

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ENERJİ  
DEPOLAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Elektrik Mühendisi S. Süleyman GEMİCİ

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Faruk BAKAN (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2006**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. ELEKTRİKLİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ .....	5
2.1 Raylı Ulaşım Sistemlerinin Genel Yapısı .....	6
2.1.1 Cer Sistemleri .....	6
2.1.2 Yardımcı Güç Sistemleri.....	8
2.1.2.1 Evirici Ünitesi.....	8
2.1.2.2 Üç Fazlı Transformator Ünitesi ve Filtre Devresi .....	11
2.1.2.3 Batarya Şarj Ünitesi .....	12
2.2 Faydalı Frenleme ve Enerji Geri Kazanımı .....	12
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	17
3.1 Enerji Depolamanın Nedenleri .....	17
3.2 Mevcut Enerji Depolama Teknolojileri .....	18
3.2.1 Hidrolik Güç Depolanması.....	19
3.2.2 Basıncılı Hava İle Enerji Depolama Sistemleri (CAES) .....	21
3.2.3 Piller .....	23
3.2.4 Yakıt Hücreleri .....	25
3.2.5 Süper İletken Manyetik Enerji Depolayıcıları (SMES).....	25
3.2.6 Metal Film ve Alüminyum Elektrolitik Kondansatörler.....	28
3.2.7 Süperkapasitörler .....	29
3.2.8 Volanlar .....	31
3.2.8.1 Volanların Fiziksel Prensibi .....	32
3.2.8.2 Volan Tipleri .....	34
3.2.8.3 Klasik ve Yeni Tip Volanların Karşılaştırılmaları .....	34
3.2.8.4 Volanların Genel Üstünlükleri ve Kullanım Yerleri .....	37
3.3 Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi.....	38
3.4 Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Uygulamaları İçin İncelenmesi .....	42
3.4.1 Raylı Sistemlerde Örnek Bir Volan Uygulaması .....	45
4. FRENLEME ENERJİSİ POTANSİYEL BELİRLEME ÇALIŞMASI.....	49
4.1 LRT Aracı Tahrik Sisteminin İncelenmesi .....	50

4.1.1	Tahrik Sistemi .....	50
4.1.2	İvmelenme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi.....	53
4.1.3	Frenleme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi .....	56
4.1.4	Kontrol ve Denetleme Sistemleri .....	58
4.1.4.1	Kontrol Prensipleri.....	58
4.1.4.2	İvmelendirme Kontrolü.....	59
4.1.4.3	Yavaşlatma İvme Kontrolü .....	60
4.1.4.4	Armatür Akım Kontrolü.....	61
4.1.4.5	Motor Gerilimi Kontrolü – Uyarma Alanı Kontrol.....	61
4.1.4.6	İvmelendirme ve Frenleme Durumunda .....	62
4.1.4.7	Uyarma Alan Akımının Kontrolü .....	63
4.2	Faydalı Frenleme Enerjisi Ölçüm Yöntemleri .....	63
5.	SONUÇLAR .....	67
KAYNAKLAR.....		69
EKLER.....		70
Ek 1 Özgül enerjinin enerji depolama sistemlerinin özgül güç değerlerine göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003) .....		71
Ek 2 Enerji yoğunluğunun enerji depolama teknolojilerinin güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003) .....		72
ÖZGEÇMİŞ.....		73

## SİMGE LİSTESİ

AW	Armatür sargıları
BD	Frenleme diyotları
BR	Frenleme direnci
CC	Şarj kontaktörü
Cc	Seviye kaydırıcı kondansatör
CF	Şarj ünitesi koruma sigortaları
CR	Şarj direnci
Cs	Bastırma kondansatörü
D	Diyot
Dc	Seviye kaydırıcı diyot
Ds	Bastırma diyotu
DU	Tetikleme ünitesi
ED	Topraklama ünitesi
FD	Serbest geçiş diyotu
FW	Uyarma sargıları
G	GTO
L	Bobin
LA	Yıldırıma karşı koruyucu
LC	Hat kapasitansı
LL	Hat endüktansı
MC	Motor modül kontaktörü
MCB	Ana devre kesicisi
MIS	Ana izolatör ayıcısı
OCH	Yüksek gerilim kıyıcısı
OPT	Yüksek gerilime karşı koruyucu tristör
P	Pantograf
PC	Motor kontaktörü
Rc	Seviye kaydırıcı direnç
TCH	Ana kıyıcı
TMI	Tahrik motor endüktansı

## **KISALTMA LİSTESİ**

ADC	Analog Digital Converter
CAES	Compressed Air Energy Storage
DMU	Dizel Multiple Unit
EDS	Enerji Depolama Sistemi
EMU	Electric Multiple Unit
FESS	Flywheel Energy Storage System
HTS	High Temperature Superconductivity
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
KGK	Kesintisiz Güç Kaynağı
LRT	Light Rail Transit
LRV	Light Rail Vehicle
SMES	Superconductive Magnet Energy Storage
TMF	Thin Metal Film
TNO	Netherlands Organization for Applied Scientific Research
VRLA	Valve Regulated Batteries

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Elektrikli raylı ulaşım aracına ait seyir periyodu (Caputo, 2000)..... 1
Şekil 1.2	Enerji depolama sistemi olmayan bir aracın şebekeden çektiği net güç, hızlanma gücü ve hız değişimleri (Caputo, 2000)..... 3
Şekil 1.3	Enerji depolama sistemi olan bir aracın şebekeden çektiği net güç, hızlanma gücü, hız değişimleri. Şekil 1.2 ile aynı moment ve hızlarda (Caputo, 2000)..... 4
Şekil 2.1	Genel kataner sistemi (ABB Consortioum, 1989). ..... 7
Şekil 2.2	Yardımcı güç sistemi (ABB Consortioum, 1989)..... 8
Şekil 2.3	Üç fazlı evirici köprü devresi. 180°'lik tetikleme açılı akım-gerilim diyagramları. .... 9
Şekil 2.4	Eviricinin bir fazına ait devresi. .... 10
Şekil 2.5	Yardımcı güç ünitesi açık devresi. .... 11
Şekil 2.6	Batarya şarj ünitesi. .... 12
Şekil 2.7	Bir yolcu treninde kullanılan enerjinin dağılımı (IZT, 2003)..... 13
Şekil 2.8	Değişik tip demiryolu sistemlerinde enerji tüketim dağılımı (IZT, 2003). .... 14
Şekil 2.9	DC raylı sistem araçların bir hızlanma – frenleme periyodunda sahip oldukları güç – moment – hız değişimleri. .... 16
Şekil 3.1	Enerji depolama sistemleri (Sels vd., 2001). .... 19
Şekil 3.2	Hidrolik güç depolaması blok şema. .... 19
Şekil 3.3	CAES sistemi elemanları..... 22
Şekil 3.4	Süperiletken manyetik alan enerji depolama sistemi basit blok diyagramı (Sels vd., 2001)..... 26
Şekil 3.5	Süperkapasitör..... 30
Şekil 3.6	Volan enerji depolama sistemi basitleştirilmiş şeması..... 31
Şekil 3.7	Modern yüksek hızlı volan (flyweel) sistemi (Bryan ve Andrews, 2004). .... 32
Şekil 3.8	Yüksek ve düşük hızlı Volan Enerji Depolama Sistemleri (FESS) (Furlong vd., 2003)..... 34
Şekil 3.9	Volanın evrim süreci. .... 35
Şekil 3.10	Geleneksel jeneratör/motor ile akuple edilmiş çelik volan uygulaması (Bryan ve Andrews, 2004). .... 36
Şekil 3.11	Değişken hız kontrollü tahrik ve evirici/çevirici elektronik devreler (Bryan ve Andrews, 2004)..... 36
Şekil 3.12	Bir tren aracında enerji depolama sistemi bağlantısı (Caputo, 2000). .... 42

Şekil 3.13	Farklı duruş frekansına sahip raylı ulaşım sistemlerinin enerji depolama kapasiteleri (Caputo, 2000).....	43
Şekil 3.14	Araçlarda ve araçlarla birlikte tesisler üzerinde elde edilen kazançlar (Caputo, 2000).....	43
Şekil 3.15	Bir tren hareketi sırasında enerji sarfiyatı ve depolaması (Caputo, 2000). .....	44
Şekil 3.16	Tren gruplarına ve EDS teknolojilerine göre EDS kütlesi/tren kütlesi karşılaştırması (Caputo, 2000).....	45
Şekil 3.17	İşletme modlarına göre (EDS çalışıyor/çalışmıyor) araç gerilimi değişimi (RWE Piller, 2002). .....	47
Şekil 3.18	Enerji depolama cihazları çalışıyorlarken akım, gerilim, d/d (rpm) değişimleri (RWE Piller, 2002). .....	47
Şekil 3.19	Depolanan enerji miktarı – zaman (RWE Piller, 2002). .....	48
Şekil 3.20	Toplam enerji miktarı, bir volana ait gerilim ve akım değerleri (RWE Piller, 2002).....	48
Şekil 4.1	Tahrik sistemi blok şeması. ....	50
Şekil 4.2	LRV aracı motor modülü ivmelendirme, frenleme devresi.....	53
Şekil 4.3	İvmelenme modunda kıyıcı eşdeğer devresi.....	54
Şekil 4.4	İvmeleme modunda akım yolu.....	55
Şekil 4.5	Serbest geçiş aralığında akım yolu.....	55
Şekil 4.6 (a)	C kontağı kapalıyken $I_A$ şarj akımı, (b) C kontağı açıkken $I_m$ faydalı frenleme akım. ....	56
Şekil 4.7	Frenlemede kıyıcı devresi (Akım sıfır olana kadar).....	57
Şekil 4.8	Kıyıcının frenlemede izlediği akım yolu.....	57
Şekil 4.9	GTO tıkamadayken akım yolu.....	58
Şekil 4.10	Tahrik sisteminin kontrol devresi. ....	58
Şekil 4.11	İvmelendirme kontrolü. ....	59
Şekil 4.12	Yavaşlama ivmesi kontrolü. ....	60
Şekil 4.13	Armatür akım kontrolü. ....	61
Şekil 4.14	Uyarma alanı güç ve frenleme modu kontrolü .....	62
Şekil 4.15	Uyarma alanı akım kontrolü .....	63
Şekil 4.16	LRV aracı tahrik sistemi güç devresi. ....	63
Şekil 4.17	Frenleme durumunda eşdeğer devre. ....	64
Şekil 5.1	Farklı demiryolu sistemleri arasında enerji depolama sistem yatırım geri dönüş karşılaştırması (Caputo, 2000).....	67

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Demiryolu araçlarının güç karakteristiklerinin karşılaştırılması (Caputo, 2000) .....	2
Çizelge 2.1 DC raylı ulaşım sistemlerinde enerji depolama sistemleri kullanımı ile elde edilebilecek ilave faydalı frenleme enerji kazanımı (IZT, 2003).....	15
Çizelge 3.1 Geleneksel volanların olumlu ve olumsuz yanları.....	37
Çizelge 3.2 Büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin anahtar özelliklerinin karşılaştırılması (Cheung vd., 2003) .....	39
Çizelge 3.3 Hannover LRV sistemi çalışmasında kullanılan volanların teknik özellikleri .	46
Çizelge 4.1 İstanbul LRV sistemi teknik verileri .....	49

## ÖZET

Elektrikli raylı ulaşım araçlarında frenleme sırasında frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülerek harcanan kinetik enerji, tasarlanacak uygun enerji depolama sistemleri ile elektriğe geri dönüştürülebilecek ve bu sayede sistemin enerji etkinliği önemli ölçüde artırılabilir.

Bu amaçla hazırlanmış bulunan tez kapsamında enerji depolama sistemlerinin raylı ulaşım tesislerine uygulanabilirliği incelenmektedir. Beş bölüm olarak düzenlenen çalışmada ilk bölüm konuya genel bir giriş niteliği taşımaktadır.

İkinci bölümde kent içi raylı ulaşım sistemleri DC LRT sistemi çerçevesinde anlatılmış, ayrıca enerji depolama sistemleri ile raylı ulaşım sistemlerini buluşturan temel husus olan faydalı frenleme enerjisi açıklanmıştır.

Üçüncü bölüm, çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan modern enerji depolama sistemlerine ayrılmıştır. Bu bölümde mevcut enerji depolama sistemleri açıklanmıştır. Yine bölümde günümüze kadar yapılmış demiryolu enerji depolama sistem uygulamalarının sonuçları değerlendirilmeye çalışılmış ve konuyu pekiştiren örnek bir çalışma ile bölüm sonlandırılmıştır.

Dördüncü bölüm ise önceki bölümlerde incelenen hususların paralelinde İstanbul kent içi ulaşımının önemli bir parçası olan LRT sistemi araçlarının faydalı enerji geri kazanım potansiyellerinin incelenmesidir. Bu amaçla, ilk olarak LRT araçları tahrik yapısı incelenmiştir.

Sonuç bölümünde ise çalışmada elde edilen sonuçlar ifade edilmiştir. Buna göre elektrikli hafif raylı sistemlere uygulanacak enerji depolama sistemlerinin işletme maliyetlerini önemli oranda azaltabilmesi yanında yatırım maliyetlerinde de önemli tasarruflar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Enerji depolama, Basınçlı hava enerji depolama, Elektrikli raylı ulaşım, Faydalı frenleme, Volan, Süperkapasite, Batarya, Süperiletken bobin.

## **ABSTRACT**

Kinetic energy generated by electrical transportation vehicles during braking period can be regenerated and stored in a suitable electrical energy storage unit. By this way, the energy efficiency of the vehicle will be increased dramatically.

