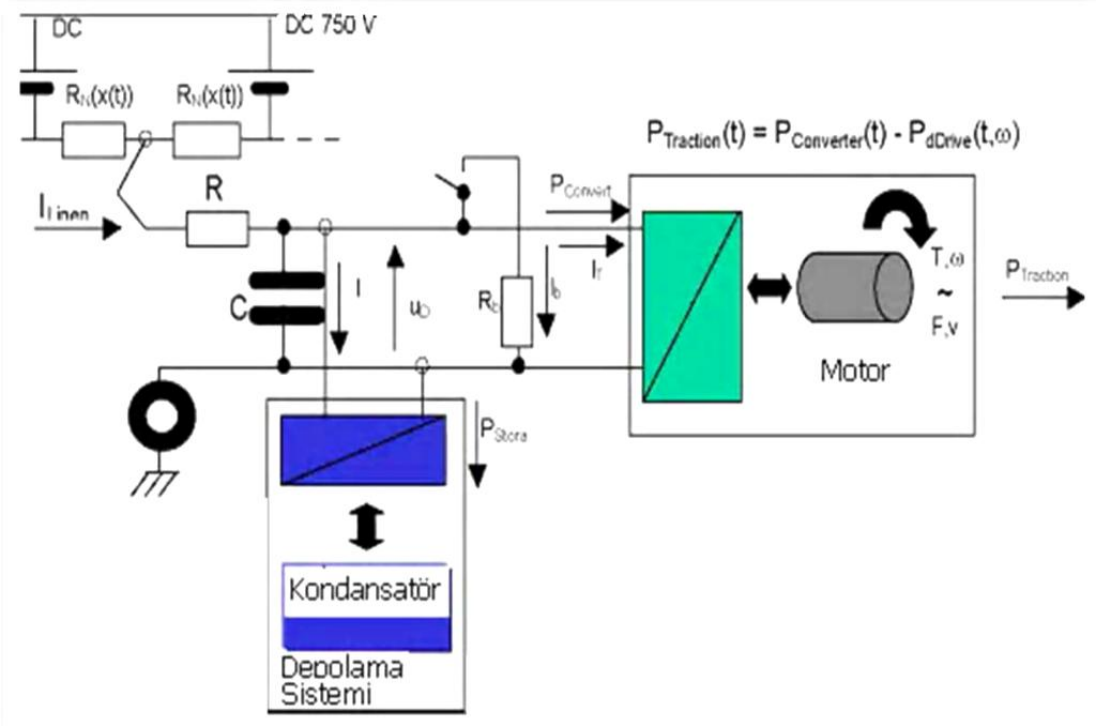
TAS (s)	Enerji Talebi (kWh)	Rejeneratif Enerji (kWh)
120	6566,81	3064,56
150	5280,46	2457,71
180	4434,26	2073,72
210	3841,61	1790,53
240	3378,36	1580,78
270	3024,37	1416,05
300	2749,35	1264,27
330	2504,29	1168,43

Frenleme esnasında kazanılan enerji değişik şekillerde kullanılabilmektedir.

1. Araç üstünde depolanabilir.
2. Hatta ki diğer trenler kullanabilir.
3. Şehir şebekesine verilebilir.
4. Fren dirençlerinde ısı enerjisine dönüştürülebilir.

3.2.1. Faydalı frenleme enerjisinin araç üzerinde depolanması

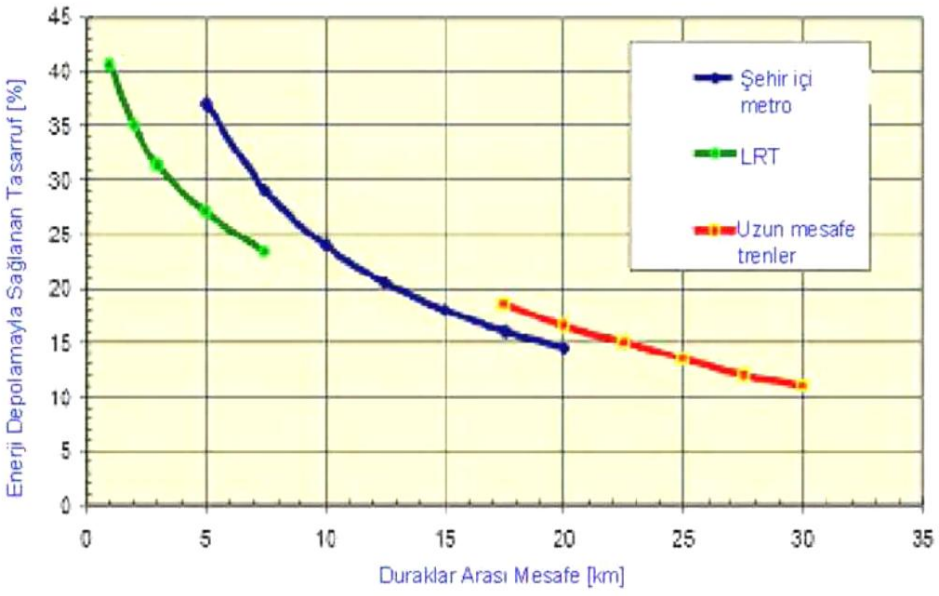
Raylı sistemlerde enerji depolama sistemleri, araçların frenlemesi esnasında elektrik motorlarının dinamik frenleme bölgesinde ürettikleri elektrik enerjisinden faydalanmak maksadıyla kullanılırlar. Kayıplardan sonra enerji depolama sistemlerinde aracın tükettiği toplam enerjinin %25'i ile %40'ı arasında bir miktarı depolamak mümkün olacaktır. Şekil 3.3'de bir tren aracında enerji depolama sistemi bağlantısı gösterilmiştir (Caputo, 2000).



Şekil 3.3. Bir tren aracında enerji depolama sistemi bağlantısı

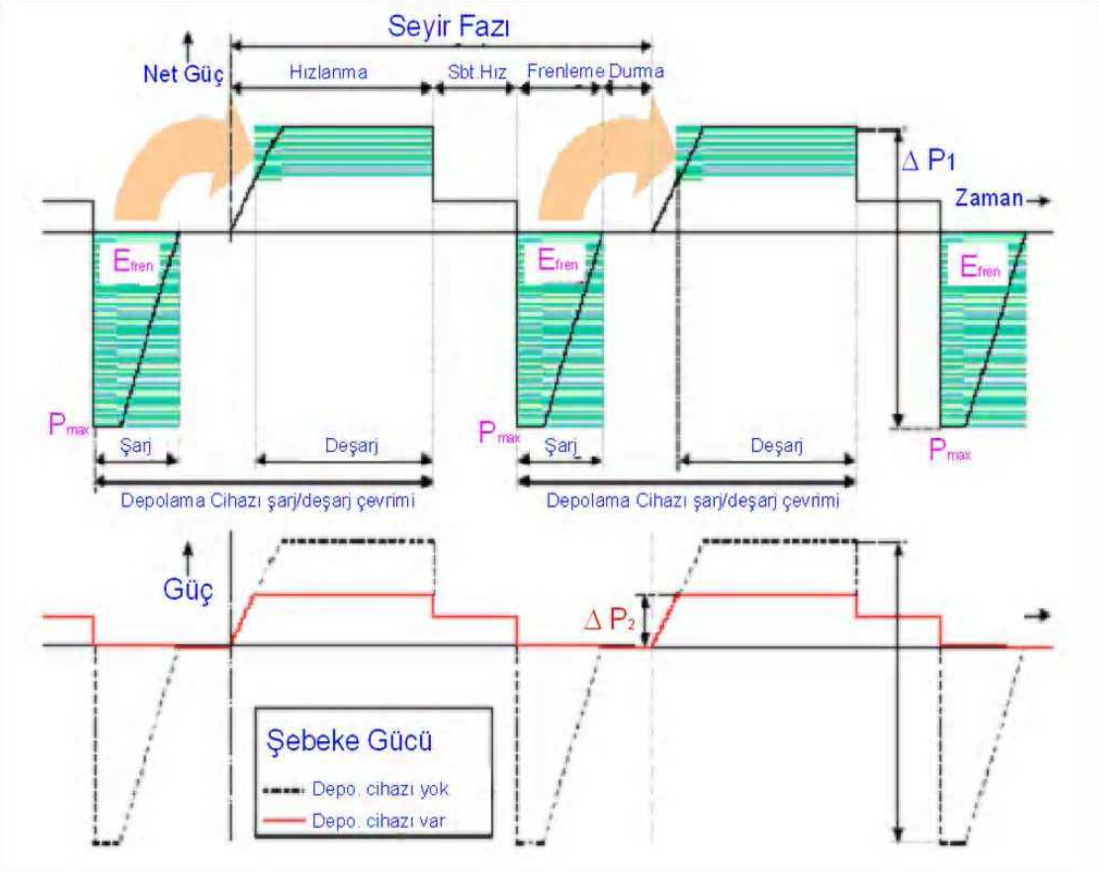
Enerji depolama sistemleri (EDS), bu noktada üretilen fazla enerjiyi depolamak ve bir sonraki ivmelenme periyodunda gerekecek enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılırlar.

Yapılan araştırmalar ve elde edilen sonuçlara göre frenleme enerjisi geri kazanılması durumunda LRV (şehir içi raylı ulaşım) demiryolu araçları enerji tüketiminde yaklaşık %30 civarında tasarruf sağlanabilmektedir. Trenin enerji ihtiyacının daha kararlı hale gelmesi nedeniyle sabit tesislerde sağlanan enerji tasarrufunun da dikkate alınması durumunda bu oran %40'lara yükselmektedir (Caputo, 2000; Gemici, 2006). Örneğin, araçlara monte edilen depolama cihazları DC sistemlerde besleme hatları üzerinde oluşan kayıpların önlenmesi ve pik yüklerin azaltılmasına etkileri büyüktür. Hafif metro hatlarında özellikle 750 V DC sistemlerde bu kazançlar en üst seviyeye çıkmaktadır. Bu durum Şekil 3.4'de LRV sistemi ve değişik tren grupları için de açıkça görülmektedir (Gemici, 2006).



Şekil 3.4. Farklı duruş frekansına sahip raylı ulaşım sistemlerinin enerji depolama kapasiteleri

Şekil 3.5 (Caputo, 2000)'de bir trende enerjinin depolanması ve depolanmaması durumları için güç/enerji değişimleri gösterilmiştir. EDS sistemlerinin enerji besleme sistemi pik değerini önemli ölçüde azalttığı grafikten kolaylıkla görülmektedir. Fakat hatırlanması gereken başka bir husus elde edilen etkinin farklı işletme şartlarına sahip demiryolu sistemleri için farklı olacağıdır.



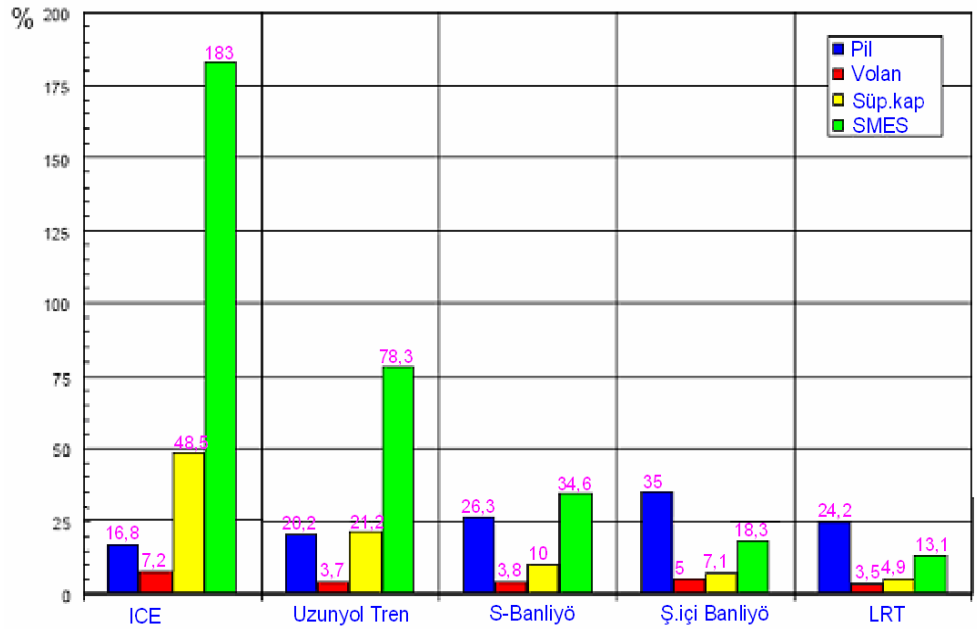
Şekil 3.5. Bir tren hareketi sırasında enerji sarfiyatı ve depolaması

EDS sistemleri çalışma periyotları içinde sık durup kalkan, durak mesafeleri daha kısa olan demiryolu tipleri için ekonomik olmaktadır. Bu durumda enerji depolama sistemlerinin hafif metro sistemlerine uygulanması, daha kârlı bir yatırım potansiyeli arz etmektedir.

Demiryolu uygulamalarında kullanmak için enerji depolama sistemi tasarlanırken, enerji depolama sisteminin büyüklüğünün belirlenmesi için aracın kütlesinin, maksimum hızının ve ivmelenme ve frenleme karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Bu bilgiler depolanacak enerji miktarını ve bunu yapmak için gerekli olan gücü belirler. Frenleme enerjisi ve gücü aynı zamanda enerji depolama sisteminin şarj zamanı demek olan frenleme zamanınca belirlenir.

Konuyla ilgili yapılan araştırmalar frenleme enerjisi depolama uygulamaları için en iyi teknolojinin volanlar ve süperkapasitörler olduğunu göstermiştir. Şekil 3.6 (Caputo, 2000) farklı tren gruplarında oluşmakta olan frenleme enerjisinin depolanabilmesi için gerekli olan EDS kütlesinin araç toplam kütlesine oranını vermektedir. Buradan da tren grupları için EDS olarak kullanılacak en iyi teknolojinin

volan olduğu açıkça görülmektedir. Şehir içi raylı ulaşım sistemlerini ifade eden LRV uygulamalarında süperkapasitör ve volanın en iyi iki teknoloji olduğu ayrıca görülmektedir. Doğal olarak, tercih edilecek teknoloji ve sistem büyüklüğü söz konusu sistemin özellikleri ile belirlenecektir (Gemici, 2006).



Şekil 3.6. Tren gruplarına ve EDS teknolojilerine göre EDS kütlesi/tren kütlesi karşılaştırması

3.2.2. Faydalı frenleme enerjisinin hatta verilmesi

Açığa çıkan frenleme enerjisi, hattın aynı bölümü üzerinde başka bir trenin var olması durumunda bu trenler tarafından kullanılır veya frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülerek harcanır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki teorik olarak hatta kullanılan toplam enerjinin tren işletme sıklığına bağlı olarak yaklaşık %40'ı frenleme enerjisinin geri kazanımından sağlanabilir. Trenlerin 3 dakika ve altında işletildiği hatlarda frenleme esnasında üretilen enerjinin neredeyse tamamının (%85 - %95) diğer trenler tarafından kullanılmakta olduğu bildirilmektedir.

3.2.3. Faydalı frenleme enerjisinin şehir şebekesine verilmesi

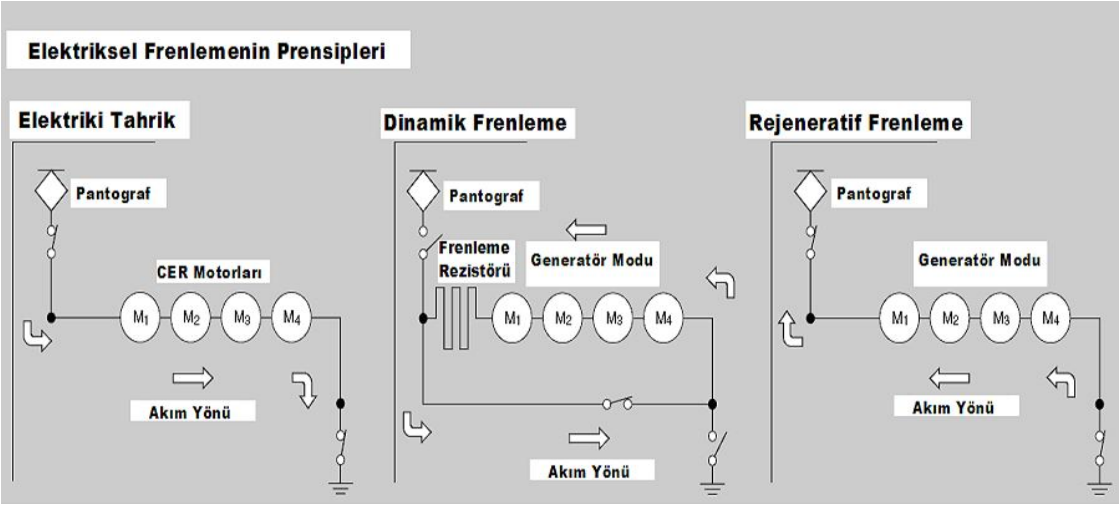
Transformatör merkezlerindeki ekipmanlar tam kontrollü doğrultucu tipinde olursa çift yönlü iletime izin verirler. Böylece hatta enerji çekecek başka tren olmasa da frenleme enerjisi şehir şebekesine verilebilir.

3.2.4. Faydalı frenleme enerjisinin dirençlerle ısı enerjisine dönüştürülmesi

Frenleme esnasında açığa çıkan enerjiyi kullanabilecek başka bir araç o anda yoksa hatta verilen enerji, hat geriliminin yükselmesine neden olur. Hat gerilimi aracın izin verilen işletme değerlerini aşarsa araç hat gerilimi ölçü ve kontrol sistemi aşırı yükselen hat geriliminin tesise zarar vermemesi için bu gerilimi aracın frenleme dirençleri üzerinde harcar. Bu sayede frenleme esnasında kinetik enerji son haliyle ısı enerjisine dönüştürülmüş olur (Gemici, 2006).

Şekil 3.7'de trenin hareketi için gerekli olan elektriki tahrik modu, dinamik frenleme modu ve rejeneratif mod çalışımı bulunmaktadır. Tren hareketi ve hızlanması için motor şeklinde çalışırken, dinamik frenleme durumunda generatör gibi çalışır (Baran, 2009).

Dinamik frenlerin kullanılması, mekanik frenlerin bakım ve yıpranmasını azaltır. Hatta mekanik frenlerin karmaşıklığını, maliyetini ve ağırlığını da azaltabilir. Rejeneratif frenleme sürtünmesiz olduğu için parçalarda yıpranma olmayacaktır.



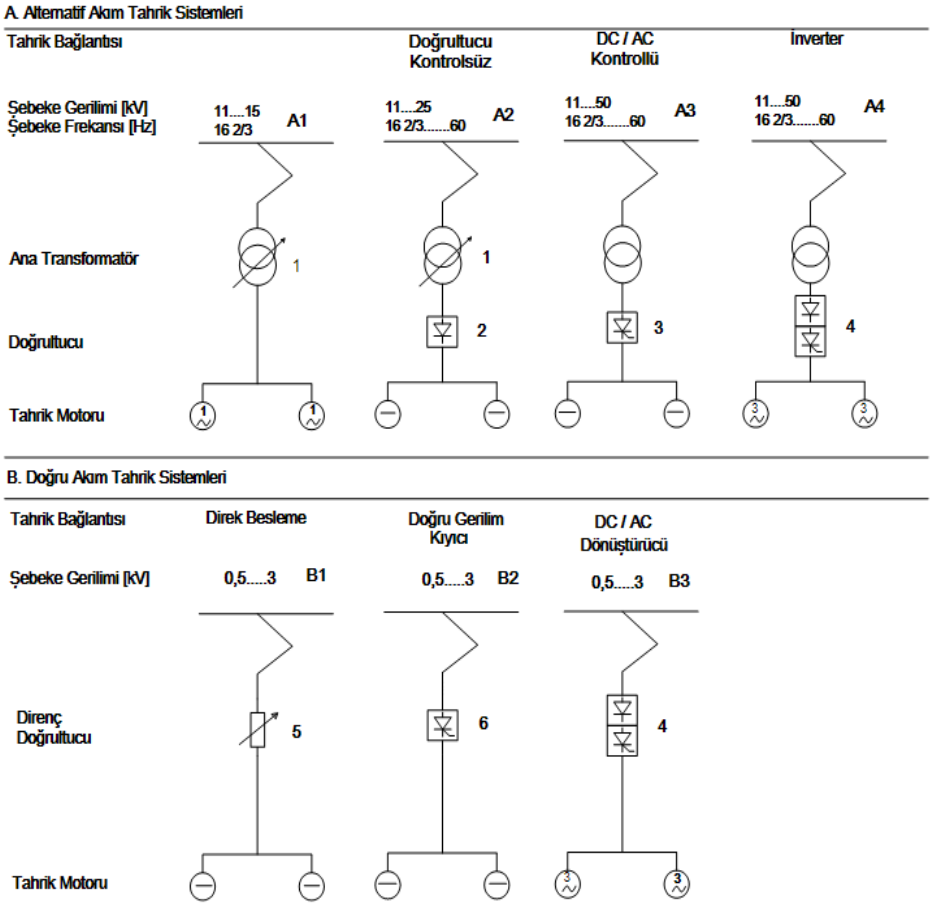
Şekil 3.7. Elektriki tahrik modu, dinamik frenleme modu ve rejeneratif mod

3.3. Elektrikli Araçlar İçin Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması

Tahrik sisteminin seçilmesi için besleyen sistem (işletme sistemi), seyir iletkeni şebekesi ve tahrik makinesi (motor) önemli bir rol oynar. Önce vasıtalar bir fazlı alternatif akım ve doğru akım işletmesi için diye ikiye ayrılırken diğer bir sınıflandırma

kullanılan tahrik tekniğine göre olabilir. Şekil 3.8'de genel bir sınıflandırma görülmektedir.

İşletim sistemleri 1 fazlı alternatif akım işletim sistemleri ve doğru akım işletim sistemleri olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.



1 = Basamak şalterli
2 = Kontrolsüz Doğrultucu
3 = Doğru-/ Alternatif kontrollü
4 = A.A. / A.A. İnvertör
5 = Basamak Kontaktörlü
6 = D.A. Kıyıcı

Şekil 3.8. Çekici vasıtalar için tahrik sistemlerinin sınıflandırılması

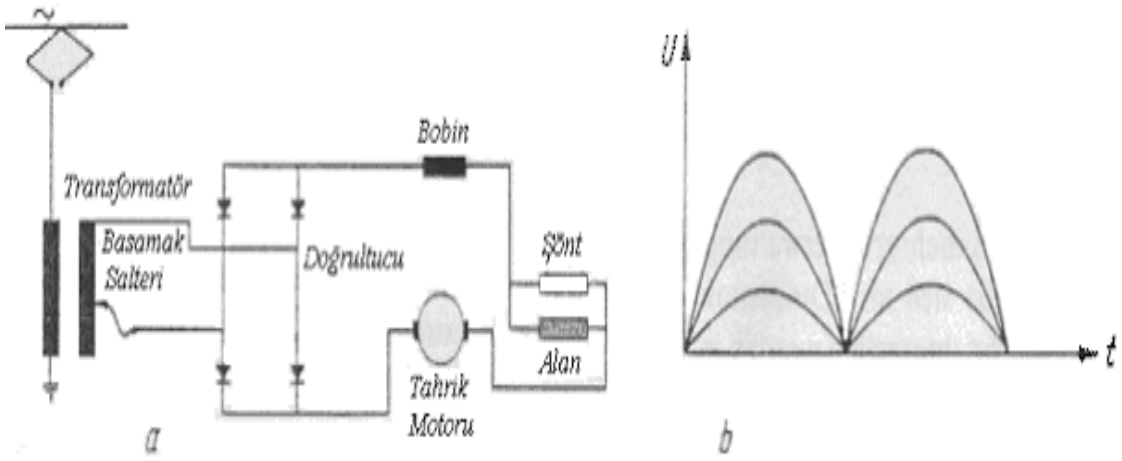
3.3.1. A.A. Raylı işletmelerinde doğru akım motoru ile tahrik sistemleri

3.3.1.1. Diyotlu tahrik sistemi

16 2/3 Hz'lik direkt motorlar 50 Hz şebekede komütasyon sebeplerinden dolayı kullanılamamıştır. 1945 den sonra aktüel olan 50 Hz lik alternatif akımla tahrikte en

uygun çözüm basamak şalterinden sonra civa buharlı bir doğrultucunun seri bağlanmasıyla dalgalanan doğru akımın elde edilmesi ve karışık akımlı motorda kullanılması olmuştur ve bu durum Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Dalgalanmayı sönümleyen bobinin motor akım devresine bağlanmasıyla dalgalanma, müsaade edilen sınırlar içinde tutulabilmiştir.

Bir karışık akım motoru pratik olarak bir doğru akım motoru gibidir. Sadece uyartım sargısına paralel olarak bir direnç bağlanır ve bu direnç, akımın dalgalanan kısmını üzerine alır. Böylece motor manyetik alanının saf doğru akım alanı olması temin edilir. Bu sayede kalkış anında bir fazlı motorda meydana gelen ve bir fazlı motoru ağır kalkışlarda duyarlı yapan transformasyon gerilimi ortadan kaldırılmış olur. Ayrıca klemens gerilimini bir fazlı alternatif akım motoruna nazaran iki katına çıkarmak mümkündür. Böylece aynı güçte akım değeri yarıya düşer. Motor ve cihaz kullanımı bu sayede oldukça azalır. Mahzurlu tarafı ise hassas civa buharlı doğrultucunun kullanılması ve dalgalanmayı azaltacak elemanların gerekli olmasıdır.



Şekil 3.9. A.A.Lokomotifi (Diyotlu Lokomotif) doğrultuculu ve dalgalı akım tahrik motorunun
a) prensip şeması b) D.A. Genlik ayarı

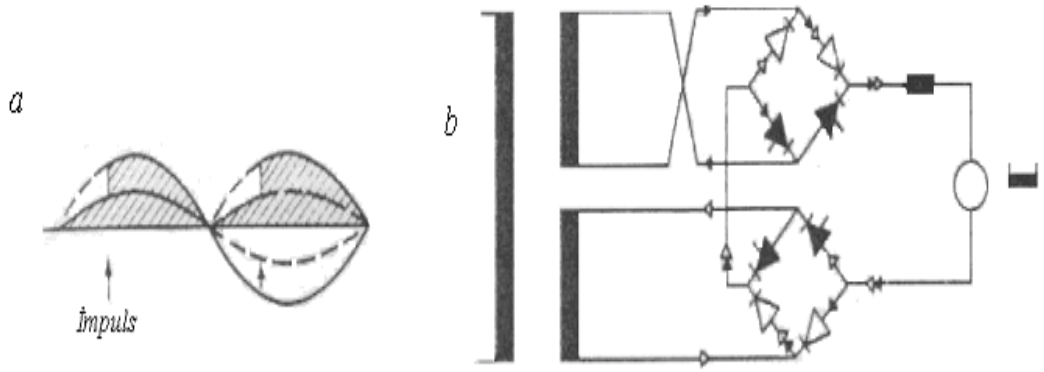
Yarı iletken diyotların kullanılmasıyla 16 2/3 Hz'lik şebekede diyotlu lokomotiflerin kullanımı artmıştır. Diyotlar köprü bağlantıyla çalıştırılmışlardır. Toplam gerilim transformatör üzerinden ayarlanmıştır. Gerilimin maksimum değeri ayarlandığından, bu sisteme amplitüd (genlik) kumandası da denmektedir.

3.3.1.2. Tristörlü tahrik sistemi

Alternatif akım sisteminde tristör, her yarım dalgada akımın sıfırdan geçişinde kendiliğinden söner. Tahrik motorunun uçlarındaki gerilim tristörün tetiklenme noktasının her yarım dalgada bir kaydırılmasıyla ayarlanır. Bu kumandaya, gerilim eğrisinin kesilmesiyle yapılan gerilim kumandası denir. Her defasında kesilen bu gerilim dalgaları bir bobin üzerinden düzeltilir ve motora dalgalılığı belirli sınırlara indirgenmiş doğru akım verilir.

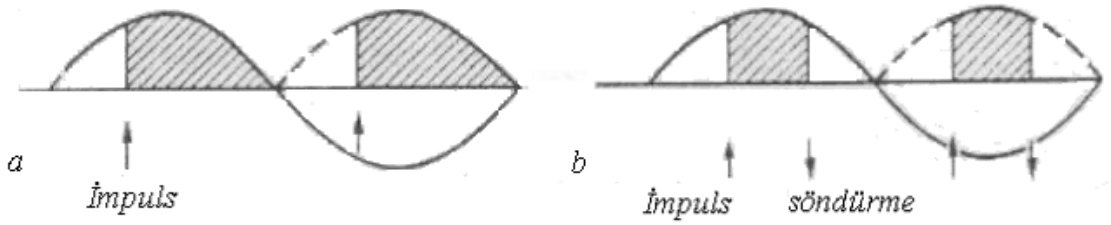
Tahrik motoru bu şekildeki akımın doğru akım ve alternatif akım bileşenleri ile çalışmak zorunda kalır. Fakat motorun üstünlükleri fazladır ve dalgalı akım motoru aynı güçteki alternatif akım motorundan oldukça hafiftir. Arzu edilmeyen kollektör yine kullanılmıştır.

Tristörün tetiklenmesi sırasındaki gerilim yükselme seviyesi, seri bağlanmış iki tristör köprüsü ile yarıya düşürülebilir. Burada sadece köprünün birine kumanda edilirken diğeri alternatif akım kısmında kapalı veya tamamen açık bırakılır. Buna "çift köprü" bağlantısı denir (Şekil 3.10 a ve b).



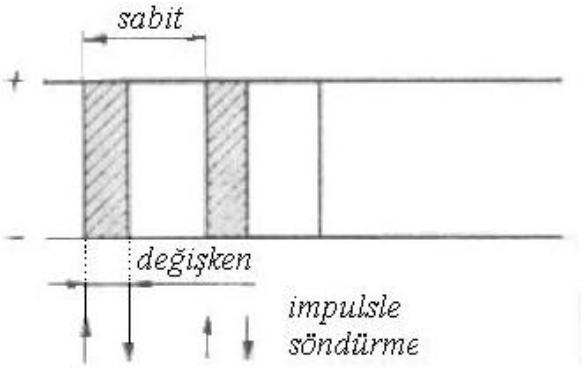
Şekil 3.10. Tristör tetikleme açısının kaydırılmasıyla "Çift köprü bağlantı" ile gerilim ayarı
a) Gerilim dalga şekli b) Bağlantı şekli

Tetikleme açısının büyütülmesi ile yapılan gerilim ayarında güç katsayısı kötüleşir. Bunu önlemek için istenilen gerilim parçası her yarı dalganın ortasından kesilerek elde edilir. Bu durumda tristörlerin zorunlu söndürülmeleri gerekir. Bu kumandaya "sektör kumanda" denir (Şekil 3.11 b).



Şekil 3.11. a)Tek köprü bağlantı b) Sektör kontrollü gerilim ayarı

Doğru akımla çalışan raylı vasıtalar için, tristör söndürme sistemleri muhakkak kullanılmalıdır. Seyir iletkeninden alınan gerilim tristörlerin tetiklenmesi ve söndürülmesi sonucu çeşitli uzunluklarda kesilir, düzeltilir ve tahrik motoruna verilir (Şekil 3.12). Buna "Chopper kumandası" denir. Zaman, bir tetiklemeden bunu takip eden diğer tetiklemeye kadar her defasında sabit tutulur. Sadece söndürme zaman noktası değiştirilirse buna "impuls genişliği kumandası" denir.

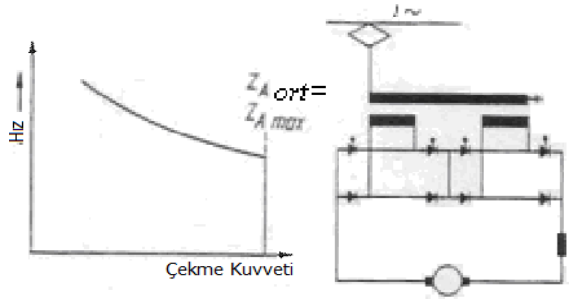


Şekil 3.12. İmpuls genişliği (Chopper) kontrollü gerilim ayarı

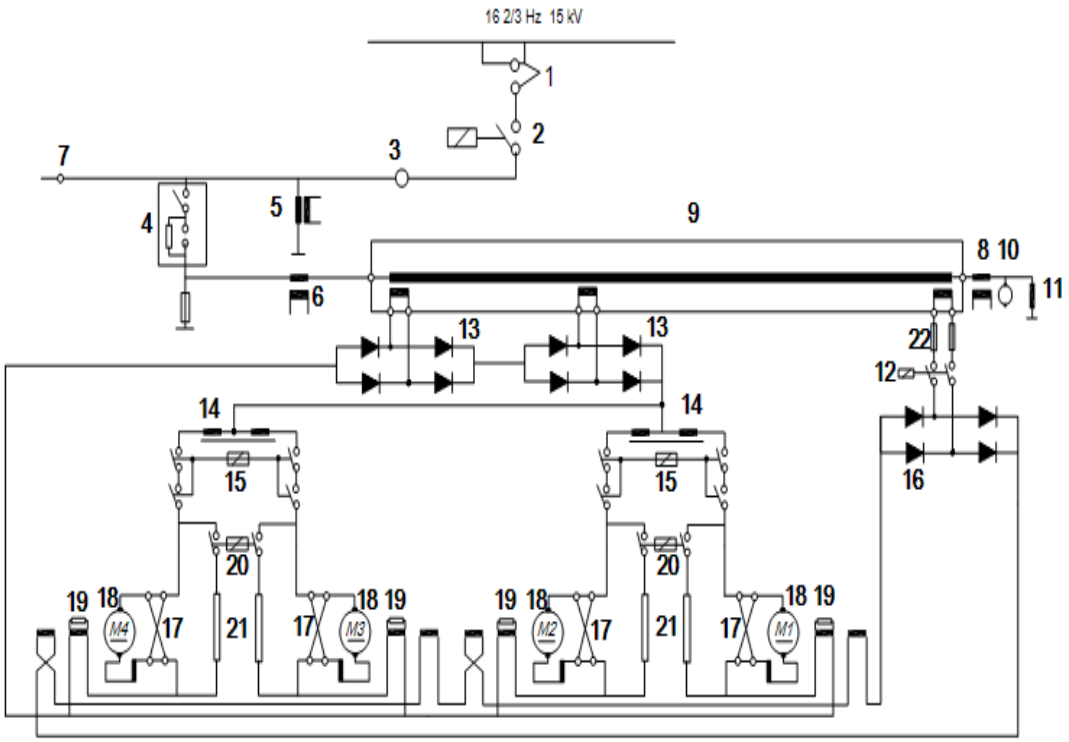
Karışık akım tekniğinin temel prensibi, seyir iletkeninden alternatif akımla beslenen transformatör üzerinden gerilim değeri düşürülen alternatif akım doğrultulur ve komütatörlü tahrik motorlarına dalgalı doğru akım olarak verilir. Gerilim ve akımın kumandası hız ve vasıtanın çekme kuvvetine göre tristörler yardımıyla gerilim dalgasının kesilmesi sonucu elde edilir.

Şekil 3.13 ve 3.14'de doğrultucular, simetrik olmayan yarı kumandalı köprü olarak yapılmışlardır. Bunun anlamı, köprünün iki ayağı tristörlerle ve diğer iki ayağı da diyotlarla imal edilmiştir. İki köprü seri bağlanmıştır. Çok köprülü kumanda sisteminin bir tek köprüye üstünlüğü, güç katsayısının ve akım dalgalanmasının iyileştirilmesidir. Motor devresine akım dalgalanmasını sınırlamak için katot bobini bağlanmıştır.

Kontaktörler ve akım yön değiştiriciler, motorun akım devresinden ayrılması, frenleme ve hareket yönünün değiştirilmesi sırasında endüvi uçlarının değiştirilmesi için kullanılırlar. Elektrikli fren şebeke veya direnç freni olarak yapılabilir. Faydalı frenlemede doğrultucu tam kumandalı yani köprü ayaklarının hepsi tristörlerle yapılmalıdır. Böylece, tahrik motorunun frenlenmesi sırasında generatör olarak çalışarak ürettiği enerji seyir iletkenine geri verilir.



Şekil 3.13. Tristörlü lokomotifin seri bağlı, yarı kontrollü köprülü prensip şeması



1. Pantoğraf
2. Pantoğraf ayırıcı şalteri
3. 15 kV Hat ayırıcı
4. 15 kV Basınçlı havalı kesici
5. Gerilim ölçü trafosu
6. Parafudr
7. Yüksek gerilim kuplajı
8. Akım ölçü trafosu
9. Transformatör
10. Topraklama kontağı
11. Toprak koruma bobini
12. Alan akımı kontaktörü
13. Endüvi akımı doğrultucusu
14. Bobin
15. Motor şalteri
16. Alan akımı doğrultucusu
17. Yön değiştirici
18. Tahrik motoru
19. Ana alan şöntü
20. Fren kontaktörü
21. Fren dirençleri

Şekil 3.14. Karışık akımlı donanımın kuvvetli akım bağlantı şeması, seri-çift köprü, karışık akım uyartımlı tahrik motorları ve direnç frenli olarak

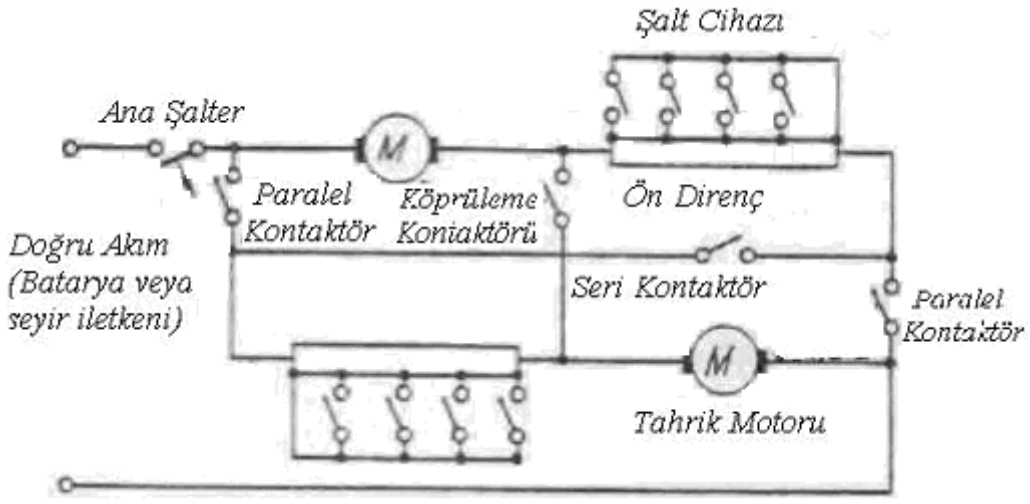
3.3.2. D.A. Raylı işletmelerinde doğru akım motoru ile tahrik sistemleri

3.3.2.1. Direk motor tahrik sistemi

Alternatif akım komütatör motorlarına nazaran doğru akım motorlarının boyutları oldukça daha küçüktür ve daha küçük güç ağırlığı gösterirler. Ayrıca komütasyonları daha geniş sınırlarda yapılabilir. Mahzurlu tarafı ise alternatif akım sisteminde kullanılan transformatör doğru akımda kullanılamaz. Böylece seyir iletkeninin gerilimi motor klemenslerinde ki müsaade edilen en büyük gerilimle sınırlanır. Bu ise 1,5 kV civarındadır. İki motor seri çalıştırılırsa seyir iletkeni gerilimi 3 kV'a çıkarılabilir. Yani enerji taşıması bakımından uygun olmayan bir çıkış noktası ortaya çıkar.

Normal doğru akım işletmesinde kullanılan motorlar seri motorlardır. Kumandaları uçlarındaki gerilimin değiştirilmesiyle yapılır. Kumandanın ayarlanması motorların seri, seri-paralel ve paralel bağlanmaları ile ve ayar dirençleri ile sağlanır. Ayar dirençleri yol alma (kalkış) sırasında basamaklar halinde kısa devre edilir. Böylece Şekil 3.15'de verilen gruplama bağlantıları ortaya çıkar.

Ayrıca 6 ve 8 motorlu çekiciler de vardır. Doğru akım çekici vasıtalarının kumandalarını genişletebilmek için alan sargılarının paralel dirençlerle bağlanması ile alan zayıflatılması da iyi sonuç vermiştir. Kaide olarak 2 alan zayıflatma basamağı öngörülür. Böylece 2 motorlu bir sistem için 6 sürekli çalışma basamağı ortaya çıkar.



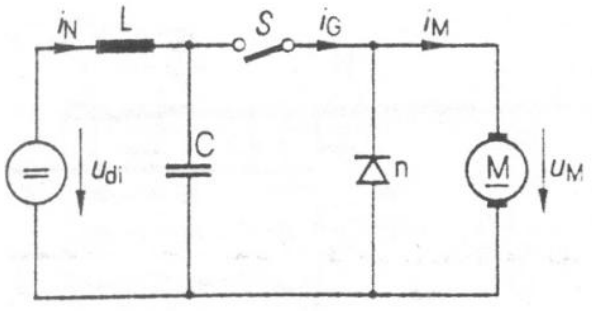
Şekil 3.15 İki motorlu yol verme dirençli doğru akım çekicilerin temel kontrol bağlantı şeması.