The main subject of the thesis which includes energy efficiency and railway transportation systems is to explain the applicability of energy storage systems to the railway transportation.

The thesis has been prepared as five chapters which its first is an introduction to the topic.

In the second chapter, both DC LRT system and regenerative braking energy are inspected.

Today's modern energy storage systems which are significant part of the thesis are explained in the third chapter. The current storage systems are described in detail while regenerative braking energy storage is examined as well. An example related to the subject is given from Germany.

Chapter four is a kind of evaluation of the previous sections. The goal of the chapter is to define the amount of energy that is generated by regenerative braking in vehicles running in Istanbul's LRT system.

The last chapter covers the conclusions produced by the study. As a result, an appropriate energy storage system is able to reduce dramatically both cost of operation and investment of electrical transportation systems.

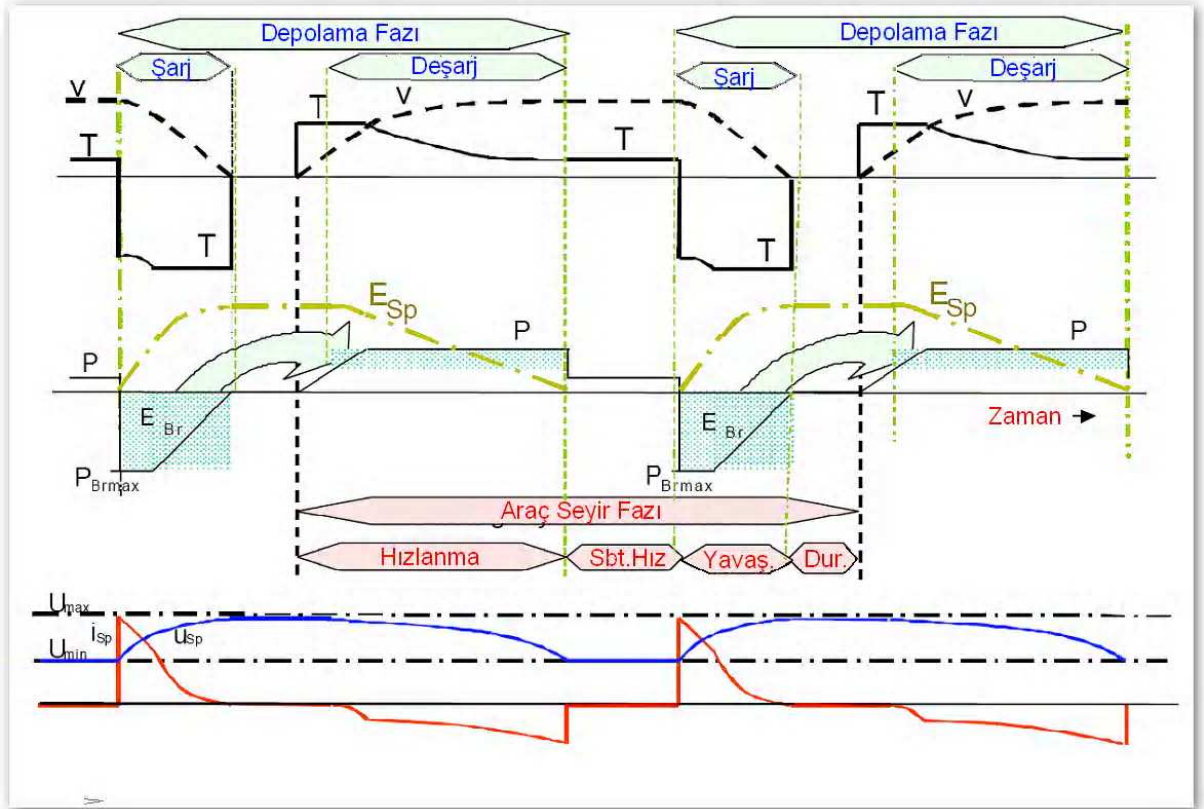
**Keywords:** Energy storage, CAES, Railway transportation, Regenerative braking, Flywheel, Super capacitor, Batteries, SMES.

## 1. GİRİŞ

Elektrikli raylı ulaşım araçlarında frenleme esnasında frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülerek harcanan kinetik enerji, enerji etkinliğini ifade eden km/kWh değerini artıracak önemli bir potansiyele sahiptir.

Bataryalar, volanlar veya süperkapasitörler gibi enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler özellikle demiryolu araç imalat endüstrisinde yakından takip edilmektedir. Enerji depolama sistemlerinden beklentiler sadece enerji tüketimini azaltıcı etkilerle sınırlı kalmamaktadır. Tüketimle ilişkili pik yükü azaltıcı, cer güç kararlılığını ve seyir performansını artırma konularında çalışmalar yapılmaktadır.

Enerji depolama sistemleri, frenleme esnasında aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi depolayıp hızlanma esnasında geri verebilmektedirler.



Şekil 1.1 Elektrikli raylı ulaşım aracına ait seyir periyodu (Caputo, 2000).

Şekilde, bir elektrikli raylı ulaşım aracına ait bir seyir periyodu ve iki depolama periyodu gösterilmektedir. Yeşil alanlar şarj ve deşarj fazlarını göstermektedir. Depolanan frenleme enerjisi, takip eden ivmelenme fazında kullanılmaktadır.

Araçlar üzerine monte edilen enerji depolama cihazları enerji şebeke karakteristiğini yükseltmek için kullanılır. Faydalı frenleme ile geri kazanılan enerjinin şebekeye geri verilmesi ekonomik değildir. Uygulamada depolama teknolojisi yatırımlarının muhtemel ekonomik sonuçlarının dikkate alınması gereklidir.

Öncelikle önemli miktarda enerjinin depolanabileceği büyüklükte bir depolama cihazı kullanımının, araçta önemli ağırlık artışına neden olacağı muhakkaktır. Bu nedenle mümkün farklı depolama teknolojileri hacim-ağırlık-fiyat-teknoloji kapsamında doğru olarak analiz edilmeli, karşılaştırılmalıdır.

Sonra, uygulamanın yapılacağı demiryolu araçlarının teknik karakteristiklerinin bilinmesi gereklidir. Uygulamanın doğru yapılabilmesi için bu çok önemlidir. Uzun menzil demiryolu araçları ile kentlerde kullanılan raylı toplu ulaşım araçlarının teknik karakteristikleri birbirlerinden farklılıklar gösterir. Buna bağlı olarak depolama cihaz seçiminde etkin olan teknik faktörler de büyük farklar arz eder. Bunlar, depolanan kinetik enerjiyi etkileyen kütle, maksimum hız, ivmelenme ve frenleme gücü, frenleme zamanı gibi parametrelerdir. Ağır demiryolu lokomotiflerinde frenleme süresi bir dakikayı bulurken şehir içi raylı ulaşım hafif metro sistemi araçlarında (LRV) bu değer on saniye mertebesindedir (Caputo, 2000).

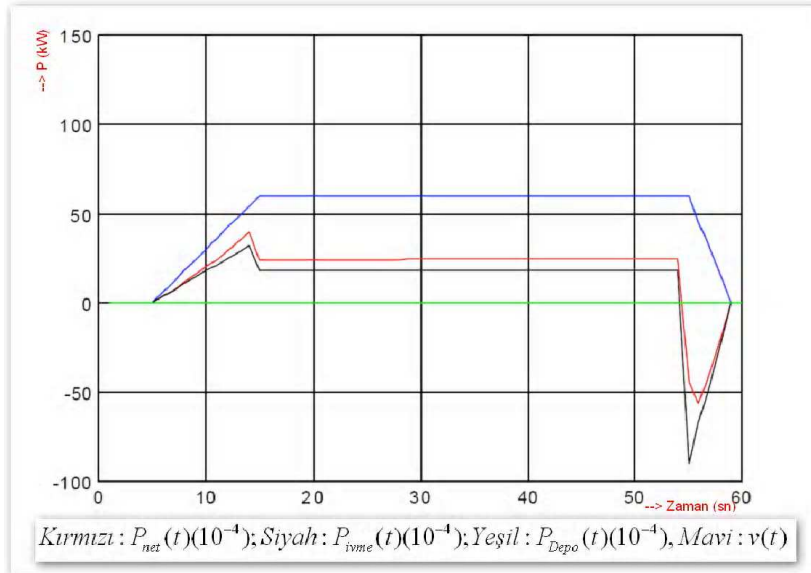
Çizelge 1.1 Demiryolu araçlarının güç karakteristiklerinin karşılaştırılması (Caputo, 2000)

	Şehirler Arası Katarlar (EMU)	Banliyö EMU (DC)	Dizel Katarlar (DMU)	Kent İçi Trenler (LRV)
Tren kütlesi (brüt)	250 T	160 T	116 T	39 T
Maksimum hız	160 km/h	100 km/h	120 km/h	70 km/h
İvmelenme gücü	4000 kW	1200 kW	875 kW	300 kW
Maksimum çekiş kuvveti	250 kN	18 kN	122 kN	60 kN
Frenleme gücü	4800 kW	3000 kW	875 kW	900 kW
Maksimum frenleme kuvveti	270 kN	200 kN	56 kN	100 kN
Depolanan kinetik enerji	70 kWh	16 kWh	18 kWh	2 kWh
Frenleme zamanı	50 s	15 s	70 s	9 s
Yılda ivmelenme sayısı	40000	100000	50000	300000
İşletme hayatı boyunca toplam ivmelenme sayısı ( $10^6$ )	0,8	2	1	6

Çizelge 1.1'den, enerji depolama teknolojilerine yapılacak yatırımların en ekonomik olacağı raylı ulaşım sisteminin, yüksek durma frekansına sahip, düşük hızlı ve kısa mesafeli çalışan sistemler olduğu kolaylıkla görülmektedir. Yani özellikle kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji depolama cihazları kullanımının enerji maliyetlerini azaltabilecek önemli bir faktör olduğu söylenebilir.

Enerji harcamadan mal ve insanları bir yerden bir yere taşımak mümkün değildir. Demiryolu taşımacılığında enerji, hızlanma, rampaları tırmanabilmek için, rüzgâr direnci, tekerlekler ve raylar arasında, dişlilerde, rulmanlarda vs. oluşan sürtünme kuvvetlerini yenmek için, yolcu konfor sistemleri gibi yardımcı sistemleri çalıştırabilmek için, araç ve sabit sistemlerde oluşan elektrik kayıplarını karşılamak için kullanılır. Öte yandan önemli miktarda enerjinin geri kazanılması da mümkündür. Araç kütlelerinde kinetik enerji olarak depolanan hızlanma enerjisinin önemli bir miktarı aracın frenleme periyotlarında geri kazanılabilir. Bugünün modern elektrikli araçlarında frenleme enerjisi geri kazanımı mükemmel olmasa da hafif raylı sistemlerde ve metrolarda geri kazanılabilecek frenleme enerji miktarını belirlemeye çalışmak incelemeye değer önemli bir konudur.

Raylı ulaşım sistem araçları için tam bir seyir periyodu dört fazdan oluşmaktadır. Bunlar, hızlanma, sabit hızla seyir, frenleme ve durma olarak isimlendirilebilir.



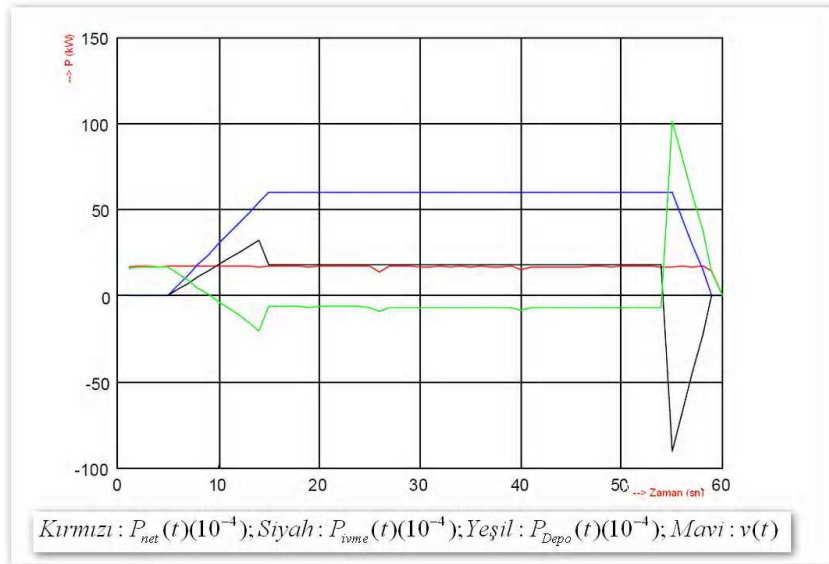
Şekil 1.2 Enerji depolama sistemi olmayan bir aracın şebekeden çektiği net güç, hızlanma gücü ve hız değişimleri (Caputo, 2000).

Hızlanma için gerekli enerji besleme hattından alınmak zorundadır. Bu enerjinin bir kısmı aracın kütlelerinde kinetik enerji olarak saklanacaktır.

Sabit hızla seyir fazında, besleme hattından çekilecek enerji azalır. Araç sadece sürtünme kuvvetlerini yenmek ve araç yardımcı sistem ihtiyaçlarını karşılamak için enerji çeker. Bu faz uzun mesafe çalışan demiryolu trenlerinde uzun, kent içi raylı ulaşım araçlarında ise oldukça kısadır.

Frenleme fazında, aracı yavaşlatmak için farklı yöntemler uygulamak mümkündür. Elektrikli araçlarda, eğer şartlar uygunsa aracın kütlesinde saklı kinetik enerji besleme hattına geri verilebilir. Fakat enerjiyi bu şekilde geri kazanım, yüksek frenleme gücü nedeniyle büyük kayıplarla mümkün olur. Enerjinin kazanımı önemsenmezse aracı durdurmak için kinetik enerjisini mekanik frenlerde tüketmek de mümkündür. Her halükarda uygulanacak bu yöntemlerle aracın sahip olduğu kinetik enerjinin büyük bir kısmı boşa gitmiş olur.

Özellikle sık aralıklarla durup kalkmak zorunda olan araçlarda frenleme esnasında araçların sahip oldukları kinetik enerjinin depolanması ve hızlanmaya geçildiğinde de kullanılması büyük faydalar sağlar. Enerji depolama sistemlerinin araç üzerinde olması enerji kayıplarını azaltacağından tercih edilmelidir. Şekil 1.3’de enerji depolama sistemine sahip olan bir aracın çektiği net gücü, hızlanma gücünü, depolama gücünü ve hızını göstermektedir.



Şekil 1.3 Enerji depolama sistemi olan bir aracın şebekeden çektiği net güç, hızlanma gücü, hız değişimleri. Şekil 1.2 ile aynı moment ve hızlarda (Caputo, 2000).

Enerji depolama sistemlerinin temel çalışma prensiplerini anlamak çok basit olmasına rağmen, uygulama şartlarında depolama cihazlarının optimum olarak nasıl işletilecekleri bilgisi net değildir. Kontrol algoritması yukarıda bahsedilen amaçları, maksimum enerji depolama kapasitesi ve maksimum pik güç gibi depolama cihazının kendi kısıtlarını da dikkate almak zorundadır (Caputo, 2000).

## 2. ELEKTRİKLİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ

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. Bu sorunun çözümünde tüm dünya tarafından kabul gören yaklaşım kentsel raylı sistemlerin yaygın bir şekilde kullanılmasıdır. Kentsel raylı ulaşım sistemleri ülkemizde metro, hafif metro, tramvay ve cadde tramvay sistemleri olmak üzere kendini göstermektedir. Bu sistemler dünyada 600, 650, 750, 1000 ve 1500 V ülkemizde ise 750 V ve 1500 VDC gerilim ile işletilmektedir. Enerji besleme şekli olarak 3. ray ve kataner hattı kullanılmaktadır (Garip ve Tuna, 2005).

Gelişmiş ülkelere bakıldığında raylı ulaşım sistemlerinin toplu taşımacılıkta ana unsur olduğu, diğer taşıma sistemlerinin ise hizmeti tamamlayıcı yardımcı unsurlar olduğu görülmektedir. Batılı ülkelerde 20. yüzyılın başında gündeme gelen metro projeleri, ülkemizde ne yazık ki ilk kez yüzyılın sonunda Ankara'da yaşama geçirilebilmiştir. Fakat o tarihten beri gittikçe artan bir hızla elektrikli ulaşım sistemleri büyük şehirlerimizde kentsel ulaşım sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmektedir. Ülkemizde İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Konya ve Eskişehir gibi kentlerimizde bu tür sistemler kullanılmakta, Adana, Kayseri, Antalya, Samsun, Rize, Gaziantep, Malatya gibi şehirlerimizde ise çalışmalar çeşitli aşamalarda devam etmektedir. Halen raylı sistemlere sahip illerimizde ise bu hatları uzatma ve/veya yeni hatlar yaparak tüm sistemi birbirine ekleme şeklinde çalışmalar devam etmektedir (Garip ve Tuna, 2005).

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.

Bu çalışma raylı ulaşım sistemlerinde enerji tasarrufuna yönelik yapılabilecek çalışmalar çerçevesinde frenleme enerjisinin yeniden kullanımı için depolanabilmesi imkânını inceleyecektir ve İstanbul hafif raylı ulaşım sisteminde (LRT) gerçekleştirilmesi olası böyle bir uygulamayı değerlendirecektir.

## 2.1 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:

- Cer Sistemleri
- Yardımcı Güç Sistemleri
- Tahrik Sistemi
- 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 ve yardımcı güç sistemleri bu bölümde verilmiş, tahrik, kontrol ve denetleme sistemleri 4. bölümde LRT sistemi incelemesi kapsamında açıklanmıştır.

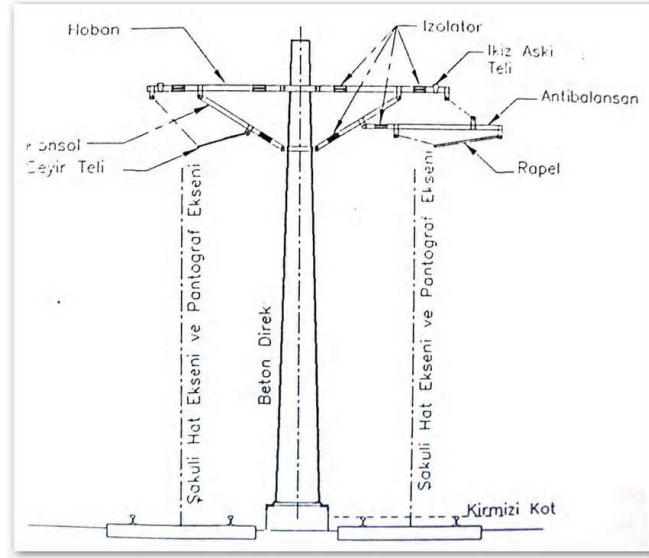
### 2.1.1 Cer Sistemleri

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 ekseninde hassas bir şekilde yatay olarak tutulan taşıyıcı bir kablo sisteminden oluşur. Bu sistem Şekil 2.1'de gösterilmektedir. 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 mekanik 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<sup>2</sup>'ye 4A akım yoğunluğuna ve 3 dakika süreyle de mm<sup>2</sup>'ye 6A akım yoğunluğuna dayanabilmektedir (ABB Consortioun, 1989).

---

\* Açıklamalara İstanbul Ulaşım A.Ş. 750 VDC LRT sistemi temel alınmıştır.



Şekil 2.1 Genel kataner sistemi (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 trafo 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 işletme akımları trafo istasyonlarının pozitif kutbundan 3. ray ve akım kolektörleri üzerinden sağlanmaktadır. Geri dönüş akımı raylar üzerinden alınmakta izole edilmiş iletkenlerle doğrultucu trafo merkezinin negatif kutbuna iletilmektedir (ABB Traction, 1989).

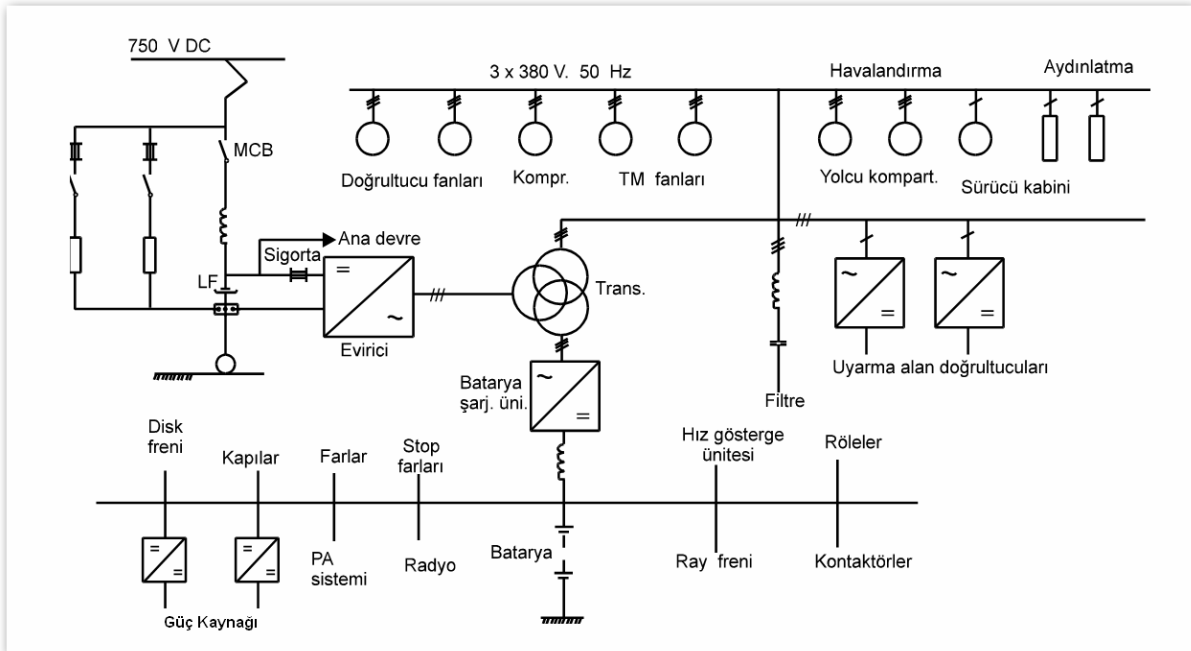
3. ray cer sistemleri maliyet ve avantaj bakımından kataner hattı sistemlerine göre daha avantajlı olmalarına rağmen arıza durumlarında sistem ve yolcu güvenliği açısından kataner sistemleri daha avantajlıdır.

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan cer sistemi katanerdir. Sadece Ankara'daki metro

sistemleri ve İstanbul metrosu 3. ray ile enerjilendirilmektedir.

## 2.1.2 Yardımcı Güç Sistemleri

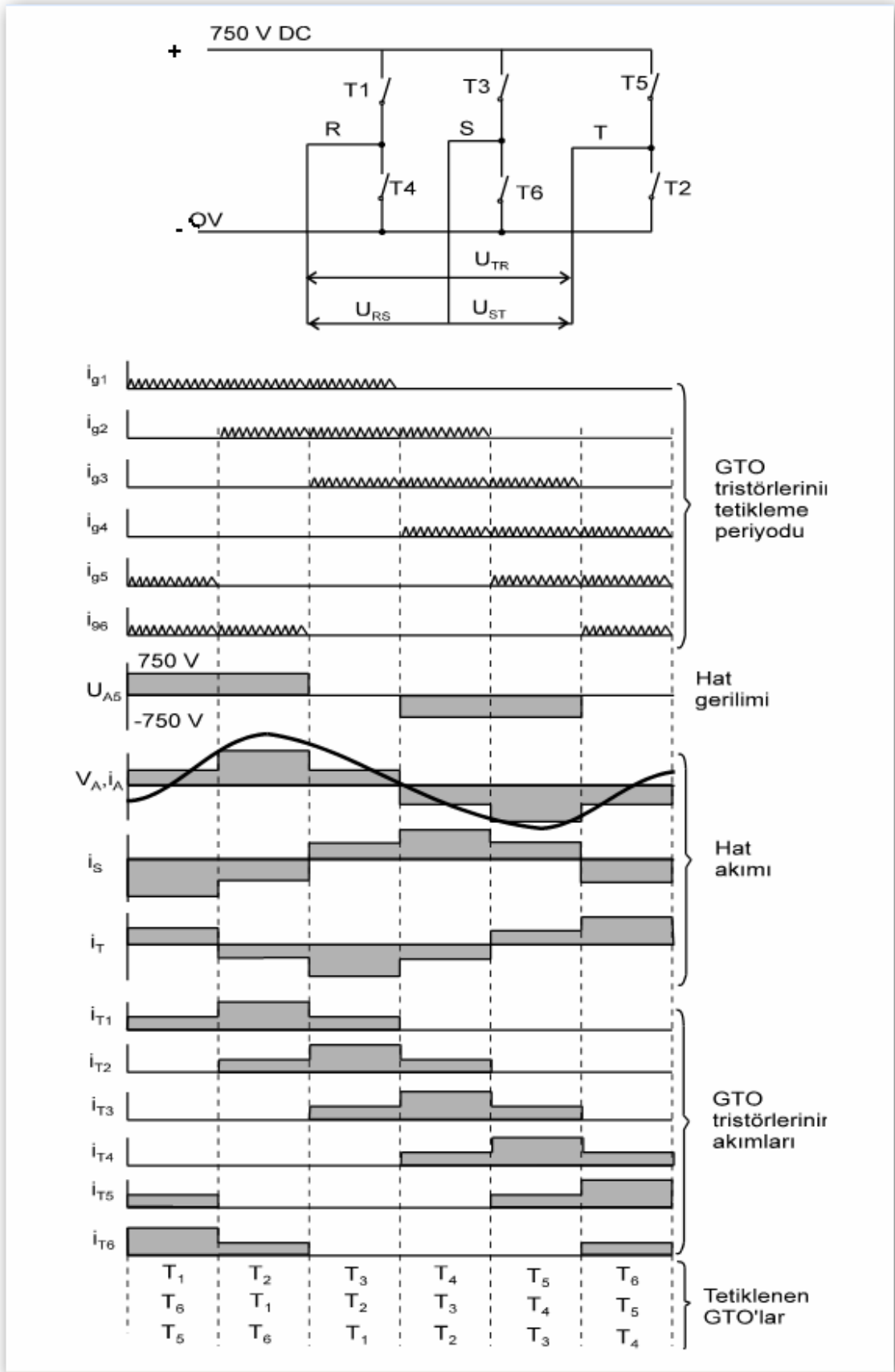
Raylı ulaşım tesislerinde araçlara hareket verdiren sistemler haricinde elektrikli birçok ünite vardır. Bunlar yardımcı güç sistemi yüklerini oluşturur. Yardımcı güç sisteminin amacı, araçtaki yolcu konforu için kullanılan ısıtma/soğutma, aydınlatma, sürücü kabin sistemlerine ve 24 VDC gerilim devresine 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 2.2'de yardımcı güç sistem devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yardımcı güç sistemi (ABB Consortioum, 1989).