3.3.2.1. Tristörlü tahrik sistemi

60'lı yılların başından itibaren doğru akım seviyesinin kontrolü ile yapılan raylı vasıtaların geliştirilmesine başlanmıştır. Chopper kumandası ile vasıtanın seyir veya frenlenmesi esnasında basamaksız olarak geriliminin ayarlanabilmesi alışılmış basamaklı dirençlerle yapılan kumandaya nazaran aşağıdaki üstünlüklere sahiptir:

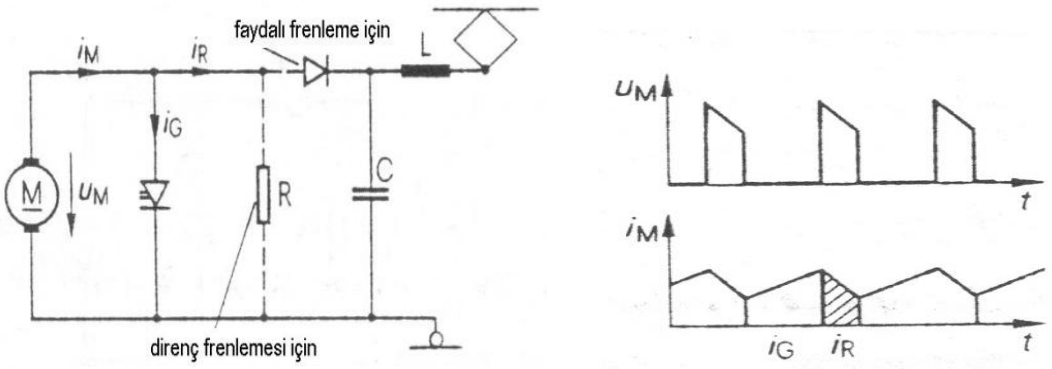
- Tristör tekniği, çok az kayıplı olarak çalışır. Yol verme direncindeki güç kaybı ortadan kalkar. Seyir iletkenlerindeki ve besleme istasyonlarındaki yük azalır.
- Motor gerilimi basamaksız kontrol edilebilir. Böylece çekme kuvvetindeki ani değişiklikler ve bunların mahzurları önlenir. Seyir konforu yükseltilir.
- Tristör kumandası kontaksız çalışır ve aşınma yoktur. Salt cihazları sadece gruplama bağlantılarında kullanılır. Normalde yüksüz açıp kapatırlar.
- Yol alma dirençleri olmadığından, çekme kuvveti-hız diyagramındaki herhangi bir noktada kumanda yapılabilir. Bunun anlamı, basit cihazlarla ayarlar istenildiği gibi gerçekleştirilebilir. Kumandanın hassas yapılabilmesi sayesinde otomatik tren işletmesine de geçilebilir.
- Basamaksız kumanda sonucu, çekme kuvveti ve fren kuvvetlerinde sıçramalar olmayacağından patinaj ve kayma olayları azalır. Ayrıca bunlar, güç devresine hızlı bir şekilde müdahale edilerek hemen ayarlanabilir.
- Tristör tekniği yardımıyla basit bir şekilde (ilk defa doğru akım trenlerinde) iyi ayarlanabilen faydalı frenleme gerçekleştirilmiştir.

Doğru akım ayarlayıcısı vasıtanın hareketi sırasında olduğu gibi frenlemede de motorların gerilim kumandasını yapar. Bir seyir iletkenindeki D.A ayarlayıcısının eşdeğer şeması Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16. Bir seyir iletkenindeki D.A ayarlayıcısının eşdeğer şeması

En basit frenleme kendi kendini uyaran dirençli frenlemedir. Şayet doğru akım ayarlayıcı tetiklenirse, makine kısa devre durumunda kendi kendini uyartır ve motor akımı yükselir. Kısa devre kaldırılırsa akım frenleme direncinin üzerinden akmaya devam eder. Te/T devrede kalma oranı yardımıyla tesirli fren direnci artar. "R" değeri ile "0" değeri arasında değişir. Doğru akım ayarlayıcısı Şekil 3.17'de görüldüğü gibi basit bir şekilde faydalı frenlemeyi de mümkün kılar. Bu durumda da doğru akım ayarlayıcısı motoru periyodik olarak kısa devre eder. Kısa devre kaldırılınca motorun indüktivitelerinden dolayı meydana gelen motor akımı, sadece şebekeye akabilir. Bu sırada meydana gelen impuls şeklindeki akımlar, LC elemanı ile düzeltilir ve şebekeye bir doğru akım verilir. Bu frenleme şüphesiz şebekenin enerji alabileceği düşünülerek yapılabilir. Kumandasız doğrultucularla beslenen şebekelerde enerji geri beslemesi sadece aynı anda diğer vasıtaların bu hattan enerji almaları durumunda mümkündür. Doğru akım ayarlayıcısı öncelikle iyi ayarlanabilen ve ayrıca hız sıfıra düşünceye kadar tam tesirli bir faydalı frenlemeyi mümkün kılar.



Şekil 3.17. D.A.ayarlayıcılı işletmede fren bağlantı prensipleri

3.3.3. A.A. Raylı işletmelerinde 3 fazlı ASM ile tahrik sistemleri

Yarı iletken tekniğinin gelişmesi, statik invertörlerin üç fazlı tahrik motorlarını beslemek üzere vasıtalarda kullanılacak kadar küçülmesini sağlamıştır. Böylece, mekanik şalt elemanlarının sayısı çok azalmıştır.

Alternatif akımla beslenen vasıtalarda, impuls şekilli doğrultucularla sinüs şekilli seyir iletkeni akımı elde edilebildiğinden besleme tesislerine olan ters etkiler küçüktür.

Yüksek verim ve faydalı frenlemenin kullanılması enerji tasarrufu sağlar. Çekme kuvvetinin basamaksız ayarlanabilmesi seyahat konforunu arttırır.

Gerilimi ve frekansı sabit tutulan alternatif akımla beslenen üç fazlı ASM'un döndürme momenti-devir sayısı karakteristiği sabittir. Bu bakımdan tahrik motoru olarak, frekansı ayarlanamadığı takdirde uygun değildir.

Gerilim ve frekansı ayarlanabilen üç fazlı asenkron motorda güç elektroniği sayesinde frekans kayıpsız olarak ayarlanabilir ve herhangi bir devir sayısı basamaksız olarak elde edilebilir. Bu türlü bir ayarlamayla üç fazlı alternatif akım motorun tabii moment karakteristik eğrisi, öyle kaydırılabilir ki motorun çalışma noktaları birleştirildiğinde seri motor karakteristiği elde edilebilir.

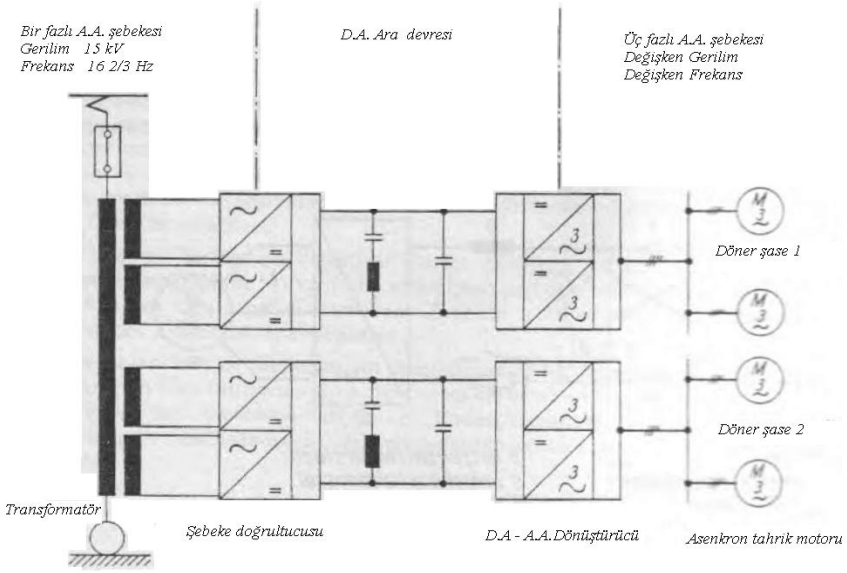
Esasen tahrik motoru olarak senkron motor veya asenkron motor kullanılabilir. Fakat bu motorların özellikleri karşılaştırılırken bunları besleyecek alternatif akım ayarlayıcılarının da birlikte düşünülmesi gerekir. Alman demiryollarının yaptığı araştırmada üç fazlı asenkron motorun özelliklerinin daha uygun olduğu görülmüştür.

Yukarıda belirtilen tristör kumandasının üstünlüklerine üç fazlı asenkron motorun şu özellikleri de ilave edilebilir:

Hızlı dönen üç fazlı motorun daha düşük ağırlık ve yer ihtiyacı, büyük güçlü vasıtalarda akis ölçülerinin küçülmesine ve seyir özelliklerinin iyileşmesine sebep olur.

Basit ve sağlam yapısı seyir motorundaki bakım masraflarını azaltır. Dik olan moment-devir sayısı karakteristiği kaymaya karşı tabii bir koruma sağlar. Tekerlek ve ray arasındaki tutunma değerinin en iyi şekilde kullanımını sağlar.

PWM alternatif akım ayarlayıcısının alternatif akım şebekesinden beslenmesi durumunda daima şebeke tarafına bir doğrultucunun bağlanması gerekir. Bunun tasarımı, müsaade edilen harcamalar ve şebekeye yapacağı aksi tesirlerin seviyesine bağlıdır. Basit akım doğrultucu sistemi, kumandasız ve kumandalı doğrultucuların seri bağlanmasından meydana gelir. Besleyen şebekeden şebeke frekanslı akım darbeleri çeker. Bunların amplitüdleri alternatif akım tarafındaki bobinlerle sınırlandırılır. Bu bağlantı geri beslemeli olamaz. Şebeke akım eğrisinin şeklinin, güç faktörünün ve geri besleme özelliğinin istenmesi gibi taleplerin arttırılması durumunda dört bölgeli çalışabilen sistemler kullanılmalıdır. Bu sistem, bir fazlı köprü yapısında üç fazlı PWM dekine benzer faz elemanları ile yapılmış olabilir. Yaklaşık sinüs şekilli temel frekanslı şebeke akımının elde edilebilmesi için yüksek güç faktörlü olarak, dört bölgeli ayarlayıcı PWM metoduna göre dizayn edilir.



Şekil 3.18. Bir A.A. lokomotifinin ana akım devresi (BR 120) üç fazlı sistem tekniği ve U-invertörlü olarak.

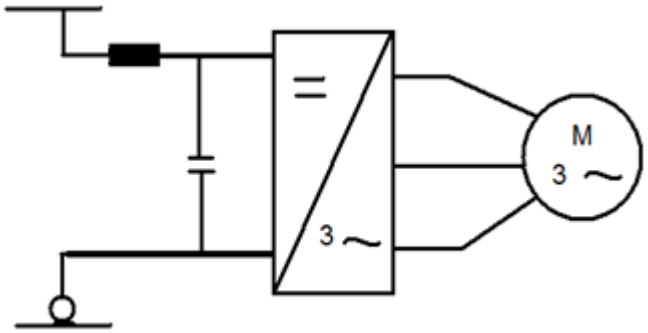
Şekil 3.18'de Alman demiryollarında kullanılan BR 120 tipi lokomotifin ana akım devresi gösterilmiştir. Enerji akışı transformatör üzerinden ve 4 akım doğrultucu gruplarından aktarılmaktadır. Bu gruplar 4 bölgeli ayarlayıcı doğru gerilim ara devresi ve PWM alternatif akım ayarlayıcısından meydana gelmiştir. İki doğrultucu grubu birlikte bir kumanda ve ayar sisteminden çalışmakta ve üç fazlı baraları beslemektedir. Bu bara, bir akis grubunun her iki motorunu da beslemektedir. Doğru gerilim ara devresinden alınan elektrik enerjisi yüksekliği ve frekansı değiştirilebilen üç fazlı gerilim olarak asenkron motorlara verilmektedir. Çekici tekniği yönünden bu bağlantının faydası çekme çengeline tesir eden momentin etkisiyle öndeki aks grubunun mekanik olarak az yüklenmesi elektriki olarak kompanze edilebilir. Ayrıca, bağlantının emniyeti artar. Bu bağlantı enerji akış yönünün değişmesine de müsaade eder. İlave elemanlar olmadan şebeke frenlenmesi yapılabilir.

3.3.4. D.A. Raylı işletmelerinde 3 fazlı ASM ile tahrik sistemleri

Doğru gerilim ara devreli invertör sistemi makine tarafındaki girişte sabit gerilim ve polarite ile çalışan bir doğrultucuyla çalışır. Sistemin istediği değişken gerilim ve frekans, impuls prensibi ile çalışan alternatif akım ayarlayıcısı ile yapılır. Bu impuls prensibiyle çalışan alternatif akım ayarlayıcısı, doğru akımı üç fazlı alternatif akıma dönüştürür.

Bu sistem impuls genişliği (PWM) modülasyonuna göre çalışır. Her bir alternatif akım ayarlayıcısı bir tarafından doğru gerilim ara devresinin (+) ve (-) kutbuna ve çıkış tarafında ise tahrik motorunun bağlı olduğu üç fazlı baraya bağlanır. PWM ile çalışan sistemde istenilen sinüs eğrisi kısa süreli (ON/OFF) açma-kapama ile ve polarite değişimiyle sağlanır. Blokların yan yana getirilmesiyle gerilim, şalt ritmi ile frekans değiştirilir. Üç fazın gerilimleri bir birine eşit fakat 120° elektriki olarak birbirinden kaydırılmıştır

PWM alternatif akım ayarlayıcısı Şekil 3.19'da olduğu gibi direkt olarak doğru akım şebekesinden beslenebilir. Kumanda yoluyla kontaksız olarak seyir halinden, şebeke frenleme işletmesine geçilebilir. İlave doğrultucu bobin sayesinde şebeke akımına verilen harmonik akım miktarı azaltılabilir. Direkt doğru akımla beslenme durumunda, bu PWM ayarlayıcı, besleme geriliminin tolerans alanının tamamına göre ölçülendirilmelidir. Üç fazlı akımın değişik frekanslarda elde edilmesi, besleme şebekesinde harmonikler meydana getirdiğinden doğru gerilim ayarlama tekniğine nazaran daha büyük filtre elemanları gerektirir. Bunlar bilhassa belirli sinyal frekansları için, mesela 50 Hz, 75 Hz veya 100 Hz şebekede hiç görülmeyecek kadar filtre edilebilecek büyüklükte olmalıdır.

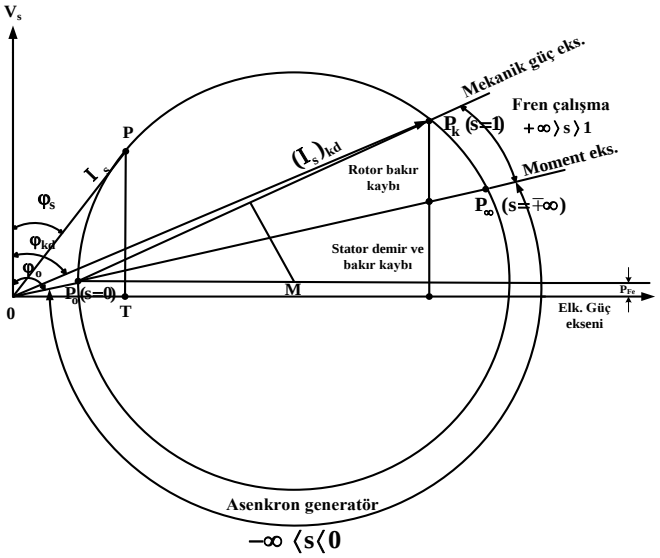


Şekil 3.19. D.A.seyir iletkeninden direkt beslenen bir U-devreli invertör. Seyir ve frenleme temel bağlantısı.

3.4. Asenkron Makinenin Motor ve Generatör Olarak Çalışması

Asenkron makinelerin çalışma karakteristikleri, eşdeğer devrelerinden hesaplanabildiği gibi, daha pratik olması bakımından, daire diyagramı yardımıyla da bulunabilir. Şekil 3.20'de ki Pk noktasından sonraki saha P∞'a kadar döner alan istikametinin aksine rotorun çevrilmek istendiği sahayı gösterir. Yani burada frenleme

tesiri mevcuttur ve kayma S>1dir. P∞'dan sonra ise senkronizmden yukarı motorun döndüğünü yani motor yerine generatör gibi çalıştığını göstermektedir. P∞ noktasında R2/s = 0 olduğundan kayma değeri sonsuzdur.

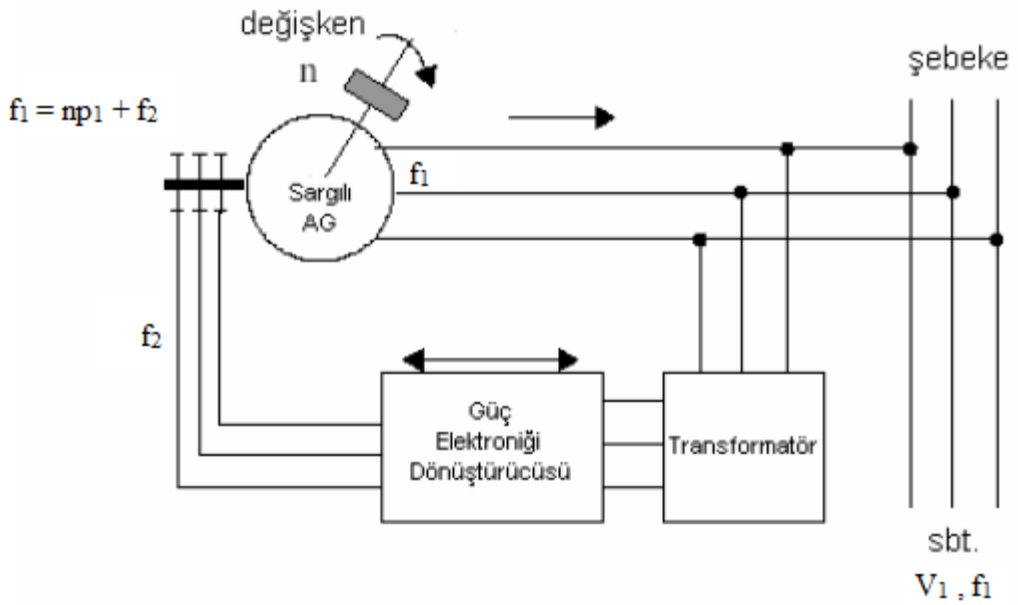


Şekil 3.20. Asenkron makinenin daire diyagramı

Asenkron makineler generatör olarak çalışabilmesi için 2 yol vardır.

3.4.1. Kendinden (şebekeden) uyartımlı asenkron generatör

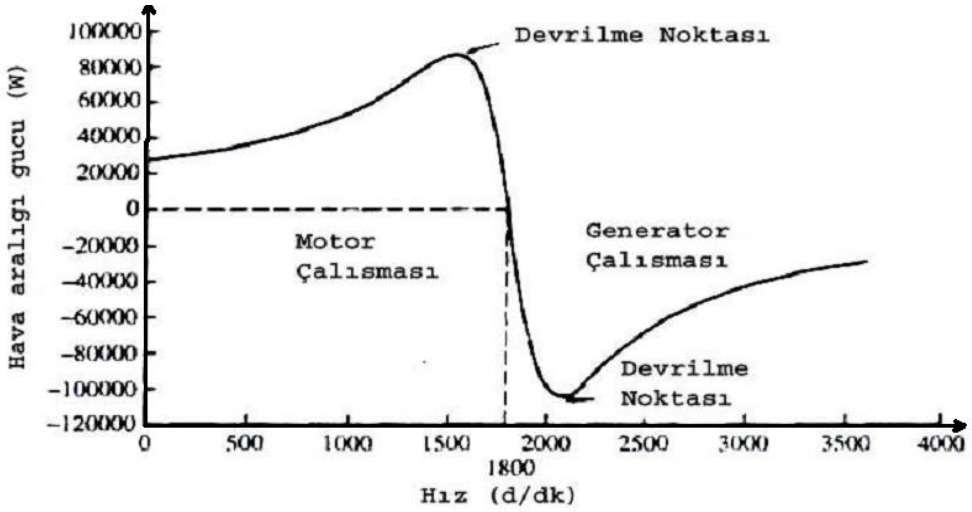
Gerilim ve frekansı sabit olan bir şebekeye paralel bağlanmış olan üç fazlı asenkron makine döner alan yönünde senkron devir sayısı üstünde tahrik edilecek olursa, asenkron makine motor çalışma durumundan generatör çalışma durumuna geçer. Bu durumda asenkron makine mıknatıslanma akımını şebekeden çekerek generatör olarak çalışmaya baslar. Böylece s kayması ile Md döndürme momenti ve mekanik gücün işareti yön değiştirerek negatif olur. s'nin negatif olması ile asenkron makinenin statoru şebekeye aktif elektrik enerjisi vermeye başlar. Asenkron generatörün ilginç tarafı mıknatıslanma akımını kendisinin üretmeyip şebekeden çekmesi halinde bu reaktif akımın motor olarak çalışma durumundaki değer ve yönünü korumasıdır (Terzi, 2000).



Şekil 3.21. Çift yönlü rotor güç akısı sağlayan çevirici ve transformatör ile şebekeye bağlı sargılı rotorlu Asenkron Generatör

Şebekeden beslenen sargılı asenkron generatörlerle rotor mil hızı değişken olmasına rağmen sabit frekanslı ve sabit gerilimli bir elektrik enerjisi üretimi yapmak için çift yönlü rotor güç akısı sağlayan düzenekler ve bağlantı biçimleri Şekil 3.21'de görülmektedir. Statik kramer sürücüsü olarak da bilinen bu basit sistemde güç elektroniği dönüştürücüsü olarak bir diyotlu doğrultucu, süzgeç ve tristörlü bir evirici kullanılır. Statik kramer sürücüsünün en büyük üstünlüğü ucuzluğu, hafifliği, ısınma probleminin olmaması ve sürücünün anma gücünün makinenin anma gücünden çok daha küçük olabilmesidir. Eviricideki tristörlerin tetikleme açısını denetleyerek kaymayı dolayısıyla da rotor frekansı denetlenebilir. Senkron hızın altında rotor statorca üretilen gücün bir kısmını geri alır. Senkron hızın üstünde ise hem stator hem de rotor şebekeyi besler. Stator, rotor hızı senkron hıza yakınken şebekeye bağlanmalı, rotorsa sürekli bağlı kalmalıdır. Örneğin %80 rotor hızında %20'lik enerji şebekeden rotora verilir.%120 rotor hızında ise %20'lik enerji stator aracılığıyla şebekeye geri verilir. Güç faktörünün düşük olması ve akım dalga biçiminde bozulmalara neden olması düzeneğin eksiklikleridir (Demirci, 2006).

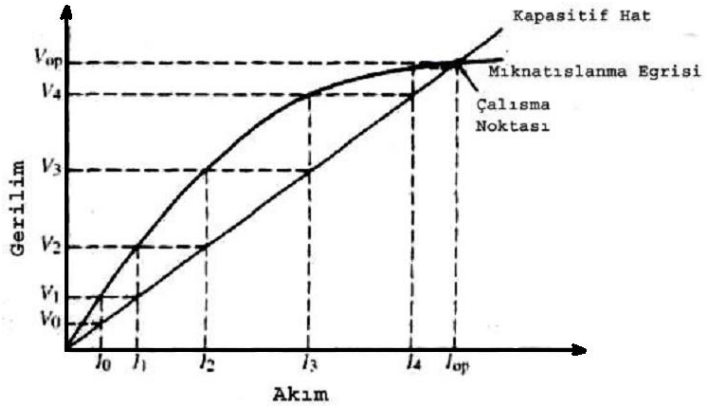
Şekil 3.22'de görüldüğü gibi motor senkron hızın çok üstünde döndürülürse devrilme moment noktasından sonra gerilim hızla düşecektir (Hubert, 2002).



Şekil 3.22. 2 Kutuplu bir makinenin 60 Hz frekansta generatör ve motor çalışma modlarında devrilme moment noktaları

Şekil 3.23'de görüldüğü gibi; artık mıknatısiyet gerilimi *Vo* gerilimi kapasitörde *Io* akımını oluşturur. Akım *Io* aynı zamanda mıknatıslanma reaktansı *Xm* 'de görülür ve bu akım mıknatıslanma eğrisinde gösterilmiştir. *Io* akımı karşıda *V*o geriliminin *V*1 gerilim değerine yükselmesine sebep olur. *V*1 gerilimi kapasitörde I1 yüksek akımını dolaştırır. Bu dönüşümde reaktans gerilimi *V*2 daha büyük gerilim değerine yükselir. Mıknatıslama eğrisi ve kapasitif hat eğrisinin kesiştiği nokta yüksüz çalışan generatör çalışma noktasıdır. Yüksüz çalışma noktasının ayarlanması kapasitif hat eğrisinin değiştirilmesiyle mümkündür. *Xc* kapasitif hat eğrisi olduğundan ve artan kapasite eğriyi küçültür ve gerilimi artırır.

$$Xc = 1/2\pi fC \qquad (3.3)$$

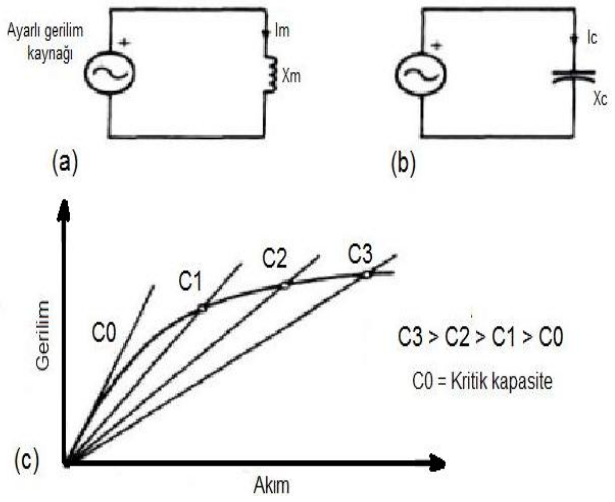


Şekil 3.23. Kendinden (şebekeden) uyartımlı generatör uç gerilim değişim eğrisi

Şekil 3.24.c'de kapasitörlerin birkaç çalışma noktası gösterilmiştir. Bu kapasitif hat değerlerinden mıknatıslanma eğrisine teğet olan *Co* kapasite değeri kritik kapasite değeri olarak adlandırılır ve bu kritik kapasite değeri gerilim oluşmasını engeller. Generatörün çalışma esnasındaki frekansı çalışma noktasındaki kapasitif reaktanstan tespit edilir. Böylece; Şekil 3.23 ve ohm kanunundan denklem 3.5 elde edilir.

$$X_c = \frac{V_{op}}{I_{op}} \Rightarrow \frac{1}{2\pi f C} = \frac{V_{op}}{I_{op}} \tag{3.4}$$

$$f = \frac{I_{op}}{V_{op}} \cdot \frac{1}{2\pi f C} \tag{3.5}$$

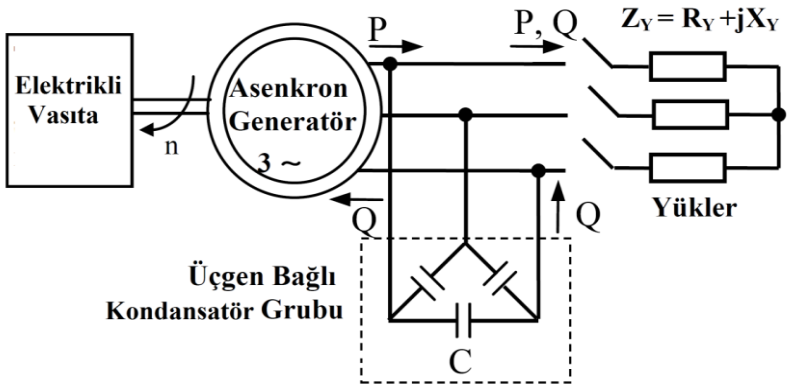


Şekil 3.24. a) Mıknatıslama eğrisinin elde edildiği devre b) Kapasitif hat eğrisinin elde edildiği devre c) Değişik kapasite değerlerinde çalışma noktasının tespiti

Kendinden uyartımlı asenkron generatörlerin en büyük handikapları yüklendikleri zaman ürettikleri gerilim değerinde hızlı düşmelerdir. Özellikle güç faktörü düşük yüklerde yüksek kapasite değerine ihtiyaç göstermeleridir.

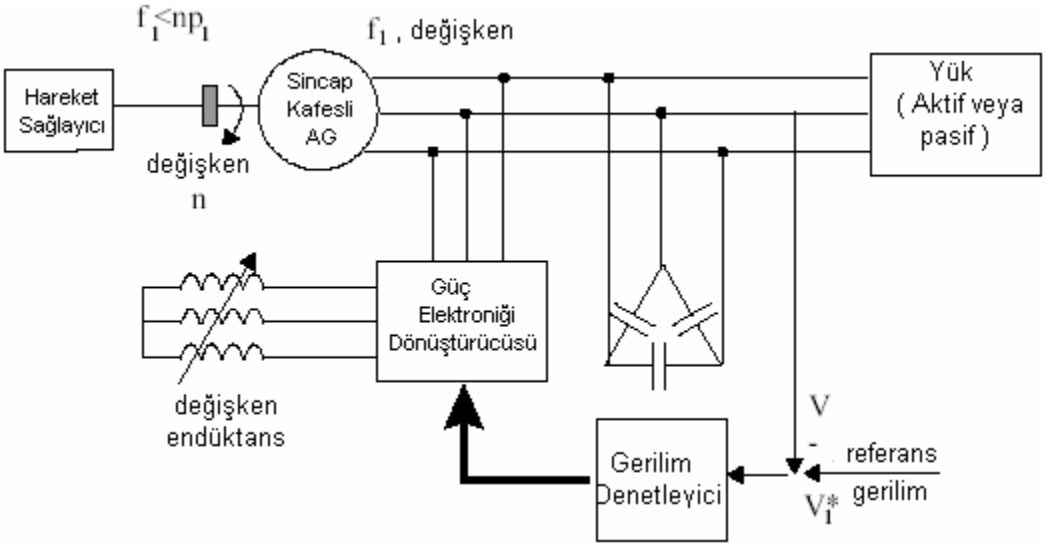
3.4.2. Kondansatör Uyartımlı Asenkron Generatör

Bir asenkron makinenin, generatör çalışma için gerekli tepkin gücü sağlayacak kondansatörler ve uçlara bağlı yeterli büyüklükte yük oldukça herhangi bir güç sisteminden bağımsız yalıtılmış bir generatör olarak çalışabilmesi olanaklıdır (Chan, 1993). Bu generatörler kondansatör uyartımlı asenkron generatörler olarak adlandırılmakta olup, sistemin ilkesel gösterilimi Şekil 3.25'de verildiği gibidir.



Şekil 3.25. Kondansatör uyartımlı asenkron generatör

Şekil 3.26'da ise şebekeden yalıtılmış kondansatör uyartımlı bir asenkron generatörde sabit uç gerilimi ve sabit frekans elde etmek için gerekli düzenek görülmektedir. Çoğu zaman şebekeye bağlı çalışan asenkron generatörlerde şebekeden fazla reaktif güç çekmeden generatör için gerekli olan mıknatıslama akımı kaynağının bir kısmını karşılaması amacıyla stator uçlarına bağlı uygun kondansatör düzenekleri kullanılır. Bu yapı ayrıca uç geriliminin istenen değerde tutulmasına da yardımcı olur. Düzeneğin çalışma ilkesi istenen referans uç gerilimi için kondansatörler tarafından sağlanan tepkin gücün değişken endüktansın akımının denetlenmesi ile dengelenmesi temeline dayanır (Wang, 1997).



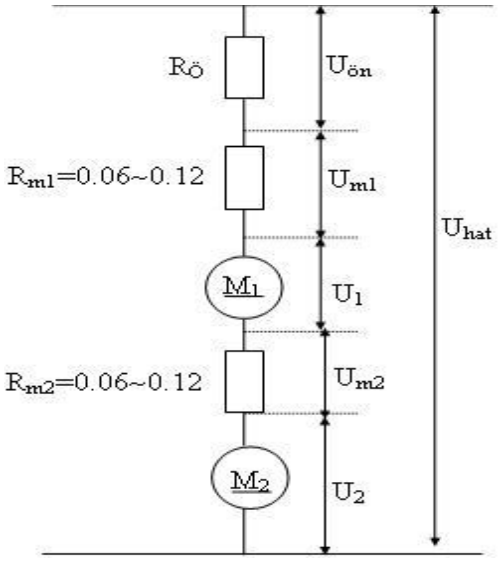
Şekil 3.26. Sabit V1 gerilimi ve değişken f1 frekans çıkışlı yalıtılmış sincap kafesli AG

3.5. Doğru Akım Makinesinin Motor ve Generatör Olarak Çalışması

Elektrikli araçlarda bir ya da birden fazla seri DC motor kullanılır. Seri DC motorlar yapılarından dolayı yüksüz çalıştırılmazlar. Bu tip tahrikli tramvaylarda DC motorun yol alması iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada DC motorlar bir direnç grubu üzerinden şebeke gerilimine seri olarak bağlanırlar. İkinci aşamada ise motorların her birinin önüne seri gelecek şekilde bir direnç grubu bağlanarak, şebeke gerilimine paralel bağlanırlar.

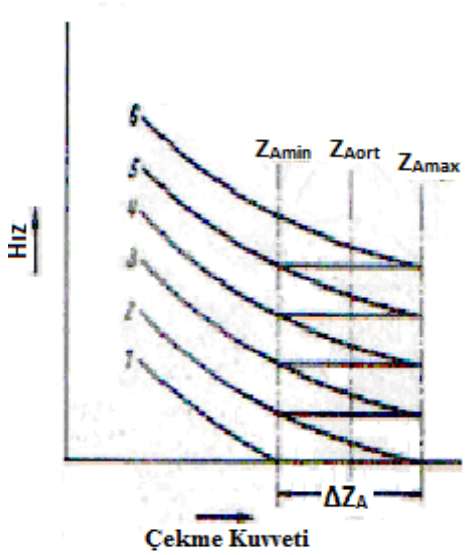
DC motor doğrudan şebekeye bağlanacak olursa ilk anda normal akımının onlarca katı akım çeker bu da sisteme zarar verir. Bu olayın sisteme vereceği zararları önlemek için DC motora yol vermek gerekir. Yol verme işleminde ilk aşamada Şekil 3.27'de görüldüğü gibi DC motorlar, kademelerden oluşan bir direnç grubu ile şebeke gerilimine seri olarak bağlanır.

Motorlar, bulundukları kademe için hesaplanan çekmelerine müsaade edilen üst akım değeri ile yol almağa başlarlar. Hızlandıkça bu akım değeri düşer ve alt akım değerine düştüğünde momenti küçüleceğinden bu hızda direncin kademe değeri bir artırılarak ön direnç değeri azaltılır ve motor uçlarındaki gerilim yükselir. Motorlar yine üst akım değerinde akım çekmeğe başlar, momentleri artar elektrikli araç ivmelenir ve hızı artar. Tekrar akım alt sınır değerine düşünce direncin kademesi bir arttırılarak yol verme işlemine bütün ön dirençler devreden çıkıncaya kadar devam edilir. Şekil 3.28'de Öndirenç kademelerinde hız-Çekme kuvveti ilişkisi görülmektedir.



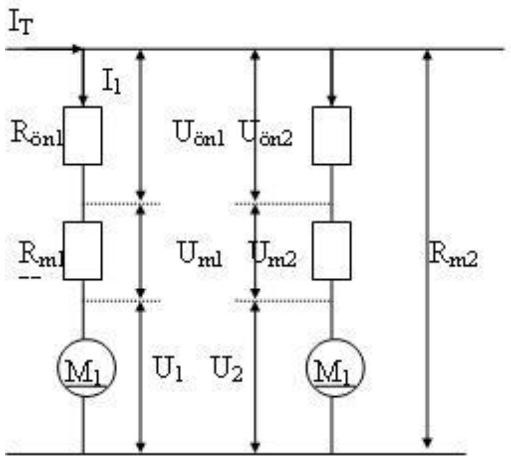
Şekil 3.27. Motorların seri olarak bir öndirençle şebekeye bağlanması

Kademeler, dirençlerin değişik şekillerde bağlanması ile oluşturulmaktadır. Öndireç grubundaki dirençler bir şalterin kontakları ile devreye alınır veya devreden çıkarılır. Motorlar yol aldıkça motorlara seri olarak bağlanan direnç değeri her kademede daha da azaltılır. Sonuncu kademede öndirençlerin tamamı devre dışı kalır, şebeke gerilimine iki DC motor seri bağlanır.



Şekil 3.28. Öndirenç kademelerinde hız-Çekme kuvveti ilişkisi

Motorlar ikinci aşamada seri bir öndirenç grubu ile şebeke gerilimine Şekil 3.29'da ki gibi paralel bağlanır. Motorlar yol aldıkça kademe değeri yükseltilir. Kademe artışında motorlara seri bağlı öndirenç grubunun değeri, dirençlere bağlı şalterler yardımıyla azaltılır. Son kademede DC motorların önüne seri bağlanan öndirenç grubları devre dışı bırakılır ve motorlar şebeke gerilimine paralel bağlanır.



Şekil 3.29. Motorların paralel olarak bir öndirençle şebekeye bağlanması

Elektrikli araç hareket halinde iken fren pozisyonuna alınacak olursa motorlar generatör olarak elektrik üretmeğe başlar. Tekerler döndüğü müddetçe, dişliler vasıtasıyla motor mili elektrikli aracın kinetik enerjisinden dolayı döndürülür. Fren pozisyonuna geçer geçmez Motorun devre bağlantısı değişir, Motorun şebekeden bağlantısı kesilir ve kutupların uyartım sargıları yabancı uyartımlı olarak akülerden beslenir. Üretilen enerji fren dirençlerine iletilir, burada ısı enerjisine dönüşür ve harcanır. Böylece tramvay elektrikli frenleme ile yavaşlatılır

4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA GÜÇ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

4.1. AC/DC Dönüştürücü

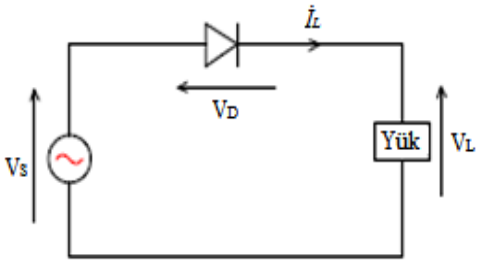
Bir doğrultucu devresi AC beslemesini DC yüke bağlayan devredir. Elde edilen DC gerilim aküde olduğu gibi sabit olmayıp ortalama gerilim seviyesinin üzerine bindirilmiş alternatif akım bileşeni içerir. Aşağıda bahsedilen devrelerin tamamı DC gerilim vermesine rağmen; çıkıştaki AC dalgalanması, ortalama gerilim seviyesi, verimi ve AC beslemedeki yükleme tesirleri açısından farklılık arz ederler.

4.1.1. Bir fazlı yarım dalga doğrultucu

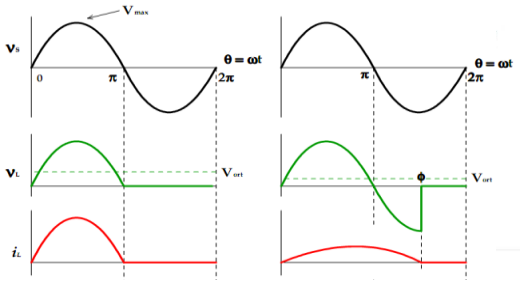
Şekil 4.1'de kontrolsüz tek fazlı yarım dalga doğrultucu görülmektedir. Dalga şekilleri çizilirken diyotun ideal anahtar gibi davrandığı kabul edilmiştir. Şekil 4.2.a'da yük saf omik iken Şekil 4.2.b'de ise indüktans içermektedir. Omik yük için diyot gerilimi düşümü ihmal edilirse yük akımı denklem 4.1'de ortalama gerilim ise denklem 4.2'de verilmiştir (Toprak, 2011).

$$IL=\frac{Vs}{R} \tag{4.1}$$

$$V_{ort} = \frac{V_{max}}{\pi} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_{max}\, sin\theta d\theta \tag{4.2}$$



Şekil 4.1. Tek faz yarım dalga doğrultucu



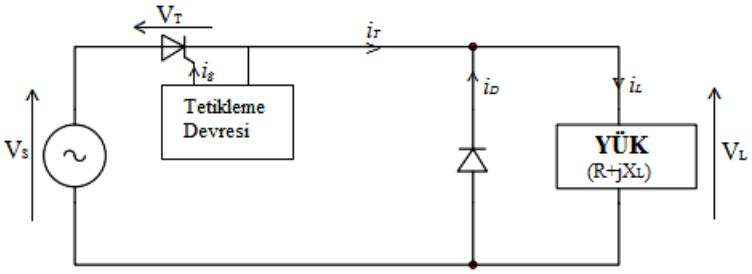
Şekil 4.2. Tek faz yarım dalga doğrultucu dalga şekilleri

Çoğu DC yükler (DC motorlar) gerilimin ortalama değerine tepki gösterirler, dolayısıyla efektif değerle pek ilgilenmez. Ancak DC gerilimdeki dalgalanmalar istemeyen kayıplara yol açar. Yüklerin neredeyse tamamı indüktans içerir. Bu durumda Şekil 4.2.b'deki dalga şekilleri elde edilir (Toprak, 2011).