### 2.1.2.1 Evirici Ünitesi

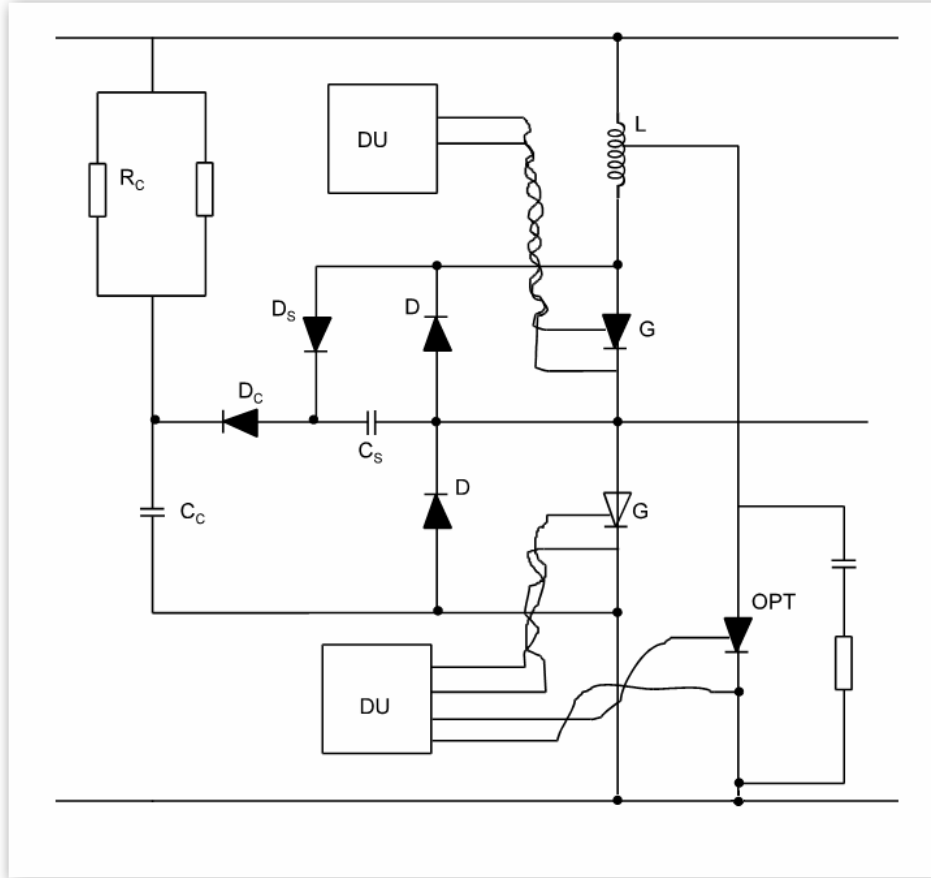
Şekil 2.3'de eviricinin tetikleme devresi ve gerilim akım şemaları gösterilmiştir. Evirici devresi 6 adet GTO tristörden meydana gelmiş 3 fazlı köprü devresidir (Lander, 1981). GTO tristör devresi darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilmektedir.



Şekil 2.3 Üç fazlı evirici köprü devresi.  $180^\circ$ 'lik tetikleme açılı akım-gerilim diyagramları.

Değişim frekansı 450 Hz'dir. Darbelerin modülasyonu sırasında 50 Hz'lik frekans elde edilir. Giriş DC gerilimi 500 V ile 900 V arasında değişir. Buna rağmen üç fazlı çıkış gerilimi küçük değişimler gösterir. Eviricinin çıkışı 3x380 V'luk AC gerilime dönüştürülür.

AC çıkış gerilimi sabit genlikli bir sinüs dalgasıdır. Sırasıyla üretilen gerilim ve istenmeyen harmonikler çıkışta filtre edilir. Bu filtreleme transformatörün sekonder sargısında yapılır.



Şekil 2.4 Eviricinin bir fazına ait devresi.

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi eviricinin her fazında iki GTO tristörü vardır ve diyotlar bunlara paralel bağlanmıştır. Bu diyotlar gücü hatta geri vermek için kullanılır. GTO'ları geçici gerilim yükselmelerinden korumak için bastırma devresi (kapasitör, diyot,  $C_s$ ,  $D_c$ ) bağlanmıştır ve aynı zamanda bastırma devresi gerilim seviye belirleyici olarak da kullanılır (Bassett ve Chamund, 1989).

Devrede oluşacak fazla gerilim seviye kaydırıcı  $C_c$  kondansatörüne aktarılır.  $R_c$  direnci bu gerilimi kaynağa geri gönderir. GTO'lardaki akım yükselme hızını sınırlandırmak için  $L$  bobini kullanılır. Böylece açma - kapama kayıpları kabul edilebilir değerlerde sınırlandırılmış olur.

Herhangi bir fazdaki hatalı bir değişme veya aşırı akım durumunda yüksek gerilim koruma tristörü (OPT) tetiklenir. OPT tetiklendiğinde yardımcı güç hattındaki sigorta atar ve GTO'lar korunmuş olur. GTO'ların ve koruma tristörlerinin açıp kapaması bilgisayarla kontrol edilir ve iki sürücü devresi de DU tarafından tetiklenir. Semboller aşağıda verilmiştir:

$R_c$  : Seviye kaydırıcı direnç

$D_s$  : Bastırma diyotu

$C_c$  : Seviye kaydırıcı kondansatör

$C_s$  : Bastırma kondansatörü

$D_c$  : Seviye kaydırıcı diyot

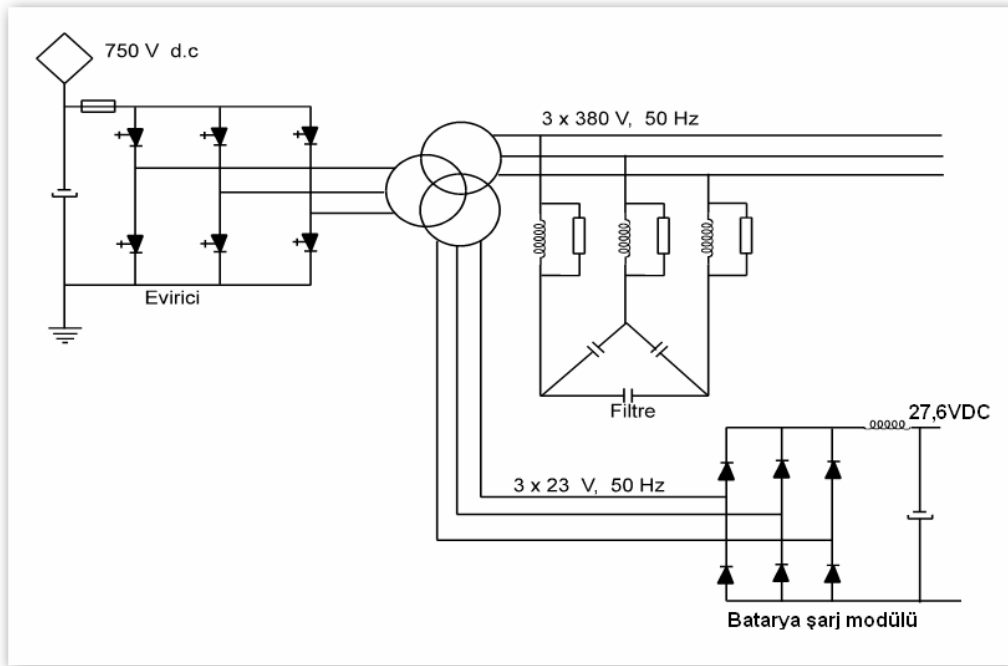
G : GTO

D : Diyot

DU: Tetikleme ünitesi

OPT: Yüksek gerilime karşı koruyucu tristör L : Bobin

### 2.1.2.2 Üç Fazlı Transformator Ünitesi ve Filtre Devresi

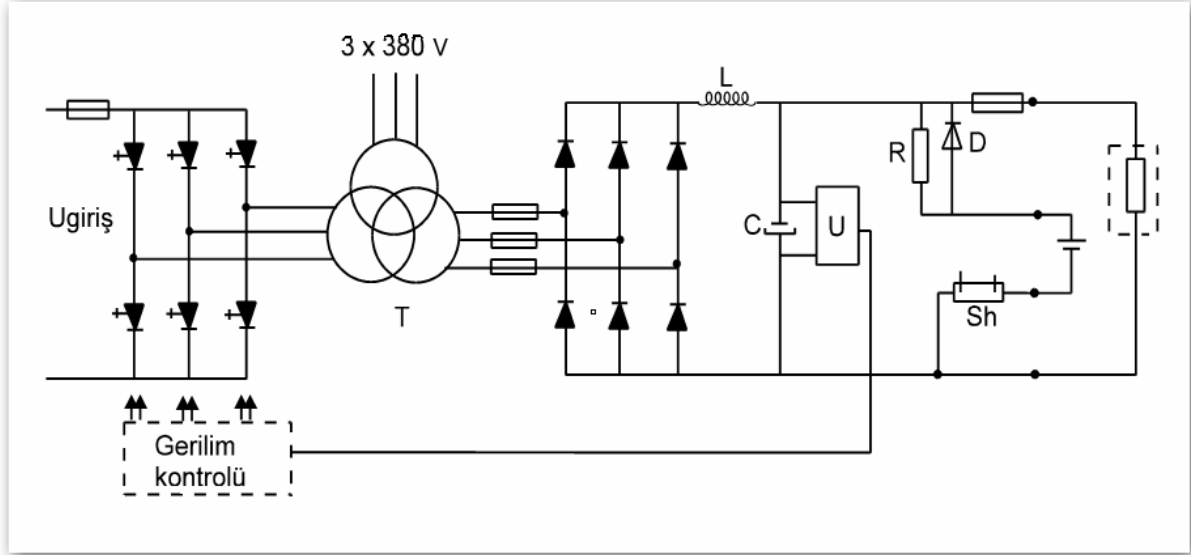


Şekil 2.5 Yardımcı güç ünitesi açık devresi.

Statik eviriciden alınan çıkış gerilimi 3x380 VAC, 50 Hz'dir. Bu üç fazlı AC gerilim yüke doğrudan uygulanmaz. Önce üç fazlı transformatorle dönüştürülür. Transformatorün iki sekonder sargısı vardır. Bunlardan biri çıkış gerilimi 3x380 V, diğerinin gerilimi 3x23 V'dur. 3x380 V'luk çıkış terminalinde bir tane çift kombineli filtre vardır. Birinci filtre eviriciden gelen yüksek frekanslı harmonikleri filtre etmek için kullanılır. İkincisi reaktif güç üretmek için kullanılır (ABB Traction, 1989).

### 2.1.2.3 Batarya Şarj Ünitesi

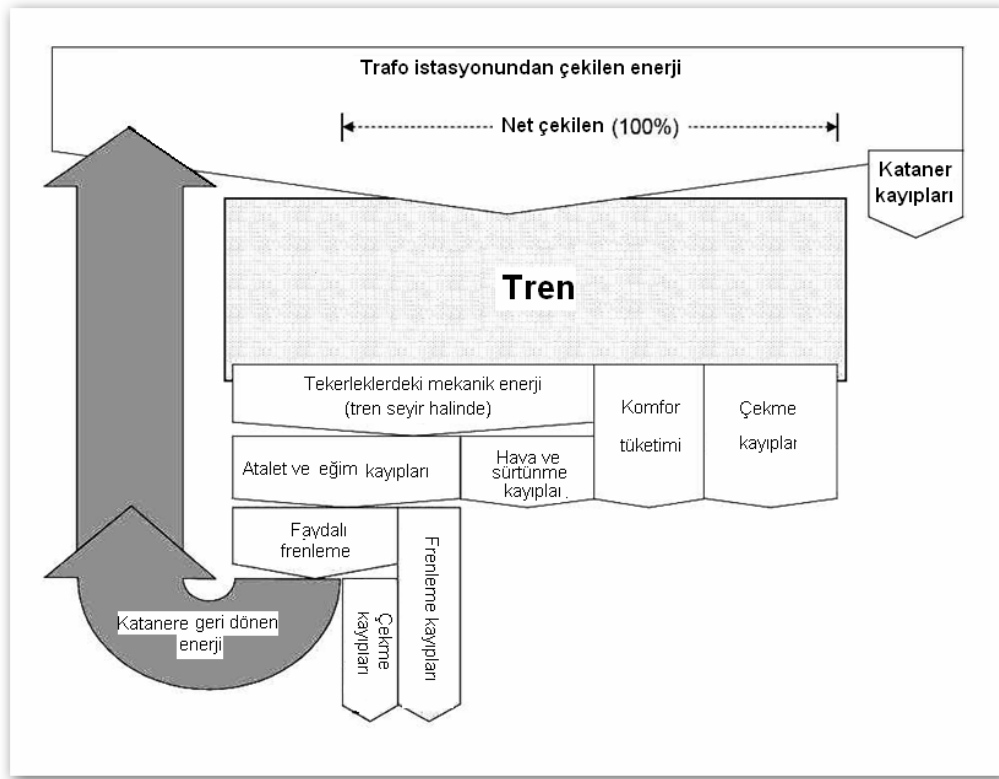
24 V'luk batarya şarj ünitesi transformatörün sekonder sargısından sağlanan 3x23 V'luk AC gerilimle bir batarya şarj ünitesi olan 6 diyottan oluşmuş doğrultucu köprüsüyle doğrultulur. Köprü'nün çıkışı 24 V'luk yükleri doğrudan besler. Batarya, doğrultucu köprü ile akım sınırlayıcı dirençten geçerek bağlanmıştır. Ünitenin kontrol sistemi doğrultucunun çıkış gerilimini 27,6 V'ta sabit kılacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.6) (ABB Traction, 1989).



Şekil 2.6 Batarya şarj ünitesi.

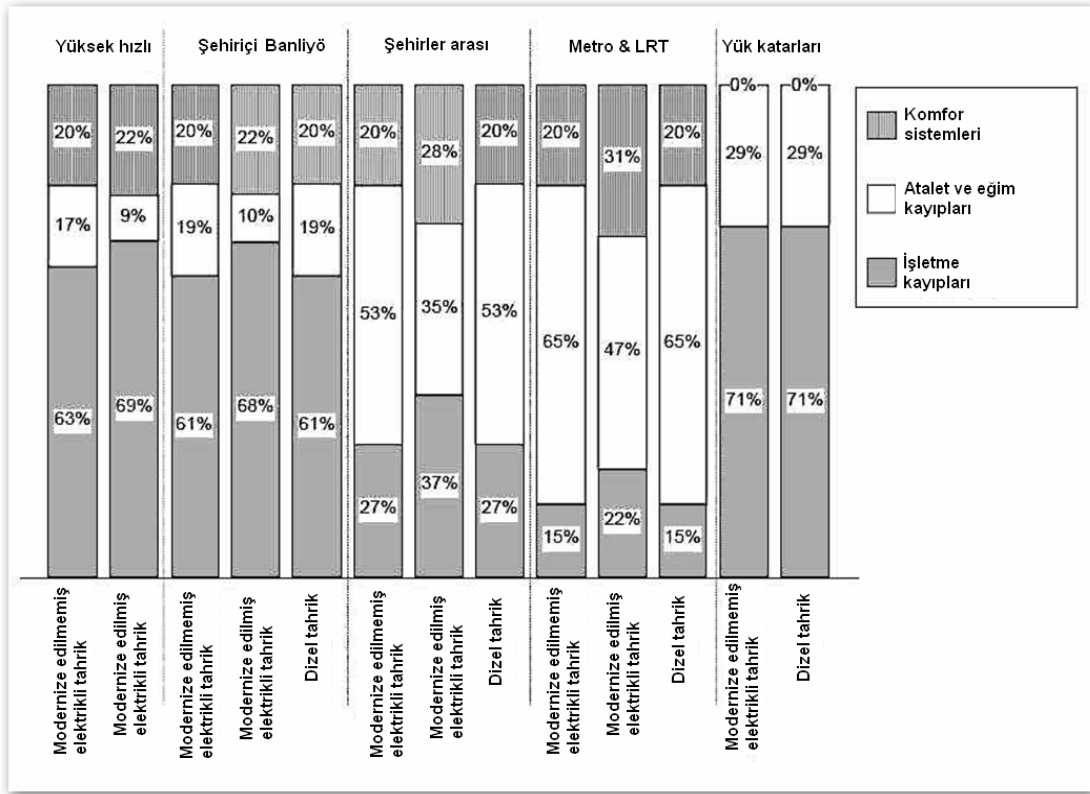
## 2.2 Faydalı Frenleme ve Enerji Geri Kazanımı

Bir trenin hızlanabilmesi veya rampa çıkabilmesi için enerji kullanması gerekir. Araç şebekeden alacağı enerjini kütlesinde kinetik ve potansiyel enerji olarak depolar. Elektrik motoru ile tahrik edilen araçlarda bu enerjinin büyük bir miktarı aracın frenlemesi anında motorun jeneratör olarak çalıştırılması ile tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Elektrik enerjisi, enerji dönüşüm çevrimi ters yönde çalıştırılarak geri kazanılabilir. Bu yöntem faydalı frenleme olarak bilinmekte ve demiryollarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.



Şekil 2.7 Bir yolcu treninde kullanılan enerjinin dağılımı (IZT, 2003).

Bununla birlikte, dinamik frenleme kullanımı elektriğe geri dönüştürülen enerjinin tasarruf edildiği anlamına da gelmez. Dizel – elektrik trenlerde yaygın bir şekilde kullanılan dinamik frenlemenin amacı mekanik frenlerin ömrünü uzatmak, bakım maliyetlerini düşürmektir (IZT, 2003). Bu yolla geri kazanılan elektrik enerjisi ise frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülmektedir.



Şekil 2.8 Değişik tip demiryolu sistemlerinde enerji tüketim dağılımı (IZT, 2003).

Şekil 2.8'den faydalı frenleme ile enerji kazanımının durma frekansı yüksek olan kısa mesafeli raylı sistemlerde çok daha etkin olduğu görülmektedir. Öte yandan, faydalı frenleme yüksek hızlı tren işletmeciliğinde de enerji verimliliğini artırıcı önemli bir potansiyele sahiptir. Birçok ülkede faydalı frenleme tekniği kullanılmakla birlikte, geri kazanılan enerji oranı kullanılabilir kısma göre oldukça küçük gerçekleşmektedir. Bunun bir kaç nedeni vardır:

- Enerjinin geri kazanım verimi: Frenleme anında sahip olunan enerjinin tamamı dönüşüm kayıpları nedeniyle kazanılamaz. Faydalı frenleme enerji kazanım verimi ivmelenme veriminin yaklaşık %90'ı kadardır (IZT, 2003).
- Kataner hattının enerji soğurma kabiliyeti: Enerji geri kazanımı ancak hattın aynı bölümü üzerinde hatta verilen enerjiyi kullanabilecek başka bir trenin var olması durumunda gerçekleşebilir. Bu durumun olasılığı trafik yoğunluğuna ve muhtemel iletim mesafesine bağlıdır.
- Frenleme gücü: Çoğu zaman aracı durdurabilmek için sadece dinamik frenlemeyi kullanmak yeterli olmaz. Özellikle yük katarlarında treni tamamen durdurmak için

mekanik frenler de kullanılır.

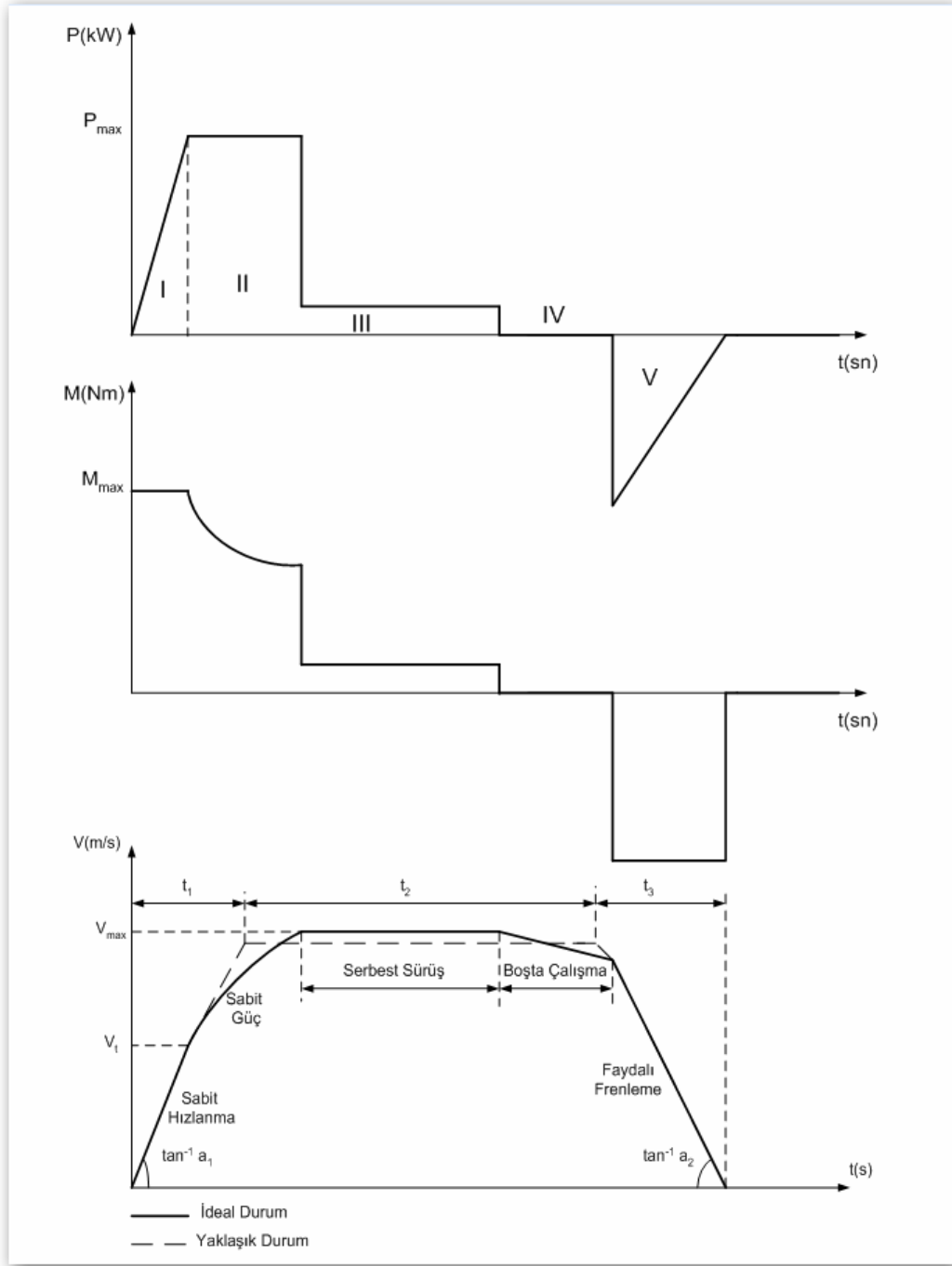
Çizelge 2.1 DC raylı ulaşım sistemlerinde enerji depolama sistemleri kullanımı ile elde edilebilecek ilave faydalı frenleme enerji kazanımı (IZT, 2003).

	Teorik Olarak Geri Kazanılabilir Frenleme Enerjisi Miktarı	İvmelene Kuvveti Düzeltme Çarpanı	Karışık Frenleme (Meka./Elekt.) Düzeltme Çarpanı	Yeni Enerji Depolama Sistemleri Kullanılması Durumunda Potansiyel Kazanım	Frenleme Enerjisinin Aktarılamaması Durumunda Düzeltme Çarpanı	Yeni Depolama Teknolojileri Kullanılmadığı Durumda Potansiyel Kazanım
Ana hatlar	15%	0,9	0,8	11%	0,2	2%
Şehirler arası hatlar	35%	0,9	0,8	25%	0,4	10%
Şehir içi hatlar	45%	0,9	0,8	30%	0,5	16%
Yük katları hatları	20%	0,9	0,5	14%	0,2	3%

Çizelge 2.1, farklı tip DC demiryolu ulaşım sistemlerinin ilave enerji depolama sistemleri ile donatılmaları durumunda, geri kazanılabilir frenleme enerji oranlarının en çok kısa mesafeli ve sık duruş yapan metro gibi kent içi ulaşım sistemlerinde artırılabilirliğini göstermektedir. Kent içi raylı ulaşım sistemlerinde teorik olarak hesaplanan potansiyel frenleme enerji miktarı aracın tükettiği toplam enerjinin yaklaşık %45'i kadardır. Kayıplardan sonra bu değer enerji depolama sistemleri kullanılması durumunda %30 olarak hesaplanmaktadır (Steiner ve Scholten, 2004). Fakat uygulamada faydalı frenleme ile elde edilen enerji hatta geri verilmektedir. Bu şekilde kazanılan enerji ise toplam potansiyelin %16'sı kadar hesaplanmaktadır.

Trenlerde, frenleme esnasında karşı yönde aynı besleme noktasından enerjisini sağlayan başka bir araç ivmelenme durumundaysa dinamik frenleme esnasında üretilen ve hatta verilen enerji gerçekten geri kazanılmış olur. Bu enerji karşı yöndeki araç tarafından kullanılabilir. Bu yüzden raylı sistem işletmecileri, araçlarda herhangi bir depolama sistemi için yatırım yapmadan önce, trafik ve işletmeyi düzenleyerek azami verimli koşulları sağlayabilecek tedbirleri almaya çalışırlar.

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



Şekil 2.9 DC raylı sistem araçların bir hızlanma – frenleme periyodunda sahip oldukları güç – moment – hız değişimleri.

Şekil 2.9 DC raylı ulaşım sistemlerinde araçların iki istasyon arasında hareketi neticesinde elde edilen tahrik yapısını göstermektedir. Araçlar I ile gösterilen bölgede sabit moment ile hızlanmakta, II bölgesinde ise eşik hızı denilen yaklaşık 37–40 km/s aşmak için alan zayıflama bölgesinde hızlanmaya devam etmektedir. III bölgesinde ise sabit hızla yol almakta, IV bölgesinde serbest sürüş haline geçmekte, son olarak V ile fren yapmakta ve istasyonda durmaktadır (Garg, 1997).

### 3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde enerji depolama sistemleri geniş kapsamlı olarak ele alınacak, mevcut teknolojiler ilgili başlıklarda incelenecektir. Açıklanan enerji depolama tekniklerinin teknik ve ekonomik açılarından birbiriyle kıyaslaması yapılacak, bazı uygulama örnekleri ile bölüm sonlandırılacaktır.

#### 3.1 Enerji Depolamanın Nedenleri

Elektrik tesislerinde enerji depolama sistemleri denilince enerjiyi istenilen niteliklerde depolayan, bu niteliklerin bazılarının kaybolması veya kesintiye uğraması halinde ise, kullanıcıya istenilen niteliklerde enerji sağlanmaya devam edilmesinde yardımcı olan sistemler akla gelmektedir. Enerjide istenilen başlıca nitelikler, sürekli, ucuz ve kaliteli olmasıdır.