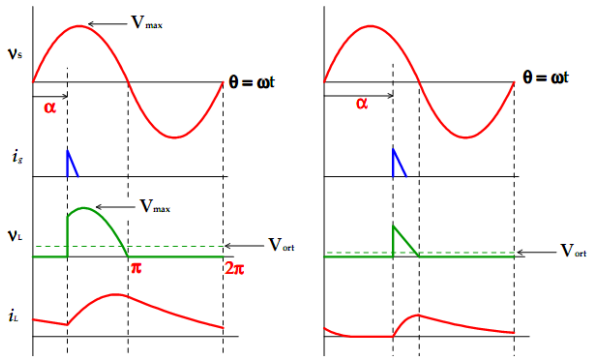
Tek faz yarım dalga devresi tristör kullanılarak kontrol edilebilir. Şekil 4.3'de devre yapısı, Şekil 4.4'de ise dalga şekilleri görülmektedir. α tetikleme açısına bağlı olarak yük akımı ve gerilimi değişmektedir. Akım seviyesi diyot tutma akımı seviyesinin altına düşerse yük akımı kesintili olur. Şekil 4.4.b'deki yük geriliminin ortalama değeri denklem 4.3 ve 4.4'de verilmiştir. α arttıkça gerilimin ortalama değeri düşer ve 180°'de sıfır olur.

$$V_{ort} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_{max}\,\sin\theta d\theta \tag{4.3}$$

$$V_{ort} = \frac{V_{max}}{2\pi}\,(1+\cos\alpha) \tag{4.4}$$



Şekil 4.3. Tek faz kontrollü yarım dalga doğrultucu

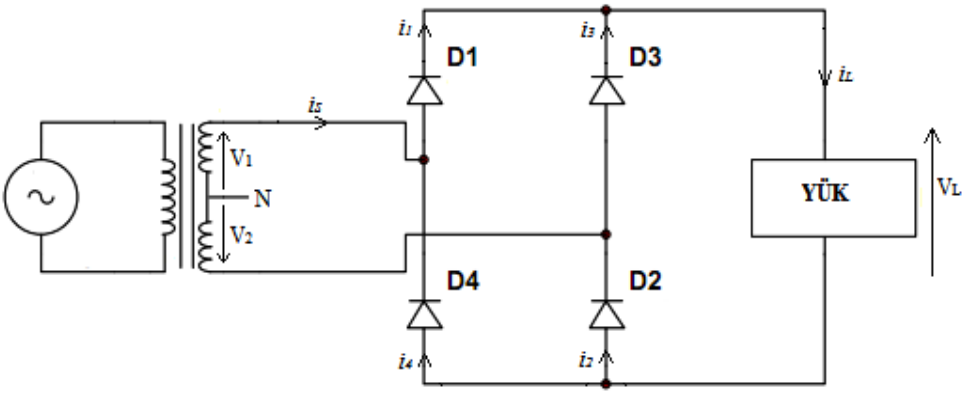


Şekil 4.4. Tek faz kontrollü yarım dalga doğrultucu dalga şekilleri

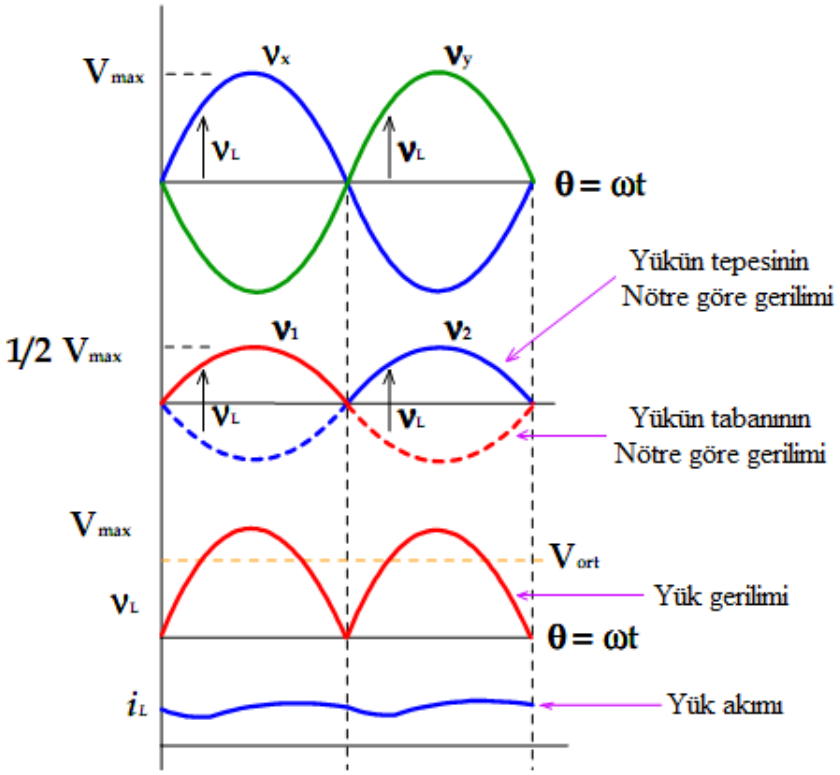
4.1.2. Bir fazlı tam dalga doğrultucu

4.1.2.1. Kontrolsüz tam dalga doğrultucu

Şekil 4.5'de tek faz köprü devresi görülmektedir. Tek faz köprü bağlantısı iki tane yarım dalga bağlantısının seri bağlanmasından elde edilmiştir. Şekil 4.6'da dalga şekilleri görülmektedir (Toprak, 2011).



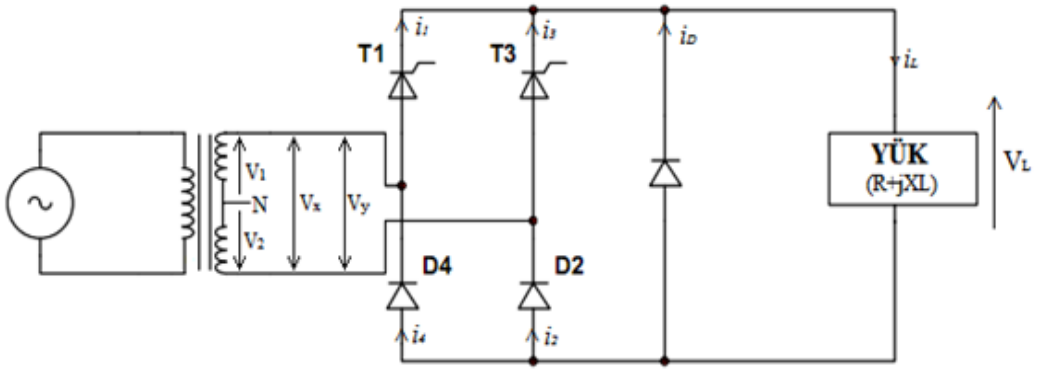
Şekil 4.5. Tek faz köprü doğrultucu



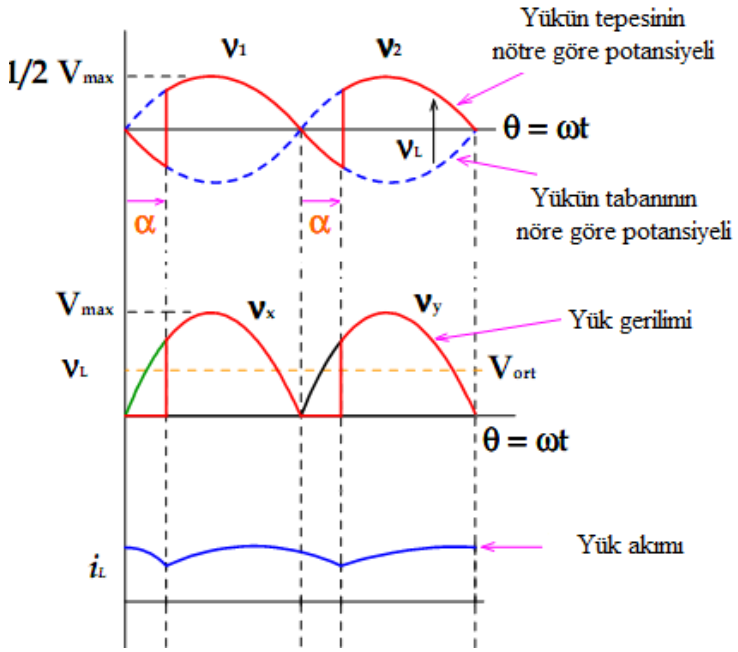
Şekil 4.6. Tek faz köprü doğrultucu dalga şekilleri

4.1.2.2. Yarı kontrollü tam dalga doğrultucu

Şekil 4.7'deki yarı kontrollü bağlantıda görüldüğü gibi, iki tristör ve iki diyot kullanarak ortalama DC gerilimi kontrol etmek mümkündür. Yüke giren akım tristörlerden geçerken dönüş yolu da diyotlarla sağlanmaktadır. Bir N (besleme nötrü) noktası tanımlayarak ve yük uçlarının bu noktaya olan potansiyel değişimlerini inceleyerek Şekil 4.8'de ki dalga şekillerini elde edebiliriz.



Şekil 4.7. Tek faz yarı kontrollü köprü doğrultucu



Şekil 4.8. Tek faz yarı kontrollü köprü doğrultucu dalga şekilleri

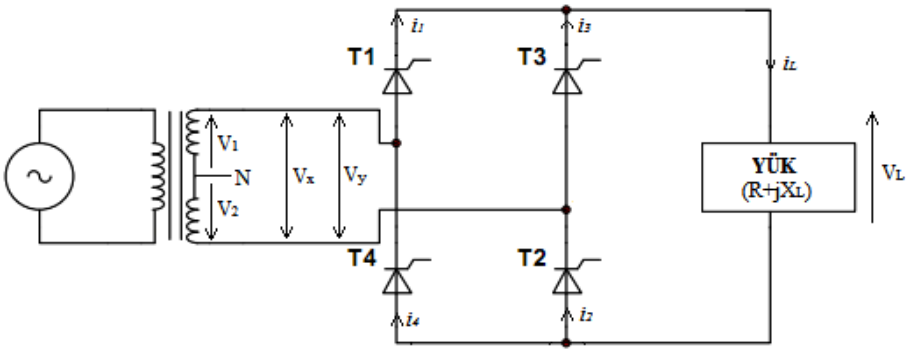
Dalga şekillerinden de görüldüğü gibi yük gerilimi asla negatif olmaz. Gecikme açısı $\alpha=180^{o}$ olunca ortalama gerilim sıfıra düşer. Yük uçlarına ters paralel bağlı olan diyot (serbest geçiş diyotu) hem yük geriliminin negatif olmasını önler, hem de indüktif olma durumu için yük akımını üzerine alır. Şebeke geriliminin sıfırdan geçtiği ve T1 iletimde olduğu bir durumda dönüş akımı D2 üzerinden şebekeye dönmektedir. T3 tristörü α kadar tetiklenmeyeceğinden bu süre zarfında yükün indüktif akımı T1 ve D4 üzerinden akmak isteyecek ve D2 akımını D4'e devredecektir. Aynı zamanda serbest geçiş diyotu da yük akımını üzerine alacağından T1 tristörü sönecektir. Ortalama değeri denklem 4.5'de verilmiştir (Toprak, 2011).

$$V_{ort} = \frac{V_{max}}{\pi} \cos \alpha \qquad (4.5)$$

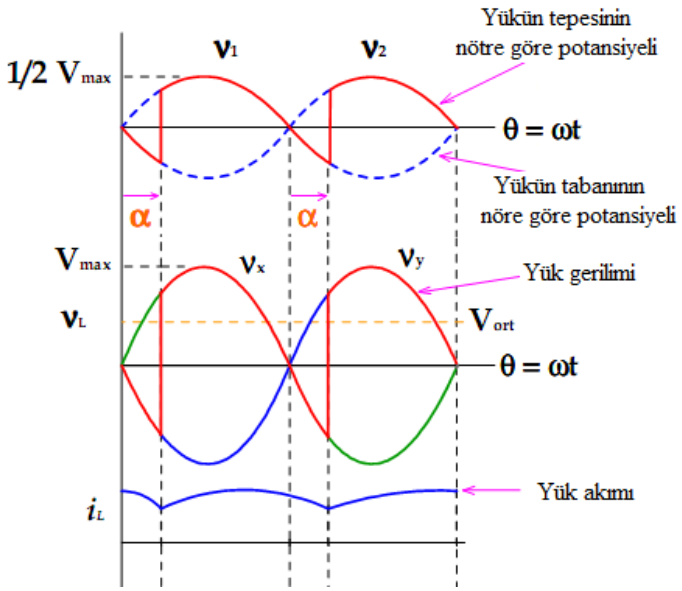
Ancak devredeki iki tristörün gerilim düşümleri dâhil edilmemiştir ve yük akımının sürekli olduğu kabul edilmiştir.

4.1.2.3. Tam kontrollü tam dalga doğrultucu

Şekil 4.9'da tam kontrollü doğrultucu görülmektedir. Tristörler tetiklenene kadar iletim söz konusu olmaz. Akımın geçebilmesi için Şekil 4.9'daki devrede T1 ve T2, T3 ve T4 grup halinde her yarı periyotta aynı anda tetiklenmelidir. Şekil 4.10'da dalga şekilleri görülmektedir (Toprak, 2011).



Şekil 4.9. Tek faz tam kontrollü köprü doğrultucu



Şekil 4.10. Tek faz tam kontrollü köprü doğrultucu dalga şekilleri

4.1.3. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu

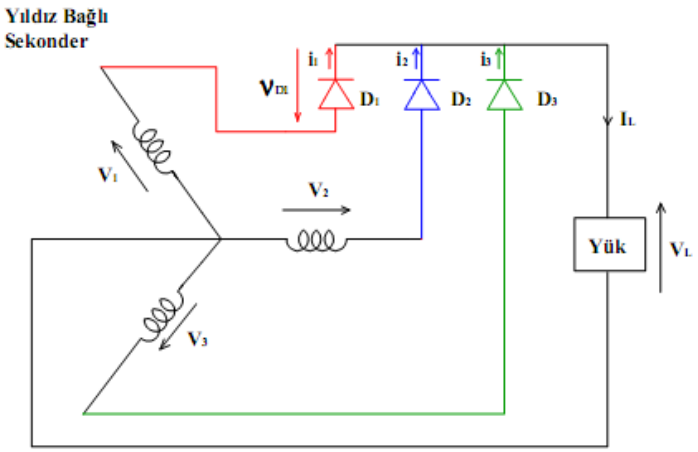
Üç faz yarım dalga bağlantısı çok fazlı doğrultucu devrelerinin temel elemanıdır. Çok fazlı bağlantılarıyla DC dalga şeklindeki dalgalanmalar daha azdır. Ayrıca endüktansı büyük güçlü yükler beslenebilir. Yük akımı dalgalanmanın azlığı nedeniyle sürekli ve sabit değerli kabul edilebilir.

Şekil 4.11'de her faz bir diyot aracılığıyla yüke bağlanmıştır. Yük çıkışı işe sekonder sargının nötr ucuyla irtibatlandırılmıştır. Herhangi bir anda sadece bir diyot iletimdedir. Şekil 4.12'deki dalga şekillerinden de anlaşılabileceği gibi, V1 gerilimi diğer sargı gerilimlerine göre daha büyük iken D1 iletimdedir. V2 gerilimi V1 'den büyük olur olmaz D1 diyodu akımını D2 'ye devreder. DC gerilimin ani değeri Vmax ile 1/2 Vmax arasında değişirken 1 periyotta 3 dalgalanma görülür. Yani bu devre üç darbeli karaktere sahiptir. Ortalama gerilim denklem 4.6'da verilmiştir.

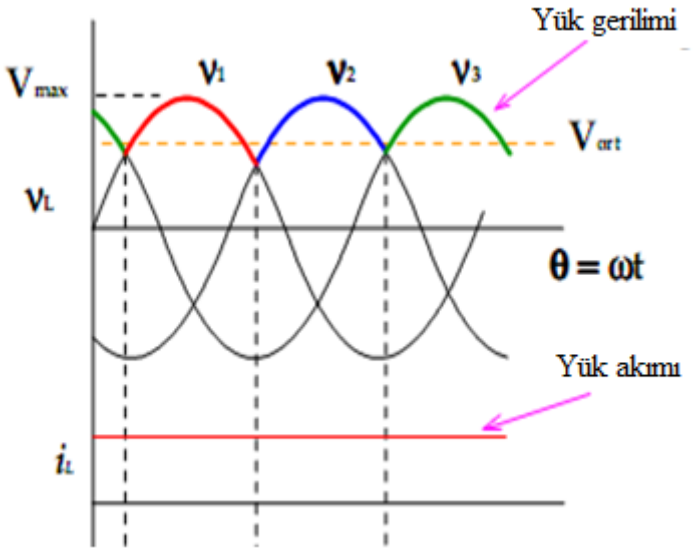
$$V_{ort} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{max} \sin\theta d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{max} \tag{4.6}$$

Yük akımı sabit kabul edilirse, her bir diyot bir periyodun üçte birinde iletimde olacağından RMS değeri denklem 4.7'de verildiği gibi olur. Diyotların maruz kalacağı gerilim $\sqrt{3}.V_{max}$olur. Yani fazlar arası gerilim kadardır.

$$I_{RMS} = I_L/\sqrt{3} \tag{4.7}$$



Şekil 4.11. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu



Şekil 4.12. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu dalga şekilleri

4.1.4. Üç fazlı tam dalga doğrultucu

4.1.4.1. Kontrolsüz tam dalga doğrultucu

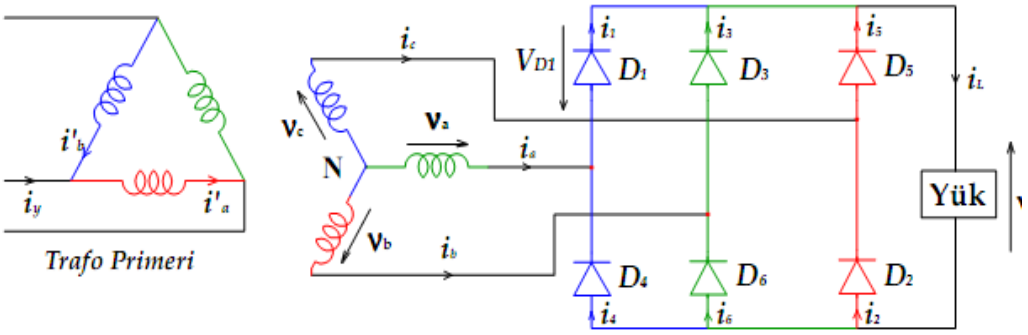
3 Faz köprü (tam dalga) devresi Şekil 4.13'de görülmektedir. Yük bir adet 3 fazlı yarım dalga bağlantısıyla beslenirken dönüş yine diğer 3 fazlı yarım dalga bağlantısıyla sağlanmaktadır. Nötr bağlantısına gerek yoktur. Şekil 4.14'de ki dalga şekilleri incelenirse; yük geriliminin, yükün üst noktası ile alt noktasının yıldız noktasına potansiyelleri arasındaki fark olduğu görülür. Bu durum denklem 4.8'de görülmektedir. Maksimum değeri, fazlar arası gerilimin maksimum değerine eşittir (Toprak, 2011).

$$V_{faz-faz} = \sqrt{3}V_{faz-nötr} \tag{4.8}$$

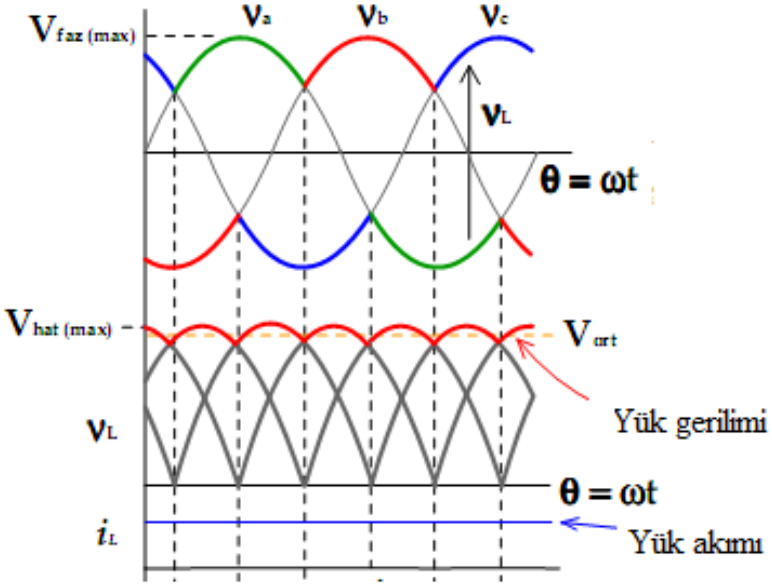
Şekil 4.13'deki transformatörün sekonderi yıldız bağlıdır, ancak üçgen bağlama da yapılabilir. Yıldız-Üçgen transformatör kullanmanın sebebi 3. harmoniği azaltmaktır. Yük geriliminin ortalama değeri denklem 4.9'da verilmiştir.

$$V_{ort} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{faz-nötr(max)} = \frac{3}{\pi} V_{faz-faz(max)} \tag{4.9}$$

Aynı anda iki diyot iletimdedir, ancak bunların gerilim düşümü ihmal edilmiştir. Diyotlar 1/3 periyot (120^o) boyunca yük akımının tamamını iletirler. AC besleme akımı simetrik olmasına rağmen basamaklı yapıdadır. Ancak, dalga şekli bir fazlı köprü devresine göre daha sinüsoidaldir (Toprak, 2011)..



Şekil 4.13. Üç fazlı köprü doğrultucu

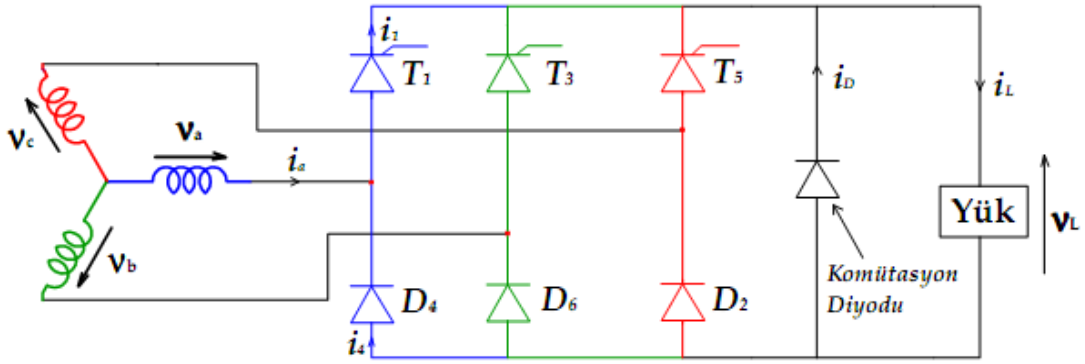


Şekil 4.14. Üç fazlı köprü doğrultucu dalga şekilleri

4.1.4.2. Yarı kontrollü tam dalga doğrultucu

6 Diyot yerine 3 tristör ve 3 diyot kullanılarak ve 3 fazlı yarım dalga bağlantısı yaparak yük gerilimi kontrol edilebilir. 1 fazlı yarım dalga bağlantısında olduğu gibi komütasyon diyotu kullanılarak Şekil 4.15'deki devre edilir. Gerilim dalga şekilleri

incelendiğinde; iki adet 3 darbeli dalganın üstte olanı küçük tetikleme darbesi gecikmeli olduğu, diğerinin ise diyot durumu dalga şekli olduğu gözlenir. Aradaki fark yük gerilimi V2 'yi verir. Bu durumda dalga şekli 3 darbeli olup tam kontrollüye göre daha fazla harmonik içerir.

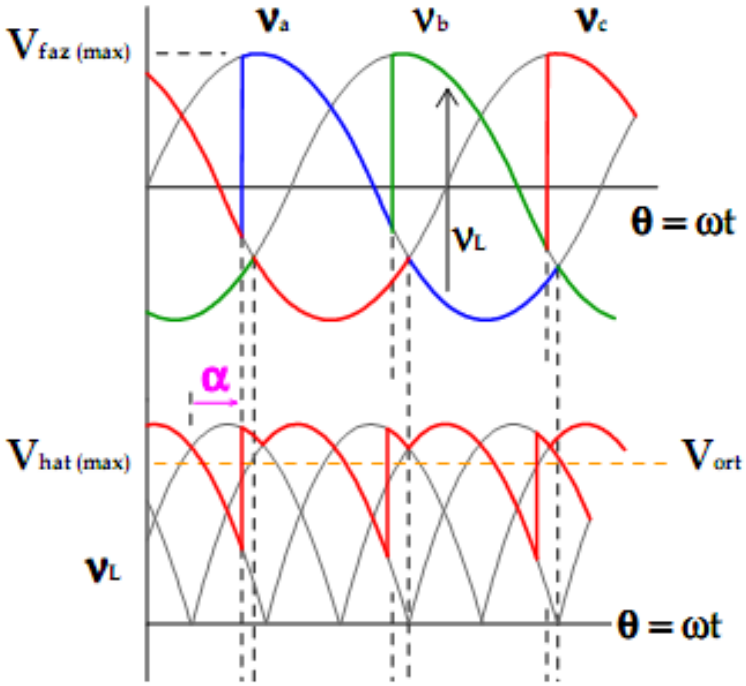


Şekil 4.15. Üç fazlı yarı kontrollü köprü doğrultucu

Şekil 4.16'da ki akım dalga şekilleri incelendiğinde ise T tristörü akımının gerilimine göre geciktirilmiş, ancak devreyi tamamlayan D diyodunun akımının ise gerilimi ile aynı fazda olduğu görülür. Bu nedenle i şebeke akımında simetrisizlik oluşacaktır. Bu da çift harmoniklerin oluşması demektir. Tetikleme açısını 90° den büyük olduğu durumlarda üst dalga formu alt dalga formuna göre daha negatif olur. Bu durumda yük gerilimi dalga şekli değeri sıfır olan bölgeler içerir. Sıfır bölgelerde yük akımı komütasyon diyotu üzerine alır. α = 180^0 için yük gerilimi ortalama değeri sıfırdır. Yük geriliminin ortalama değeri denklem 4.10'da verilmiştir.

$$V_{ort} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{Faz(\max)}(1+\cos\alpha) = \frac{3}{2\pi} V_{Hat(\max)}(cos\alpha) \qquad (4.10)$$

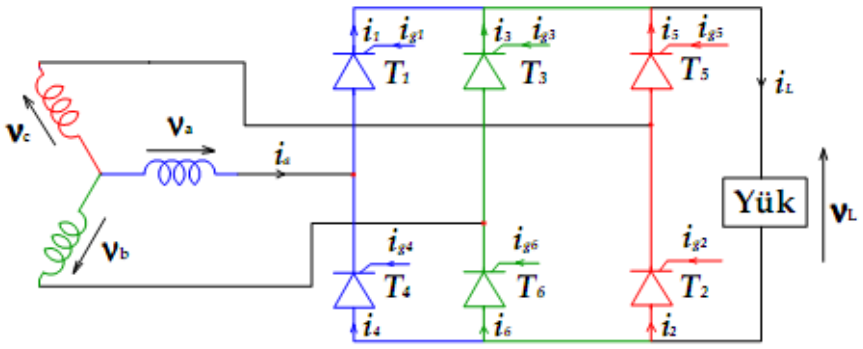
Tam kontrollü devreyle karşılaştırıldığında, yarı kontrollü devresi daha ucuz, başlangıç çalıştırma problemleri olmayan, fakat yük gerilimi ve besleme akımında daha çok harmonik oluşturan bir devredir.



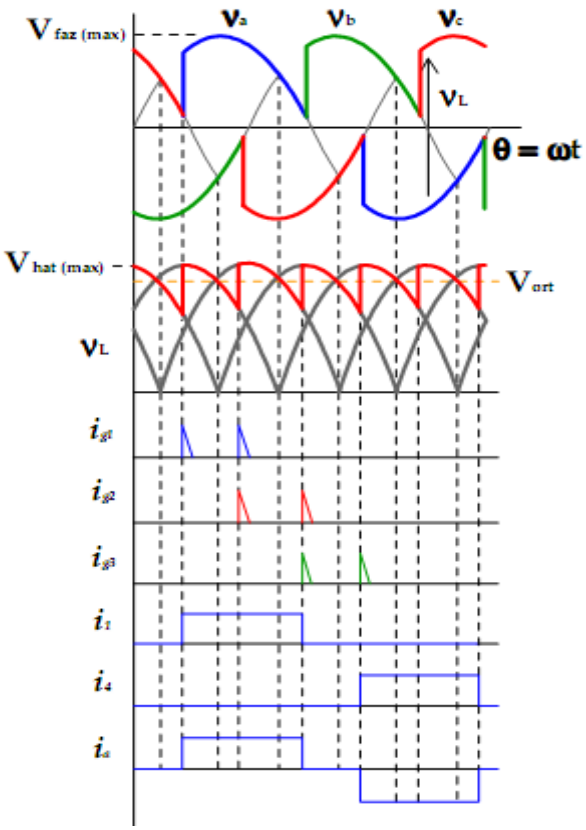
Şekil 4.16. Üç fazlı yarı kontrollü köprü doğrultucu dalga şekilleri

4.1.4.3. Tam kontrollü tam dalga doğrultucu

6 adet tristör kullanılarak 3 fazlı köprü devresi tam kontrollü yapılabilir. Dolayısıyla ortalama gerilim α'ya bağlı olarak ayarlanabilir. Şekil 4.17'de küçük bir α gecikme açısının uygulandığı tam kontrollü 3 fazlı köprü devresi görülmektedir. Şekil 4.18'de dalga şekilleri küçük bir α değeri için çizilmiştir.



Şekil 4.17. Üç fazlı tam kontrollü köprü doğrultucu



Şekil 4.18. Üç fazlı tam kontrollü köprü doğrultucu dalga şekilleri

6 Darbeli yük gerilimi dalga şeklini oluşturmak için iki 3 darbeli bağlantı bir araya getirilmiştir. Akım dalga şekilleri diyot çalışma durumuna benzer; ancak, α açısı kadar geciktirilmişlerdir. Bu köprü devresinde diğer devrelerde rastlanmayan bir problem söz konusudur. Devrenin ilk çalıştırılması sırasında iki tane tristör aynı anda iletimde olması gerekeceğinden iki tetikleme bir tristöre yapıldıktan bir müddet sonra Şekil 4.18'de görüldüğü gibi diğer tristör iletime alınırken bu tristöre yine tetikleme uygulanması zorunluluğu vardır. Bu sebeple başlangıçta her bir tristöre iki kez (fakat belirli aralıklarla) tetikleme uygulanır. Çalışma düzene kavuşunca bu uygulamaya gerek kalmaz, ancak devam edilmesi de sakınca oluşturmaz. Tetikleme gecikmesi artarsa 3 darbeli iki dalga şekli çizerek yük geriliminin dalga şekli değişimini anlamak güçleşir. Bu sebeple faz geriliminin farkından oluşan 6 hat gerilimleri ile dalga şekli elde edilebilir. Yük geriliminin ortalama değeri denklem 4.11'de verilmiştir.

$$V_{ort} = \frac{3}{\pi} V_{Hat(max)} \cos\alpha \qquad (4.11)$$

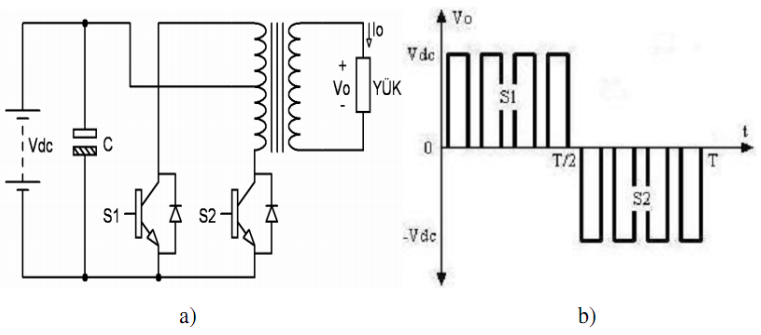
4.2. DC/AC Dönüştürücü

İnverterler, DC gerilimi değişken gerilim dalga şekline dönüştürebilen, frekansı ve gerilimi birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilen devrelerdir. İnverterler, uygulamada besleme özelliklerine göre akım beslemeli ve gerilim beslemeli olmak üzere iki grupta incelenirler. Akım veya gerilim beslemeli inverterler arasında yapılacak seçim, yükün özelliklerine göre değişir. Eğer yük, harmonik akımlara karşı yüksek empedans gösteriyorsa gerilim beslemeli inverterler, yük harmonik akımlara karşı düşük empedans gösteriyorsa akım beslemeli inverterler tercih edilmelidir. Çıkış gerilimi genellikle PWM kontrol yöntemiyle değiştirilir (Sarıtaş ve ark., 2002).

Harmonik profili genlik kontrolüne eklenen ekstra bir özelliktir. Harmonik profilinin hedefi, çıkış geriliminin temel bileşeninin genliğini kuvvetlendirmek ve yüksek seviyeli harmoniklerin elimine edilmesini veya indirgenmesini sağlamaktır. Kullanılan tekniklerden birisi, temel darbeye basamak darbeleri eklenmesidir. Diğer teknik, temel darbenin her periyoduna her biri çıkış dalga formunun istenen dalga şeklinde olmasını sağlamak için darbe genişlik modüleli çoklu darbelerin uygulanmasını gerektirir (Akdemir, 2003).

4.2.1. Push-Pull Dönüştürücüler

Bu inverterde, Şekil 4.19'da görüldüğü gibi primer tarafında orta ucu bulunan bir transformatör kullanılmaktadır. Transformatör, yük ile kaynak arasında elektriksel izolasyon sağlamaktadır. Çıkışta AC gerilim üretmek için, bir periyodun yarısında anahtarlardan biri kapalı diğeri açık konumda, periyodun diğer yarısında da kapalı anahtar açık, açık anahtar ise kapalı konumdadır. Çıkış gerilimi transformatörün dönüştürme oranı değiştirilerek ayarlanabilir (Doğan, 2006).

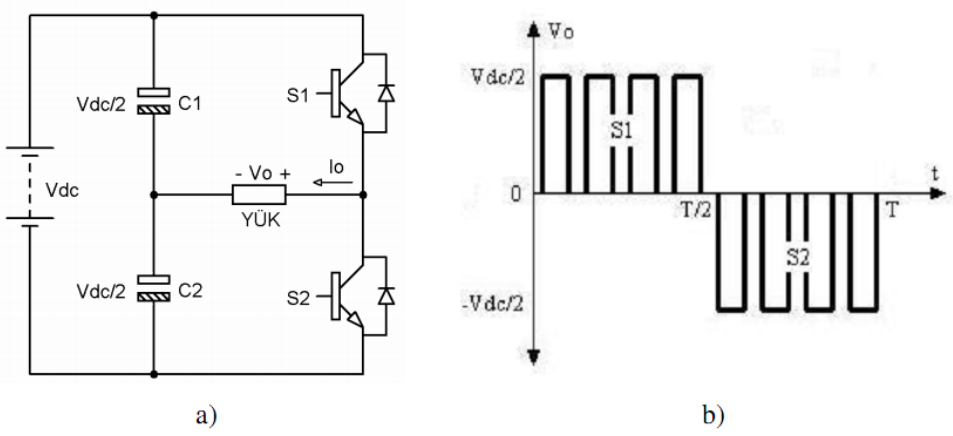


Şekil 4.19. Push-Pull inverter devre şeması ve çıkış gerilimi dalga şekli

Her yarı çevrimde akım yalnızca bir yarı iletken üzerinden akmakta ve bu nedenle yarı iletkenler üzerinde, iletim yönünde, daha az gerilim düşümü olmaktadır. Özellikle, düşük kaynak gerilimi kullanılan durumlarda bu, verimin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu devre yapısı ile sadece 2 basamaklı gerilim dalga şekli elde edilebilir. Oysa 3 basamaklı gerilim dalga şekillerinin harmonikleri daha az olduğundan, sinüs çıkış elde etmek için kullanılması gereken süzgeçler daha küçüktür. Bahsedilen bu özellikleri dolayısıyla Push-pull dönüştürücü düşük güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, çıkış geriliminin sinüs olmasının arzulanmadığı DC-DC regülatörleri için çok uygundur (Çay, 1986).

4.2.2. Yarı köprü (Half-Bridge) dönüştürücüler

Şekil 4.20.a'da verilen devre şemasında da görüldüğü gibi iki adet yarıiletken anahtarla gerekleştirilen yarı köprü inverter, düşük güç uygulamalarında kullanılmaktadır. Burada, DC gerilim kaynağına iki adet eşit kapasiteli kondansatör seri bağlanmıştır ve bağlantı noktaları her kondansatörün üzerinde Vdc/2 kadar bir gerilim olacak şekilde yarı potansiyeldedir (Doğan, 2006).

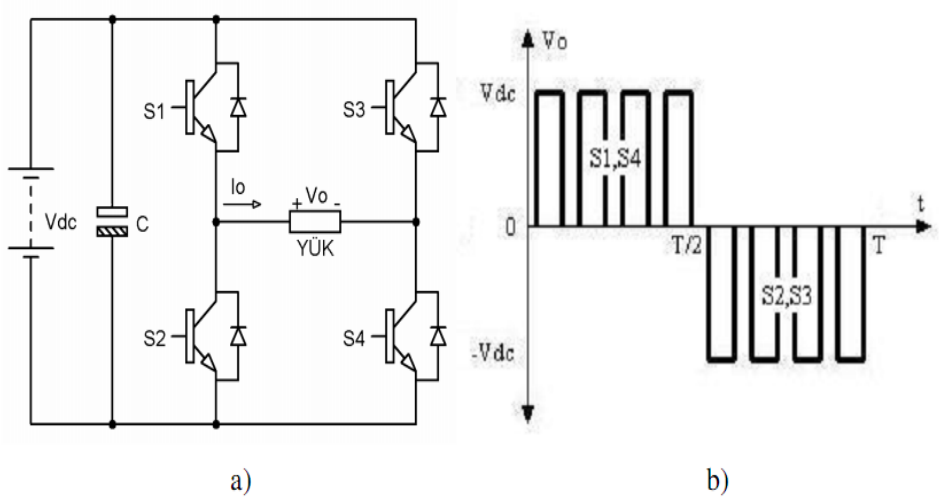


Şekil 4.20. Yarı köprü inverter devre şeması ve çıkış gerilimi dalga şekli

Şekil 4.20.b'de görülen çıkış gerilim dalga şekli anahtarların sırası ile konum değiştirmesi ile oluşmaktadır. Buna göre, 0 ile T/2 aralığında S1 anahtarı kapalı S2 anahtarı açık ve çıkış gerilimi +Vdc/2dir. T/2 ile T aralığında ise S1 açık S2 kapalı ve çıkış gerilimi Vdc/2dir. Böylece çıkış gerilimi frekansı 1/T olan ve tepe değeri +Vdc/2 ile Vdc/2 arasında değişen karesel bir dalga şekline sahip olur (Doğan, 2006).

4.2.3. Köprü (Full-Bridge) dönüştürücüler

Şekil 4.21.a'da daha yüksek güç uygulamalarında tercih edilen tam köprü inverter gösterilmiştir. İki adet yarı köprü inverterin birleşiminden oluşmaktadır. Dolayısıyla inverterde dört adet anahtar kullanılmıştır. Bu yüzden, aynı DC giriş gerilimi için, tam köprü inverterin en yüksek çıkış gerilimi yarı köprünün çıkış geriliminin iki katıdır. Bunun anlamı, aynı güç değeri için, çıkış akımı ve anahtar akımları yarı köprüdekinin yarısı kadardır. Bu durum özellikle yüksek güç değerlerinde tam köprü inverterin açık bir üstünlüğüdür (Doğan, 2006).



Şekil 4.21. Tam köprü inverter devre şeması ve çıkış gerilimi dalga şekli

Şekil 4.21.b'de görülen çıkış gerilim dalga şekli, anahtarların sırası ile çapraz olarak konum değiştirmesi ile oluşmaktadır. Buna göre, 0 ile T/2 aralığında S1 ile S4 anahtarı kapalı S2 ile S3 anahtarı açık ve çıkış gerilimi +Vdc'dir. T/2 ile T aralığında ise S1 ile S4 anahtarı açık S2 ile S3 anahtarı kapalı ve çıkış gerilimi Vdc'dir. Böylece çıkış gerilimi frekansı 1/T olan ve tepe değeri +Vdc ile Vdc arasında değişen karesel bir dalga şekline sahip olur (Doğan, 2006).

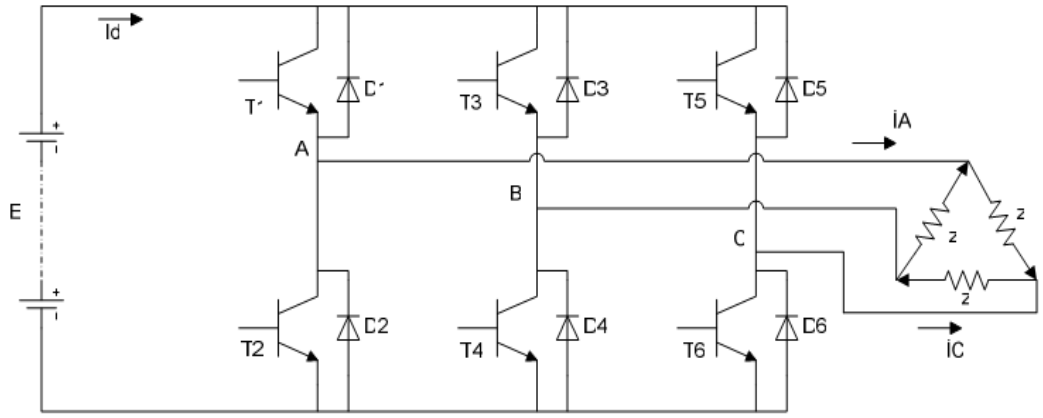
Burada, enerji akışı, anahtarlama elemanı iletimde iken DC kaynaktan AC yüke doğru ve diyotlar iletimde iken AC yükten DC kaynağa doğrudur. Diyotlar, temel olarak yükte biriken enerjiyi kaynağa geri verme görevini yaparlar. Yük akımının reaktif bileşeni arttıkça diyottan geçen akım da artar. Omik yüklerde teorik olarak diyotlara gerek kalmaz, fakat uygulamada emniyet açısından diyotlar yine bağlanır. Saf endüktif

yüklerde, anahtarlama elemanından ve diyotlardan geçen akımlar birbirine eşittir. Yani anahtarlama elemanı üzerinden yüke gelen enerji hiç harcanmadan diyotlar vasıtasıyla kaynağa geri verilir. Yükün gerilim ve akımı arasındaki faz farkı arttıkça, diyotların akımı artar.