Süreklilikten kasıt, istenildiği anda hizmet vermeye hazır olması, kesintiye uğrayıp, üretimde ve hizmetlerde çok daha büyük kayıplara sebebiyet vermemesidir.

Kaliteli olması gerilim ve akımlarda salınım ve harmonikleri içermemesi demektir. Bu tür şebeke problemleri, bilindiği üzere, özellikle elektronik cihazlar üzerinde daha çok etkili olmakta, arızalanmalarına ve devre dışı kalmalarına, hasar görmelerine sebep olmaktadır. Bu tür şebeke kaynaklı gerilim dalgalanmaları ve problemleri neticesinde devre dışı kalan cihazın arıza bakım masraflarının ötesinde belki de çok daha büyük bir problem, ticari değere sahip hizmet ve üretim sektöründe yol açtığı kayıplardır.

Amerika Birleşik Devletleri'nden örnek verilecek olursa, bütün endüstrilerde yapılan bir tahmine göre sadece bir dakikalık kesinti dahi, özellikle bankacılık ve finans sektöründe saniyeler mertebesinde milyonlarca doların kaybolmasına neden olabilmektedir.\*

Problemler her zaman şebekeden yük tarafına doğru kaynaklanmaz. Kimi zaman şebekeye bağlı olan yüklerin kendileri de şebekeyi rahatsız edici, gerilim bozucu, harmonik üreten bir yapıya sahip olabilir. Bunlar, tüketici tarafında alınacak tedbirler ile giderilse de, yüklerin aynı anda devreye girip çıkmaları, darbeleri ve kesikli çalışma karakteristiklerine sahip olmaları da, bu değişken yük ihtiyacına cevap verebilecek olan şebeke yapılarını zorlar. Bu bakımdan yük dengelemesi ve yönetimi şebeke tesis işletmeciliğinin önemli sorunlarından birisidir.

---

\* US Department of Energy

Bilindiği üzere, jeneratörlerin kararlı çalışma bölgesinde kalabilmesinin yolu, uygun işletme şartlarını sağlamaktan geçer. Bir şebeke bölgesinde bu şartlar sağlanmadığı takdirde jeneratörleri korumak maksadıyla devre dışı bırakan koruma elemanları devreye girer. Bir jeneratörün devre dışı kalması, diğerlerinin üzerine artan bir yükün gelmesi ve onları da kararlı çalışma bölgesinden çıkarma riskinin doğmasına neden olabilir. Bu şekilde birbiri ardı sıra devam eden zincirleme kesintiler ile sistemler tamamen çökme tehlikesiyle karşılaşabilirler. Hiç kesintinin olmadığı, şebeke ve üretim alt yapısının çok iyi olduğu ülkelerde bile kimi zaman bütün bir şehri, eyaleti elektriksiz bırakabilecek hadiseler yaşanmaktadır. Esas problem, bu hadiselerin yaşanmasından sonra sistemi tekrar geri toparlayabilmektir. Zira sistemdeki yüklere yol verildikçe bu sefer bunların yol alma akımlarının büyüklüğü sebebiyle sistemi tekrar dengeli bir yapıda tutabilmek zorlaşabilmektedir.

Bu tür benzeri büyük şebeke çaplı, ya da münferit işletme bazında yaşanan enerji kalite problemlerinin yine ABD’de sanayi ve ticari sektörlerde yıllık yaklaşık 150 milyar dolarlık kayıplara yol açtığı tahmin edilmektedir\*.

Elektrik enerjisinde ve enerji kaynaklarında istenen diğer ortak özellik ise ucuz olmasıdır. Bu tamamen kaynak enerjinin bolluğu, üretim, iletim ve dağıtım tesis yapısı ile alakalıdır.

### **3.2 Mevcut Enerji Depolama Teknolojileri**

Enerji depolaması konusunda uygulama yeri ve özelliklerine göre değişik depolama teknolojileri geliştirilmiştir. Sırasıyla bu teknikler incelenecektir.

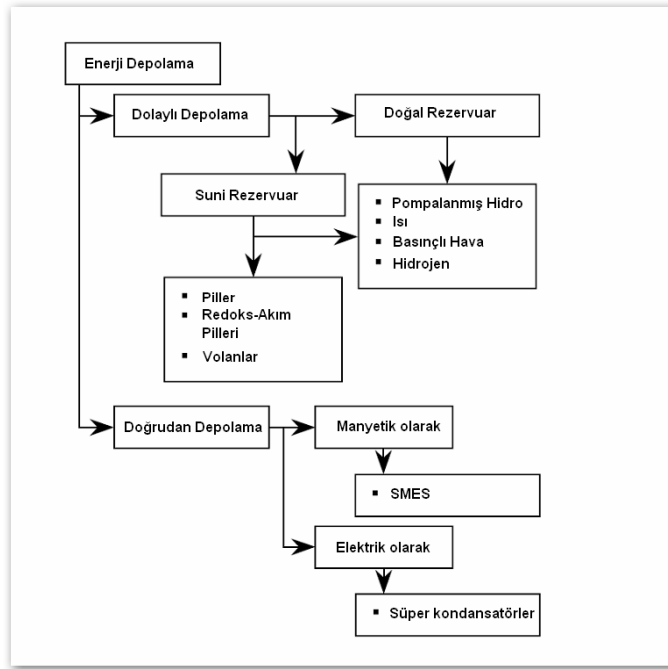
Enerji depolama sistemleri elektriğin doğrudan veya başka enerjilere çevrilerek depolandığı yöntemlere göre temelde ikiye ayrılır.

Doğrudan depolama elektrik alanda depolama yapan kondansatörler ve manyetik alanda depolama yapan süperiletken bobinler vasıtasıyla yapılır.

Dolaylı depolamada ise elektrik enerjisi pillerde önce kimyasal enerjiye, volanlarda kinetik enerjiye, pompalanmış su tesislerinde potansiyel enerjiye, basınçlı hava ile depolama sistemlerinde mekanik enerjiye, ısı enerjisine dönüştürülür sonra da ters işlemle elektrik enerjisine geri kazanılır. Şekil 3.1’de bu sınıflama basitçe gösterilmiştir.

---

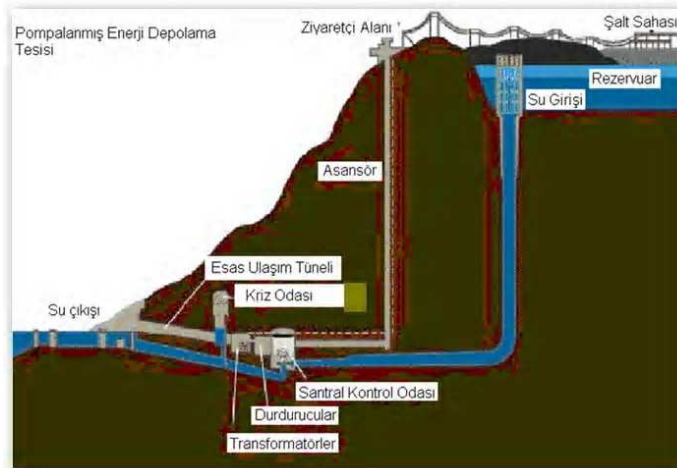
\* USA Energy Department



Şekil 3.1 Enerji depolama sistemleri (Sels vd., 2001).

### 3.2.1 Hidrolik Güç Depolanması

Bu sistem, 1929 yılından beri uygulamada olmakla beraber ticari olarak 1970 yılından itibaren kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Hidrolik güç depolanması blok şema.\*

Sistem yapı itibarıyla, hidrolik gücün potansiyel enerji formunda saklanması için 2 adet

\* [http://www.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energystorage\\_report/](http://www.doc.ic.ac.uk/~matti/ise2grp/energystorage_report/)

depodan oluşmaktadır. Depolardan biri zemin seviyesinde diğeri ise daha yüksek bir seviyede tutulmaktadır. Depolanan enerji miktarı depo hacmi ve yükseklik yani net düşü ile orantılıdır.

İlke olarak, enerjinin ucuz olduğu saatlerde su, jeneratörlerin yani senkron makinelerin motor olarak çalıştırılmasıyla bir üst seviyedeki depoya basılmakta ve potansiyel enerji olarak saklanmaktadır. Enerjinin pahalı olduğu saatlerde depolanan su, tersine bir akışla senkron makinelerin jeneratör olarak çalışmalarıyla kinetik enerjiye, oradan da elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Böyle bir sistemin iki açıdan faydası vardır. Birincisi, pahalı enerjiden tasarruf, ikincisi ise pik yük talebi nedeniyle ihtiyaç duyulan ekstra tesis kapasitesine cevap vermek, yatırım ve işletme maliyetlerine katkı sağlamaktır.

Galler'de 1976 ve 1982 yılları arasında inşa edilmiş olan Dinorwig Enerji Santrali bu konuda dünyada en iyi bilinen örneklerden biridir. Santral her biri 317 MW enerji üretme gücüne sahip 6 adet pompa/türbin grubu ihtiva eder. 600 m yüksekte depolanan 6 milyon metre küp su 1800 MW'lık bir güç üretme kapasitesine sahiptir. Bu konuda dünyada en büyük pompa/türbin grubu 337 MW gücüyle Çin'de Tianhuanping Santrali'dir. Tianhuanping Santrali'nin ek rezervuar kot farkı ise 50 metredir (Cheung vd., 2003).

Bu amaçla geliştirilen pompa/hidroelektrik türbinlerin tam güçle yüklenmeleri 10 saniye gibi kısa bir sürede gerçekleşebilmektedir. Öyle ki tam yükte şebekeye girmeleri için 1 dakikalık süre bile yeterli olmaktadır (Cheung vd., 2003).

Büyük ölçekli enerji depolama yöntemleri içersinde en etkin olanı pompalanmış hidro elektrik güçtür. En büyük enerji depolama kapasitesine (>2000 MW) sahip olması yanında, uzun süreyle depoladığı enerjiyi saklayabilme özelliğine de sahiptir. Öyle ki tipik bir tesis depolamış olduğu enerjiyi yarım yıldan daha uzun bir süre saklayabilmektedir. Hızlı devreye girebilme özellikleri sayesinde ani talep değişiklikleri gibi durumlarda yedek güç olarak kullanışlıdır.

Göreceli olarak basit yapıları ve büyük ölçekli olmaları, birim enerji başına işletme maliyetleri diğer teknikler içinde en ucuzu olmalarını sağlamaktadır. Fakat işletme maliyetlerinin az olması yanında, genelde bu tip tesislerin ilk kuruluş maliyetleri baraj ve devasa yeraltı boru inşası nedeniyle oldukça yüksek olmaktadır.

Depolanmış hidroelektrik enerji sistemlerinin olumsuz yanları da vardır. En temel sorunu özel coğrafi koşulları gerektirmesidir. İki yeterince büyük ve aralarında kot farkı bulunan, yapı maliyetlerinin ekonomik olacağı rezervuar alanının bulunması gereklidir. Bu tip coğrafi bölgeleri bulmak zordur. Bulunsa bile genelde kırsal alanda, yapı maliyetlerini artıran ve

enerji şebekesi bulunmayan bölgelerdedir. Depo yapımını zorlaştıran kısıtlar arasında ayrıca çevre koşullarını, yüksek yapım maliyetlerini, uzun süren inşaat dönemini saymak mümkündür.

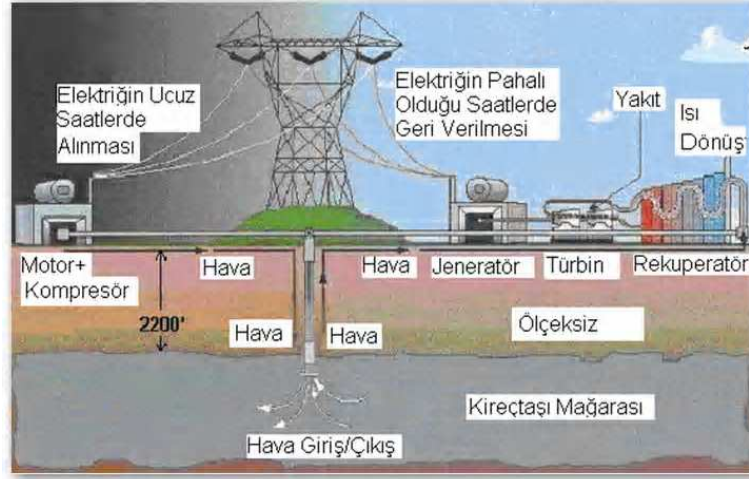
1997 yılında tüm dünya genelinde 290 adet pompalanmış hidroelektrik enerji depolama santralının toplam enerji üretim gücü 82.8 GW olmuştur (Cheung vd., 2003). 25 adet santral da yapım aşamasındadır. Ülkemizin 2005 yılı itibariyle toplam elektrik kurulu gücünün 38,82 GW olduğu dikkate alınacak olursa, bu değer oldukça büyük olduğu anlaşılacaktır. 1998 yılında Japonya toplam enerji üretiminin %10'unu bu tip santrallerden karşılamaktadır.

Günümüzde mevcut yer üstü rezervuara sahip tesislerden kaynaklanan sıkıntıları önlemek için artık yeraltında depo yapılması konusunda artan bir yönelim vardır. Bir diğer husus da düşük seviye rezervuar olarak denizi kullanmaktır. Fakat ekipmanlara yapacağı aşındırıcı etki gibi deniz suyunun tuzluluğundan kaynaklanan sorunların üstesinden gelme konusu hala aşılması gereken teknik bir sorun olarak çözüm beklemektedir.

### **3.2.2 Basınçlı Hava İle Enerji Depolama Sistemleri (CAES)**

CAES santralleri, pik saatler dışında şebekeden aldıkları talep fazlası enerjiyle sıkıştırdıkları havayı büyük, derin ve sızdırmaz mağaralarda ya da kullanılmayan tuz madenleri ve özellikle bu amaçla oluşturulmuş kaya galerilerinde depolarlar. Pik saatlerde artan talebi karşılamak için sıkıştırılan hava açığa salınır. Isınan hava genişler ve elektrik üretmek üzere bir türbinden geçirilir.

CAES için kayaçlara mağara açma maliyeti tuz mağaralara göre %60 daha pahalıdır (Cheung vd., 2003). Bu nedenle de en ucuz yöntem depo haznesi olarak doğal yeraltı yapılarını kullanmaktır. Diğer bir yaklaşım basınçlı havayı bir tank içerisinde saklamaktır. Bu maksatla çok yüksek basınca dayanıklı çelik tanklar imal edilir. Fakat günümüz teknolojisi ile bu tip tankları uygun fiyatla imal etmek mümkün olmamaktadır. Ayrıca böyle sistemler ölçek olarak çok daha küçük sistemlerdir.



Şekil 3.3 CAES sistemi elemanları.\*

Enerji üretim çevriminde basınçlı havanın serbest bırakılarak jeneratörü tahrik etmesi yanında daha çok tercih edilen yöntem ise, basınçlı havanın doğal gaz ile karıştırılarak konvansiyonel türbin santrallerinde olduğu gibi yakılmasıdır. Bu yöntem basınçlı havanın daha az enerji kaybetmesini sağlayacağı için daha verimli bir yöntemdir. Bu yöntemde süreç şöyle çalışır (Cheung vd., 2003):

CAES sistemlerinde bir motor ile tahrik edilen kompresörler basınçlı hava için kullanılan depoda (mağara, maden, tank vs.) enerjiyi basınçlı hava olarak depolarlar. Sıkıştırma, enerji talebinin üretimden daha az olduğu periyotlarda yapılır. Sıkıştırma işlemi öncesinde depolama haznesinden daha fazla faydalanabilmek için hava önce soğutulur. Sonra yaklaşık 75 bar basınçla sıkıştırılır (Cheung vd., 2003).

Sıkışmış hava yeniden elektrik üretmek için dışarı salınır, fakat öncelikle ısı dönüştürücüde (recuperator) ısıtılır. Dönüştürücü bu işlem için kompresör soğutucularının atık ısısından yararlanır. Isınan hava yakıcıda yakılmadan önce az miktar petrol veya gaz ile karıştırılır. Yakıcıdan (combustor) ısınarak çıkan gaz genişler ve jeneratör türbinini döndürerek elektrik üretilmesine neden olur.

CAES üniteleri, daha çok içten yanmalı kombine çevrim santralleri için ekonomik olmaktadır.

Dünyada sadece iki tane büyük ölçekli CAES enerji üretim santrali vardır. Bunlardan ilki 1991 de ABD Alabama'da devreye alınan 110 MW gücündeki tesis ve Almanya Huntorf'da

\* [http://www.doc.ic.ac.uk/~mpj01/ise2grp/energystorage\\_report/node7.html](http://www.doc.ic.ac.uk/~mpj01/ise2grp/energystorage_report/node7.html)

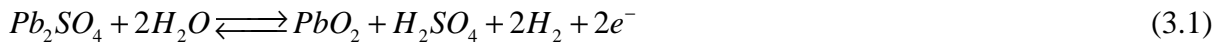
bulunan 290 MW güce sahip tesistir. Bunlardan başka günümüzde 5–350 MW arası kullanımda olan tesisler de mevcuttur (Cheung vd., 2003).

### 3.2.3 Piller

Bataryalar enerjiyi elektrokimyasal olarak depolarlar. Enerjinin depolanması, harici bir elektrik kaynağından gelen elektrik enerjisinin, batarya iç yapısını oluşturan elektrokimyasal bileşiklerde kimyasal reaksiyonlar ile soğurulması ile yapılır. Bu işlem bataryanın şarj edilmesidir. Gerekliğinde enerjinin kullanılması için kimyasal formda depolanmış olan enerji, ters kimyasal reaksiyonlarla elektrik enerjisine dönüştürülür.

Geçen yıllarda çeşitli tiplerde bataryalar geliştirilmiş olmasına rağmen günümüzde hala en yaygın kullanılan tip 1859'da Gaston Plante tarafından icat edilmiş olan kurşun – asit bataryalardır (Holm vd., 2002).

Kurşun – asit bataryada, kurşun dioksit ( $PbO_2$ )'den oluşan katot ile kurşundan (Pb) oluşan anot elektrolitik sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) içerisine daldırılmıştır. Katotta oluşan kimyasal reaksiyon ise aşağıdaki gibi olacaktır:



Burada şarj olayı soldan sağa doğru gerçekleşmektedir. Anotta meydana gelen reaksiyon ise aşağıdaki gibi olmaktadır:



Burada ise elektriksel şarj soldan sağa doğru olmaktadır.

Bu tip bataryalar diğer teknolojilere göre yüksek iç empedanslarından (elektrotlar ve elektrolit arasındaki kontak direnci) ötürü düşük özgül güç değerine sahip olmalarına rağmen yüksek özgül enerji değerine sahiptirler. Bu tip bataryalarla ilgili yapılan araştırmalar, esas itibariyle onların yapıları ile alakalı olmuştur. 140 yıldır olduğu gibi bugün de arabalarımızın bataryalarında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar yukarıdaki reaksiyonlarda gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.

Zamanla batarya içerisindeki elektrotlarda, kullanıldıkça geri dönüşü olmayan fiziksel değişiklikler oluşmaktadır ki bunlar bir süre sonra enerji depolama performansını bozmakda daha sonra da pili hiç kullanılamaz hale getirmektedir. Bataryanın tasarımına, kullanım sıklığına, yoğunluğuna ve şarj/deşarj derinliğine bağlı olarak ekonomik ömrü 200 ila 2000

döngü (şarj/deşarj peryodu) arasında değişmektedir (Holm vd., 2002).

Amerika'da Bolder Technologies Corporation tarafından yapılan, kurşun asit bataryaların güç iletme kapasitelerini artırma çalışmaları "İnce Metal Film" (Thin Metal Film) bataryaların geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu bataryalar elektrotlar ile elektrolit arasındaki temas yüzeyi alanını artırma tekniklerini kullanmaktadır. Yüzeyin büyütülmesi için elektrotlar çok ince levhalar halinde birbirlerine çok yakın ve spiral şekillerde sabitlenmişlerdir. Bu yapı Bolder TMF bataryalarının özgül gücünü önemli ölçüde artırmıştır. Öte yandan kimyasal yapıya dokunulmamıştır. Formül (3.1)'den de görüleceği gibi, şarj durumunda katotta gaz çıkışı sırasında kontak direnci yüksek şarj akımlarında artmaktadır. Bu da bataryanın şarj olurkendeşarjda olduğundan daha düşük özgül güce sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle de kurşun asit bataryalarda daha yüksekdeşarj akımları elde etmek mümkün iken şarj akımı büyüklüğü batarya kimyasal yapısı tarafından sınırlandırılmaktadır. 2 V, 1.2 Ah Bolder TMF pil hücresi 1 kA'lık bir akımla 1 saniyede boşalırken, tekrar şarjını 2 – 3 dakikada ancak tamamlayabilmektedir. Bu tip bataryaların şu anki özgül gücü 4,4 KW/kg'dır ve gelecekte 15 kW/kg'a kadar yükseltilebileceği hesaplanmaktadır (Holm vd., 2002).

Bir başka araştırma kurşun – asit batarya yapısı ile ilgili, Hollanda Uygulamalı Bilim Araştırmaları Organizasyonu tarafından yapılmıştır (TNO). Bu araştırma sonucunda geliştirilen batarya yapısı bipolar kurşun – asit bataryalardır. Bu yapı Ek-1'de gösterildiği gibi özgül güç değerini 1 KW/kg'ın üzerine ve güç yoğunluk değerini de 30 MW/m<sup>3</sup>'e kadar yükseltmiştir (Holm vd., 2002).

Özetle, kurşun – asit pil ailesinin en büyük dezavantajı, özgül güç değerlerinin tek yönlülüğü, yüksek iç direnç ve kısa ekonomik ömürleridir.

Diğer batarya kimyaları ile ilgili bir araştırma da SAFT firması tarafından yapılmıştır (yüksek güçlü Li-ion). Ek-1'den de görülebileceği gibi bu tip bataryalarda bipolar kurşun – asit bataryaların sahip olduğundan daha yüksek değer olan 1 KW/kg'a kadar çıkan özgül güç değeri elde edilebilmesi mümkündür (Holm vd., 2002). Fakat bu değer bolder TMF bataryalarından daha kötü bir değerdir.

Bu teknolojiler daha kötü bir güç iletme performansı yanında daha yüksek enerji depolama kapasitelerine sahiptirler. Ek-2'de bataryaların bir dakika ile yüzlerce saat enerji transfer zamanı bölgesinde gösterilmeleri onların uzun süreli enerji depolama cihazları olduklarını göstermektedir. Bataryalar kapasite olarak 100 Watt'tan daha küçük ölçeği ile birkaç megavat modüler konfigürasyonlarda üretilirler. Enerji üretim, dağıtım ve servis hizmetleri gibi

elektrik enerjisinin kullanıldığı her alanda kullanılırlar.

Valf – regüleli (valve regulated) (VRLA) bataryalar günümüzde kullanılan yeni teknolojilerden birisidir ve bu tip bataryaların az bakımlı sızdırmaz kompakt bir yapısı vardır (Gandy, 2000). Zine/Bromine (Çinko/bromin) bataryalar henüz pazara çıkmamış fakat daha iyi depolama özelliğine sahip bir teknolojidir.

### 3.2.4 Yakıt Hücreleri

Yakıt hücrelerinin geçmişi bataryalardan çok daha eskiye uzanır. İlk olarak İngiltere’de Grove tarafından 1839’da hidrojen – oksijen hücre prensibi tanıtılmıştır.

Aslında, yakıt hücreleri bataryalar gibi elektrokimyasal enerji depolama cihazları değildir. Çünkü onlar yakıt ve yakıcılarını bünyelerinde barındırmazlar. Bunun yerine bu iki kimyasalı depo edildikleri harici bir kaynaktan sürekli olarak alırlar. Oysa bataryalar yakıt ve yakıcılarını kendi içyapılarında bulundurlar. Mesela, kurşun – asit pillerinin yakıtı (kurşun) anotta bulundurulurken, yakıcı maddesi (kurşun dioksit) katotta bulundurulur, depo edilir.

Ek-2’de metanol yakıt hücresinin özgül enerjisine karşı özgül güç bölgeleri gösterilmektedir. Buradan da kolayca görüleceği gibi bu tip yakıt hücresi özgül enerji değeri açısından bataryalardan daha yüksek bir değeri sağlayabilirken özgül güç bakımından daha kötü bir değere sahiptir.

Bunun da ötesinde, yakıt hücreleri oldukça pahalıdırlar (1500 \$/KW, 1999 fiyatlarıyla) ve yük değişimlerine hızla adapte olamamaktadırlar (Holm vd., 2002). Bu sebeplerden burada tartışılan diğer teknolojilerle karşılaştırıldıklarında yüksek güç kapasitesine sahip değildirlar.

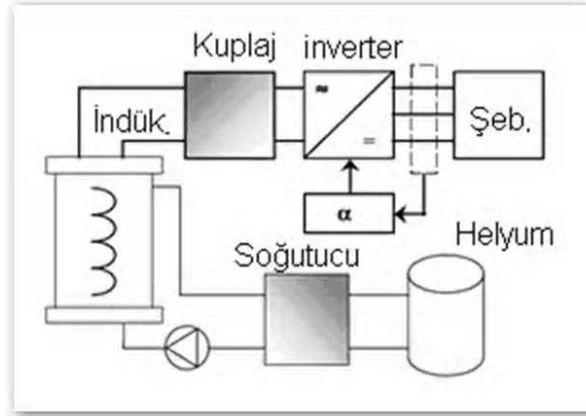
### 3.2.5 Süper İletken Manyetik Enerji Depolayıcıları (SMES)

Soğutma sistemlerinin kontrolü ve çalışılması ile ilgili bilgilerdeki teknik iyileşmeler SMES sistemlerinin hızlı bir şekilde piyasaya girmesine ve kullanımda olan diğer depolama sistemlerinin rakibi haline gelmelerine neden oldu.

Süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerinde ana yapı üç temel unsurdan oluşur. Bobin, bağlantıları ve soğutma tankından oluşan soğuk komponentler, soğutma ünitesi ve şebekeye bağlantısı (güç elektronik dönüştürücü –PCS).

Bir SMES sistemi, süperiletken malzemedan yapılmış bir bobin içinden doğru akım geçirilerek oluşturulan manyetik alanda enerji depolar. Süperiletken özelliklere sahip bir

bobin oluşturmak için düşük sıcaklık süper iletkenlerle vakum izoleli sıvı helyum kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık süper iletkenlerle ise sıvı nitrojen kullanılmaktadır.



Şekil 3.4 Süperiletken manyetik alan enerji depolama sistemi basit blok diyagramı (Sels vd., 2001).

Bilindiği gibi üzerinden akım geçen bir tel etrafında manyetik alan meydana gelir ve oluşan manyetik alanda,

$$E_m = \frac{1}{2} L.I^2 \quad (3.3)$$

ile ifade edilen bir enerji depolanır. Burada  $I$  bobin içinden akan akımı göstermektedir. Formül (3.3)'den açıkça görülebildiği gibi depolanan enerjiyi maksimum kılabilmek için bobin içinden akan akımın olabildiğince büyük olması gereklidir. Bu ise süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerinin (SMES) üzerine kurulduğu temel prensiptir. Süperiletken özelliğe sahip olmayan iletkenlerin iç dirençleri nedeniyle büyük miktarda enerji depolamak için bobin üzerinden yeterli büyüklükte akım akıtmak mümkün olamamaktadır.