Tam köprü dönüştürücünün en önemli özelliği çıkışta dalga biçiminde değişim basamağı sayısının artırılabilmesidir. Ayrıca, iki anahtarlama elemanının eklenmesiyle üç fazlı invertör devresine dönüşebilir.

4.2.4. Üç fazlı DC/AC dönüştürücüler

Şekil 4.22'de transistörlü üç fazlı gerilim beslemeli köprü invertör devresi verilmiştir. Üç fazlı invertör devreleri, bir fazlı tam dalga köprü invertöre bir paralel kol daha eklenerek elde edilmektedir (Ateş, 2007).

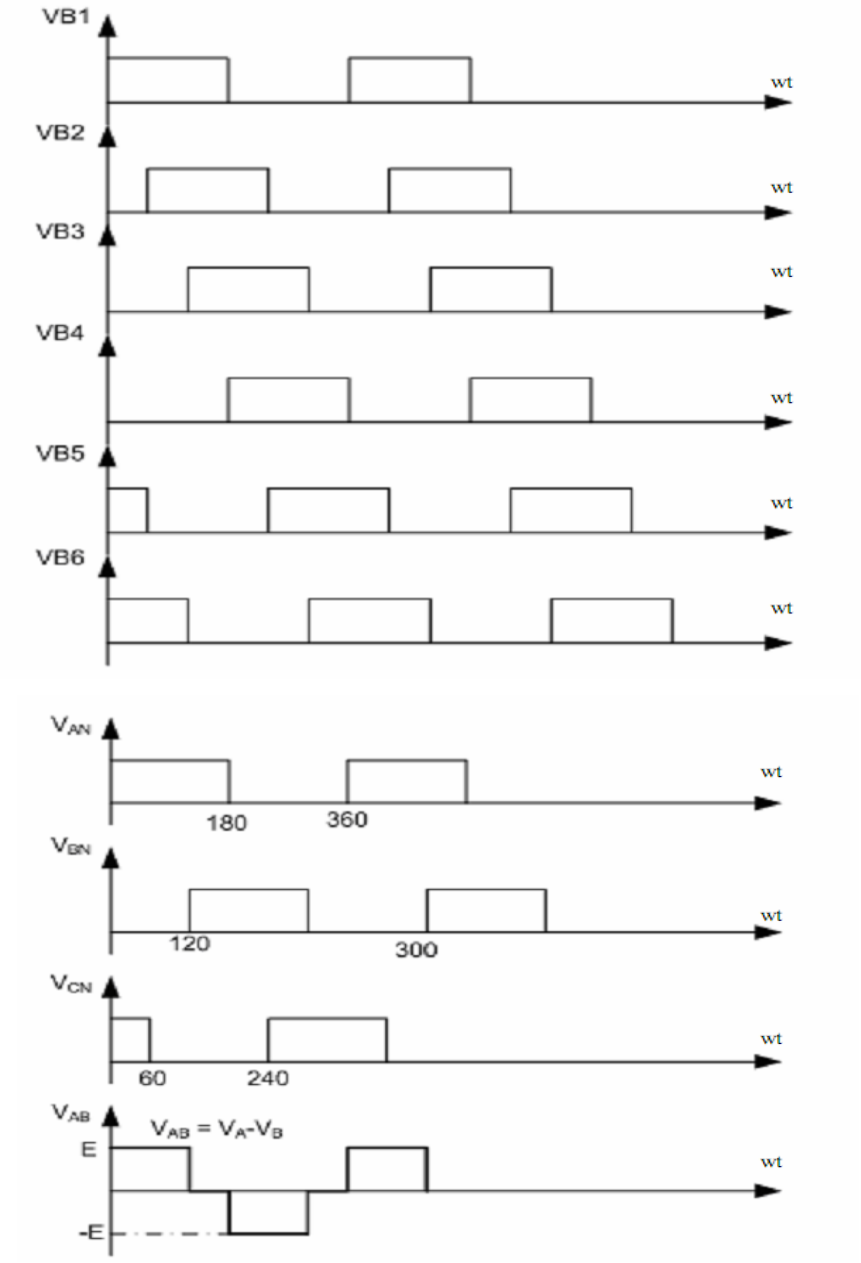


Şekil 4.22. Üç fazlı gerilim beslemeli evirici devresi

Bu evirici devresinde güç transistörleri kullanılmaktadır. T1, T2, T3, T4, T5 ve T6 transistörleri sıra ile her biri 120 derece veya 180 derece iletimde kalacak şekilde anahtarlanmaktadır. Bu nedenle evirici dalga çıkış dalga biçimleri iletim biçimlerine göre değişmektedir. İletimde olan transistör öyle bir ayarlanmalıdır ki üç fazın gerilimleri toplamı her an sıfır olmalıdır. Köprünün 6 transistöründen herhangi birinin yanlış iletime geçirilmesi veya iletim süresinin uzatarak, kendinden sonra iletime geçecek transistörün iletim süresince de iletimde kalması eviricinin güç devresini oluşturan köprüde istenmeyen kol kısa devresine yol açacaktır. Kol kısa devresini önlemek için ise, her bir koldaki alt ve üst transistörlerin anahtarlanması sırasında her

ikisinin birden kesimde tutulduğu bir minimum ölü zaman gereklidir (Rashid, 2003). Eviricinin kontrol devresi tasarlanırken bu konuya özel önem verilmelidir. Eviricideki geri besleme diyotları yükte biriken enerjiyi kaynağa geri vermek için kullanılmaktadır. Eviricinin çıkış frekansı, transistörlerin anahtarlama frekansı ile belirlenmektedir.

Üçgen bağlı direnç - endüktans durumunda üç fazlı eviricinin çıkış dalga biçimleri Şekil 4.23'de görülmektedir. Burada Van,Vbn,Vcn faz gerilimleri ve Vab, Vbc, Vca ise faz gerilimlerinin birbirinden çıkarılması ile elde edilen faz arası gerilimlerdir (Ateş, 2007).



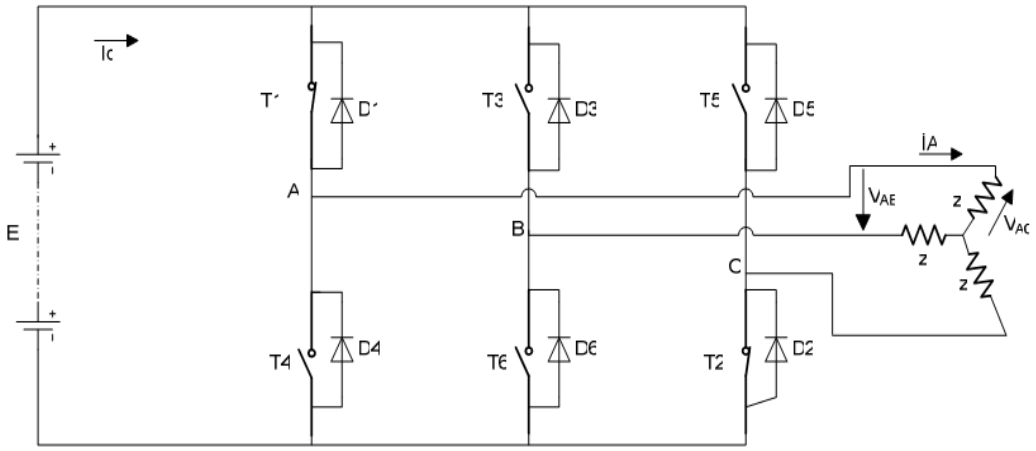
Şekil 4.23. Üç fazlı eviricinin üçgen bağlı yük durumunda çıkış gerilimi işaret biçimleri

Devrenin çalışması aşağıdaki gibi açıklanabilir. T4,T5,T6 transistörlerinin iletimde olduğu varsayılırsa T1 transistörü iletime geçirilip, T4'ün kesime getirildiği an zamanın başlangıcı olarak seçilebilir. Bu durumda, yükün C fazına uygulanan gerilim ilk 120 derece için +E olur. Bu üstel olarak artan i akımını üretir. Yük zaman sabiti göz önüne alındığında T3 iletime geçirilip T6 kesime getirildiğinde faz akımının akmakta olduğu gözlenir. Böylece C fazının her iki ucu da (+) ucuna bağlanır ve faz gerilimi sıfıra indirilir. Bununla birlikte endüktif akım, T1 ve D3 elemanları üzerinden dolaşımını devam sürdürür. Bunun sonucu olarak faz akımı ($İ_2$) üstel olarak sıfıra doğru azalır. 180 derecede T4 iletime geçirilip, yarı periyot sona erince C fazının uçlarına E gerilimi ters yönde uygulanır. Diğer fazların dalga biçimleri de, bu fazın dalga biçimlerinin 120 derece ve 240 derece kaydırılmasıyla çizilebilir. Hat akımı Ia, denklem 4.12'de verilmiştir (Ateş, 2007).

$$Ia = Iç - Ia \tag{4.12}$$

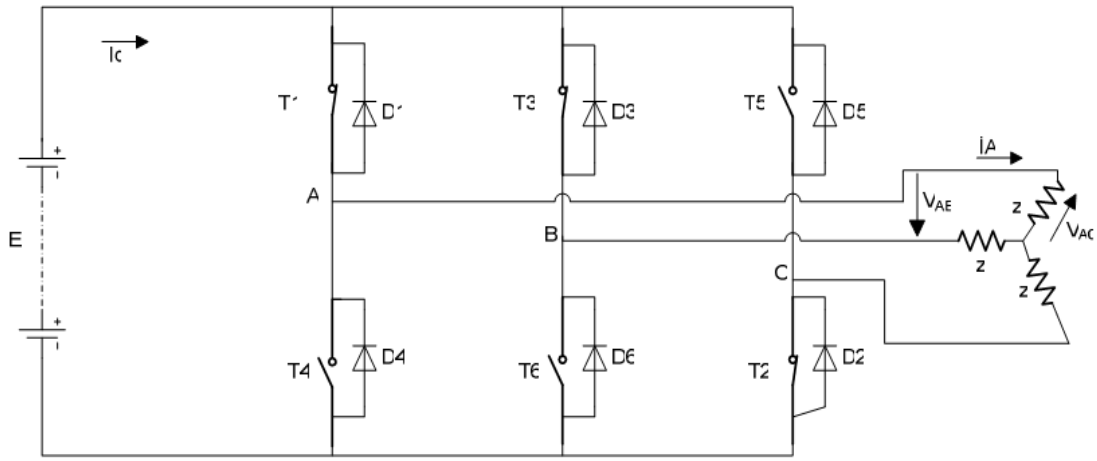
Üç fazlı eviricide anahtarlama elemanlarının her birinin 120 derece iletimde olması veya 180 derece iletimde olması durumlarında evirici çıkış dalga biçimleri değişmektedir.

120 derece iletim durumunda her bir anahtarlama elemanı bir periyotta 120 derece iletimde kalmaktadır. Bu periyot süresince bir başka tümleşik anahtarlama elemanlarıyla 60 derece iletimde kalmaktadır. Şekil 4.24'de bu ilkeye göre çalışan üç fazlı evirici devresi verilmektedir (Ateş, 2007).

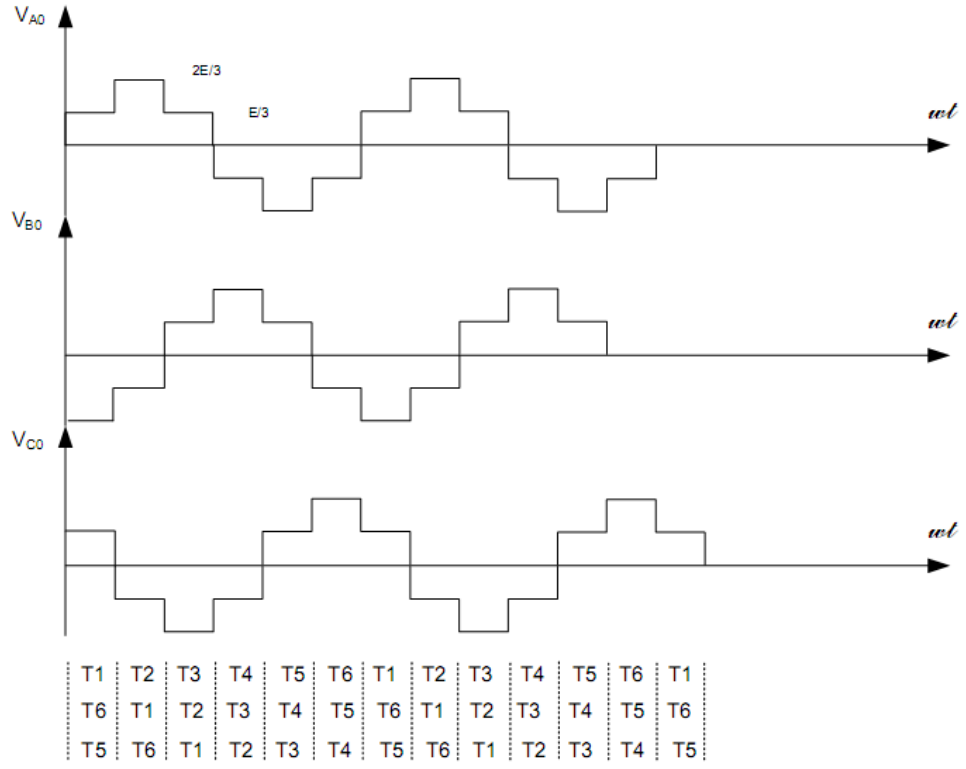


Şekil 4.24.120 Derece iletim durumunda üç fazlı evirici devresi

Uygulamada daha çok, 180 derece iletimde kalan evirici tipi kullanılmaktadır. Bu tür eviricilerde bir T anında bir kolda tek bir transistör öbür kolda ise bir transistör paralel olarak devrede bulunurlar. Şekil 4.25'de bu ilkeye göre çalışan üç fazlı evirici devresi ve Şekil 4.26'da çıkış dalga şekilleri görülmektedir (Ateş, 2007).

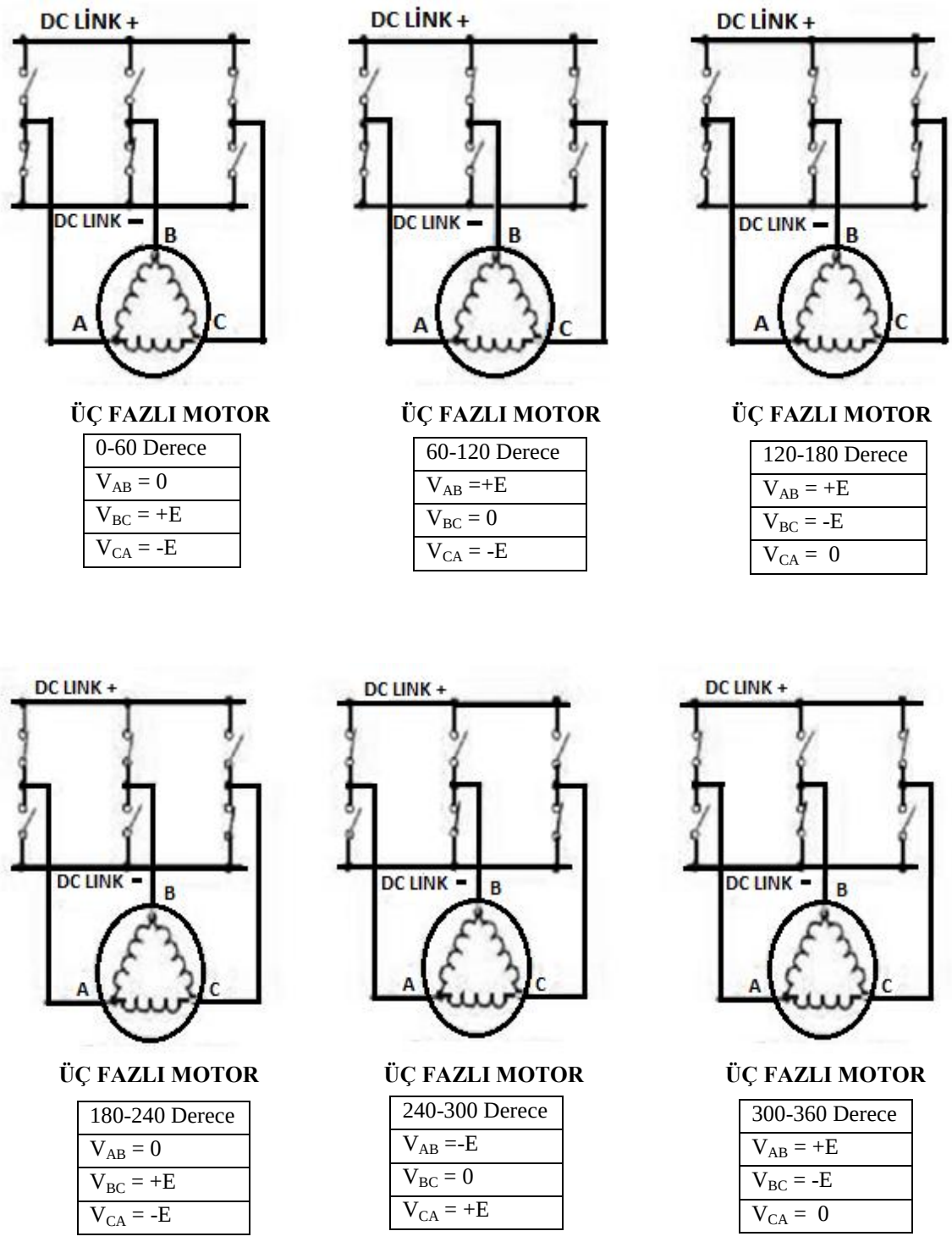


Şekil 4.25. Üç fazlı evirici devresi



Şekil 4.26. 180 Derece iletim durumunda çıkış dalga şekilleri

Şekil 4.27'de yıldız bağlı dengeli direnç yükünde ve 180 derece iletim durumunda Şekil 4.26'deki faz gerilim ve akım dalga şekillerinin belirlenmesi için yapılan analiz sonuçları verilmektedir (Ateş, 2007).



Şekil 4.27. Faz akım ve gerilim dalga şekillerinin belirlenmesi için yapılan analiz

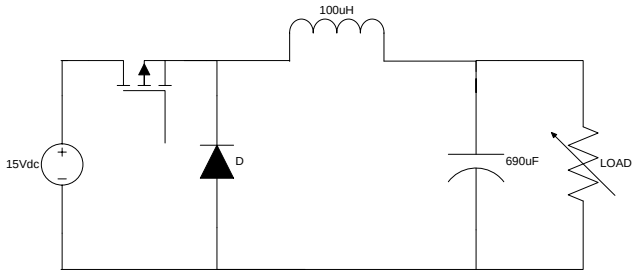
4.3. DC/DC Dönüştürücü

DC-DC dönüştürücüler endüstride oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaman zaman doğrudan, ayarlanabilir gerilimli bir güç kaynağı uygulaması, herhangi bir uygulamada gerekli olan herhangi bir DC gerilim seviyesinin elde edilmesi, ya da empedansları uyumsuz olan ardışık 2 katın birbirine uydurulması vb. sebepler için kullanılırlar.

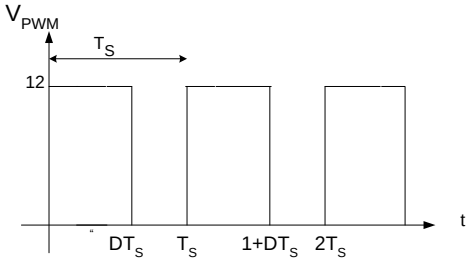
4.3.1. Gerilim azaltan (Buck) dönüştürücüler

Şekil 4.28'de tipik tek transistorlü bir gerilim azaltan dönüştürücü devre şeması görünmektedir.

Görüldüğü üzere devrede biri kontrollü (MOSFET) diğeri ise kontrolsüz (diyot) olan iki adet anahtar bulunmaktadır. Mosfet'in kapı-kaynak terminaline sabit frekansta, ayarlanabilir darbe genişliğine sahip, yine Şekil 4.29'da görülen PWM sinyali uygulanmaktadır. Bu sinyalin DT_S süresince (yani darbenin uygulandığı sürede) transistör, geriye kalan $(1\text{-}D)T_S$ ile gösterilen süresinde de diyot iletimde olacaktır. Bu durum devrenin 2 ayrı modda çalışarak lineer olmayan bir yapı göstermesine sebep olur. Devrenin bu 2 ayrı modunu inceleyerek gerilim azaltan dönüştürücünün giriş ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi bulabiliriz.

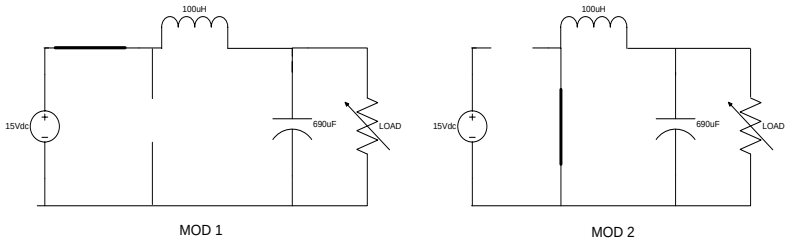


Şekil 4.28. Transistörlü bir gerilim azaltan dönüştürücü devre şeması



Şekil 4.29. PWM sinyali

Şekil 4.30.a' da dönüştürücünün, transistörün iletimde diyotun kesimde olduğu mod 1'deki durumu gösterilmiştir. Transistör iletimde olduğu için kısa devre olarak, diyot ise kesim durumunda olduğu için açık devre olarak gösterilmiştir.



a b

Şekil 4.30. Transistörün iletimde ve kesimde olduğu durumlar

Şekil 4.30'de görüldüğü gibi mod 1'de indüktör, doğrudan çıkış ile giriş arasına bağlanmıştır. Bu durumda bu modda indüktörün uçları arasındaki gerilim denklem 4.13'de verildiği gibi giriş gerilim ile çıkış gerilimi arasındaki fark kadardır.

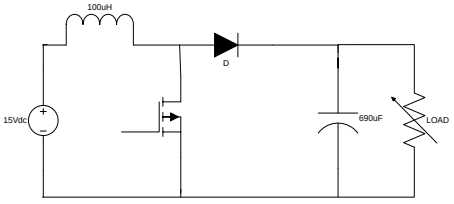
$$V_L = V_g - V \tag{4.13}$$

Şekil 4.30.b'deki mod 2 durumunda bakarsak bu kez transistörün kesimde diyotun iletimde olduğunu görürüz. Bu durumda indüktör üzerinde, çıkış gerilimine eşit ve ters polariteli bir gerilim gözlemleriz. Bu durum denklem 4.14'de verilmiştir.

$$V_L = -V \tag{4.14}$$

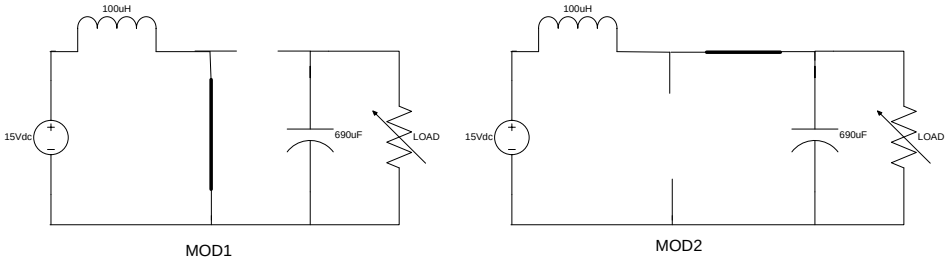
4.3.2. Gerilim artıran (Boost) dönüştürücüler

Şekil 4.31'de tek transistörlü tipik bir gerilim artıran dönüştürücünün (boost converter) devre şeması görülmektedir. Bu devre de gerilim azaltan dönüştürücü devresi gibi anahtar olarak bir mosfet bir de diyot bulundurmaktadır. Mosfet yine aynı şekilde, sabit frekanslı bir PWM sinyali ile sürülmektedir.



Şekil 4.31. Gerilim artıran dönüştürücünün (boost converter) devre şeması

Bu devre de diyotun ve transistorün iletimine göre 2 moddan oluşmaktadır. Şekil 4.32'de bu modlar gösterilmektedir.



a b

Şekil 4.32. Diyotun ve transistorün iletimine göre modlar

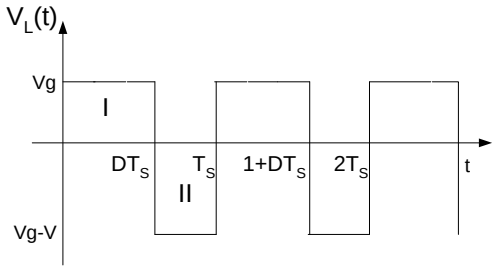
Devreyi, gerilim azaltan dönüştürücüde yaptığımız gibi bobin gerilimi üzerinden modelleyerek, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasında ilişkiyi elde edebiliriz. Transistorün iletimde diyotun kesimde olduğu mod 1'de bobin, transistör üzerinden doğrudan toprağa bağlanmış durumdadır. Dolayısıyla üzerinde giriş gerilimi olduğu gibi görünecektir. Bu durum denklem 4.15'de yazılmıştır.

$$V_L = V_g \tag{4.15}$$

Mod 2'de transistör kesimdedir ve devre diyot üzerinden çıkışa enerji aktarmaktadır. Bu durumda bobin gerilimi giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki farka eşit olacaktır. Bu durum denklem 4.16'da yazılmıştır.

$$V_L = V_g - V \tag{4.16}$$

Buna göre bobinin terminalleri arasındaki gerilim şekil 4.33'de gösterildiği gibi olacaktır.

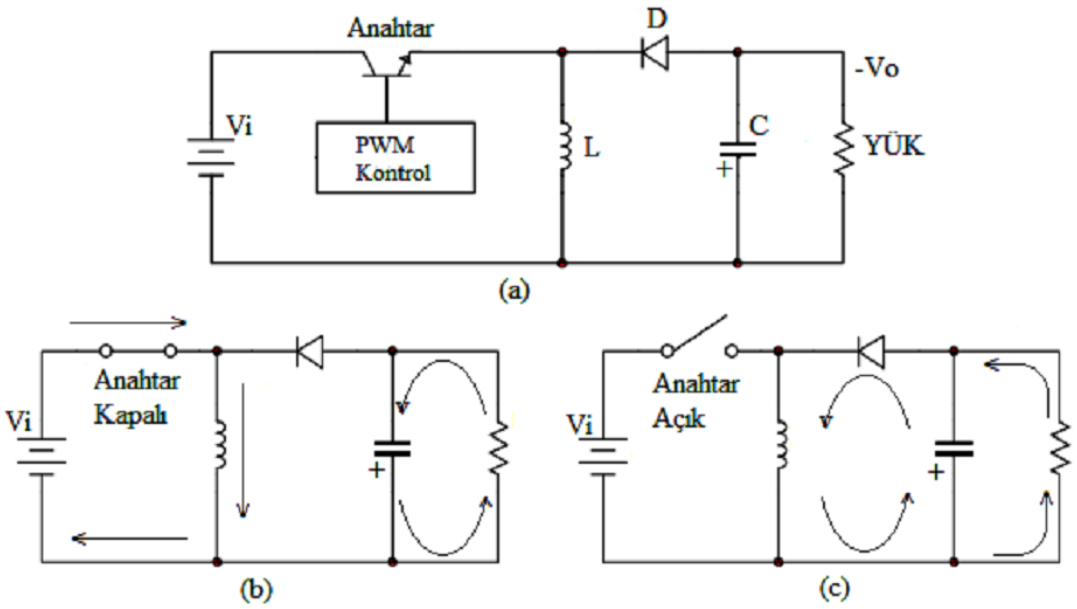


Şekil 4.33. Bobinin terminalleri arasındaki gerilim

4.3.3. Yön çeviren (Buck-Boost) dönüştürücüler

Buck-Boost veya inverting (tersleyici) regülatör, DC giriş gerilimini işleyerek DC çıkış gerilimi elde eder. Bu gerilim girişe göre ters polaritededir. Negatif çıkış gerilimi girişe göre daha yüksek ya da daha düşük büyüklükte olabilir. Şekil 4.34'de inverting regülatörün yapısı gösterilmiştir (Toprak, 2011).

Anahtar kapatıldığında indüktans üzerinde giriş gerilimi oluşur ve indüktans akımı lineer olarak maksimum değerine yükselir. Bu durumda diyot kesimdedir. Anahtar açıldığında ise diyot iletime geçer ve indüktansta depolanan enerji çıkış kondansatörüne veya yüke aktarılır (Toprak, 2011).



Şekil 4.34. Buck-Boost (İnverting) dönüştürücü

Bu dönüştürücüde, diğer dönüştürücülerin aksine, çıkışa transfer edilecek gücün tamamı indüktans üzerinde depolanan enerji vasıtasıyla iletilir. Bu da ancak düşük güçlü sistemler için uygundur. Anahtar kapalı oluğu durumda indüktans akımı denklem 4.17'de ki gibi artar (Toprak, 2011).

$$\Delta I_{Li} = \frac{Vi}{L} t_{on} = \frac{Vi}{L} T \qquad (4.17)$$

Anahtar açıldığında ise diyot iletime geçer ve indüktans akımı kesilmeden, denklem 4.18'de ki gibi azalarak çıkışa akmaya devam eder.

$$\Delta I_{Lo} = \frac{Vo}{L}\, t_{off} = \frac{Vo}{L}\,(1-\lambda)T \tag{4.18}$$

Giriş akımı çıkış akımına eşit olduğunda kalıcı duruma ulaşılır. Bu durum denklem 4.19'da gösterilmiştir.

$$\frac{Vi}{L}dt = \frac{Vo}{L}(1-\lambda)T \tag{4.19}$$

Bu denklemden çıkış gerilimi denklem 4.20'deki gibi bulunur.

$$V_o = \frac{\lambda.Vi}{1-\lambda} \tag{4.20}$$

Bu denklemden, değişken giriş ve görev periyoduna bağlı olarak sabit bir çıkış gerilimi üretebileceğimiz görülmektedir (Toprak, 2011).

4.4. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)

İnverterlerde istenilen en önemli şey, çıkış işaretinin genliğini ve frekansını ayarlayabilmektir. Ayrıca çıkışın harmoniksiz olması yani sinüzoidal olması istenir. Ancak inverter çıkışında ana harmoniğe çok yakın ve genlikleri büyük harmonikler oluşmaktadır. Bu harmonikler yükü çok etkilemektedir. İnverterlerde çıkış harmonik bileşenlerinin büyüklüğünü azaltmak ve çıkış genliğini ayarlamak amacı ile PWM kullanılır (Toprak, 2011).

PWM, temel elektronik devre elemanlarıyla gerçekleştirildiği gibi özel PWM entegre devreleri ve mikroişlemciler yardımıyla da gerçekleştirilmektedir.

Genel olarak PWM sinyalleri yüksek frekanslı bir üçgen taşıyıcı dalga ile istenen çıkış frekansındaki bir referans sinüs dalganın karşılaştırılmasından elde edilir. Denklem 4.21'de yazıldığı gibi referans dalganın tepe değerinin (VR) üçgen taşıyıcı dalganın tepe değerine (VC) oranına modülasyon indeksi denir ve Ma ile gösterilir (Toprak, 2011).

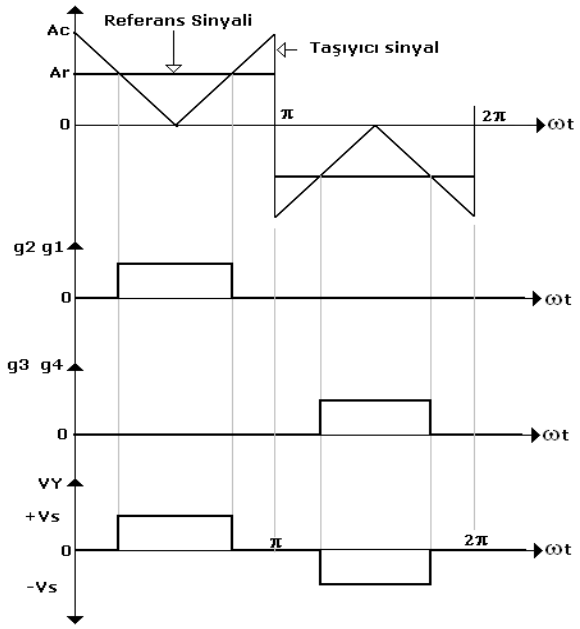
$$M_a = \frac{V_R}{V_{C_R}} \tag{4.21}$$

Modülasyon indeksinin değiştirilmesi çıkış gerilimi ana harmonik genliğini ayarlar. Üçgen taşıyıcı dalga frekansının (f_s) referans dalga frekansına (f_m) oranı frekans modülasyon oranıdır ve m_f ile gösterilir. Bu durum denklem 4.22'de verilmiştir. mf'nin en az 9 olması istenir. m_f ne kadar büyük olursa harmonik bileşenler ana harmonikten o derece uzaklaşır (Toprak, 2011).

$$m_f = \frac{f_s}{f_m} \tag{4.22}$$

4.4.1. Tek pals genlik modülasyonu

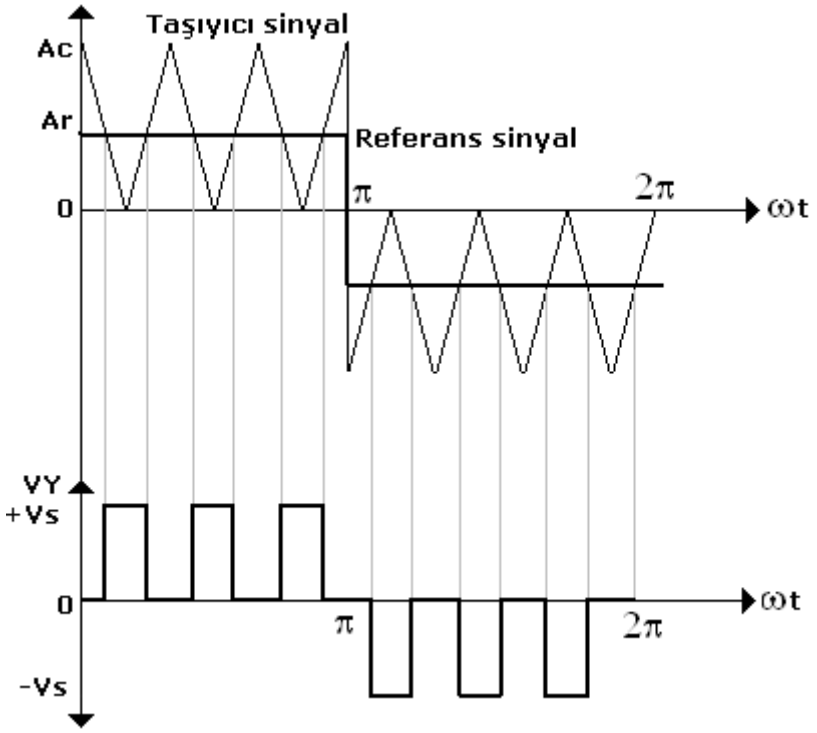
Tek pals genişlik modülasyonu ile kontrolde, her yarım saykılda tek pals vardır. İnvertor çıkış gerilimi, palsin genişliği değiştirilerek sağlanır. Şekil 4.35'e bakacak olursak tetikleme sinyallerinin üretimini ve tek fazlı tam köprü bir invertör devresinin çıkış gerilimini göstermektedir. Tetikleme sinyalleri genliği Ar olan bir kare dalga referans sinyali ile genliği Ac olan bir üçgen dalga taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması ile elde edilir. Referans sinyalin frekansı çıkış geriliminin temel frekansını tayin eder Ar'nin sıfırdan Ac'ye kadar değişimini pals genişliğinin sıfırdan 180 dereceye kadar değişimine neden olur.



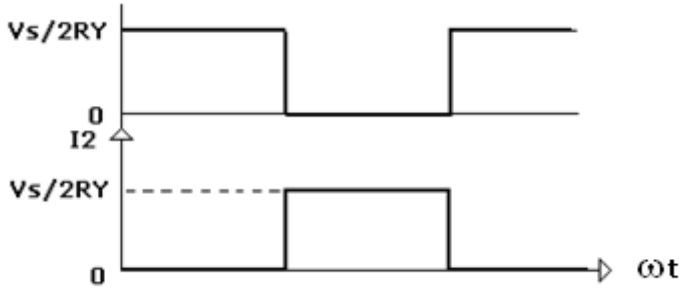
Şekil 4.35. Tetikleme sinyallerinin üretimi ve tek fazlı tam köprü bir invertör devresinin çıkış gerilimi

4.4.2. Çoklu pals genlik modülasyonu

Bir invertörün harmoniği, çıkış geriliminin her bir yarım saykılda birçok pals kullanmakla azaltılabilir. Transistörleri iletim ve yalıtıma sokmak için gereken tetikleme sinyalleri, Şekil 4.36'daki gibidir. Bir referans sinyal ile üçgen dalga şekildeki gibi kıyaslanması ile elde edilir. Referans sinyalin frekansı, çıkış frekansını tayin eder. Taşıyıcı frekans ise her bir yarım saykılda ki pals sayısını belirler. Tek fazlı bir köprü invertör devresinin çıkış gerilimi Şekil 4.37'deki gibidir.



Şekil 4.36. Transistörleri tetikleme sinyalleri



Şekil 4.37. Tek fazlı bir köprü invertör devresinin çıkış gerilimi

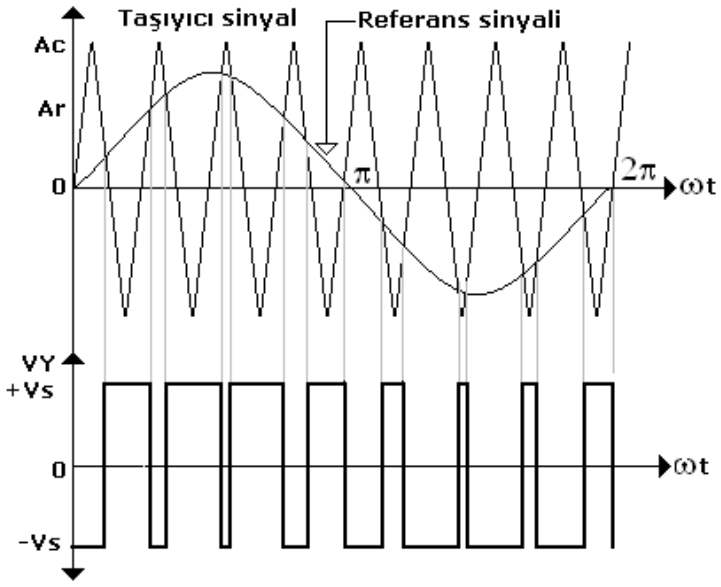
Tek pals modülasyonu ile kıyaslandığında distorsiyon faktörü oldukça azaltılmıştır. Bununla birilikte güç transistörlerinin iletim ve yalıtım sayısının fazla olması anahtarlama kayıplarını artırır. Her bir yarım saykıldaki pals sayısının fazla olması düşük dereceli harmoniklerin genliğini azaltır.

4.4.3. Sinüsoidal pals genlik modülasyonu

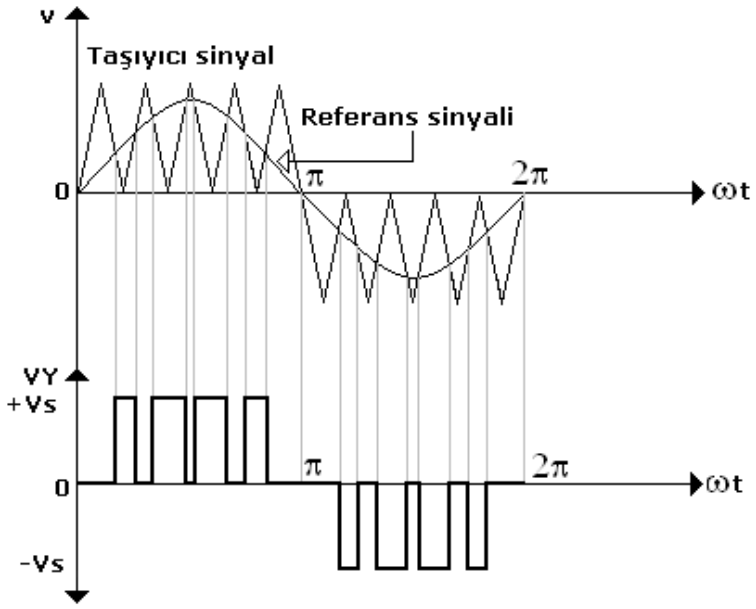
Bu teknikte her bir palsın genişliği sinüs dalgasının genişliği ile orantılı olarak değişir. Distorsiyon faktörü ve düşük dereceli harmonikler önemli derecede azaltılır. Tetikleme sinyalleri Şekil 4.38'deki gibi bir sinusoidal referans sinyali ile bir üçgen dalga taşıyıcı sinyalin kıyaslanması ile elde edilir.

Yukarıda açıklanan PWM'a alternatif bir yol vardır. Bir fazlı köprü inverter devresindeki dönüştürücüde transistörler, çift çift olarak sürülerek DC kaynak sürekli bir şekilde yüke bağlanarak kontrol edilebilir. Böylece çıkış geriliminin sıfır olduğu bölümlerden kaçınılmış olur. Bu durumda Şekil 4.39'daki PWM dalga şekli elde edilmiş olur. Çıkış gerilimi dalga şeklinin yarı periyodunda ters periyotlar kısadır (Çay, 1986)

Endüstriyel uygulamalarda çok sık kullanılan bu modülasyon SPWM kısaltması ile tanınır. Referans sinyalin frekansı invertörün çıkış frekansını belirler her bir yarım saykıldaki pals sayısı taşıyıcı frekansa bağlıdır.



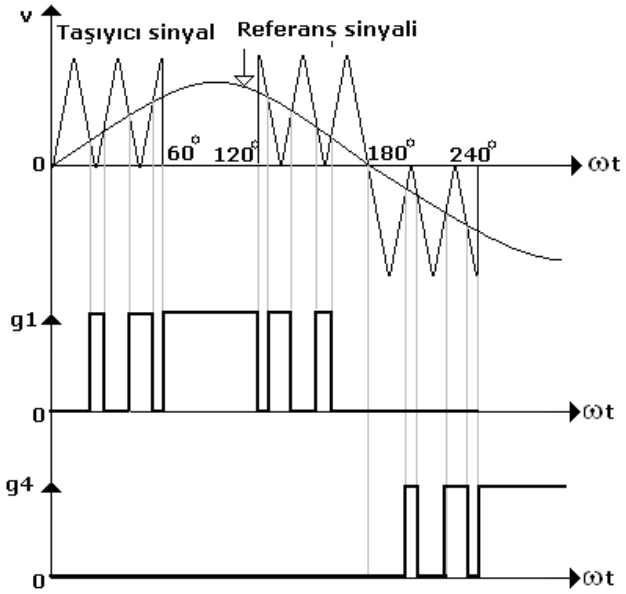
Şekil 4.38. Tetikleme sinyallerinin elde edilmesi



Şekil 4.39. Kaynağın sürekli olarak yüke bağlı olması durumunda PWM'li dalga şekli

4.4.4. Modifiye sinüsoidal pals genlik modülasyonu

Şekil 4.40'da gösterilen bu teknikte sinüs dalgası tepe kısmına yakın bir bölgede pals genişliği yaklaşık sabittir. Çünkü taşıyıcı dalga her bir yarım saykıl için 60 derece aralıklarla uygulanır (0 dereceden 60 dereceye kadar ve 120 dereceden 180 dereceye kadar) güç transistörlerinin anahtarlama sayısı azalacağından anahtarlama kayıpları da düşüktür.



Şekil 4.40. Tetikleme sinyallerinin elde edilmesi

4.4.5. Üç fazlı sinüsoidal PWM

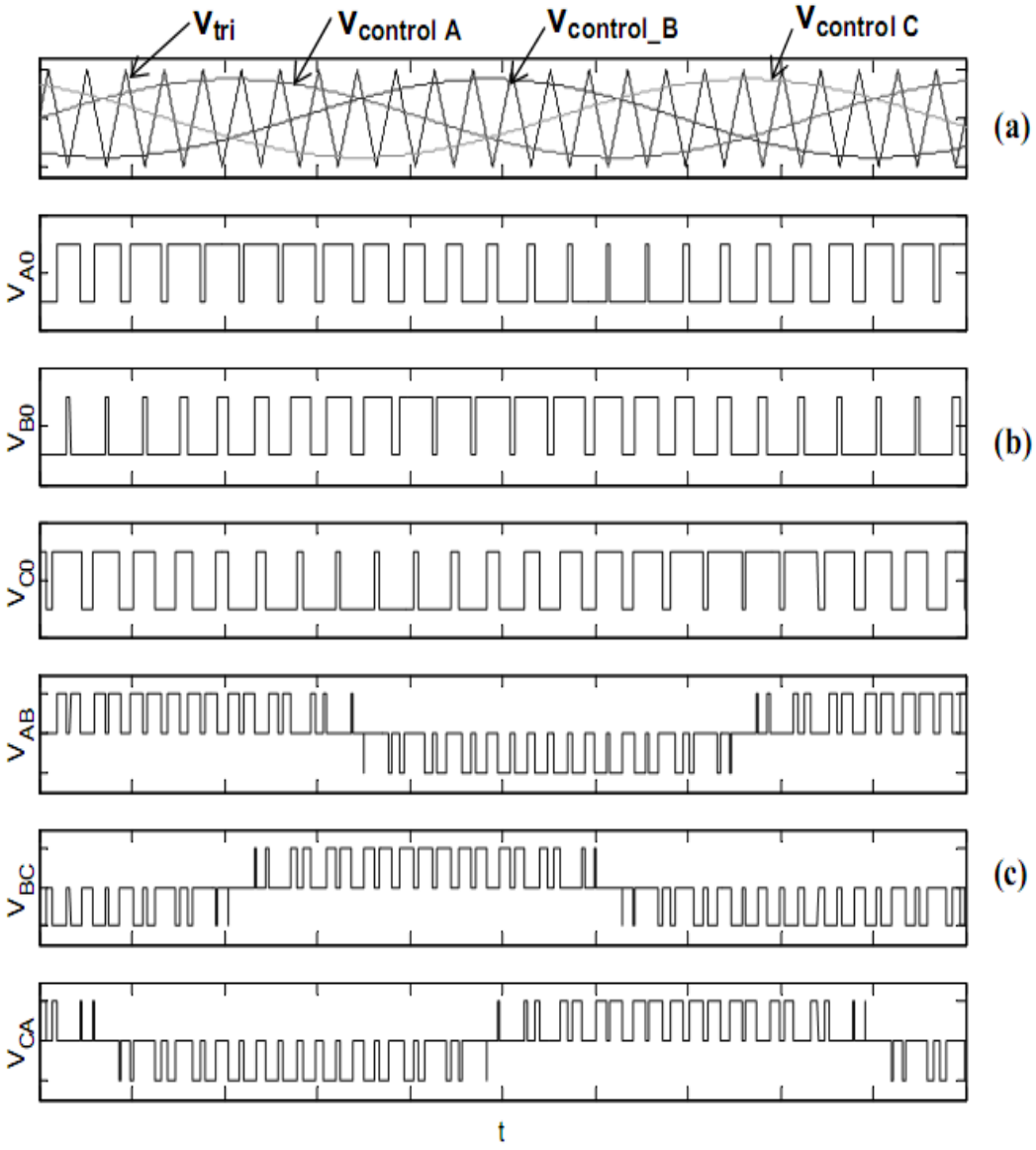
Kare dalga PWM de referans dalga bir kare dalgadır. Bu dalganın genliği frekansı ve harmonik bileşenleri çıkış geriliminde ortaya çıkar böylece referans dalganın düşük dereceli harmonikleri ortaya çıkar. Ancak AC motorlar sinüsoidal kaynaktan işletildiği için invertörler çıkışında mümkün olduğu kadar sinüsoidale yakın olması gerekmektedir. Bunun içinde referans dalga olarak kare dalga yerine sinüsoidal bir dalga kullanılır. Bu referans dalga üçgen taşıyıcı bir dalga ile karşılaştırılarak tetikleme işaretleri elde edilir (Ateş, 2007).

Burada da her fazı yada yarım köprüsünde bulunan komparatörler o fazın referans dalgası ile simetrik üçgen dalgayı karşılaştırırlar.

Şekil 4.41'de taşıyıcı oranının 9 ve modülasyon indeksinin 1 olması halinde VA, VB, VC uç gerilimleri verilmiştir. Yine darbe sayısı p, üç faza uygun bir çıkış elde edebilmek için 3 ve 3'ün katları olacak şekilde seçilmelidir.

AC motor kontrolünde kullanılan bir sinüs dalga PWM invertörün değişken frekansla çalıştırılabilmesi için sinüs dalga genlik ve frekansının ayarlanabilmesi gerekmektedir. Böylece çıkış geriliminde darbe genlikleri bu yolla ayarlanan sinüs eğrisi şeklinde çıkış gerilimi elde edilir. Eğer motor hızları düşükse sıfıra kadar düşük frekansları verebilen bir frekans osilatörüne ihtiyaç vardır. Bu osilatörün klasik devre elemanları ile gerçekleştirilmesi zor olduğundan entegreler kullanılmıştır. Ancak dijital tekniğin gelişmesiyle dijital hafıza yada geniş ölçülü entegre devrelerin (LSI) kullanılmasıyla sinüsoidal PWM tekniği gelişmiştir (Bose, 1993).

Büyük taşıyıcı oranlardaki sinüsoidal PWM invertörde etkili harmonikler yüksek mertebedendir ve çıkış geriliminin dalga şekli oldukça düzgündür. Bu harmonikler, taşıyıcı frekansının mertebesinde oluşur. Çok düşük hızlarda bile düzgün bir motor dönüşü elde edilir. Zira istenmeyen düşük mertebeden harmonikler ve moment salınımları sinüsoidal PWM' de ortadan kalkar (Atalay, 1990).



Şekil 4.41. Üç faz sinüsoidal PWM gerilim dalga şekilleri (a) Komparatör gerilimleri (b) Kutup gerilimleri, (c) AC hat gerilimi

4.5. İnvertör İle Yapılan Asenkron Motorların Hız Kontrolü

İnvertör ile asenkron motor kontrolü V/f ve Vektör Kontrol olmak üzere iki temel yaklaşım ile yapılmaktadır. Bu bölümde invertör ile asenkron motor kontrolünde kullanılan bu kontrol teknikleri anlatılmaktadır. Birinci kısımda neden asenkron motor kontrolünde invertör kullanıldığı, ikinci bölümde V/f kontrol ve üçüncü bölümde ise Vektör kontrol anlatılmıştır.

4.5.1. Giriş

Bir AC motorun sabit momentle çalışması için gerekli olan sabit gerilim frekans şartı, sinüsoidal PWM invertörle kolayca yerine getirilebilir. Çıkış frekansı ile orantılı bir ana dalga gerilimi almak için modülasyon indeksi, referans dalgasının frekansı ile lineer olarak değiştirilir. Değişken hız kontrollü sürücülerle AC motor sürüşü endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandıktan sonra, bu sürüş sistemlerinden birçok yeni özellikler de istenmeye başlanmıştır. Bunların başında daha iyi bir dinamik performans, sıfır hızda yüksek tork, kararlı hız kontrolü ve ani yük değişimlerine çabuk cevap verme sayılabilir. Geleneksel olarak bu karakteristikler DC sürüş sistemlerinde bulunmaktadır. Uygulamalarda kontrol açısından tüm elektrik motorları içerisinde en uygun makine doğru akım makinesidir. Doğru akım motorları sahip oldukları moment öz eğrileri kontrol açısından diğer elektrik motorlarına göre daha üstündür. DC sürüşte, torku ve akıyı oluşturan akım, DC motorun yapısında bulunan fırça ve komütator sayesinde ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. DC motorlarda, fırçalar sayesinde rotor sargılarına direk akım uygulanabilir. Bu da motor torkunun doğrudan kontrolüne imkan verir (Ateş, 2007).

Bu özelliğinden dolayı DC motor ani hız değişimlerinde bile sürüş kararlılığını korur ve herhangi bir hız aralığında motorda istenilen tork elde edilir. Ancak bu sistemlerde DC motorların fırça ve komütatörlerinin sürekli bakım gerektirmeleri, motorların pahalı oluşu patlayıcı ya da korozyona maruz kalan ortamlarda kullanılmayışları, yüksek hız yüksek gerilimli çalışma koşulları altında sınırlı komütasyon kapasitesine sahip oluşu ve genel güç faktörünü düşürmeleri gibi çeşitli dezavantajlarından dolayı DC motorların kullanım alanları azalmıştır. Endüstride istenen ise, DC sürüşün getirdiği tüm bu avantajları kapsayan, yüksek performansla birleştirilmiş basit ve ucuz bir AC motor sürüşüdür. Çünkü AC motor aynı güçlü DC motora göre ucuz, hafif, basit yapılı ve az bakım gerektirir. Ancak AC motor basit mekanik yapısına karşın oldukça karışık bir matematiksel yapıya sahiptir. Matematiksel olarak ortaya çıkan sistem, lineer olmayan bir yapıdadır. Asenkron makinenin genel dinamik modeli, giriş stator gerilimi ve frekansı, çıkış rotor hızı, rotor pozisyonu, emk mıknatıslanma akısı veya bunların bir kombinasyonu olabilen altıncı dereceden bir durum uzayı modeli denklemleri ile ifade edilebilir. Bu nedenle de asenkron motorun hız ve konum kontrolü, oldukça karmaşık kontrol düzenekleri gerektirir (Ateş, 2007).

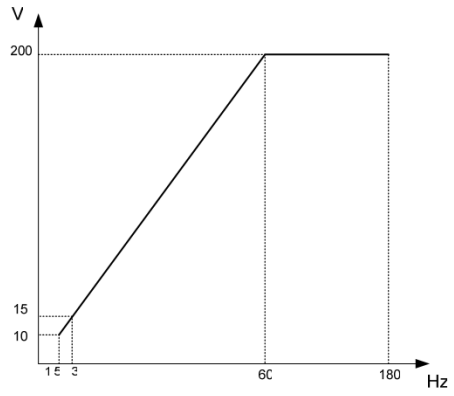
4.5.2. V/f kontrol

AC motorun hız kontrolü için çeşitli kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bunlardan biri V/f kontrollü sürücülerdir. Bu yöntemde, statorda endüklenen gerilimin, statora uygulanan gerilimin frekansına oranı sabit kalacak şekilde, endüklenen gerilim ve frekans birlikte değiştirilir. Uygulamalarda ise, statorda endüklenen gerilim yerine, stator uç gerilimi değiştirilir. Stator uç gerilimi, stator sargı direnci ve kaçak reaktansı üzerinde düşen gerilim ihmal edilirse, statorda endüklenen gerilime eşittir. Böylece, statordan rotora geçen hava aralığı akısı sabit tutulur. Akının sabit kalması ile rotorda endüklenen momentin, stator gerilimi frekansının altındaki değerleri için, devrilme noktası momentinin sabit kalması sağlanır. Bunun fiziksel anlamı şudur. Anma değerin altındaki farklı stator gerilimi frekansları ve mil hızları için, yüke aktarılan moment değeri aynı kalır. Ancak anma geriliminin çok altına inildiği çok düşük hızlarda, Is sabit olduğundan, Rs üzerine düşen gerilim artık ihmal edilemez düzeye gelir. Bu da endüklenen gerilimin çok küçülmesine ve hava aralığı akısının azalmasına sebep olur. Bu nedenle belirli bir hızın altında V/f kontrolü istenen sürüş özelliklerini sağlamayabilir (Ateş, 2007).

Sabit bir V / f oranı herhangi bir PWM metodu örneğin sinüs PWM kullanılarak kolayca elde edilmektedir. V/f sürücülerin tahrik karakteristiği nominal hızın altında endüvi gerilimi kontrol edilerek, nominal hızın üstünde ise alan zayıflatılarak hızı ayarlanan klasik DC motorlu tahrike benzer. Günümüzde V/f kontrollü sürücülerin yazılımlarında çeşitli uygulamalar için programlanmış hazır V/f eğrileri bulunmaktadır. Ayrıca kullanıcı isterse kendi V/f değerlerini de girebilmektedir (Rashid, 2003).

Kullanıcı Fmin; minimum çıkış frekansı, Vmin; minimum çıkış frekansındaki çıkış gerilimi, FB; orta frekans, VC; orta frekansta çıkış gerilimi FA; maximum gerilim frekansı, Vmax ; maximum çıkış gerilimi FAX; maximum çıkış frekansı parametrelerini ayarlayarak yük türüne göre V/f eğrisini ayarlayabilir. Örneğin yüksek kalkış torku gerektiren asansör gibi dikey yükler için düşük frekanslarda yüksek gerilimler girilmeli, yük faktörü hızın karesi veya küpü ile değişen pompa ve fan gibi uygulamalarda ise düşük frekanslarda düşük gerilimler girilebilir.

Sabit güçte ise aşağıdaki V/f eğrisi motoru 60 Hz (nominal motor frekansı) veya daha yüksek hızlarda döndürmek için kullanılır. Şekil 4.42'de görüleceği üzere bu V/f eğrisiyle motora 60 Hz den sonra sabit çıkış gerilimi uygulanır (Ateş, 2007).



Şekil 4.42. Sabit güçle çalışma için V/f eğrisi

V/f modunda çalışan sürücülere birden fazla motor bağlanabilmesi ve özel motorları da (yüksek hızlı gibi) sürebilmesi bu kontrolü diğer kontrol yöntemlerden ayıran başlıca unsurlardan biridir. V/f kontrollü sürüş halen birçok uygulamada başarıyla kullanılmasına karşın sıfır hızda maximum tork, daha iyi bir dinamik performans ve yüksek hız kararlılığı gerektiren uygulamalarda yerini vektör kontrollü sürüş sistemlerine bırakmıştır (Ateş, 2007).

4.5.3. Vektör kontrol

Düşük hızlarda veya sıfır hızda V/f kontrolde oluşan problemler vektör kontrol yöntemi ile en verimli şekilde çözülebilmektedir. Vektörel kontrol yönteminin uygulanması ile asenkron motorlar yüksek performanslı dört bölgede çalışan doğru akım motorlu sistemlerle yarışabilir hale gelmiştir.

Geçmişte karmaşık donanım ve yazılım ile karmaşık problemlerin çözülmesinin gerektiği asenkron makine uygulamaları, hızlı mikroişlemcilerle desteklenen vektörel kontrol tekniklerinin uygulanması ile günümüzde kolayca gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan vektör kontrol tekniklerinde amaç, asenkron makinenin davranışını kolay kontrol edebilen doğru akım makinesinin davranışına getirebilmektir. Asenkron makinelerin vektör kontrolü üzerinde yapılan çalışmalar makine modelindeki moment ifadesi üzerinde yoğunlaşmıştır ve moment ifadesinin serbest uyarmalı doğru akım makinesinin moment ifadesine getirilmeye çalışılır. Çünkü serbest uyarmalı doğru akım makinesinde moment, uyarma akısı sabit tutularak endüvi akımı ile lineer değişmektedir. Yani momenti oluşturan iki büyüklük birbirini etkilememektedir. Oysa asenkron makinede böyle bir etkileşim söz konusudur, moment ve akı arasında bir

kuplaj vardır. Vektör kontrol yöntemleri bu etkileşimi ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir (Ateş, 2007).

Fleix Blaschke tarafından Alan Yönlendirme (FOC) olarak adlandırılan yöntemde asenkron makinenin senkron hızda dönen d-q koordinat sistemindeki modelini kullanarak stator akımı uygun bir biçimde ayrıştırılmış (decoupling) ve moment ifadesinin serbest uyarmalı doğru akım makinesine benzetilmesi sağlanmıştır (İncekara, 2000).

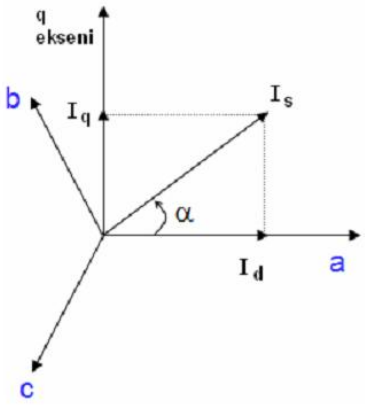
Daha sonra Peter Vas tarafından yapılan incelemelerde vektör kontrol stator akısı yönlendirmeli, rotor akısı yönlendirmeli ve mıknatıslanma akısı yönlendirmeli olarak sınıflandırılmıştır. Rotor akısı, stator akısı veya mıknatıslanma akısına sabitli eksen takımlarında, düzgün hava aralıklı makinelerin indüklenme gerilimi ifadesinin serbest uyarmalı doğru akım makinesinde alan ve armatür akımlarının kontrolüne benzer olarak, stator akımlarına akı üreten bileşenlerinin ikili kontrolü ile asenkron makinenin moment kontrolü yapılabilir. Burada sorun asenkron makinede rotor akımlarının doğrudan ölçülememesidir.

Vektör kontrolünün yapılabilmesi için (stator, rotor veya mıknatıslanma alan yönlendirmeli kontrol) için sırasıyla stator akısı, rotor akısı veya mıknatıslanma için uzay fazörlerinin modülüne ve uzay açısına ihtiyaç vardır. Ayrıca enine ve boyuna eksenin stator akımları kullanan eksen takımına göre hesaplanır. Hesaplanan bu stator akımları serbest uyarmalı doğru akım makinesinin alan ve armatür akımlarına benzer hale gelir (Ateş, 2007).

Asenkron makinelerde yukarda anlatılan stator alanı veya mıknatıslanma alan yönlendirmeli kontroller de mümkün olduğu halde, genellikle rotor alan yönlendirmeli kontrol kullanılır. Rotor alan yönlendirmeli kontrolde, rotor akısı uzay fazörünün modülünü $\dot{I}Q$ uzay açısını elde etmek için iki ana yöntem kullanılır. Doğrudan Alan yönlendirmeli Kontrol (akı geri beslemeli kontrol) ve Dolaylı (akı ileri beslemeli) Kontrol.

Doğrudan alan yönlendirmeli kontrolde, akımın genlik ve fazına ait büyüklükler Hall algılayıcıları ya da akı algılatıcı bobinleri kullanılarak doğrudan ölçülür veya akı modeli adıyla anılan model yardımı ile hesaplanır. Dolaylı rotor alan yönlendirmeli kontrol (akı ileri beslemeli kontrol) de ise, akımın genlik ve faz bilgileri stator akımları ve rotor hızının izlenmesi yardımıyla elde edilir. Bütün kontrol metotları arasında Dolaylı Vektör Kontrol veya literatürde Dolaylı Rotor Akısı Yönlendirmeli Kontrol olarak bahsedilen kontrol yöntemi uygulanabilmesi acısından en basit ve kolay olanıdır.

Vektör kontrolde, sürücü modül akıyı ve torku üreten akımı ayrı ayrı kontrol ederek, motor torkunu oluşturan akımın kullanımını optimize eder. Aynı zamanda kontrol sistemlerinin de gelişmesiyle yüke olan tepki süresi ve hız korunumu yani kararlılık da gelişmiştir. Aslında artık vektör kontrollü bir hız kontrol sistemi, sadece geleneksel DC motorla sürüş sistemlerinin değil, servo sistemlerin de yerini almaya başlamıştır (Büyükatlı, 2000).



Şekil 4.43. Vektor kontrolde akım bileşenleri

Şekil 4.43'de toplam akım (Is), akı üreten akım vektörü (Id) ve tork üreten akım vektörü (Iq) olarak ayrılır. Buna modern AC invertör sürüşünde iki yolla ulaşılabilir (Büyükatlı, 2000).

4.5.3.1. Kapalı çevrim vektör kontrol

Bu sistemde hız ve konum bilgisinin invertöre sürekli iletilmesi için motor miline bir enkoder bağlanır ve invertöre de enkoder işaretlerini okuyabilen bir hızlı sayıcı kart ilave edilir. Bu sayede kapalı çevrim bir sistem elde edilmiş olur. Matematiksel ifadelerin de yardımıyla kontrollü tork ve akı akım bileşenleri elde edilir. Kapalı çevrim vektör kontrolü ile sıfır hızda maksimum tork elde edildiği gibi ani yük değişimlerine karşı çok kısa bir cevap süresi vardır. Tork kontrollü uygulamalarda kullanılacağı gibi hız kontrol aralığı da diğer kontrol metotlarına göre daha geniştir.

Fakat kurulumu diğer kontrol tekniklerine göre hem daha zor hem de uzmanlık gerektirmektedir. Ayrıca çoklu motor sürümü için uygun olmayıp kontrol sistemleri içinde en maliyetli olanıdır. Kapalı çevrim vektör kontrol AC motor kontrolünde günümüzde en gelişmiş kontrol tekniklerinden biri olup sadece DC motorla sürüşün değil servo sistemler gibi hassas pozisyonlama gerektiren yüksek maliyetli

uygulamalarda da kullanılmaya başlayarak bu uygulamalardaki maliyetleri azaltmaya başlamıştır (Büyükatlı, 2000).

4.5.3.2. Açık çevrim vektör kontrol

Bazı sistemlerde enkoder ve invertöre eklenmesi gereken enkoder sayıcı kartı ekstra bir maliyet gerektirdiğinden açık çevrim vektör kontrol adı verilen sensörsüz bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde basit bir otomatik dönüş (auto-tuning) ile motora dinamik ve statik bir test yapılarak motor parametreleri elde edilir. Bu şekilde kapalı çevrim vektör kontrolüne de yaklaşılmış olur.

Açık çevrim vektör kontrolde 1 Hz'lik çok düşük hızlarda nominal çıkış torkunun %150 si uygulanabilir. Motor yükünde meydana gelebilecek ani değişimlere V/f kontrole göre daha hızlı tepki vererek hız dalgalanmalarını engeller.

Tam kapalı çevrim en iyi hız ve tork performansını sağlar, ancak bir çok uygulamada enkodersiz açık çevrim, maliyeti tam kapalı çevrim vektör kontrolden ve DC sistemden ucuz olduğundan ve performansı da yeterli görüldüğü takdirde tercih edilmektedir (İncekara, 2000).

Çizelge 4.1'de Vektör Kontrol, V/ f kontrol ve DC Kontrol Sürüş Tekniklerinin Karşılaştırılması yapılmaktadır (Ateş, 2007).

Çizelge 4.1. Vektör kontrol, V/f kontrol ve DC Kontrol sürüş tekniklerinin karşılaştırılması

Kriter	V/F Kontrol	Vektör Kontrol	DC Kontrol
Hız Aralığı	1:10-1:40	1:50-1:1000	1:10-1:200
Hız	%2 - 3	% 0.5-0.01	% 0.5- 0.01
Tork	Mümkün değil	Mümkün	Mümkün
0 Devirde Tork	Mümkün değil	Mümkün.înverter akımı ile sınırlı.	Mümkün. Komütatör ve fırça seti dayanımı ile sınırlı.
Güç faktörü	1 e yakın	1 e yakın	0.1-0.8 hıza bağlı
Motor bakımı	-	-	Komütatör ve fırça
Motor Koruma	IP 65 e kadar kolay	IP 65 e kadar kolay	Pahalı ve zor
Kurulum	Kolay	Zor olabilir	Kolay
Uzmanlık Gereği	Sadece zor uygulamalarda	Gerekli	Sadece zor uygulamalarda
Ani yüke	Uzun	0.3.-0.5 .sn	0.5-1.0 sn
Çoklu motor sürme	Mümkün	Mümkün değil	Mümkün
Yük paylaşımı	Tavsiye edilmez	Mümkün. Tork kontrolle.	Mümkün

4.6. Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolü

Doğru akım motorları, değişken kolay hız değiştirme özelliklerine sahip olduğundan hızın kontrol edilmesi istenen yerlerde kullanılırlar. Yüksek yol alma momenti sağladığından, hız kontrolü geniş aralıklarda yapılır. Hız kontrolü alternatif akım motorlarına göre daha kolay ve daha ucuzdur. Kontrollü doğrultucular, sabit AC gerilimden değişken DC gerilimi elde ederken, kıyıcılar ise sabit DC gerilimi değişken DC gerilime çevirir (Akmeşe, 2006).

$$\omega = \frac{V_a - I_a.R_a}{K_1.\phi_f} \tag{4.23}$$

Denklem 4.23'de doğru akım motorunun açısal hız bağlantısı görülmektedir. Bağlantıdan da görüleceği üzere endüviye uygulanan gerilim değişirse motor hızı da değişir. Ayrıca alan akısındaki değişiklik de motor hızının değişmesine neden olur. DC motorun hızı aşağıdaki yöntemlerle ayarlanabilir.

1. Endüvi devresi direncini (Ra) değiştirerek
2. Uyarma akımını (If) değiştirerek
3. Motor terminal geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü

4.6.1. Endüvi devresi direncinin değiştirilmesi ile hız kontrolü

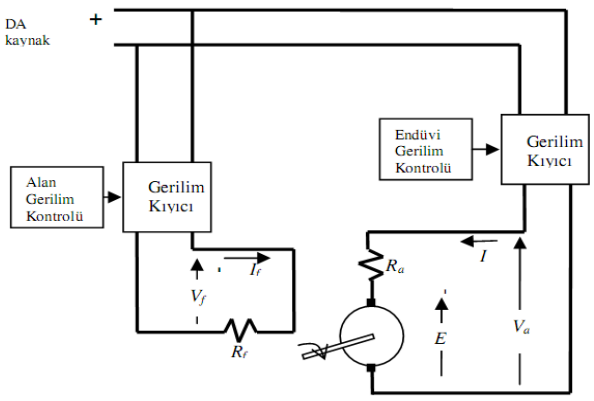
Endüvi devresi direncinin değiştirilmesi için endüvi devresine seri dirençler bağlanır ve böylece motorun hızı ayarlanabilir. Burada seri direnç gerilim bölücü olarak görev yapmakta ve direnç değeri ayarlanarak istenen gerilim motora uygulanmaktadır. Bu metod en çok DC motorlara kademeli olarak yol vermek için kullanılır. Bu uygulamada kullanılan seri dirençler sürekli olarak kullanımda kalırlarsa dirençler üzerinde önemli ölçüde güç kaybı meydana gelecektir. Bu nedenle endüvi direncinin değiştirilmesi, sürekli hız değişimi gerektiren yerlerde tercih edilmez (Akmeşe, 2006).

4.6.2. Uyarma akımının değiştirilmesi ile hız kontrolü

Uyarma akımının değiştirilmesi ile hız kontrolü seri ve paralel uyartımlı DC motorlarda tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde endüvi uç gerilimi değişmemektedir. Motorun paralel uçlarına bağlanan ayarlı bir direnç yardımıyla uyarma akımı değiştirilir. Uyarma akımının değişimi manyetik akının değişmesine neden olacak ve hızın değişimi gerçekleşecektir. Bu yöntemde paralel uyarma devresinden geçen uyarma akımı, endüvi devresi akımına göre çok küçük olduğu için üzerinde oluşan enerji kaybı az olacaktır (Akmeşe, 2006).

4.6.3. Motor terminal geriliminin değiştirilmesi ile hız kontrolü

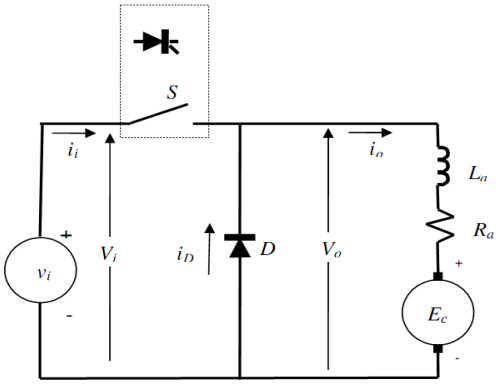
Endüvi gerilimini değiştirmek için bir DC kıyıcı, sabit gerilimli bir DC kaynak ile motorun endüvisi arasına bağlanır. Başka bir kıyıcı da sabit gerilimli bir DC kaynak ile motorun alan sargısı arasına bağlanır. Şekil 4.44'de yabancı uyartımlı DC motor hız sürücüsünün blok şeması gösterilmiştir. Kıyıcılar motor endüvi devresi ile güç kaynağı arasındaki bağlantıda devre kesici yardımıyla saniyede yüzlerce kez açılıp kapanma esasına göre çalışırlar. Kıyıcı tipi sürücülerde verim oldukça yüksek olup, hızın kontrolü sürekli olarak değiştirilebilir ve motor gerekli durumlarda bir generatör olarak frenlenebilir.



Şekil 4.44. Yabancı uyartımlı DC motor hız sürücüsünün blok şeması

Yarı iletkenli hız kontrol devreleri, direnç ile yapılan kontrol devrelerindeki aşırı ısı kaybını ortadan kaldırmışlardır. Şekil 4.45'de yabancı uyartımlı DC motorunun endüvi gerilimi kontrol için tipik bir kıyıcı devresi gösterilmektedir. S anahtarı yerine

güç yarıiletkenleri kullanılabilir. Yarıiletkenli DC kıyıcılarında güç anahtarlarının iletim zaman aralığı (t on) değiştirilerek motor endüvisine uygulanan gerilim ayarlanabilir (Özel, 2006).

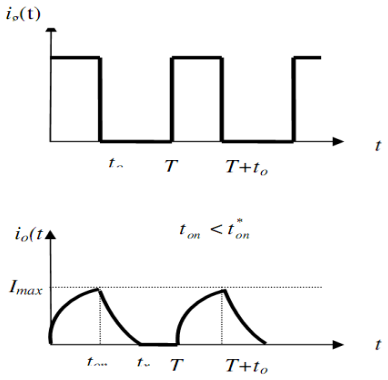


Şekil 4.45. Kıyıcı devresi ile hız kontrol devresi

Motor endüvisine uygulanan gerilimin değeri denklem 4.24'de gösterilmiştir.

$$V_o = E_c + R_a i_o + L_a \frac{di_o}{dt} \tag{4.24}$$

Temel kıyıcı devresi gerilim ve akım dalga şekilleri Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.46. Temel kıyıcı devresinin dalga şekilleri.

Sabit moment bölgesinde (birinci bölge) ortalama çıkış momenti;

$$T_o = K_1 \emptyset_f I_a \tag{4.25}$$

olarak yazılır. Bu alışma bölgesinde alan akısı sabit tutulur. Zıt emk;

$$E_c = K_1 \emptyset_f \omega \tag{4.26}$$

Buradan motor hızı;

$$\omega = \frac{t_{on}}{t_x} \frac{V_i}{K_1 \emptyset_f} - \frac{R_a}{\left(K_1 \emptyset_f\right)^2} \frac{T}{t_x} T_o \tag{4.27}$$

ile ifade edilir. t_x = T olduğundan denklem 4.27 aşağıdaki gibi yazılabilir.

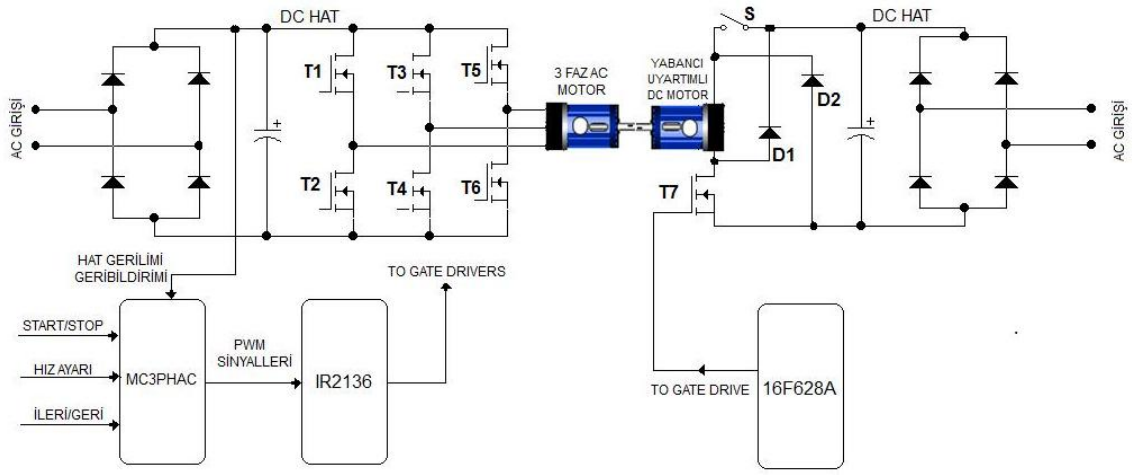
$$\omega = \frac{(t_{on}/T)V_i - \left(R_a/K_1 \emptyset_f\right)T_o}{K_1 \emptyset_f} \tag{4.28}$$

Denklem 4.28 incelendiği zaman, DC motorunun hızı, değiştirilebilen (t_{on} / T) oranı ile ayarlanabildiği görülecektir (Özel, 2006).

5. FAYDALI FRENLEME SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

5.1. Tasarımın Amacı ve Faydalı Frenleme Sisteminin Çalışma Prensibi

Bu çalışmada eğitim amaçlı olarak elektrikli araçlarda faydalı frenleme enerjisinin hattaki diğer vasıtalarda kullanıldığını gösteren bir eğitim seti tasarlanmıştır. Elektrikli ulaşım araçlarında genellikle 3 faz asenkron motor ve doğru akım motoru olmak üzere iki tip motor kullanılmaktadır. Tasarlanan eğitim setinde her iki tip motorun milleri esnek bir kavrama ile birbirine akuple edilmiştir. Bu sayede her iki motor için de faydalı frenleme ayrı ayrı incelenebilmiştir. Ayrıca motorlar birbirine akuple edilerek frenleme süresi istenilen değerde gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 5.1'de tasarlanan faydalı frenleme sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 5.1. Tasarlanan faydalı frenleme sisteminin blok şeması

Motorlardan bir tanesi vasıtanın hareketini sağlarken diğeri de vasıtanın ağırlığından dolayı kazanacağı kinetik enerjiyi sağlar. Frenlemeye geçildiğinde, tahrik motoru generatör olarak çalışmaya geçerken diğer motor, mil hızını yavaşlatır ve istenilen frenleme süresi sonunda hızı sıfıra ulaştırır. Bu işlemler tahrik motorunun 3 fazlı asenkron motor veya doğru akım motoru olduğu durum içinde geçerlidir. Her iki motora da hız kontrolü yapmak gerekmektedir. Bu çalışmada hem 3 fazlı asenkron motorun hız kontrolü hem de yabancı uyartımlı doğru akım motorunun hız kontrolü yapılmıştır.

Asenkron makinenin generatör olarak çalışabilme şartları bölüm 3.4'de anlatılmıştı. Frenlemeye geçildiğinde asenkron motora uygulanan gerilimin frekansı

(senkron hız) mil hızının altına düşürülerek generatör çalışma sağlanır. Generatör çalışmanın devam etmesi için senkron hızın daima mil hızının altında olması gerekir. Bunun için mil hızı sıfıra doğru azalırken asenkron motora uygulanan frekansta azaltılır.

Doğru akım makinenin generatör olarak çalışabilme şartları bölüm 3.5'de anlatılmıştı. Şekil 5.1'deki S anahtarı kapatılıp T7 MOSFET'i iletime geçirilirse doğru akım motoru vasıtayı harekete geçirir. Frenlemeye geçebilmek için S anahtarının açılması gerekir. S anahtarı açıldığında motor generatör olarak çalışmaya başlar. D1 ve D2 diyotları üzerinden ürettiği enerjiyi DC hatta verir. Frenleme süresince T7 MOSFET'i tetiklenir.

5.2. Tasarlanan Faydalı Frenleme Sisteminin Kısımları

Tasarlanan faydalı frenleme sisteminde 3 ayrı kontrol devresi mevcuttur.

1. Üç fazlı asenkron motor kontrol devresi
2. Doğru akım motoru kontrol devresi
3. Frenleme sisteminin kontrol devresi

Frenleme sisteminin kontrolü doğru akım motoru kontrol devresindeki mikrodenetleyici ile yapıldığından her iki devre birlikte incelenecektir. Şekil 5.2'de gerçekleştirilen faydalı frenleme sistemi eğitim seti gösterilmiştir.

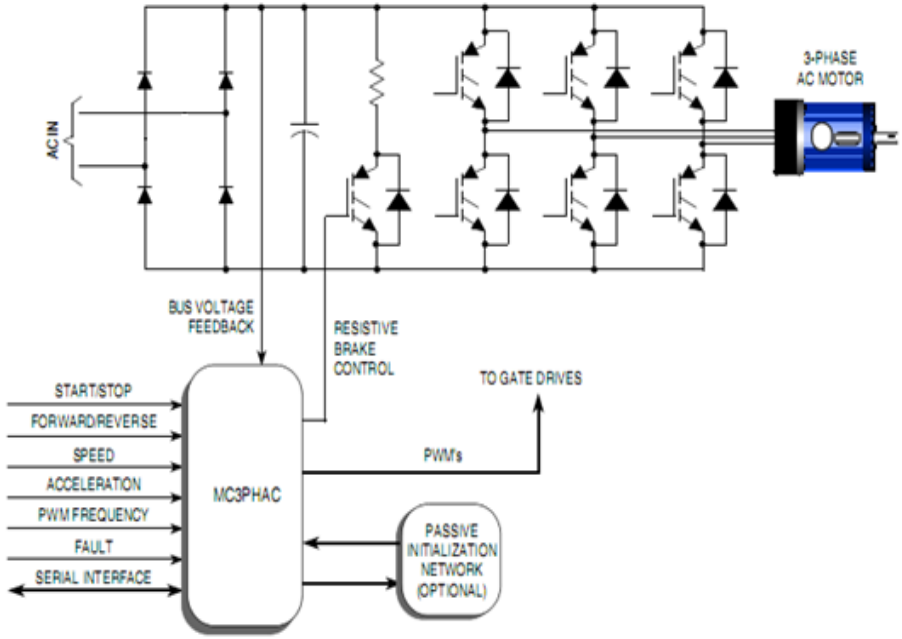


Şekil 5.2. Gerçekleştirilen faydalı frenleme sistemi eğitim seti

5.2.1. Üç Fazlı Asenkron Makine Sürücü Devresi

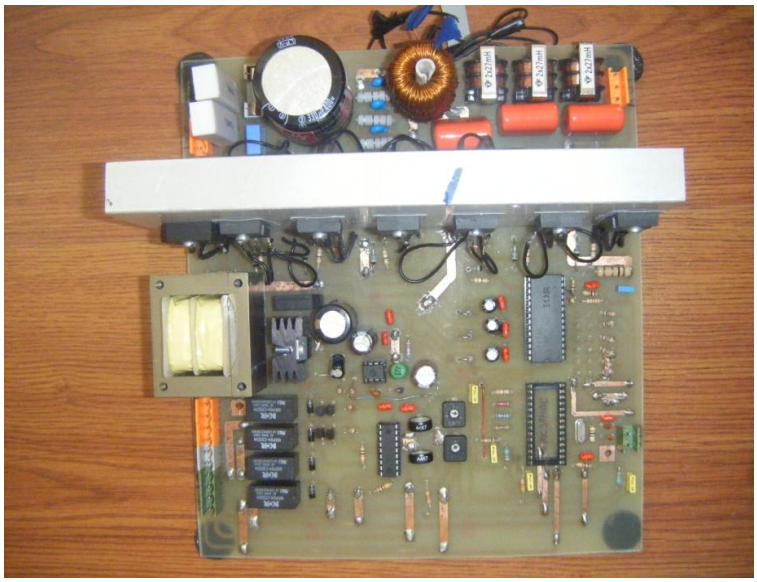
5.2.1.1. Giriş

Gerçekleştirilen devrede kontrol birimini Motorola firmasının üretmiş olduğu 3 faz sinüs PWM üretebilen MC3PHAC entegresi oluşturmaktadır. MC3PHAC entegresi DSP (Digital Signal Processing) tabanlı bir filtreden ve inverter için gerekli PWM darbelerini dijital olarak üreten ve parametrelerin değiştirilmesine de izin verebilen bir mikrokontrolörden oluşmaktadır. Entegre içerisinde 3 faza ait PWM darbeleri eş zamanlı olarak üretilmektedir. Gerçekleştirilen devre Şekil 5.3'de görüldüğü gibi bir AC-DC konverter ve bir inverterden oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Tasarlanan inverter devresinin blok diyagramı

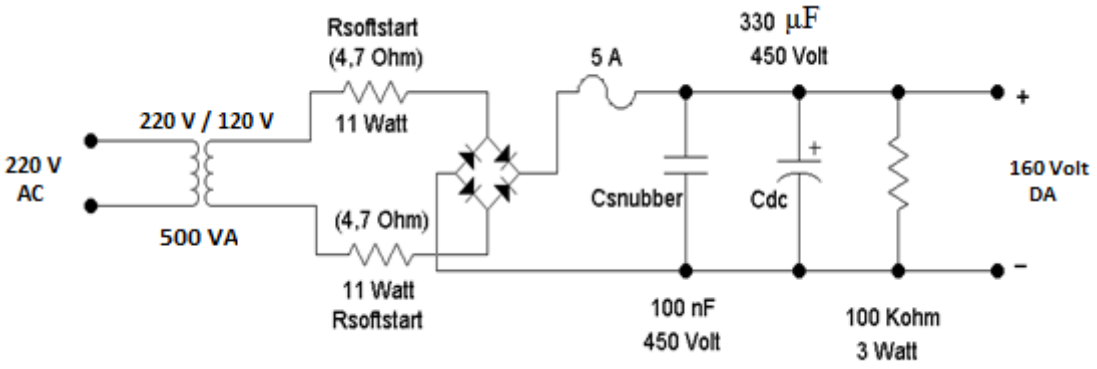
MC3PHAC entegresinde frekans kontrolü potansiyometre ile yapılmaktadır. Faydalı frenleme uygulamasında asenkron motora uygulanacak frekans, mil hızına göre belirleneceğinden frekans kontrolünü 16F628A mikrodenetleyicisi yapmaktadır. Şekil 5.4'de Üç fazlı DC/AC dönüştürücü ile yapılan asenkron makine hız kontrol devresi gösterilmiştir. Bu devre besleme katı, kontrol katı ve Güç sürücü katı olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır.