Süperiletkenler üç kritik parametreye sahiptirler: Akım yoğunluğu  $J$ , manyetik akı yoğunluğu  $B$  ve sıcaklık  $T$ . Bir süperiletkenin emniyetli çalışma bölgesi yaklaşık olarak  $J$ 'nin  $B$ 'ye ve  $T$ 'ye göre çizilmiş grafiğinde pozitif çeyrek alan içindedir. Burada  $J_c$ ,  $B_c$  ve  $T_c$  kritik noktaları tanımlamaktadır. Eğer bu kısıtlar arasında kalınacak olunursa, süperiletken bir maddenin DC akıma göstereceği direnç sıfır olacaktır.

Pratik süperiletkenler, süperiletkenin aniden normal iletken halini alması durumunda enerjiyi soğurmada kullanılan bakır veya alüminyum stabilizasyon matrisi içine gömülü bulunan NbTi maddesinden veya Nb<sub>3</sub>Sn'den oluşan multi filamentlerden yapılırlar. Günümüzde işlenmesi daha kolay olduğu için tercih edilen malzeme Nb<sub>3</sub>Sn'dir. Nb<sub>47</sub>Ti için kritik değerler:

$$J_c := J|_{B=0, T=0} = 10^4 \text{ A/mm}^2 \quad (3.4)$$

$$B_c := B|_{B=0, T=0} = 15 \text{ T} \quad (3.5)$$

$$T_c := T|_{B=0, T=0} = 9,2 \text{ K} \quad (3.6)$$

Bu tip sistemlerde esas olarak hava kullanılır. Sargılar selenoidal (ucuz olmasına rağmen yüksek manyetik alan kaçığına neden olur), veya toroidal (pahalıdır fakat manyetik alan kaçığı olmaz) yapılıdır. Bir SMES sistemindeki iletkenler oldukça büyük kuvvetlere maruz kalırlar. Örneğin, 5T'lik bir manyetik akı yoğunluğu bir selenoidal bobinde bobin üzerinde radial doğrultuda dışarı yönde 100 atü basınç meydana getirir. Bu nedenle mekanik yapının bu derece kuvvetleri bertaraf edecek bir şekilde tasarlanması gerekir (Holm vd., 2002).

Yüksek sıcaklık süperiletken araştırmaları birçok araştırmaya konu olmaktadır. Bu tip maddeler NbTi'nin sahip olduğundan daha yüksek  $T_c$  değerine sahip malzemelerdir. Bu durum soğutucu madde olarak sıvı helyum yerine sıvı nitrojen kullanımına olanak verir ki bu da maliyeti azaltan önemli bir etkidir. HTS'lerde karşılaşılan sorun biritte seramiklerdir ki bunlar pratik olarak iletken üretimini çok zorlaştırır. Amerikan Süperiletken Şirketince geliştirilen metal bir yapıda, BSCCO esnek kablosu ile sağlanmıştır. BSCCO, bizmut, stronsiyum, kalsiyum ve bir miktar kurşun içeren bir bakır oksit seramiktir. Bu telden yapılmış olan bir SMES bobini, bir kâğıt fabrikasında bir dip koruyucu sisteminde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. SMES sistemlerinin özgül güç değerleri 200–1500 W/kg dolaylarındadır (Holm vd., 2002). SMES'lerin özgül enerji seviyeleri ise ortalama çift katman kapasitörlerin (süperkapasitörler) sahip olduğu değerlerdedir. Bu değer süperiletkenleri Ek – 1 'de görüldüğü gibi alüminyum elektrolitik kapasitörler ile çift katman kapasitörler arasında bir yere yerleştirir. Bu ise süperiletkenleri 100 ms – 60 s aralığında tam deşarj olabilen kısa süreli güç transferi için ideal enerji depolama sistemleri haline getirir. Bu süreler hem şarj hem de deşarj anında geçerli olup buda SMES sistemleri özgül güç açısından tamamen iki yönlü kılar.

SMES sistemlerin özgül güç değerlerini sınırlandıran bobini oluşturan iletken üzerinde deri ve proksimite etkisi nedeniyle oluşan AC dirençtir. Anlık olarak yüksek enerji çekilecek olursa, meydana gelen çok büyük  $di/dt$  değeri bobin üzerine kuvvet uygular ki bu da yukarıda bahsedilen iki etki nedeniyle belli noktalarda direnci çok yükseltir. Bu durum sırasıyla o noktalarda sıcaklığın aşırı artmasına ve sıcaklığın süperiletken kritik sıcaklık değerini aşmasıyla da süperiletken özelliğini kaybetmesine neden olur. Normal iletken özellik gösteren tel bu noktalardaki muazzam enerji nedeniyle tüm bobini tahrip eder.

SMES sistemlerinin 700 – 1000 \$/kg aralığında maliyetleri vardır (Holm vd., 2002). Bu sistemler çalışmada incelenen teknolojiler içinde en yüksek güç değerlerine sahip olan sistemlerdir (1 GW'ta kadar). Öte yandan SMES sistemleri, incelenen teknolojiler içinde yakıt hücrelerinden sonra en pahalı ikinci teknolojidir. SMES sistemlerinin maliyetleri kabaca %10'u soğutma, %30'u SMES bobinine ve %60'ı güç dönüşümünden oluşur (Holm vd., 2002). SMES sistemlerin neredeyse sınırsız şarj – deşarj döngüsü vardır. Bu sistemler herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadan veya yüksek verimlerini düşürmeden (>%95) tamamen deşarj olabilirler. Ayrıca özgül güç kapasiteleri açısından da tam olarak iki yönlüdürler. Yani hem şarjda hem de deşarjda aynı değeri gösterirler.

### 3.2.6 Metal Film ve Alüminyum Elektrolitik Kondansatörler

Bu cihazlar elektrik enerjisini plakaları arasında oluşturdukları elektrik alanda depo ederler. Elektrik alanda tutulan enerji,

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.7)$$

eşitliğine göre değişmektedir. Burada V plakalar arasındaki potansiyel farkını, C ise,

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A_e}{d} \quad (3.8)$$

ile ifade edilen kapasitansı göstermektedir. Burada  $\epsilon_r \epsilon_0$  dielektrik sabiti (permitivite),  $A_e$  plakalar arasındaki toplam alan, d ise plakalar arasındaki mesafedir.

Metal film kapasitörler basitçe aralarında kuru bir dielektrik madde olan iki metal plakanın rulo şeklinde sarılıp bir hazne içersine yerleştirilmesiyle yapılırlar. Çok düşük iç empedansları vardır ve bu nedenle de çok yüksek (1 TW/m<sup>3</sup>) güç yoğunluklarına ve özgül güç (100 kW/kg –1 MW/kg) değerlerine sahiptirler (Holm vd., 2002).

İçlerindeki dielektrik malzeme elektrolitik bir işlemle oluşturulduğu için elektrolitik kapasitör olarak adlandırılırlar. Tantal, niyobyum, zirkonyum ve çinko gibi birçok başka tipte de olsa endüstride en yaygın bulunan elektrolitik kapasitör tipi alüminyum elektrolitik kapasitörlerdir. Alüminyum elektrolitik kapasitörlerde dielektrik kısım elektrolitik işlemle alüminyum levhanın bir yüzeyinde oluşturulmuş ince bir alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tabakasından oluşur. Bu işlem sırasında, uygun bir solüsyona batırılmış levha üzerinden akım geçirilir. Oksit tabakanın kalınlığı çalışma geriliminden genelde 3 – 4 kat daha yüksek olan formasyon voltajına bağlıdır.

Dielektrik katmanın kalınlığı 1  $\mu\text{m}$  mertebesindedir. Oksit tabakasının özelliği gereği doğrultucu gibi çalışır, yani bir yönde iletken diğer yönde ise yalıtkan olarak davranır.

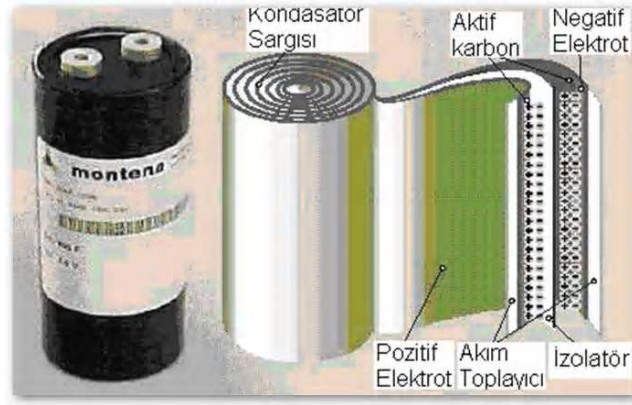
Formül (3.8)'den görüldüğü gibi kapasitans değerini artırabilmek için ya etkin alanı ve/veya  $\epsilon_r$  değerini artırmak veya  $d$  değerini küçültmek gerekmektedir. Alüminyum oksit göreceli olarak 8 civarında bir permitiviteye sahipken tantalyum peroksit ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )'de bu değer 27 civarındadır. Bununla birlikte tantalyum peroksit kapasitörler çok daha pahalıdırlar. Oksit tabakaların özel bir işleme tabi tutulması ile etkin alan  $A_e$  30 ile 100 kat artırılabilir. Bir alüminyum elektrolitik kapasitörde oksit tabakanın dielektrik dayanımı elektrolitik levhalar arasındaki gerilimi dolayısıyla maksimum enerji depolama kapasitesini sınırlamaktadır. Örneğin, 800 V, 680  $\mu\text{F}$ 'lık bir alüminyum elektrolitik kapasitör tam şarjlı iken 217,6 J'luk bir enerji depo eder. Ayrıca elektrolit kısım zamanla bozulur. Şöyle ki endüstride DC şebekede kullanılan tipik bir kapasitör 2 – 3 yıl gibi bir süre sonunda ekonomik ömrünü tamamlar.

Maalesef, oksit tabakası genelde metal kısmın sahip olduğundan daha yüksek bir empedansa sahip olur ki bu değer etching prosesle daha da yükseltilir. Kapasitansı, dolayısıyla birim kg'da ve metre küpte enerji sığasını artırmak için uygulanan yöntemler kapasitörün güç kapasitesini de düşürür. Alüminyum elektrolitik kapasitörler 100 kW/kg civarında özgül güç ve 400 ile 850  $\text{MW}/\text{m}^3$  aralığında değişen güç yoğunluğu değerlerine sahiptir. Bu değer metal film kapasitörlerin sahip olduğundan daha yüksek bir özgül enerji (0,1 Wh/kg) ve enerji yoğunluğu (100 Wh/ $\text{m}^3$ ) değerleri demektir (Holm vd., 2002).

Bu cihazlar Ek-1'de gösterilen teknolojiler arasında en yüksek özgül güç değerlerine sahip olanlardır. Alüminyum elektrolitik kapasitörler 600 \$/KW civarında mal olurlar ki sağladıkları yüksek özgül güç değeri dikkate alındığında bu çok yüksek bir maliyet değildir (Holm vd., 2002). Fakat yüksek miktar enerji depolamayı gerektiren uygulamalarda daha az çekici olmaktadır.

### 3.2.7 Süperkapasitörler

1853'de, Helmholtz iletken bir sıvı içerisine batırılmış iki karbon elektroda bir gerilim uygulandığında belli bir gerilim değerine ulaşıncaya kadar sürekli bir akımın akmadığını gözlemledi. Bu, süperkapasitörlerin dayandığı temel prensiptir. Elektrikli cihaz uygulamalarında kullanılan ilk enerji depolama tekniklerinden biridir. Bir süperkapasitör elektrokimyasal bir cihaz olmasına rağmen, bünyesinde pillerdeki gibi kimyasal bir reaksiyon olmadığı için enerjiyi elektrokimyasal değil elektrostatik olarak depolar. Bir süper kapasitör, hem bir batarya ve hem de bir kondansatördür.



Şekil 3.5 Süperkapasitör.\*

Bataryalarda enerji, şarj yoluyla iyonlar ile depolanırken geleneksel bir kapasitörde, enerji alımında kimyasal reaksiyon olmaz. Uygulanan elektrik alan, sıvı içindeki iyonların elektrot etrafında çok ince bir tabaka halinde toplanmasına sebep olur (elektrot etkin olarak elektroliti polarize eder). Pozitif elektrota uygulanan gerilim elektrolit içindeki negatif iyonları kendisine doğru çekerken, negatif elektrota uygulanan gerilim ise elektrolit içersindeki pozitif iyonları çeker. Bu, şarj ayrımının iki tabakasını oluşturur ki bu nedenle de bu cihazlara iki katmanlı kapasitörler de denilir. Elektrotlar için  $10^4 \text{ mm}^2/\text{g}$ 'a kadar bir yüzey alanı oluşturabilen gözenekli karbon kullanılır. Kutuplar arası mesafenin tipik olarak  $10 \text{ \AA}$  gibi birbirine oldukça yakın bir mesafede olması durumu bu cihazlara karakterini veren yüksek kapasitansın da nedeni olur. Süperkapasitörlerin elektrolit delinme gerilimi düşüktür ( $3 \text{ V}$ 'ün altında), bu nedenle de bataryaların kullanılabildiğinden daha düşük enerji gereksinimli pratik uygulamalarda kullanımları sınırlıdır.

Ek-1 gösteriyor ki süperkapasitörler elektrolitik kapasitörlerin sahip olduğu özgül güç değerlerinden