Şekil 5.4. Üç fazlı DC/AC dönüştürücü ile yapılan asenkron makine hız kontrol devresi

5.2.1.2. Besleme katı

Bu çalışma eğitim amaçlı deney seti olduğundan çalışma gerilimi 120 Volt olarak belirlenmiştir. 220V/120V - 50 Hz besleme transformatöründen 120V doğrultularak DC 160V elde edilmiştir. Bu gerilim MOSFET'leri beslemek için kullanılacaktır. Şekil 5.5'de 160 Volt besleme devresinin açık şeması gösterilmiştir. Devrede kullanılan transformatör her iki motoru da besleyecektir. Her iki motor için transformatör 500 VA olarak seçilmiştir.



Şekil 5.5. 160 Volt besleme devresinin açık şeması

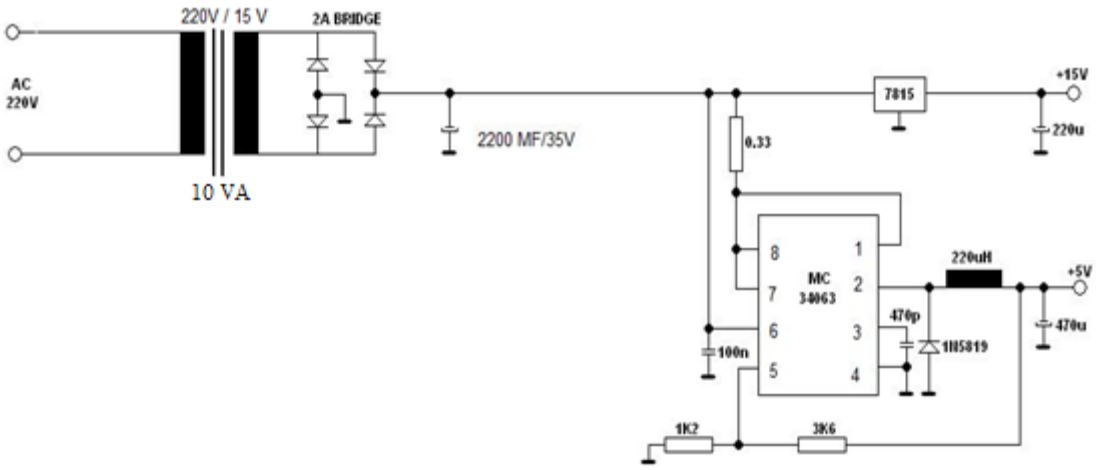
Şekil 5.5'deki devrede, inverter doğru besleme gerilimi, şebeke gerilimine bağlı KBU10M (10 Amper, 1000 Volt) serisi güç diyotları ile oluşturulan köprü diyot katından elde edilir. Bu gerilimdeki dalgalanmaları filtrelemek için C_{dc} elektrolitik

kapasitesi kullanılmıştır. Köprü diyot çıkışına bağlanacak kapasite değeri büyültülerek, dalgalı doğru gerilimdeki salınımlar en aza indirilebilir. Devreye ilk enerji verildiğinde, C_{dc} filtre kapasitesi de şarj durumda olduğundan, kapasite ve köprü diyotlardan pik akımları geçerek kapasite ve diyotlara zarar verebilir (Yalçın, 2009). Bu pik akımlarını önlemek için şebeke ucu ile köprü inverter girişi arasına iki adet $R_{softstart}$ (4,7 ohm 11 Watt) direnci bağlanmıştır.

$C_{snubber}$ kapasitesi, özel bir kapasite olup, güç elektroniği elemanlarının anahtarlanması sırasında, DC bara kaçak endüktansından ötürü meydana gelecek gerilim endüklenmesini söndürmek için kullanılır. Tasarımda, inverter girişine bağlandığı DC bara hatları düz çekilir, bu durumda hattın sadece direnci olması beklenir. Pratik açıdan incelendiğinde, bu hatların dirençlerinin yanı sıra kaçak endüktansları bulunur. Anahtarlama esnasında i_{hat} hat akımının sıfıra götürülmesi durumunda, L_{hat} kaçak endüktansında büyük bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilim, DC bara gerilimi ile birlikte güç elektroniği anahtarlama elemanlarını zorlar. Toplam gerilim, MOSFET'lerin dayanma gerilimini aşarsa, elemanlar delinir ve çalışamaz duruma gelir. Snubber kapasiteleri, özel kapasiteler olup, anahtarlama esnasında DC bara kaçak hat endüktansından kaynaklanan bu gerilim endüklenmelerini söndürerek güvenli çalışma değerine indirirler. İyi bir sonuç alabilmek için, snubber kapasitesinin inverter bloğuna mümkün olduğunca yakın bağlanması pratik açıdan büyük önem arz etmektedir.

Gerçekleştirilen bu devre eğitim amaçlı olduğu için AC 120 volt olarak tasarlanmıştır. Ancak devre direk 220 voltluk şebekeye bağlanarak da çalıştırılabilir. Bunun için devrede kullanılan malzemeler 220 Volta dayanacak şekilde seçilmiştir. Doğrultulmuş şebeke geriliminin maksimum değeri 311 volttur. Bu değer doğrultma katının ve sürücü katının elemanlarının belirlenmesinde önemlidir. Seçilen elemanların gerilim değeri doğrulma gerilim değerinden büyük olur. Konverter çıkışında minimum dalgalılıkta DC gerilim elde etmek için doğrultulmuş gerilim kondansatör yardımıyla süzülür. Kondansatör üzerinde oluşabilecek maksimum gerilim, kondansatör gerilimini belirleyen faktördür. Doğrultulmuş çıkışın maksimum değeri 311 Volt olduğu göz önüne alınarak kondansatör gerilim değeri 450 Volt seçilmiştir. Motorun çekeceği nominal akım 0,9 A'dir. Kısa süreli yüklenmeler ve kalkış akımı da göz önünde tutularak doğrulma diyotları 10A'lik blok köprü diyot seçilmiştir. Doğrultma diyotlarının gerilim değeri ise 1000 Volt seçilmiştir.

IR 2136 sürücüsü için DC 15 volt gerekmektedir. 7815 regüle entegresi ile DC 15 volt elde edilmiştir. MC3PHAC entegresi ve 16F628A mikrodenetleyicisi DC 5 volt ile beslenmeleri gerekir. DC 5V ise MC34063 BUCK devresi ile oluşturulmuştur. Devrenin açık şeması Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. +15 ve +5 Volt besleme devresinin açık şeması

5.2.1.3. Kontrol katı

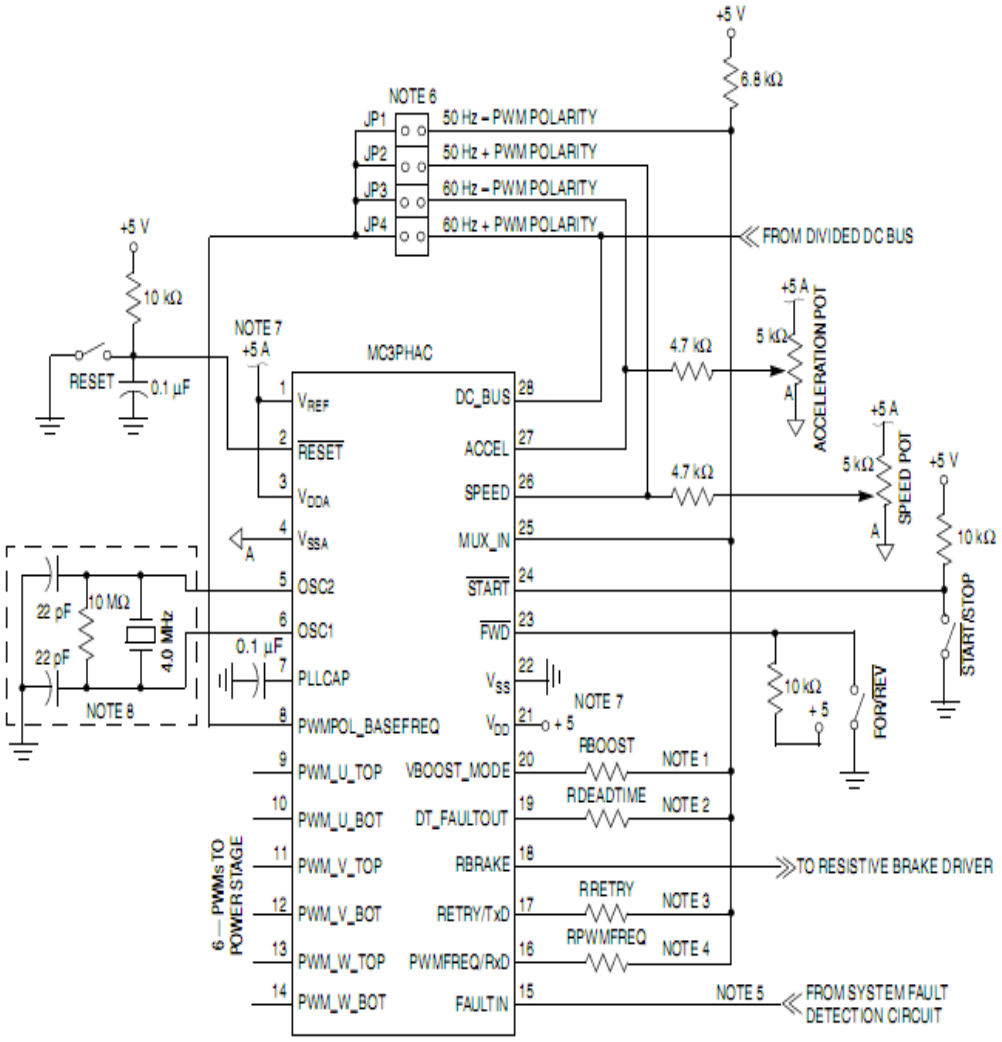
Sinüs PWM kontrol darbeleri Motorola firmasının üretmiş olduğu ve hesaplamalarını bir DSP (dijital signal Procesing) yaptığı MC3PHAC entegresi tarafından üretilmektedir. Entegre çıkışı 3 kolda bağlanmış olan 6 sürücü elemanına gerekli olan PWM darbelerini ayrık olarak verebilmektedir (Akdemir, 2003).

MC3PHAC entegresi sıfır geçişle başlayan ya da biten bir kontrol sinyali üretmez. Bundan amaç kontrol sinyallerinin tüm sinüs periyodu boyuna simetrik olmasını sağlamaktır. Bu sağlandığı taktirde harmonik gürültüler azalır. MC3PHAC entegresi geri besleme girişine bağlı olarak harmonik eliminasyonu yapabilir. Geri beslemeye bağlı olarak sinyallerin formatının değişmesi gerektiği durumlarda entegre 5,4 kHz hızında darbe formlarını yeniler. Geri beslemenin her değişiminde hesaplanmış bir paket form işleme konur. Sabit uygulamalar için açık çevrim olarak ta tasarlanabilir.

Sincap kafesli asenkron motor ilk kalkınmak istediğinde kayıpların karşılanıp ta hareketin başlayabilmesi için büyük bir akım çeker. AC motora yumuşak yol verebilmek için gerilim değerinin düşük değerlerden başlatılması gerekmektedir. Pratik uygulamalarda λ/Δ dönüşümü sağlayan basit şalterlerle çözüm sağlanır. Ancak ileri

düzey uygulamalar için bu yöntem kullanışlı değildir. Motor üzerindeki frekans ve gerilimin düşük değerlerden itibaren orantılı olarak artırılması gerekir. MC3PHAC entegresi bir rampa boyunca V/f değerinin sıfırdan başlayarak doğrusal olarak hedeflenen hız seviyesine motorun ulaşmasına olanak sağlamaktadır. Böylece motor direkt kalkışlarda çekmesi gereken başlangıç akımından daha düşük bir akım değeriyle yol almış olur. Motorun kalkış rampası bir potansiyometre yardımıyla 0,5 ile 128 Hz/s arasında ayarlanabilir. Ancak bu çalışmada ki faydalı frenleme uygulamasında, asenkron motora uygulanacak frekans, mil hızına göre belirleneceğinden, frekans kontrolünü 16F628A mikrodenetleyicisi yapmaktadır.

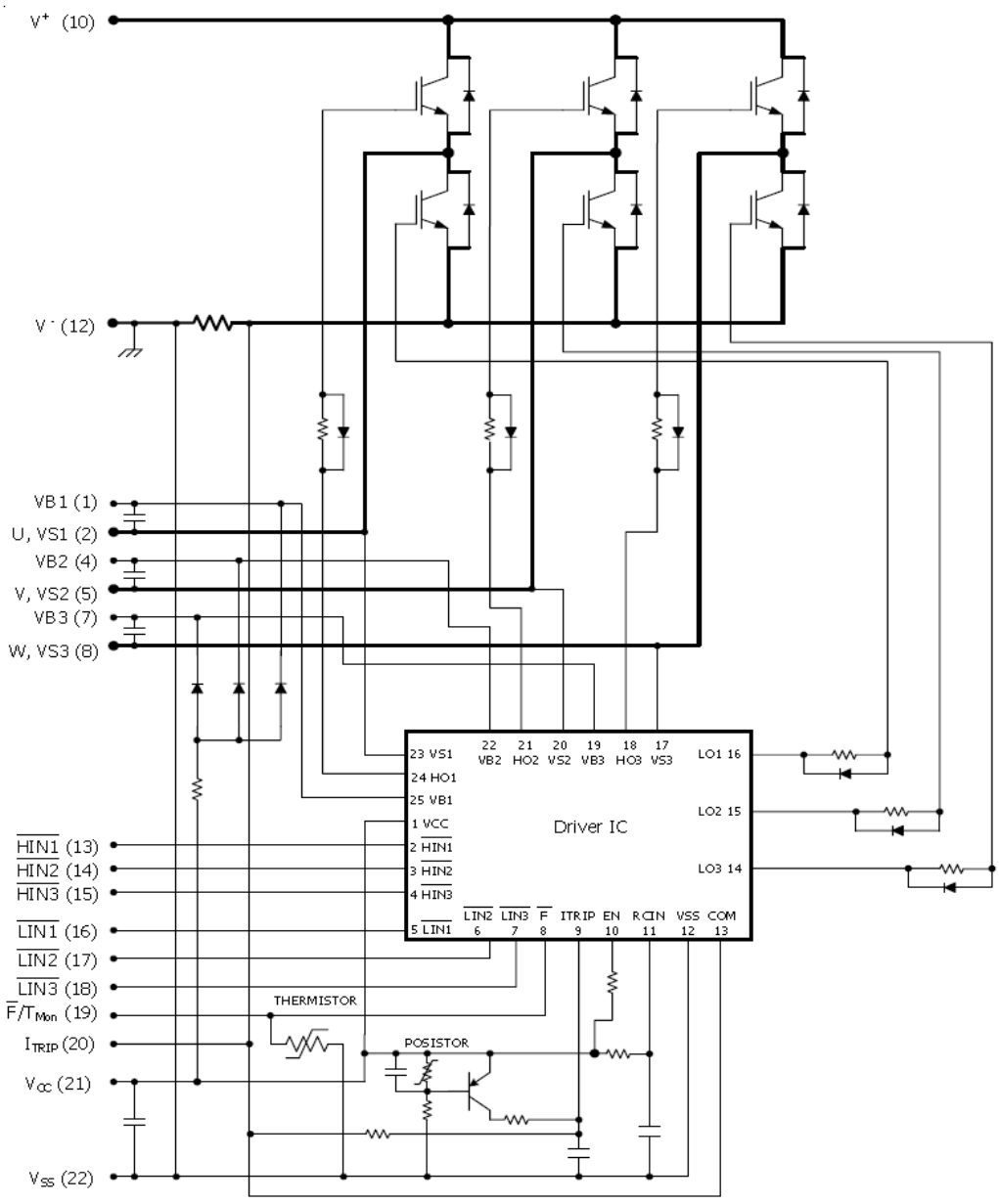
Motora ait hız ve ivme gibi parametreler dirençsel olarak programlanmış olup çalışma esnasında da değiştirilebilirler. Sinyallerin üretilmesine ait açık devre şeması Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Kontrol sinyallerini üreten MC3PHAC entegresinin açık bağlantı şeması

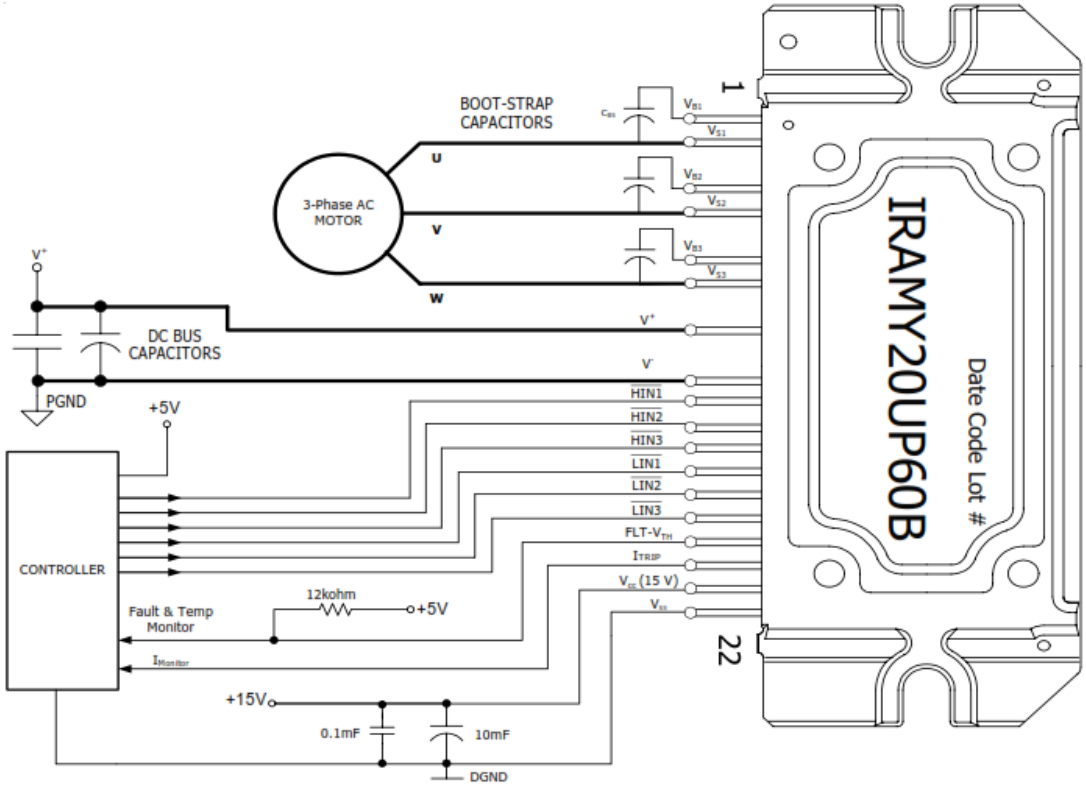
5.2.1.4. Güç Sürücü (İnverter) katı

MC3PHAC entegresinden gelen işaretler güç sürücü devresinde değerlendirilmektedir. Sürücü devresi olarak IRAMY20UP60B entegresi kullanılmıştır. IRAMY20UP60B entegresinin içinde IR2136 sürücü devresi, 6 adet IGBT, IGBT'lere ters bağlanmış 6 adet diyot, entegre aşırı ısındığında uyarı sinyali vermesi için termistör ve akım bilgisinin ölçülmesi için bir adet sinyal çıkışı mevcuttur. IRAMY20UP60B entegresinin içyapısı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. IRAMY20UP60B sürücü entegresinin iç yapısı

İnverter katı doğrultulan DC gerilimi kıyarak motora genliği ve frekansı uygun 3 fazlı AC gerilim haline getirmektir. İnverter çıkışının ortalama değeri ve aynı zamanda frekansı da ayarlanabilmektedir. Güç sürücü katının açık bağlantı şeması Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Güç sürücü devresinin açık bağlantı şeması

İnverter katında motor gücü ve anahtarlama frekansı göz önüne alınarak IRAMY20UP60B entegresi tercih edilmiştir. Bu entegrenin maksimum faz akım değeri 20 Amper, gerilim değeri 600 Volt, PWM frekans değeri 20kHz'dir. IGBT'lerin tetiklemesi için entegrenin beslemesi 15 Volttur.

IRAMY20UP60B entegresinin 19 nolu ucu hata-sıcaklık sinyal çıkışıdır. Bu uç mikrodenetleyicinin analog girişine bağlanır. Entegrenin sıcaklığı -40ºC derece iken bu uçtan 5 Volt, +40ºC derecede 4 Volt, +65ºC derecede 3 Volt, +100ºC derecede 1,5 Volt, +120ºC derecede 1 Volt çıkış vardır. MC3PHAC entegresinin 15 nolu ucu hata giriş ucudur. Eğer bu uca 0 volt verilirse MC3PHAC entegresi çıkış sinyali üretir. Eğer +5 Volt verilirse hata olduğu anlamına gelir ve çıkış sinyali kesilir. Yani iki entegrenin hata uçları birbirine uyumlu değildir. Bu uyumu sağlamak için IRAMY20UP60B entegresinin hata-sıcaklık sinyali mikrodenetleyicinin analog girişine uygulanır. Mikrodenetleyici bu sinyalin gerilimini ölçer. Hangi sıcaklıkta devrenin kesilmesi

istenilirse Mikrodenetleyici o derecede MC3PHAC entegresinin 15 nolu ucuna +5 Volt uygular ve sinyal üretimi kesilerek motorun durması sağlanır.

IRAMY20UP60B entegresinin 20 nolu ucu motorun çektiği akımı ölçmeye yarar. 6 adet IGBT'den oluşan köprü ile GND arasına seri bir direnç bağlanmıştır. Motorun çektiği akım bu dirençten de geçmektedir. I_{TRIP} ucunda bu dirençte oluşan gerilim vardır. Mikrodenetleyici bu gerilimi ölçerek motorun çektiği akımı hesaplar.

Motor bağlantısının yapıldığı çıkışa bağlanan Boot-strap kondansatörün değeri PWM frekansına bağlı olarak değişmektedir. PWM frekansı mikrodenetleyici için yazılan programla belirlenir.

- #use delay(clock=4M)
- setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,255,1);

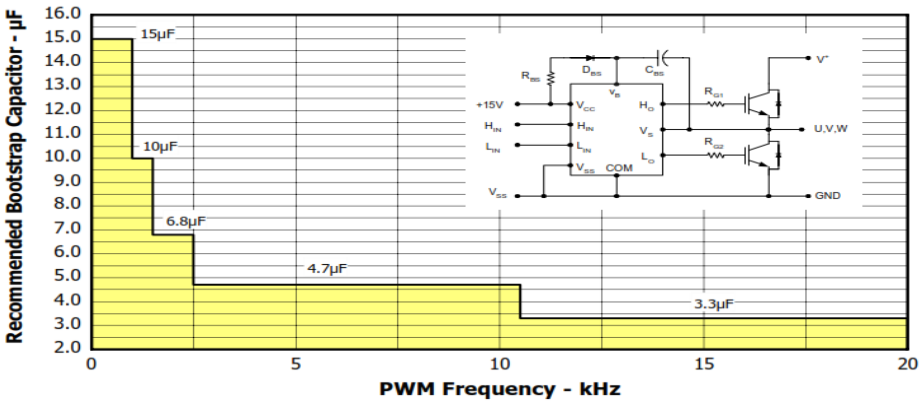
Programda yukarıda ki komut satırları yazılmıştır. Clock frekansı 4 MHz olarak seçilmiştir. PWM frekansının hesaplanmasında (5.1) , (5.2) ve (5.3)'de ki formüller kullanılır. Komut satırındaki değerleri formülde yerine yazılırsa PWM frekansını hesaplayabiliriz.

$f_{komut} = f_{osc} / 4 = 4.000.000 \ / \ 4 = 1.000.000$ Hz. (5.1)

$T_{PWM} = (1 / f_{komut}) \, . \, (PR_2 + 1) \, . \,$ (TMR_2 bölme oranı)

$T_{PWM} = (1 / 1.000.000) \, . \, (255 + 1) \, . \, (1) = 0{,}000256$ msn. (5.2)

$f_{PWM} = 1 / \ T_{PWM} = 1 / \ 0{,}000256 = 3906{,}25$ Hz. (5.3)

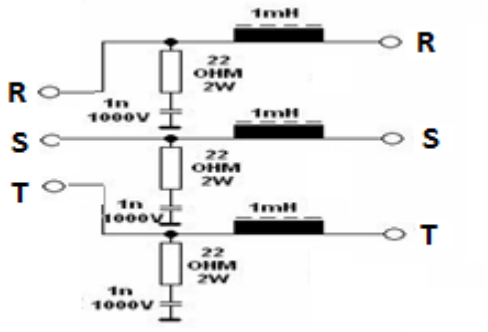


Şekil 5.10. PWM Frekansına göre kullanılacak Boot-strap kondansatörün değeri

PWM frekansı 3906,25 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.10 incelendiğinde bu değere karşılık 0 – 4,7 µF arasında bir kondansatör kullanmak gerektiği anlaşılmaktadır. Uygulamasını yaptığımız devrede 3,3 µF değerinde kondansatör kullanılmıştır.

Güç sürücü devresi, kontrol katından gelen anahtarlama sinyallerine göre köprü inverter katında bulunan IGTB'lerin iletim ya da kesime sokulma işlemini yapar. Güç sürücü devresinin çalışması Şekil 5.8'de gösterilen IRAMY20UP60B sürücü entegresinin iç yapısı üzerinden açıklanabilir. Kontrol devresinde üretilen PWM sinyalleri şekil 5.8'de görüldüğü gibi IR2136'a uygulanır. IR2136, kontrol sinyalini IGBT'yi sürecek şekilde yükseltir, aynı zamanda kontrol devresini yüksek gerilim seviyesinde bulunan köprü inverter katından elektriksel olarak yalıtır. IR2136 girişine lojik 1 uygulandığında, IGBT Geyt girişine +15 V gerilim uygulanır, böylece IGBT iletime sokulur. IR2136'ın girişine lojik 0 uygulandığında, Geyt girişine 0 V uygulanarak MOSFET kesime sokulur.

Sinüzoidal PWM metodunda, inverter içindeki anahtarlar, her bir anahtarlama periyodunda çıkışta sinüs şeklinde bir gerilim dalga şekli oluşacak biçimde birçok defa iletime sokulup çıkarılırlar. Böylece çıkış geriliminin en az harmonik bileşen içerecek biçimde olması sağlanır. Ama yine de inverter girişine uygulanan doğru gerilimdeki değişmeler, çıkış gerilim dalga şeklinde hesaplanan değerlerin ötesinde harmonikler oluşturur. Şebekeden beslenen köprü doğrultucu gibi çeviricinin çıkışına bağlanacak yüksek değerli bir filtre kapasitesi dalgalanmaları söndürebilir. Tasarlanan bu çalışmada IGBT çıkışlarında her faz için alçak geçiren filtre konmuştur (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Filtre devresi

İnverter devresinde bulunan 6 IGBT'in de kollektör (C) – emiter (E) arasına diyot bağlanmıştır. Bu diyotlar IGBT'lerin korunmasına yardımcı olurlar. Ayrıca elektrikli vasıta frenlemeye geçtiğinde asenkron motor generatör olarak çalışmaya başlar. Üretilen elektrik bu diyotlarla doğrultularak DC hatta geri verilir.

5.2.2. PWM Tekniği ile yapılan Doğru Akım Makinesi Sürücü Devresi

5.2.2.1. Giriş

Doğru akım motorunun sürücü devresi, asenkron motorun sürücü devresinden daha kolay ve ucuzdur. Doğru akım motoru hem kolay hız değiştirme özelliğine sahip olmasından hem de yüksek yol alma momenti sağladığından elektrikli ulaşım araçlarında uzun yıllar tahrik motoru olarak kullanılmıştır.

Motorun hızı onun terminaline uygulanan gerilimin ayarlanmasıyla denetlenir. Motora uygulanan gerilimin seviyesini ayarlamak için dönüştürücünün anahtarlarına uygulanan sinyallerin genişliği ayarlanır. Tasarımda kullanılan motor yabancı uyartımlı doğru akım motorudur. Bundan dolayı endüvi sargısı ve uyartım sargısı ayrı kaynaklardan beslenmekte ve ayrı ayrı gerilim kontrolü yapılmaktadır. Şekil 5.12'de PWM Tekniği ile yapılan doğru akım makinesi sürücü devresi görülmektedir.



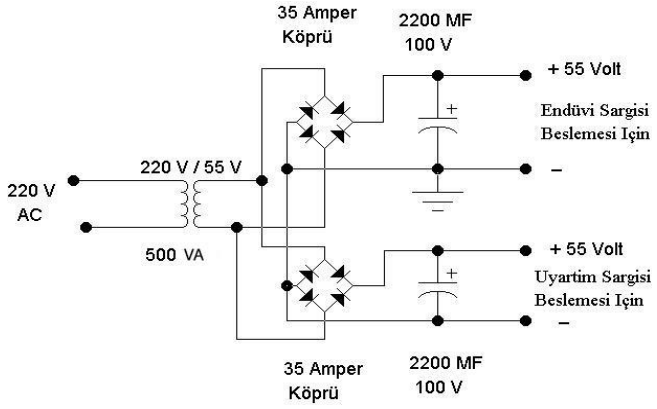
Şekil 5.12. PWM Tekniği ile yapılan doğru akım makinesi sürücü devresi

5.2.2.2. Besleme katı

Tasarımda kullanılan 500 VA gücündeki transformatörün 120 Volt ve 55 Volt olmak üzere iki çıkışı mevcuttur. 120 Volt çıkışı ile asenkron motor beslenirken 55 Volt çıkışı ile doğru akım motoru beslenir. Doğru akım makinesinin endüvi ve uyartım sargıları makinenin çalışma durumuna göre değişik gerilim değerleri alması gerektiğinden beslenme devreleri ayrılmıştır. Şekil 5.13'de verilen doğru akım

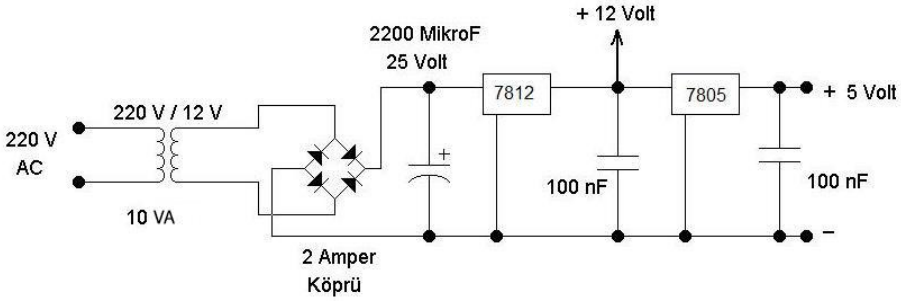
motorunun besleme devresinde görüldüğü gibi transformatör çıkışına birbirinden bağımsız 2 adet doğrultma ve filtre devresi eklenmiştir. Kontrol katında her iki çıkışa da gerilim kıyıcı devresi eklenerek doğru akım motorunun her iki sargısının da gerilim değerleri ayarlanabilmektedir.

Beslenme geriliminin maksimum değeri U_{max}= √2.55 V = 77,78 Volt olacağından gerilimde ki dalgalanmaları filtreleyecek kondansatörün gerilim değeri 100 Volt olarak seçilmiştir. Endüvi sargısı 4.4 A, uyartım sargısı 1.73 A olmak üzere motorun çekeceği nominal akım 6.13 A'dir. Kısa süreli yüklenmeler ve kalkış akımı da göz önünde tutularak doğrulma diyotları 35A'lik blok köprü diyot seçilmiştir. Doğrultma diyotlarının gerilim değeri ise 1000 Voltdur.



Şekil 5.13. Doğru akım motorunun besleme devresi

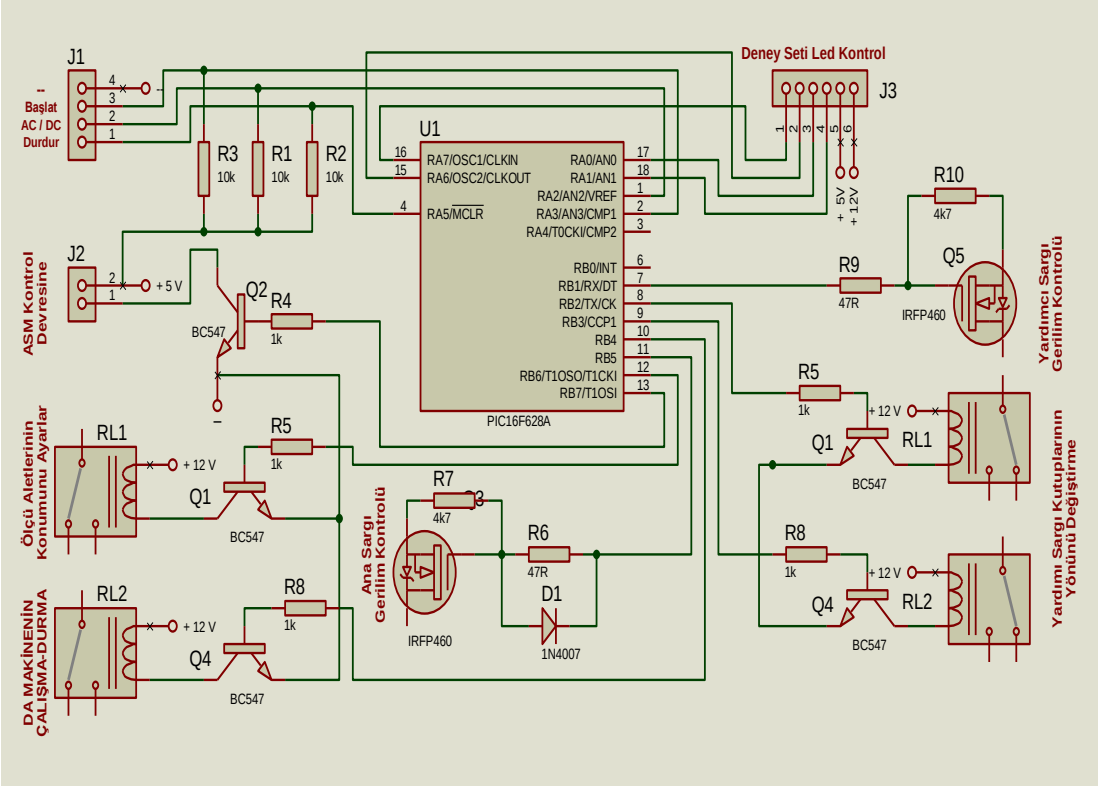
Rölelerin beslenmesi 12 volt gerilim ile yapılmaktadır. Ayrıca 16F628A mikrodenetleyicisinin beslenmesi için de 5 volt gerilim gerekmektedir. Şekil 5.14'de görüldüğü gibi +12 ve +5 voltluk gerilim değerleri 78XX serisi regüle entegreleri ile elde edilmiştir. Bu entegrelerin çıkışına bağlanan 100 nF'lık kondansatörler parazitleri filtreler. Bu sayede mikrodenetleyicinin bu parazitlerden etkilenerek kendini resetlemesi engellenmiş olunur.



Şekil 5.14. Besleme devresinin açık şemaları

5.2.2.3. Kontrol ve sürme katı

Kontrol işlemi, bu devrede bulunan PIC16F628A mikrodenetleyicisi ile yapılmaktadır. Bu entegrede 4 MHz'lik dahili RC bir osilatör vardır. Bu sayede besleme dışında ki bütün uçlar (16 adet) giriş-çıkış olarak kullanılabilir. Şekil 5.15'de Kontrol ve sürme katı devresinin açık şeması görülmektedir.



Şekil 5.15. Kontrol ve sürme katı devresinin açık şeması

Tasarımda kullanılacak iki motor da zamanlama yönünden birbiriyle uyumlu çalışması gerektiğinden kontrol devreleri arasında sinyal alış verişi olması gerekir. İki kontrol devresinin elektriksel olarak birbirine bağlanması kısa devre akımları oluşturabilmektedir. Bunu önlemek için asenkron motor kontrol devresine bir adet röle konmuştur. Bu rölenin enerjisi ise ana kontrol görevini gören doğru akım motor kontrol devresindeki mikrodenetleyiciden verilmektedir. Mikrodenetleyici sinyal göndermek istediğinde RB7 çıkışı lojik-1 yaparak Şekil 5.15'de ki Q2 transistörünü tetikler ve asenkron motor kontrol devresindeki röle enerjilenerek açık kontaklarını kapatır. Böylece iki kontrol devresi arasında iletişim sağlanır.

Tahrik motorunun asenkron motor veya doğru akım motoru olması durumları için ayrı ayrı ölçü aletleri kullanmak yerine ölçü aletlerinin bağlantı yerleri rölelerle değiştirerek kullanılan ölçü aletleri sayısı yarıya düşürülmüştür. Devrede 3 ampermetre ve 1 voltmetre bulunmaktadır. Eğitim setinin üzerindeki anahtardan tahrik motorunun cinsi seçildiğinde mikrodenetleyici ölçü aletlerinin bağlantı yerlerini RB6 çıkışı ile değiştirmektedir.

Mikrodenetleyicinin RB4 çıkışı doğru akım makinesinin çalıştırılmasını ve durdurulmasını sağlar. RB5 çıkışı ise PWM yöntemi ile MOSFET'i sürerek endüvi sargısına uygulanan gerilimin değerini ayarlar. RB1 çıkışı da aynı şekilde PWM yöntemi ile MOSFET'i sürerek yabancı uyartım sargısına uygulanan gerilimin değerini ayarlar. Her iki gerilim ayarı için de MOSFET olarak IRFP460 (18.4 Amper, 500 Volt) kullanılmıştır.

Doğru akım makinesinin motor olarak çalışabilmesi için mikrodenetleyicinin RB4 çıkışı lojik-1 yapılır. Frenleme moduna geçmek için RB4 çıkışı lojik-0 yapılır. Bu durumda motorun generatör durumuna geçmesi için yabancı uyartımlı sargı uçlarının polaritesinin değişmesi gerekir. Bunu yapabilmek için 2 adet röle kullanılmıştır ve bu röleleri mikrodenetleyicinin RB2 ve RB3 uçları kontrol etmektedir.

Eğitim setinin çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için pano üzerinde elektrik akımının yolları ledlerle gösterilmiştir. Makinelerin çalışma modları yine ledlerle belirgin hale getirilmiştir. Bu led yollarının kontrolü mikrodenetleyicinin RA0, RA1, RA6 ve RA7 uçları ile yapılmaktadır.

Mikrodenetleyicinin RA2, RA3 ve RA5 uçları sinyal girişi olarak kullanılmaktadır. Eğitim setinin panosunda başlat butonuna basıldığında RA2'ye, AC/DC butonuna basıldığında RA3'e sinyal gider. Durdur butonuna basıldığında ise RA5 üzerinden mikrodenetleyici resetlenir.

5.3. Faydalı Frenlemenin Ölçüm Yöntemi

5.3.1. Giriş

Bu çalışmada faydalı frenleme enerjisi incelenmiş ve faydalı frenleme enerjisinin eğitime yönelik uygulaması için bir adet deney seti tasarlanarak gerçekleştirilmiştir.

Elektrikli ulaşım araçlarında genellikle iki tip tahrik motoru kullanılır. Çeşitli avantajlarından dolayı doğru akım motorları uzun yıllar birçok araçta kullanılmıştır. Bununla birlikte elektronik hız yöntemlerinin gelişimiyle asenkron motorlar da artık bu araçlarda kullanılmaktadır. Bu tez uygulamasında bu iki farklı motor için de faydalı frenleme enerjisi incelenmiştir. Uygulamada kataner hattı AC veya DC gerilim ile beslenmektedir. Şehir içi ulaşımda kataner hattının beslemesinde daha çok DC gerilim tercih edildiğinden yaptığımız çalışmada DC gerilim seçilmiştir.

Elektrikli ulaşım araçları hareket halinde iken toplam ağırlıkları ile orantılı olarak kinetik enerjiyi üzerlerinde depolarlar. Frenleme esnasında bu enerji generatör milinin dönmesini ve elektrik enerjisinin üretilmesini sağlar. Ancak yapılan eğitim setinde motor milinde yük olmadığından frenlemeye geçildiğinde generatör çalışma süresi çok kısa olur. Faydalı frenleme enerjisinin ölçümünün kolaylaştırmak için eğitim setinde kullanılan asenkron motor ve doğru akım motoru birbirine akuple edilmiştir. Motorlardan biri frenlemeye geçtiğinde diğeri gerçeğe yakın olarak 24 saniyede hızını sıfıra düşürür. Bu sayede faydalı frenleme enerjisi hem daha rahat gözlemlenir hem de süre yönünden gerçeğe uygun olur.

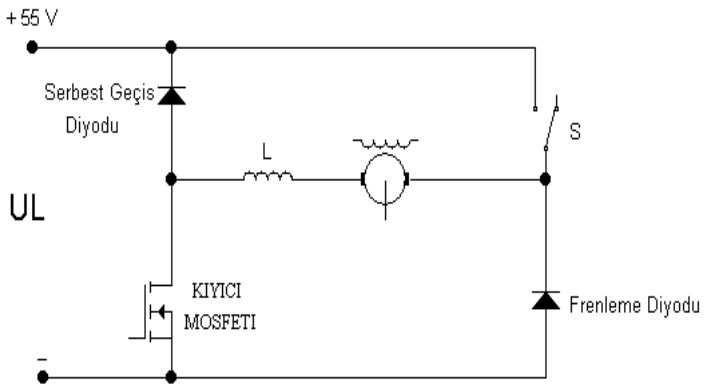
Tasarımda kullanılan asenkron ve doğru akım motoru için ayrı ayrı hız kontrol devreleri yapılmıştır. Ayrıca bu kontrol devreleri frenleme anında üretilen enerjinin hatta geri verilmesine imkan sağlamaktadır. Bunu yaparken frenleme anında motorlar hattan ayrılmazlar. Asenkron motorun frekansı düşürülerek generatör çalışması sağlanır. MOSFET uçlarına ters diyot bağlayarak ta üretilen enerji hatta geri verilir. Doğru akım motorunda ise diyotlar sayesinde generatör olarak çalışan motor ürettiği enerjiyi hatta tek yönlü olarak geri verir. Diyotlar hattan motora enerji akışına izin vermezler.

3. Bölümde faydalı frenlemenin dört çeşidinden bahsedilmişti. Burada ‘faydalı frenleme enerjisinin hatta verilmesi’ çeşidi kullanılmıştır. Bu enerjinin faydalı olabilmesi için hattaki başka bir vasıta tarafından kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada faydalı frenleme enerjisi bir akkor flamanlı ampülün beslemesinde kullanılmıştır. Ama istenirse ampül yerine motor da kullanılabilir.

5.3.2. Araçta doğru akım motoru kullanıldığında ki ölçüm yöntemi

5.3.2.1. İvmelenme modunda çalışma ilkesi

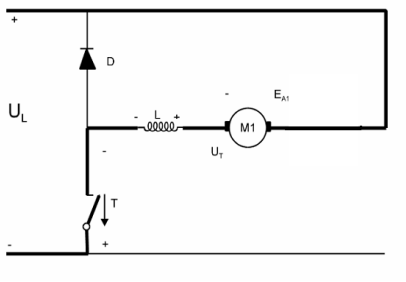
Şekil 5.16'da serbest uyarmalı DC motorun kıyıcı üniteleriyle birlikte çalışma düzeni gösterilmiştir. Kıyıcı MOSFET'in temel görevi hat gerilimini kontrol ederek tahrik motorlarına uygulamaktır. Hat gerilimi değişik oranlarda kıyılarak motor armatür devresine filtre edildikten sonra uygulanır. DC tahrik motoru uyartım sargısı ayrı bir DC kaynaktan beslenir. Motor modül kontağı (S), ana devrenin ivmelendirme modunda çalışmasını sağlar. Kontak ivmelenme durumunda kapatılırken elektrodinamik frenlemede açılır.



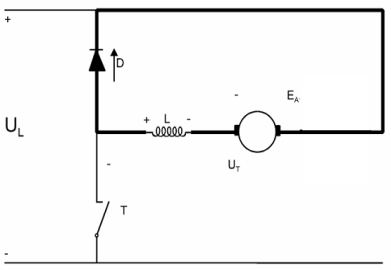
Şekil 5.16. DC Motor modülü ivmelendirme ve frenleme devresi

Motorun armatür devresine, kıyıcı tarafından oluşturulan sert darbeleri filtre etmek için, bir L bobini seri bağlanmıştır. Kıyıcı ünitesi, MOSFET'in iletim ve tıkama durumlarının, ortalama saniyede birkaç yüz devirle değişmelerine izin vererek çalışır. Motor durduğu zaman, sıfır hızda endüklenmiş EA gerilimi de sıfırdır. Bu sebepten kıyıcı, motoru sadece (R.IA) gerilim düşümünü karşılayabilecek kadar küçük bir gerilimle beslemelidir. Motordaki armatür akımı ve manyetik akı tarafından oluşturulan moment, aracın ivmelenmesini sağlayacaktır. Bu nedenle motorun hızı (n) ve EA gerilimi artacaktır.

Şekil 5.17 kıyıcı devresinin ivmelendirme durumunu göstermektedir. Kalın çizgiler MOSFET'in iletime geçtiği andaki akım yolunu gösterir. MOSFET, iletime çok kısa süre için geçirilir ve sonra yeniden tıkamaya sokulur. MOSFET tıkamaya girdiğinde, Şekil 5.18'de ki akım yolunu izler.



Şekil 5.17. İvmelenme modunda akım yolu



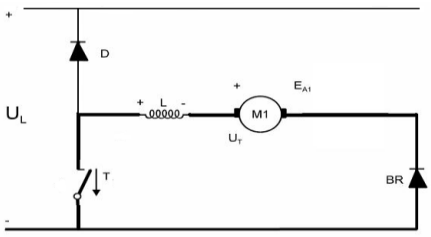
Şekil 5.18. Serbest geçiş aralığında akım yolu

MOSFET tıkamaya girdiği zaman, akım yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Akım, MOSFET tıkamaya girdiği zaman hemen sıfırlanmaz, çünkü büyük miktarda enerji bobinde depolanmıştır. Bu nedenle akım, yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Bu bir nevi armatür akımının filtre edilmesidir.

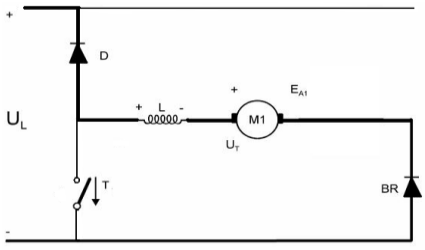
5.3.2.2. Frenlenme modunda çalışma ilkesi

Elektrodinamik frenlemedeki kıyıcı devresinin çalışma prensibi, ivmelendirme modundakiyle aynıdır. Frenleme modunun ivmelendirme modundan farkı, motor geriliminin polaritesinin ters olmasıdır.

Motor yüksek devirde çalışırken uyarma alanına akım verildiğinde, motorun EA gerilimi birkaç yüz volta ulaşır ve MOSFET bobinle motora bağlanır. MOSFET iletime geçtiği an armatür akımı ivmelendirme durumundaki gibi artacaktır. Şekil 5.19'da, frenleme konumunda armatür akımının izlediği yol kalın çizgilerle ifade edilmiştir. MOSFET tıkamaya girdiğinde, armatür akımı belirli bir oranda düşecek ve yolunu Şekil 5.20'de gösterildiği gibi tamamlayacaktır.



Şekil 5.19. Frenleme konumunda akımın izlediği yol.



Şekil 5.20. Mosfet tıkamadayken akım yolu

Akım yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Bunun sebebi de endüktif bobinde ivmelenme esnasında büyük miktarda enerji depolanmış olmasıdır. Endüktif bobinde indüklenen bu gerilim, geri besleme gerilimi olarak hatta geri verilir.

Kıyıcı, istenilen hız konumuna göre motor için gerekli akımı belirli periyottaki darbeleri uygulayarak sağlar.

Frenleme esnasında, aracın hızıyla birlikte motor gerilimi de düşecektir. İstenilen motor akımını devam ettirebilmek için kıyıcı darbe genişliği motor EA gerilimi sıfır olana kadar artırılır. Uygulamada armatür akımı saatte 2–5 km hızlarda sıfıra düşer ve elektrodinamik fren mekanik sürtünme freniyle yer değiştirir.

5.3.3. Araçta 3 fazlı ASM kullanıldığında ki ölçüm yöntemi

3. Bölümde asenkron makinelerin generatör olarak çalışabilmesi için 2 yol olduğundan bahsedilmişti.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde kondansatör uyartımlı asenkron generatörlerin enerji üretebilmesi için asenkron devrin belli değerin altına düşmemesi gerektiği görülmektedir. Bu değerde yaklaşık döner alanın %50-60'sı civarındadır. Elektrikli aracın motoru frenleme esnasında hızı sıfıra kadar düştüğünden kondansatör uyartımlı generatörün faydalı frenlemede kullanılması verimli olmamaktadır.

Kendinden (şebekeden) uyartımlı asenkron generatörün enerji üretebilmesi için milin senkron hızın üzerinde bir devirde döndürülmesi gerekmektedir. Ancak asenkron motor hiçbir zaman senkron hıza ulaşamaz. Frenleme başlayıp generatör olarak çalışmaya başladığında devir sayısı sıfıra kadar düşer. Bu probleme şöyle çözüm getirebilir. Frekans f ve çift kutup sayısı p ile gösterilir. Senkron hız d/d cinsinden denklem 5.4'de verilmiştir.

$$ns=60.f/p \qquad (5.4)$$

Denklemden de görüleceği üzere araçta frenleme moduna geçildiğinde tahrik invertörleri motorların hızından biraz daha düşük bir frekans gerilimi oluşturarak motorlardan negatif tork ve negatif kayma sağlarlar. Bunun sonucunda da dinamik frenleme gerçekleşir.

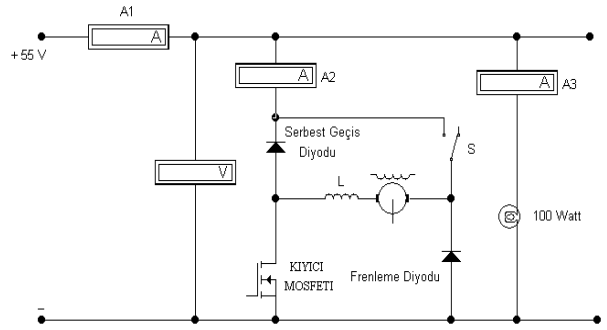
Frekans kontrollü frenlemede motor hızı sıfıra düşünceye kadar enerji hatta geri verilebilir. Bu durum verimin yüksek olmasını sağlar. Ayrıca sistemin basit olması ve ilave olarak sadece kontrol ünitesi gerekmesi sistemin avantajlarındandır.

Hatta geri verilen frenleme enerjisi, frenleme esnasında aynı besleme noktasından enerjisini sağlayan başka bir araç ivmelenme durumundaysa bu enerji diğer araç tarafından kullanılabilir. Yapılan tasarımda hattan devamlı olarak başka bir aracın enerji çektiği varsayılmıştır.

5.4. Deneysel Sonuçlar

5.4.1. Araçta doğru akım motoru kullanıldığında faydalı frenleme uygulaması

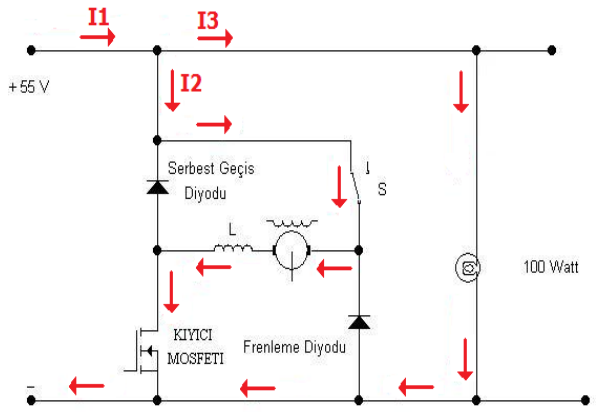
Şekil 5.21'de üç adet ampermetre ve bir adet voltmetre kullanılmıştır. A1; hat üzerindeki vasıtaların çektiği toplam akımı A2; vasıtanın çektiği akımı A3; hattaki diğer vasıtanın (bu uygulamada vasıta yerine lamba kullanılmıştır) çektiği akımı ölçmektedir.



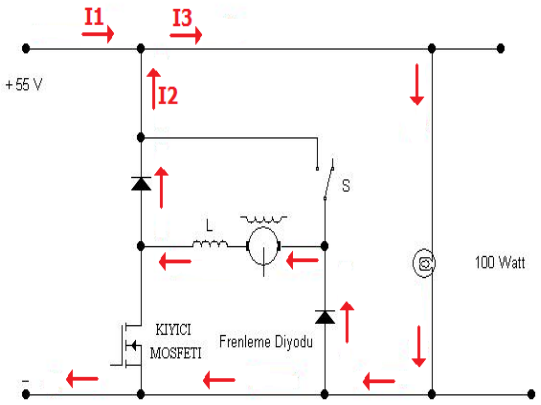
Şekil 5.21. Araçta doğru akım motoru kullanıldığında devrenin bağlantı şeması

İvmelenme modunda S anahtarı kapalı pozisyondadır. Devrede ki doğru akım makinesi yabancı uyartımlıdır. Akımlar şekil 5.22'de kırmızı oklarla gösterildiği gibi devresini tamamlarlar. Makinenin hızı MOSFET ile ayarlanır. A2 ampermetresi makinenin çektiği akımı gösterir. A3 ampermetresi ise hattaki diğer vasıtayı temsil eden lambanın çektiği akımı göstermektedir. Hem kontrol edilen makine hem de hattaki diğer makine enerjisini hattan almakta olduğundan A1 ampermetresinin çektiği akım (değerlerin pozitif olduğu kabul edilerek) denklem 5.5'de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{5.5}$$



Şekil 5.22. İvmelenme modunda akım yolu



Şekil 5.23. Frenleme modunda akım yolu

Şekil 5.23'de görüldüğü gibi S anahtarı açık pozisyonuna getirilirse frenleme moduna geçilir. Ancak makinenin generatör olarak enerji üretebilmesi için uyartım sargısına verilen gerilim ilk önce sıfır yapılmalı sonra ters yönde maksimum değere kadar artırılmalıdır. Bu uygulamada S anahtarının pozisyonu ve uyartım sargısının gerilim ayarının kontrolü, doğru akım makinesi sürücü devresinde bulunan mikrodenetleyici ile yapılmaktadır.

S anahtarı açılıp uyartım sargısı uygun şekilde enerjilendirildiğinde makine generatör olarak çalışır ve Şekil 5.23'de kırmızı oklarla gösterildiği gibi serbest geçiş diyotu üzerinden hatta doğru enerji verir. Bu enerji frenlemeye ilk başlandığı anda doğru akım makinesi generatör durumuna geçinceye kadar (birkaç saniye) sıfır iken hızla maksimum değere yükselir. Makine yavaşladıkça hatta verilen enerji de azalır.

Frenleme esnasında, aracın hızıyla birlikte generatör olarak çalışan doğru akım motorunun gerilimi de düşecektir. İstenilen motor akımını devam ettirebilmek için kıyıcı MOSFET darbe genişliği motor EA gerilimi sıfır olana kadar artırılır. Mil hızı sıfır olduğunda EA gerilimi de sıfır olacaktır.

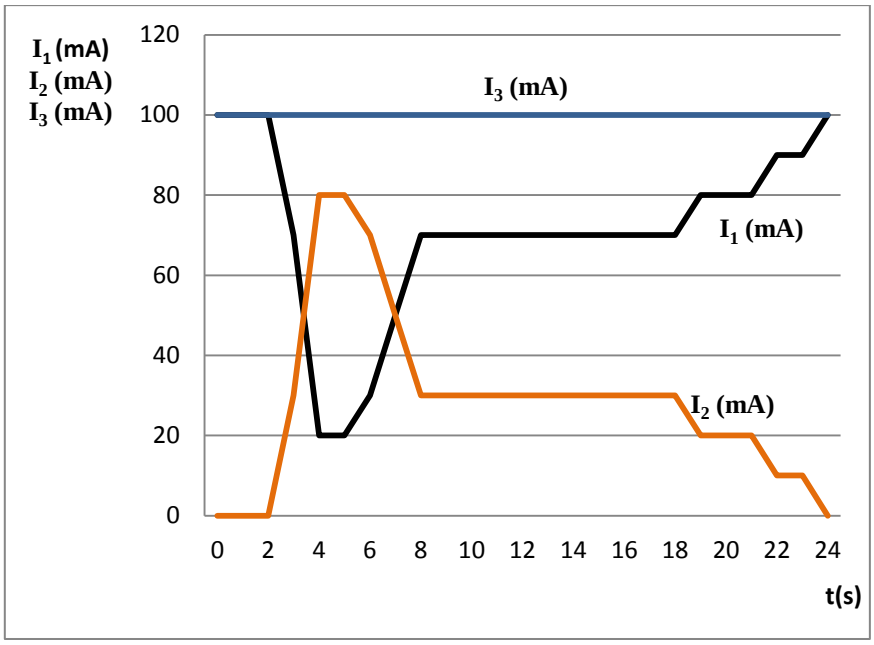
Frenleme moduna geçildiğinde hattaki diğer vasıtanın enerjisini hatla birlikte generatör durumuna geçen makinemiz karşılar. Bu durumda A1 ampermetresinin çektiği akım (değerlerin pozitif olduğu kabul edilerek) denklem 5.6'de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$I_1 = I_3 - I_2 \qquad (5.6)$$

Denklem 5.5 ve 5.6 incelendiğinde doğru akım makinesi motor olarak çalıştığında hattan akım çekerken, frenleme moduna geçip generatör olarak çalışmaya başladığında hatta enerji vermeye başladığı görülür.

Çizelge 5.1. Doğru akım motoru tahriki ile yapılan deney sonucunda alınan değerler

t (s)	**U (V)**	**I_1 (mA)**	**I_2 (mA)**	**I_3 (mA)**
0	**67,4**	**100**	**0**	**100**
1	**67,4**	**100**	**0**	**100**
2	**67,4**	**100**	**0**	**100**
3	**65,6**	**70**	**-30**	**100**
4	**66,5**	**20**	**-80**	**100**
5	**66,8**	**20**	**-80**	**100**
6	**66,9**	**30**	**-70**	**100**
7	**65,7**	**50**	**-50**	**100**
8	**66,1**	**70**	**-30**	**100**
9	**65,8**	**70**	**-30**	**100**
10	**66,1**	**70**	**-30**	**100**
11	**65,4**	**70**	**-30**	**100**
12	**65,3**	**70**	**-30**	**100**
13	**65,3**	**70**	**-30**	**100**
14	**65,3**	**70**	**-30**	**100**
15	**65,3**	**70**	**-30**	**100**
16	**65,2**	**70**	**-30**	**100**
17	**64,4**	**70**	**-30**	**100**
18	**64,7**	**70**	**-30**	**100**
19	**64,0**	**80**	**-20**	**100**
20	**64,2**	**80**	**-20**	**100**
21	**64,2**	**80**	**-20**	**100**
22	**63,9**	**90**	**-10**	**100**
23	**63,1**	**90**	**-10**	**100**
24	**63,5**	**100**	**0**	**100**
TOPLAM		**1780**	**-720**	**2500**



Şekil 5.24. Doğru akım motoru tahriki ile yapılan deneydeki akımların zamana göre değişimi

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.24'den görüleceği gibi frenlemeye geçildiğinde 2 sn doğru akım makinesi generatör durumuna geçememektedir. Bunun nedeni uyartım sargısının frenlemeye geçince polaritesi değişmesi gerektiği ve bu süre zarfında generatör olarak çalışamamasıdır.

Doğru akım makinesi 3. saniyede generatör olarak çalışmaya başlamakta ve hatta verdiği enerji miktarını hızla artırmaktadır. 4. ve 5. saniyede hatta maksimum miktarda enerji göndermekte ve 6. saniyeden itibaren hatta verdiği enerji bir miktar düşmektedir. Buradan mil hızı düştüğü için generatörün ürettiği enerjinin azaldığı anlaşılmaktadır.

8. saniyede hattaki diğer vasıta enerjisinin %30'unu frenlemeye geçen doğru akım makinesinden almaktadır. Bu durum 10 saniye boyunca devam etmektedir. 19. Saniyeden itibaren verilen enerji gittikçe azalmakta ve nihayet 24. saniyede doğru akım makinesi generatör olarak çalışmayı sonlandırmaktadır. Çünkü mil hızı çok düşük olduğundan ve uyartım akımı üst sınır değerine ulaştığından gerekli enerji üretimi yapılamamaktadır. Bu hızdan sonra vasıtanın tamamen durdurulması için mekanik frenleme kullanılmalıdır.

Hattaki diğer vasıtanın kullandığı enerjinin ne kadarını şebekeden ne kadarını frenlemeye geçen doğru akım makinesinden aldığına bakıldığında, kataner hat gerilimi ve frenleme süresi sabit olduğu varsayılırsa akım miktarları bize generatörün ürettiği frenleme enerjisinin miktarını vermektedir(Denklem 5.7).

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (5.7)$$

$$\% \eta = 720*100 / 2500 = \% 28,8 \quad (5.8)$$

Bu oran denklem 5.8'de ki gibi hesaplanırsa hattaki diğer vasıta kullandığı enerjinin % 28,8'ini frenlemeye geçen doğru akım makinesinin generatör olarak ürettiği enerjiden aldığını görürüz.

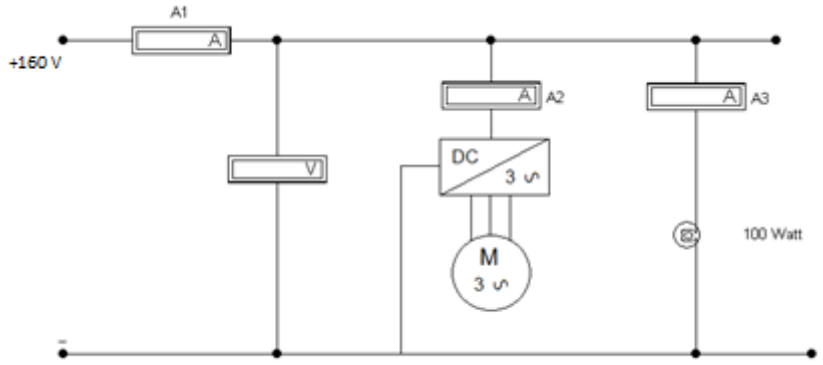
Çizelge 5.2 hatta başka ikinci bir vasıta yokken ki alınan değerleri göstermektedir. Bu çizelgede hat gerilimi incelendiğinde doğru akım makinesi generatör olarak çalıştığında hat geriliminin arttığı ve bu artışın normal çalışma değerine göre %62,46 oranına kadar çıktığı görülmektedir. Gerçekleştirilen devrede hatta devamlı olarak ikinci bir vasıta olduğundan bu gerilim artışı tehlike oluşturacak boyutlara ulaşmamaktadır. Ancak uygulamada her zaman hatta başka bir vasıta olmayabilir. Bu durumda hat gerilimi istenilmeyen değerlere çıkabilir. Ayrıca hatta başka vasıta yoksa hatta verilen enerji kullanılamadığından doğru akım makinesi frenleme yapamaz. Bu nedenle hat gerilimi devamlı ölçülmeli ve artış belirlenen değerin üstüne çıkarsa üretilen enerji yük dirençleri devreye alınarak harcanmalıdır. Bu şekilde frenleme işlemi de gerçekleştirilmiş olur.

Çizelge 5.2. Hatta başka vasıta yokken yapılan deney sonucunda alınan değerler

t (s)	U (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I_3 (mA)
0	67,4	0	0	0
1	67,4	0	0	0
2	67,4	0	0	0
3	70,9	-30	-30	0
4	83,5	-40	-40	0
5	98,6	-40	-40	0
6	104,9	-10	-10	0
7	107,0	0	0	0
8	106,5	0	0	0
9	105,3	0	0	0
10	108,0	0	0	0
11	106,9	0	0	0
12	107,4	0	0	0
13	108,4	0	0	0
14	108,8	0	0	0
15	109,1	0	0	0
16	109,5	0	0	0
17	108,9	0	0	0
18	106,0	0	0	0
19	105,2	0	0	0
20	104	0	0	0
21	99,7	0	0	0
22	98,0	0	0	0
23	93,5	0	0	0
24	88,7	0	0	0

5.4.2. Araçta 3 fazlı ASM kullanıldığında faydalı frenleme uygulaması

Hattan alınan 160 volt doğru gerilim 3 faz inverter devresi yardımıyla asenkron motor için gerekli 3 faz enerjiye dönüştürülür. İnverter devresinde frekans kontrolü de yapılmaktadır. Bu sayede motorun hızı kontrol edilir. Araçta 3 fazlı ASM kullanıldığında devrenin bağlantı şeması Şekil 5.25'de gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Araçta ASM kullanıldığında devrenin bağlantı şeması

Asenkron motorun generatör olarak çalışabilmesi için senkron hızın mil hızından daha az olması gerektiğinden 3. bölümde bahsetmiştik. Yapılan uygulamada ivmelenme modunda motor mil hızı senkron hızın biraz aşağısındadır. Bu durumda her iki vasıta da enerjisini hattan almaktadır. A1 ampermetresinin çektiği akım (değerlerin pozitif olduğu kabul edilerek) denklem 5.9'da görüldüğü gibi hesaplanır.

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{5.9}$$

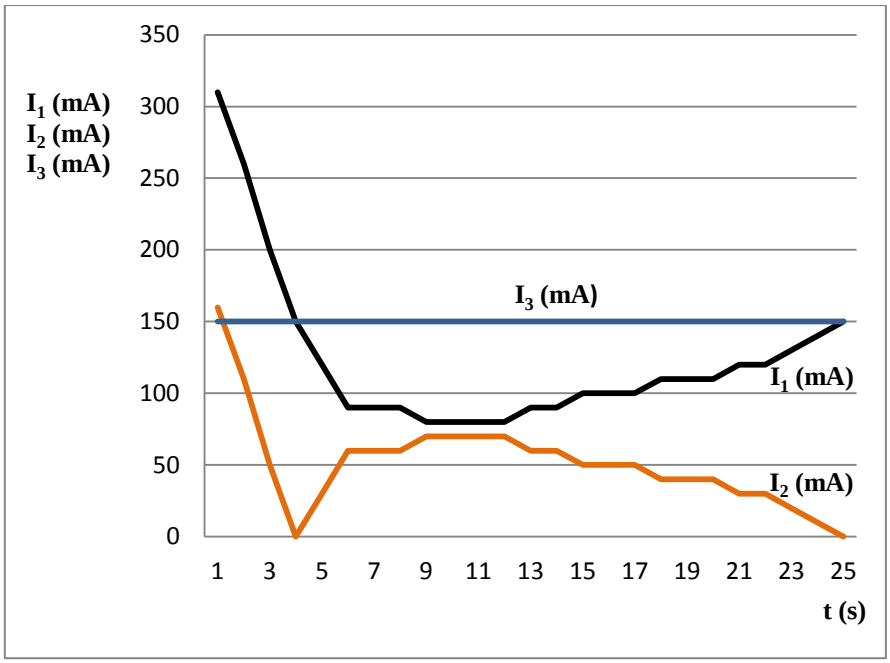
Frenleme moduna geçebilmek için asenkron makineye uygulanan gerilimin frekansı (senkron hız) düşürülür. Ancak motorun mil hızı, vasıtanın ağırlığı nedeniyle kazandığı kinetik enerjiden dolayı çok fazla azalmaz. Senkron hız mil hızın altına alındığından makine generatör olarak çalışır ve hatta enerji vermeye başlar. Eğer mil hızı ölçülerek senkron hız daima bu değerin altında tutulursa devir sıfır olasıya kadar enerji üretilebilir. Bu durumda A1 ampermetresinin çektiği akım (değerlerin pozitif olduğu kabul edilerek) denklem 5.10'da görüldüğü gibi hesaplanır.

$$I_1 = I_3 - I_2 \tag{5.10}$$

Denklem 5.9 ve 5.10 incelendiğinde asenkron makine motor olarak çalıştığında hattan akım çekerken, frenleme moduna geçip generatör olarak çalışmaya başladığında hatta enerji vermeye başladığı görülür.

Çizelge 5.3. Asenkron motor tahriki ile yapılan deney sonucunda alınan değerler

(t) (s)	**(U) (V)**	**I_1 (mA)**	**I_2 (mA)**	**I_3 (mA)**
0	**166,2**	**310**	**160**	**150**
1	**167,3**	**260**	**110**	**150**
2	**168,1**	**200**	**50**	**150**
3	**171,4**	**150**	**0**	**150**
4	**172,9**	**120**	**-30**	**150**
5	**169,4**	**90**	**-60**	**150**
6	**167,4**	**90**	**-60**	**150**
7	**169,3**	**90**	**-60**	**150**
8	**174,6**	**80**	**-70**	**150**
9	**174,8**	**80**	**-70**	**150**
10	**171,9**	**80**	**-70**	**150**
11	**173,4**	**80**	**-70**	**150**
12	**171,9**	**90**	**-60**	**150**
13	**174,0**	**90**	**-60**	**150**
14	**171,8**	**100**	**-50**	**150**
15	**173,2**	**100**	**-50**	**150**
16	**170,9**	**100**	**-50**	**150**
17	**172,9**	**110**	**-40**	**150**
18	**172,5**	**110**	**-40**	**150**
19	**169,6**	**110**	**-40**	**150**
20	**170,3**	**120**	**-30**	**150**
21	**171,5**	**120**	**-30**	**150**
22	**171,6**	**130**	**-20**	**150**
23	**169,9**	**140**	**-10**	**150**
24	**172,9**	**150**	**0**	**150**
TOPLAM (3. Saniyeden itibaren)		**2330**	**-970**	**3300**



Şekil 5.26. Asenkron motor tahriki ile yapılan deneydeki akımların zamana göre değişimi

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.26 incelendiğinde makine, frenlemeye geçmeden önce (t=0) mil hızı senkron hızın altında ve motor olarak çalışmaktadır. Bu durumda her iki vasıtada enerjisinin tamamını hattan almaktadır.

İlk 2 saniyede ASM' ye uygulanan gerilimin frekansı azaltılmıştır. Dolayısıyla senkron hız azalıp, rotor hızına yaklaşarak ASM'nin çektiği akımın azaldığı görülmektedir. 3. saniyede Senkron hız ile rotor hızı eşit hale gelmiştir. Bu anda ASM ne enerji çekmekte nede hatta enerji vermektedir.

4. saniyeden itibaren senkron hız biraz daha azaltılarak rotor hızının altına düşürüldüğünde generatör olarak çalışmaya başlar. 1. ve 8. Saniyeleri arasında senkron hızın azaltılması rotor hızının azalmasından biraz daha hızlı yapılmaktadır. Çünkü maksimum enerjinin üretilmesi için senkron hızın rotor hızının bir miktar altında olması gerekmektedir. Senkron hız bu seviyeye ininceye kadar frekans hızla azaltılır. Uygulama yaptığımız deneyde 8. saniyede bu seviyeye gelinmiştir. Bu anda ASM generatör olarak çalışmakta ve maksimum enerjiyi üretip hattaki diğer vasıtaya vermektedir.

8. saniyeden itibaren ASM'ye uygulanan gerilimin frekansı rotor hızındaki düşüşle aynı oranda olmaktadır. Yani rotor hızının senkron hıza oranı sabit tutulmaktadır. 4 saniye boyunca maksimum enerji üretilmiştir. Daha sonra makinenin

devri azaldıkça hatta verdiği enerji de azalmaktadır. 12. saniyeden 23. saniyeye kadar gittikçe azalacak şekilde enerji üretmeye devam etmektedir.

24. saniyede ASM generatör olarak çalışmayı sonlandırmaktadır. Çünkü mil hızı çok düşük olduğundan gerekli enerji üretimi yapılamamaktadır. Bu hızdan sonra vasıtanın tamamen durdurulması için mekanik frenleme kullanılmalıdır.

Hattaki diğer vasıtanın kullandığı enerjinin ne kadarını şebekeden ne kadarını frenlemeye geçen doğru akım makinesinden aldığına bakıldığında, kataner hat gerilimi ve frenleme süresi sabit olduğu varsayılırsa akım miktarları bize generatörün ürettiği frenleme enerjisinin miktarını vermektedir(Denklem 5.11).

$$W = U \cdot I \cdot t \tag{5.11}$$

$$\% \eta = 970*100 / 3300 = \% 29{,}39 \tag{5.12}$$

Bu oran denklem 5.12'de ki gibi hesaplanırsa hattaki diğer vasıta kullandığı enerjinin % 29,39'unu frenlemeye geçen asenkron makinenin generatör olarak ürettiği enerjiden aldığını görürüz.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada elektrikli araçlarda faydalı frenleme enerjisinin elde edilmesi ve hattaki diğer vasıtalarda kullanılmasını inceleyen bir eğitim seti tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Elektrikli ulaşım araçlarında tahrik motoru olarak genellikle 3 faz asenkron motor ve doğru akım motoru olmak üzere iki tip motor kullanılmaktadır. Tasarlanan eğitim setinde her iki tip motorun milleri esnek bir kavrama ile birbirine akuple edilmiştir. Bu sayede frenleme süresi istenilen değerde gerçekleştirilmiş ve her iki motor için de faydalı frenleme enerjisinin hattaki diğer vasıtalarda kullanılması ayrı ayrı incelenebilmiştir.

Kataner hattının beslenmesinde daha çok uzun mesafelerde ki hatlarda alternatif gerilim, şehir içindeki hatlarda da doğru gerilim tercih edilmektedir. Frenleme sıklığı şehir içi hatlarda daha fazladır. Bundan dolayı bu çalışmada kataner hattı doğru gerilimle beslenmiştir.

Gerçekleştirilen bu sistemin kontrolü 2 ayrı devre ile yapılmıştır. 3 Fazlı asenkron motorun sürücü devresi sinüs-PWM kullanılarak V/f kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Gerekli sinyaller MC3PHAC entegresi tarafından üretilmiştir. İçerisinde 6 adet IGBT bulunan IRAMY20UP60B sürücü entegresi de güç katını oluşturmuştur.

Asenkron makinelerde genellikle Y/Δ yol verici veya yumuşak yol vericiler kullanılır. Her iki yöntemde de kalkış süresince gerilim düşürülmekte ve moment gerilimin karesi oranında azalmaktadır. Gerçekleştirilen devrede frekans kontrolü ile yol verme ve hız kontrolü yapılarak kalkış momentinin azalması engellenmiştir.

Bu çalışmada doğru akım makinesi klasik seri dirençlerle sürme yöntemi yerine güç anahtarlama elemanı olan MOSFET ile sürülmüş ve hız kontrolü yapılmıştır. Böylece vasıtanın daha yumuşak kalkış ve frenleme yapması sağlanmıştır. Ayrıca dirençlerde boşa harcanan enerji engellenmiştir.

Yabancı uyartımlı doğru akım motorunun sürücü devresi PWM tekniği kullanılarak PIC 16F628A mikrodenetleyici ile yapılmıştır. Bu mikrodenetleyici aynı zamanda eğitim setinin genel çalışmasını da kontrol etmektedir.

Bu eğitim setinde elektrikli araçta kullanılan motor çeşidine göre 2 ayrı çalışma modu bulunmaktadır. Bu modlar ayrı ayrı incelenmiştir.

1. Mod; araçta tahrik motoru olarak yabancı uyartımlı doğru akım motoru kullanımıdır. Bu modda araç frenlemeye geçtiğinde diyotlar sayesinde, generatör olarak çalışan motor ürettiği enerjiyi hata tek yönlü olarak geri verir. Diyotlar hattan motora enerji akışına izin vermezler. Geri verilen enerji hattaki diğer vasıta tarafından kullanılır. Gerçekleştirdiğimiz devrede frenleme süresi 24 saniye sürmektedir. Bu süre zarfında hattaki diğer vasıtanın kullandığı enerjinin %28,8'ini frenleme enerjisinden aldığı gözlemlenmiştir.

2. Mod; araçta tahrik motoru olarak 3 fazlı asenkron motorun kullanımıdır. Bu modda araç frenlemeye geçtiğinde motora uygulanan gerilimin frekansı rotor hızının altına düşürülmekte ve 3 fazlı asenkron motorun generatör olarak çalışması sağlanmaktadır. Rotor hızı düştükçe motora uygulanan gerilimin frekansı da düşürülmekte ve böylece generatör çalışma süresi artarak frenleme zamanı kısaltılmaktadır. Asenkron makinenin ürettiği enerjiyi hatta bulunan diğer vasıta kullanmaktadır. Gerçekleştirdiğimiz devrede frenleme süresi 24 saniye sürmektedir. Bu süre zarfında hattaki diğer vasıtanın kullandığı enerjinin %29,39'unu frenleme enerjisinden aldığı gözlemlenmiştir.

Her iki çalışma modu da incelendiğinde önemli bir oranda enerji tasarrufu sağlandığı görülmektedir. Özellikle durup-kalkma sıklığı fazla olan hatlarda bu enerji miktarı kısa zamanda ilk kurulum maliyetlerini karşılamaktadır. Ayrıca elektrikli araçlarda faydalı frenlemenin kullanılması, mekanik frenlerin bakım ve yıpranmasını azaltır. Hatta mekanik frenlerin karmaşıklığını, maliyetini ve ağırlığını da azaltabilir. Faydalı frenleme sürtünmesiz olduğu için parçalarda yıpranma olmayacaktır.

Ülkemizde gerek şehir içi, gerekse şehirlerarası raylı toplu taşıma sistemlerinde önemli yatırımlar yapılmaktadır. Mevcut hatlar yenilenerek elektrikli trenlerin bu hatlarda kullanılması sağlanmaktadır. Bununla birlikte birçok şehre yüksek hızlı tren hatları planlanmaktadır. Yine şehir merkezlerinde hafif ray ve metro sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde çalışan elektrikli tren setleri büyük güçlerde enerji çekmektedir. Faydalı frenleme enerjisinin kullanımı ile ülkemizin enerji konusunda dışa bağımlılığı önemli ölçüde azaltılabilir.

6.2. Öneriler

Faydalı frenleme enerjisinin kullanılabilmesi için hatta ivmelenme modunda bir vasıtanın olması gerekmektedir. Bu çalışmada hatta devamlı bir ivmelenme modunda

vasıta bulundurulmuştur. Ancak bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Transformatör merkezlerindeki ekipmanlar tam kontrollü doğrultucu tipinde olursa çift yönlü iletime izin verirler. Böylece hatta enerji çekecek başka vasıta olmasa da frenleme enerjisi şehir şebekesine verilebilir.

Faydalı frenleme enerjisini kullanmanın başka bir yolu da bu enerjinin depolanmasıdır. Depolama elemanlarının pahalı oluşu, ömürlerinin kısa oluşu gibi dezavantajları olsa da ilerleyen zamanlar da teknolojinin gelişmesiyle avantajlı duruma gelebilirler. Bu yüzden depolama elemanlarının geliştirilmesi çalışmaları yapılmalıdır.

Yapılan çalışma eğitim amaçlı olduğu için hat gerilimi 160 volt ve kullanılan motorların gücü 250 watt seçilmiştir. Ancak elektrikli araçlarda daha yüksek gerilim ve güç değerleri kullanılmaktadır. Daha yüksek güçlü motor ve daha yüksek hat gerilimi ile çalışma geliştirilebilir. Bunun için güç seviyesi daha yüksek anahtarlama elemanı kullanılmalıdır.

Sistemde mikrodenetleyiciler yerine Sayısal İşaret İşlemciler (DSP) kullanıldığı taktirde kontrollerin hepsi bir merkezden yapılabilir. Böylece kontrol biriminin donanımı basitleşebilir. Ayrıca DSP'lerin mikrodenetleyicilere göre üstünlükleri daha fazla hafıza kapasitesi ve daha yüksek hızlarda işlem yapmasıdır. Ayrıca DSP'ler paralel işlem yapabilme ve güçlü matematiksel işlem birimlerine sahiptirler.

KAYNAKLAR

ABB Consortium, 1989, Power Supply Substations Design and Installation Document G40.100 (yayımlanmamış).

ABB Traction, 1989, Metro Vehicle Design and Installation Documents F00.100 (yayımlanmamış).

Akdemir, B.,2003, 3 Fazlı asenkron motorların MC3PHAC mikrodenetleyicisi kullanarak hız kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 30-35.

Akmeşe, D., 2006, Güneş panelinden beslenen bir DA. motorun çalıştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi *Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-46.

Alstom, 2006, APS wire-free system, http://www.transport.alstom.com/home/elibrary/technical/environnement/_files/file_31288_29589.pdf, [Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2009].

Altındemir, E.,2008, Hibrid elektrikli taşıtlarda rejeneratif frenleme, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 30-31.

Atalay, F.,1990, Asenkron motorlarda darbe genişlik modülasyonlu frekans çevirici İle hız denetim, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 42-25.

Ateş,M.,2007, Frekans invertörleri ve eğitime yönelik uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 18-26.

Bae, C. H., Jang D. U., Kim Y. G., Chang S. K., Mok J. K., 2007, Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations, The 7th International Conference on Power Elektronics, 2007, EXCO, Daegu, Korea, 801-805.

Baran, S., 2009, Şehir içi raylı sistem işletiminde rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 60-65.

Bombardier, 2003, First catenary-free and contact-less operating tram, http://www.bombardier.com/en/corporate/media-centre/press-releases/, [Ziyaret Tarihi: 6 Ekim 2009].

Bose, B.K., 1993, Microcomputer Control Of Power Electronics And Divers, *Prentice Hall*, New York, USA .

Bozkurt, V.,2006, Asenkron motor ve asenkron generatör parametrelerinin dolaylı metot ile çıkarılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi *Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 32-36.

Brenna, M., Foiadelli, F., Tironi, E. and Zaninelli D., 2007, Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems, IEEE,2007, 69-73.

Büyükatlı, A., 2000, Asenkron makinanın hız sensörsüz vektör kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 23-28.

Caputo, L., 2000, Control of Energy Storage Devices for Rail Vehicles, Master Thesis, *Department of Automatic Control Lund Institute of Technology* , 68-70 (yayımlanmamış).

Chan, T.F. , 1993, Capacitance Requirements Of Self-Excited Induction Generators, *IEEE Trans. On Energy Conversıon*, Vol.8, No.2, pp.304-311.

Çay, M. A., 1986, Yüksek güçlü DC/AC konvertörü, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 1-15 .

Demirci, E., 2006, Yel enerjisi için sayısal denetimli asenkron generatör dizge modeli tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 37-38.

Doğan, H., 2006, Uzay vektör PWM kontrollü tek fazlı kesintisiz güç kaynağının tasarımı ve gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 27-32.

Düşmez, S., 2011, Elektrikli taşıtlarda faydalı frenleme enerjisinin daha iyi kazanımı için bir güç dönüştürücü tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-13.

Flinders, F., Mathew, R. and Oghanna, W.,1995, Drives, Power Electronics and Traction Systems Laboratory Centre for Railway Engineering Central Queensland University, Australia,55-61.

Gemici, S.S., 2006, Elektrikli ulaşım sistemlerinde enerji depolama yöntemlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-16.

Hubert, I, Charles, 2002, Electric machines theory operation applications adjustment and control 2nd ed., *Pearson Education Inc. Upper Saddle River*, New Jersey of, USA, 221-227.

IZT, 2003, Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways, Final Report, Berlin.

İncekara, B., 2000, Pwm inverterlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 22-23.

Jisheng H., Xiaojing L. And Yukun Z., 2008, The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2008, Harbin, China.

Latkovskis, L., and Grigans, L., 2008, Estimation of the Untapped Regenerative Braking Energy in Urban Electric Transportation Network, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008, Poznan-Poland, 2066-2070.

Nasri, A., Moghadam, M. F. and Mokhtari H., 2010, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2010, 1218-1221.

Ortaç, O, 2007, DA/AA Dönüştürücü, Gazi *Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 11-13.

Özel, N., 2006, Doğru akım motoru ve step motorun mikroişlemci yardımıyla senkronizasyonu ve bobin sarma makinesine uyarlanması, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*Zonguldak, 29-36.

Park, C. H., Jang, S.J., Lee, B. K., Won C.Y. and Lee H. M., 2007, Design and Control Algorithm Research of Active Regenerative Bidirectional DC/DC Converter used in Electric Railway, The 7th International Conference on Power Elektronics, 2007, EXCO, Daegu, Korea, 790-794.

Rashid, Muhammad H., 2003, Power Electronics Devices and Applications, 3rd ed', Upper Saddle River, *Pearson Education,* New Jersey of, USA.

Sarıtaş, M., Aydemir, M.T. ve Dalbaz, A., 2002, 700 VA Kesintisiz Güç Kaynağı Devresinin Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der*. Cilt 17, No 1, 33-42.

Shen, X., Chen S. and Zhang Y., 2013, Configure Methodology of onboard Supercapacitor Array for Recycling Regenerative Braking Energy of URT Vehicles, Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2013 IEEE.

Terzi, K., 2000, Mini hidroelektrik sistemler için gerilim ve frekans kontrol asenkron generatör tasarımı, Doktora Tezi, *Marmara üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul, 53-55.

Toprak, A., 2011, Elektrik üretimi için düşük güçlü rüzgar enerji sistemi tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 35-42.

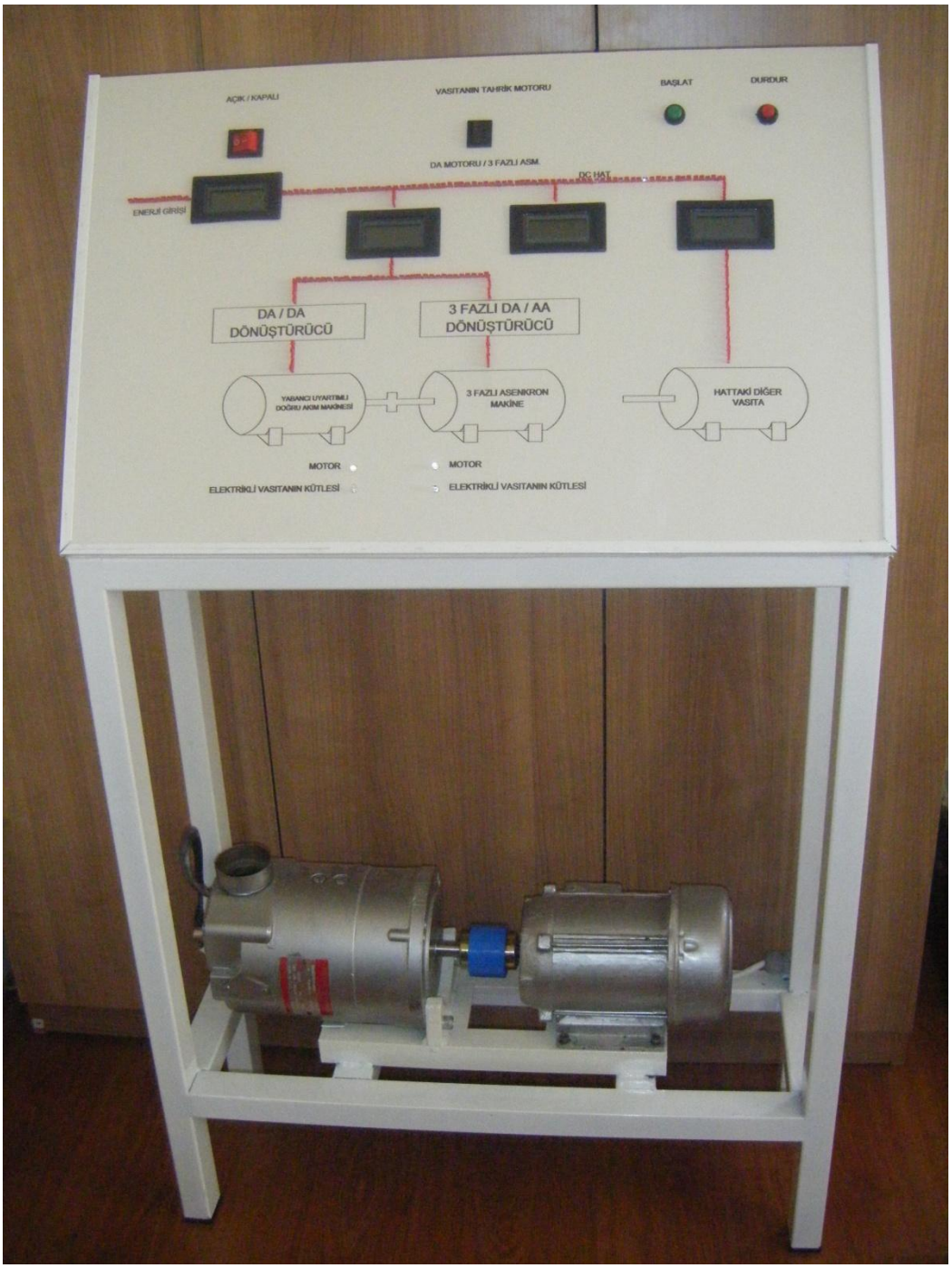
Tseng, K.H., SHIAO, Y. F., 2012, The analysis of regenerative breaking power for taipei rapid transit systems electrical multiple units, Proceedings of the 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xian, 1947-1951.

Wang, L., and LEE, C.H. ,1997, A Novel Analysis On The Performance Of An Isolated SelfExcited Induction Generator, *IEEE Trans. on energy conversion,* Vol.12, No.2, PP log-115.

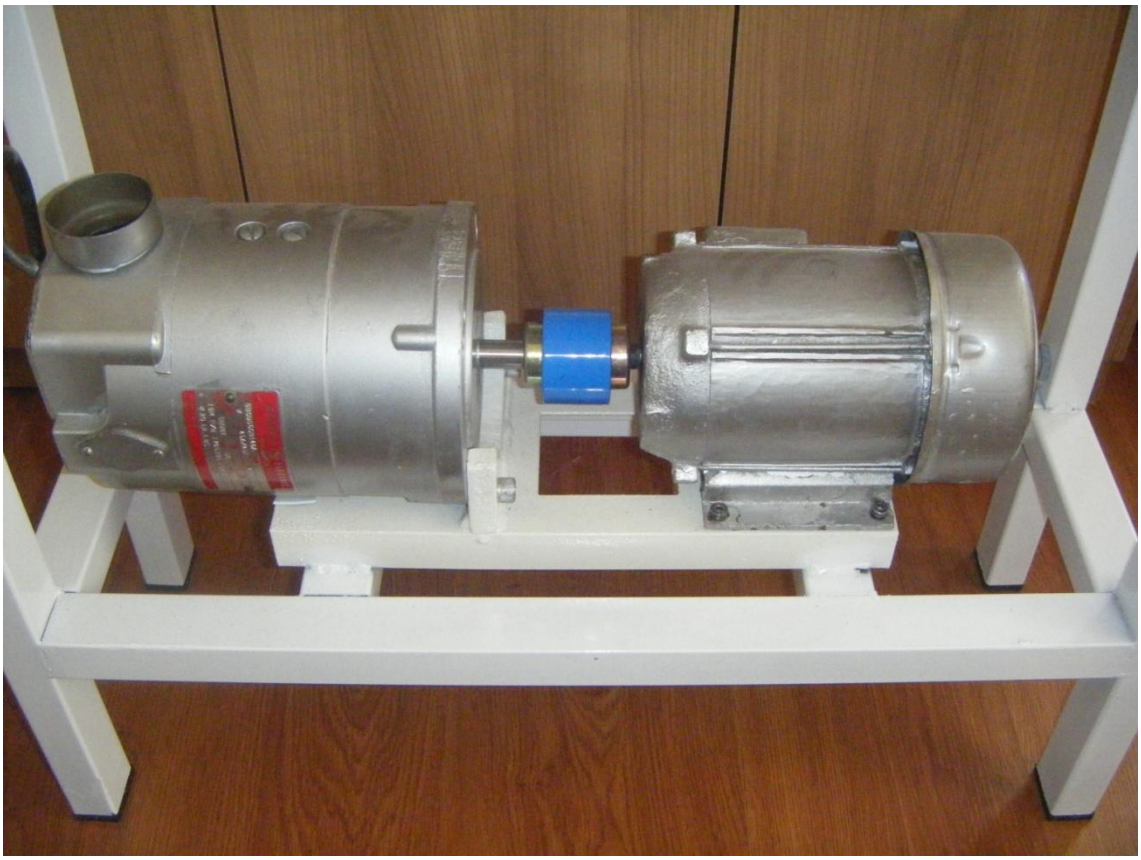
Yalçın, F., 2009, Bir fazlı inverter tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 24-28

EKLER

EK - 1: Eğitim setinin fotoğrafları



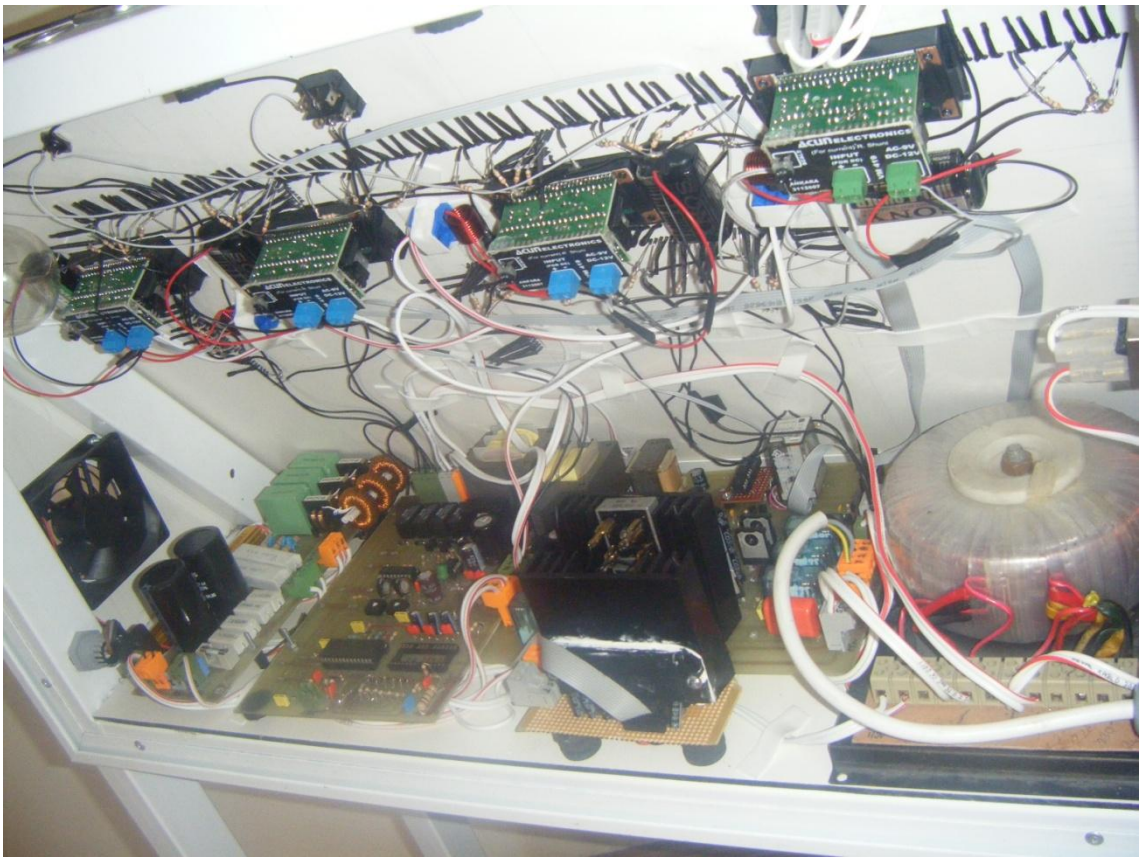
Eğitim setinin genel görünüşü

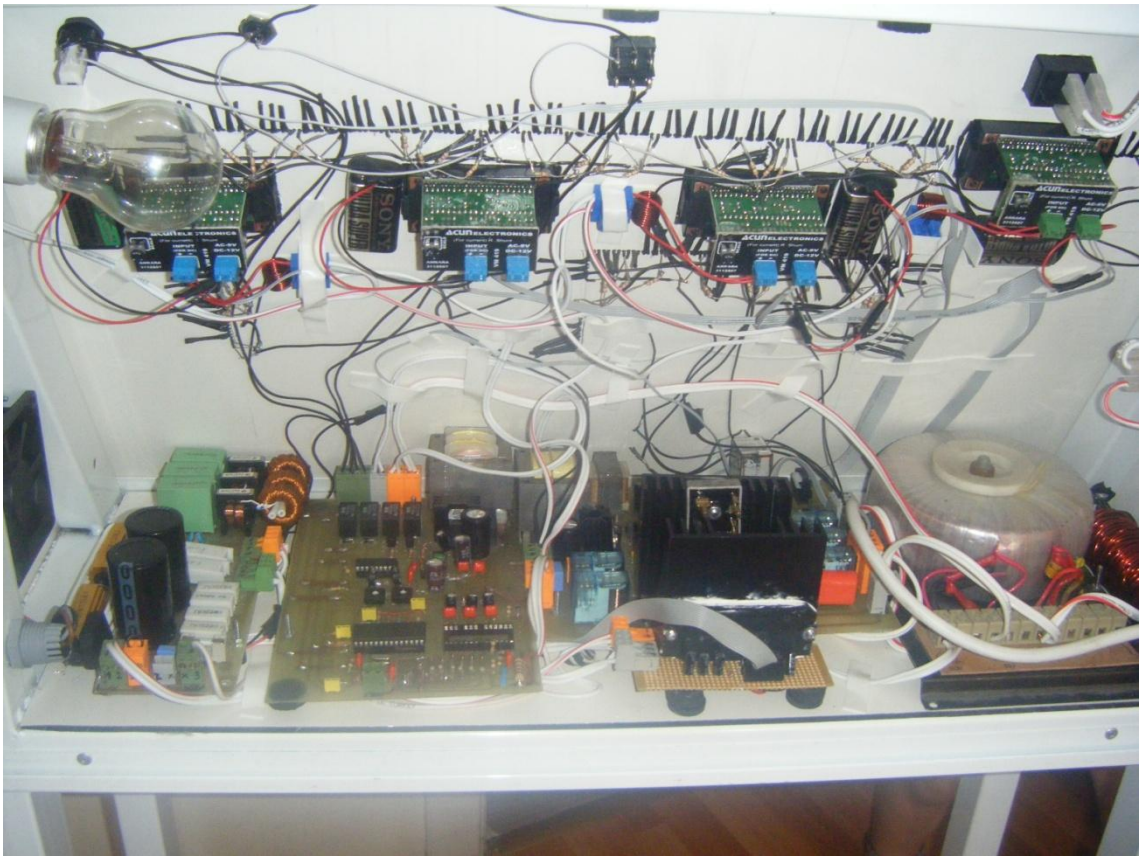


Eğitim setinde kullanılan motorlar



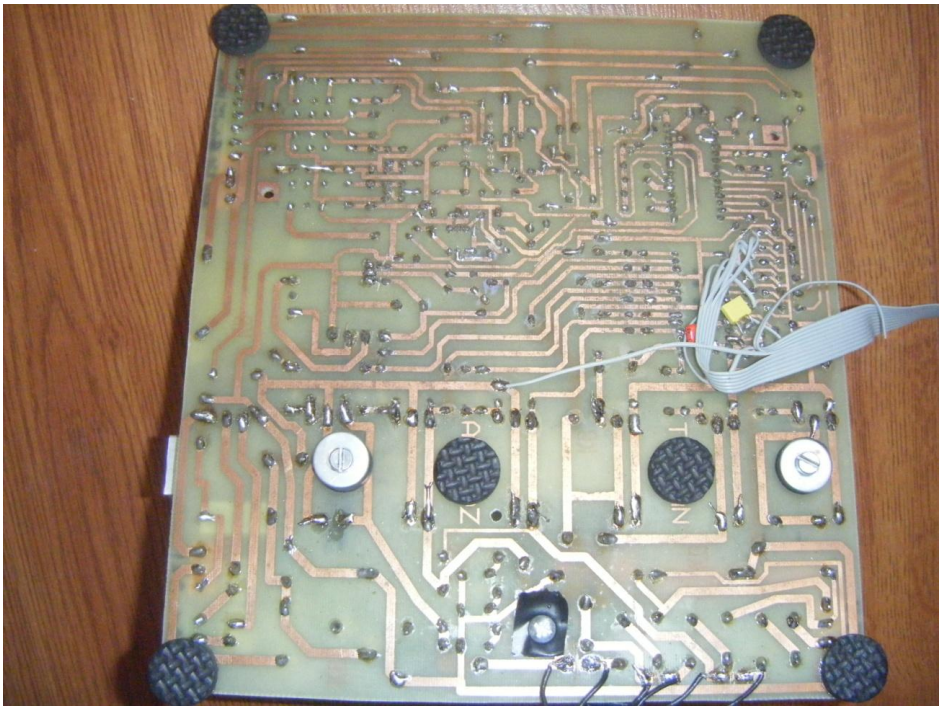
Eğitim setinde kullanılan transformatör



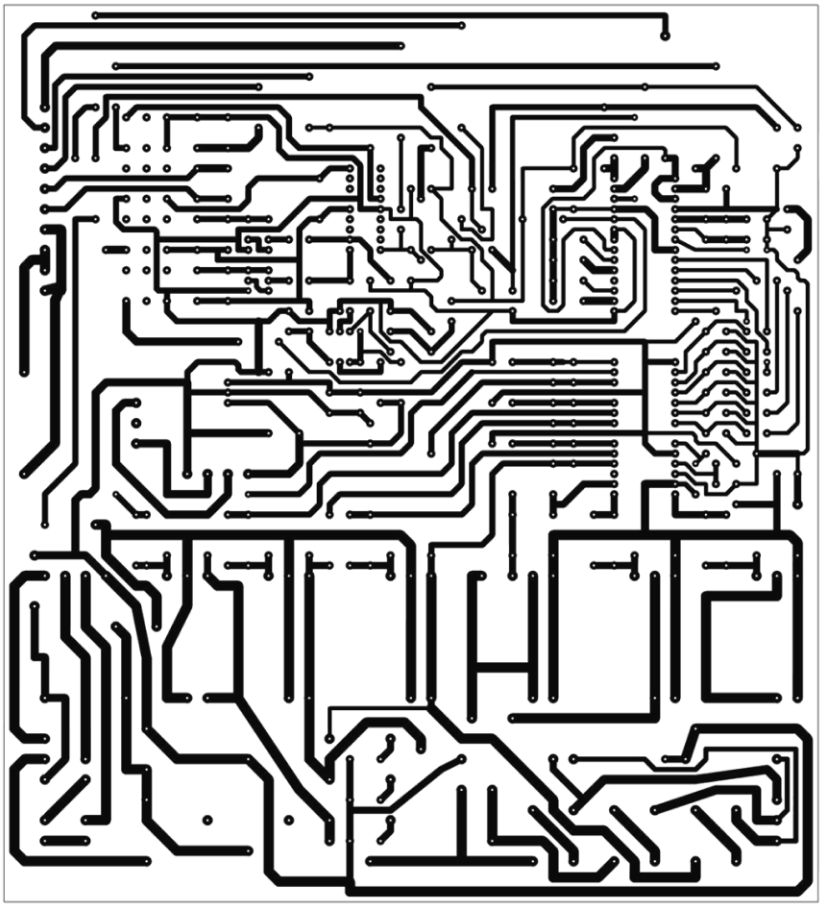


Eğitim setinin elektronik kontrol kısmı

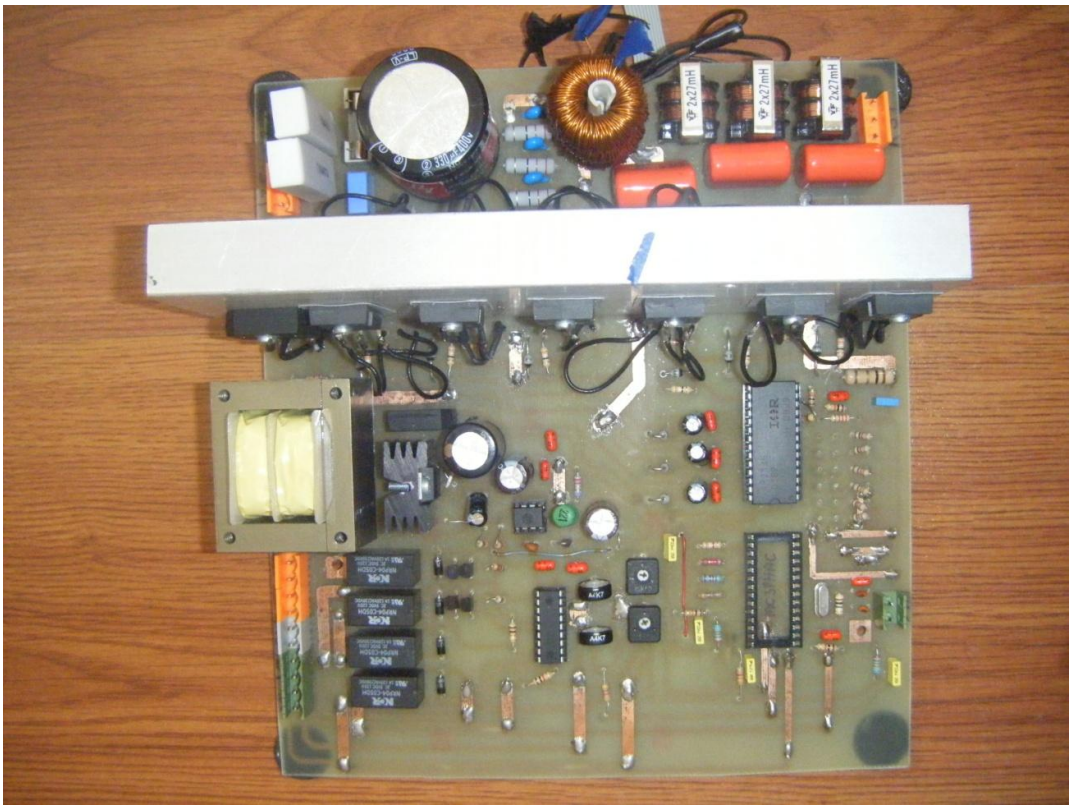
EK - 2: Elektronik devre kartlarının alt-üst görünüşleri ve baskı devreleri



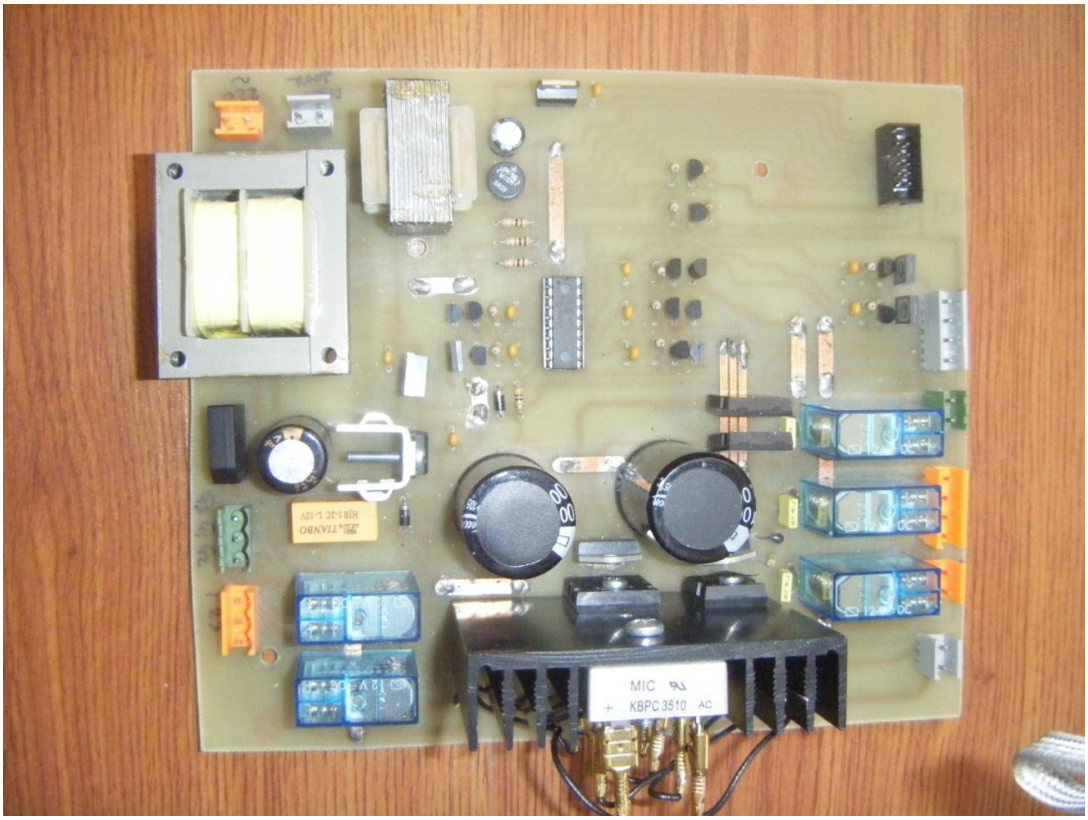
Üç fazlı asenkron makine sürücü devre kartının alttan görünüşü



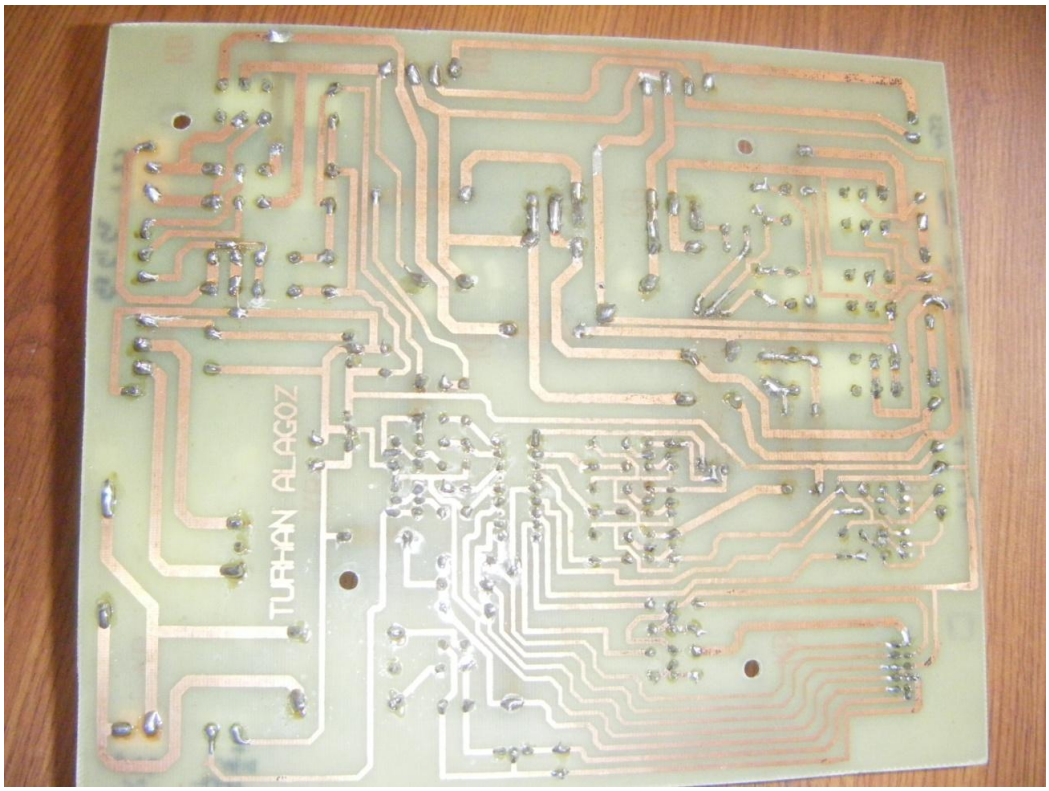
Üç fazlı asenkron makine sürücü devre kartının baskı devresi



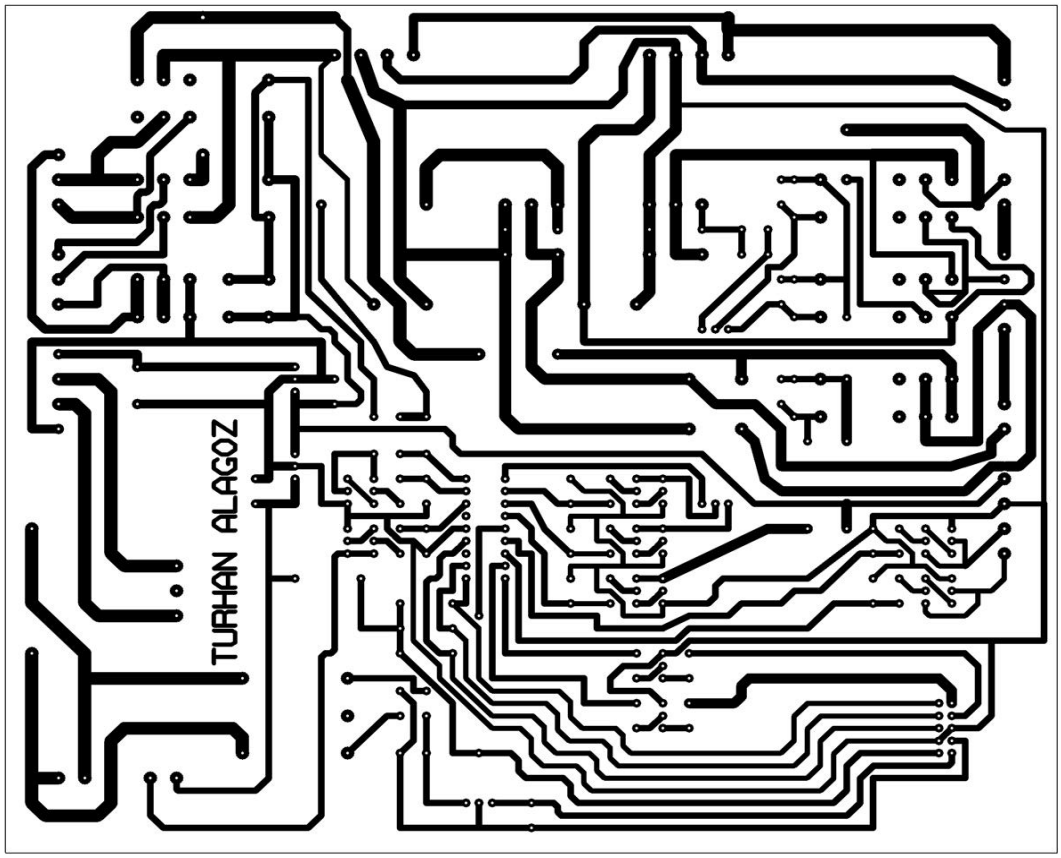
Üç fazlı asenkron makine sürücü devre kartının üstten görünüşü



Doğru akım makinesi sürücü devre kartının üstten görünüşü



Doğru akım makinesi sürücü devre kartının alttan görünüşü



Doğru akım makinesi sürücü devre kartının baskı devresi

EK - 3:Üç fazlı asenkron makine sürücü devresinde bulunan mikrodenetleyicinin CCS C programa diliyle yazılmış program kodları

```
#include <16f628a.h>
#FUSES NOWDT
#FUSES XT
#FUSES NOPUT
#FUSES NOPROTECT
#fuses INTRC_IO
#use delay(clock=4M)
#use fast_io(a)
#use fast_io(b)
#define buton pin_A1
int i=0;
int k=0;
void main ( )
{
        setup_timer_1(T1_DISABLED);
        set_tris_b(0x00);
        set_tris_a(0xFF);
        output_b(0x00);
         setup_ccp1(CCP_PWM);
        k=0;
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,255,1);
basa:
        if(input(buton))
        {
        i=0;
        set_pwm1_duty(i);
        delay_ms(200);
        }
        else
        {
        i=255;
        set_pwm1_duty(i);
        delay_ms(200);
        goto devam;
        }
        goto basa;
devam:
        i=255;
        set_pwm1_duty(i);
         delay_ms(500);
        output_high(pin_b5);
```

```
        delay_ms(1000);
        output_high(pin_b4);
        delay_ms(500);
        set_pwm1_duty(i);
 basa1:
        if(input(buton))
        {
        i=255;
        set_pwm1_duty(i);
        delay_ms(200);
        }
        else
        {
        i=255;
        set_pwm1_duty(i);
        delay_ms(200);
        goto devam1;
        }
        goto basa1;
devam1:
        delay_ms(2000);
        if(input(buton))
        {
        goto devamac;
        }
        else
        {
        goto devamdc;
        }
devamac:
        delay_ms(3000);
        k=0;
         while(1)
        {
        i-=1;
        k+=1;
        if (k<=50)
        delay_ms(100);
        if ((k>50)&&(k<90))
        delay_ms(300);
        if ((k>=90)&&(k<105))
         {
        i+=1;
        delay_ms(300);
```

```
          }
          if ((k>=105)&&(k<113))
          delay_ms(300);
          if (k>=113)
          delay_ms(10);
          if (i<20)
         break;
         set_pwm1_duty(i);
         }
          i=0;
          set_pwm1_duty(i);
          output_b(0x00);
          goto basa;
devamdc:
          i=255;
          set_pwm1_duty(i);
          delay_ms(8000);
          k=0;
          while(1)
          {
           delay_ms(200);
           i-=1;
          k+=1;
          if (i<140)
          break;
          set_pwm1_duty(i);
          }
           i=0;
          set_pwm1_duty(i);
          output_b(0x00);
          goto basa;
           }
```

EK - 4:Doğru akım makinesi sürücü devresinde bulunan mikrodenetleyicinin ASM programa diliyle yazılmış program kodları

```
LIST    P=16F628A
INCLUDE      "P16F628A.INC"
__CONFIG _CP_OFF & _WDT_OFF & _PWRTE_OFF &
_INTRC_OSC_NOCLKOUT & _MCLRE_ON & _BODEN_OFF & _LVP_OFF &
_DATA_CP_OFF
BSF             STATUS,5
MOVLW               B'00000000'
MOVWF               TRISB
MOVLW               B'00111100'
MOVWF               TRISA
BCF                 STATUS,5
MOVLW               H'07'
MOVWF               CMCON
IS                  EQU    H'20'
PER                 EQU    H'21'
ISYED               EQU    H'22'
SAYAC1              EQU    H'23'
SAYAC2              EQU    H'24'
SAYAC               EQU    H'25'
TURHAN              EQU    H'26'
TEST3
MOVLW               B'00000000'
MOVWF               PORTB
MOVLW               B'00111100'
MOVWF               PORTA
BTFSC               PORTA,3
GOTO                ACOTO
GOTO                DCOTO
DCOTO
MOVLW               B'00000000'
MOVWF               PORTB
MOVLW               B'01111100'
MOVWF               PORTA
BTFSC               PORTA,2
GOTO                TEST3
CALL                GECIKME
CALL                GECIKME
CALL                GECIKME
BTFSC               PORTA,2
GOTO                TEST3
BSF                 PORTA,0
```

```
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'00000010'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'00000000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
```

```
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10000000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10100000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111010'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
```

```
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10010000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'00000000'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'01001000'
MOVWF   PORTB
BCF     PORTA,0
BASLA
```

```
MOVLW       d'250'
MOVWF       IS
MOVWF       ISYED
DON
MOVLW       D'70'
MOVWF       SAYAC
DONGU
MOVF        ISYED,W
MOVWF       IS
MOVLW       d'250'
MOVWF       PER
MOVLW       B'01001000'
MOVWF       PORTB
PWM0
DECFSZ      IS,F
GOTO        PWM1
MOVLW       B'01010000'
MOVWF       PORTB
PWM1
DECFSZ      PER,F
GOTO        PWM0
DECFSZ      SAYAC,F
GOTO        DONGU
MOVF        ISYED,W
MOVWF       IS
DECFSZ      IS,F
GOTO        NEL
GOTO        TEST3
NEL
MOVF        IS,W
MOVWF       ISYED
MOVLW       d'30'
SUBWF       ISYED,0
MOVWF       TURHAN
DECFSZ      TURHAN,F
GOTO        DON
GOTO        TEST3
ACOTO
MOVLW       B'00000000'
MOVWF       PORTB
MOVLW       B'10111100'
MOVWF       PORTA
;
BTFSC       PORTA,2
```

```
GOTO        TEST3
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
BTFSC       PORTA,2
GOTO        TEST3
BSF         PORTA,1
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       PORTB
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
MOVLW       B'00000110'
MOVWF       PORTB
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
MOVLW       B'00000100'
MOVWF       PORTB
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
CALL        GECIKME
```

```
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'00100100'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10100100'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111100'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
```

```
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111110'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
MOVLW   B'10111100'
MOVWF   PORTB
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
```

```
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
CALL    GECIKME
```

```
DONGUC
MOVF        ISYED,W
MOVWF       IS
MOVLW       d'250'
MOVWF       PER
MOVLW       B'10111100'
MOVWF       PORTB
PWM0C
DECFSZ      IS,F
GOTO        PWM1C
MOVLW       B'10110100'
MOVWF       PORTB
PWM1C
DECFSZ      PER,F
GOTO        PWM0C
DECFSZ      SAYAC,F
GOTO        DONGUC
MOVF        ISYED,W
MOVWF       IS
DECFSZ      IS,F
GOTO        NELC
GOTO        TEST3
NELC
MOVF        IS,W
MOVWF       ISYED
MOVLW       d'195'
SUBWF       ISYED,0
MOVWF       TURHAN
DECFSZ      TURHAN,F
GOTO        DONC
GOTO        TEST3
GECIKME
MOVLW       H'FF'
MOVWF       SAYAC1
DONGU31
MOVLW       H'FF'
MOVWF       SAYAC2
DONGU2
DECFSZ      SAYAC2,F
GOTO        DONGU2
DECFSZ      SAYAC1,F
GOTO        DONGU31
RETURN
END
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Turhan ALAGÖZ
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Ağın 06.10.1977
Telefon	**:**	0 505 518 69 42
Faks	**:**	0 332 885 73 01
e-mail	**:**	turhan@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Konya İmam-Hatip Lisesi, Konya	1994
Üniversite	:	Gazi Üniversitesi,Tek.Eğt. Fak.,Elektrik Böl.,Ankara	1999
Yüksek Lisans	:	-	
Doktora	:	-	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
1999	Hendek Endüstri Meslek Lisesi	Elektrik Öğretmeni
2004	Kulu METEM	Elektrik Öğretmeni
2008	Kadınhanı METEM	Elektrik Öğretmeni
2009	Selçuk Üniversitesi Ilgın MYO	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Elektrik Makineleri, Güç Elektroniği, Endüstriyel Kontrol, Mikrodenetleyiciler.

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR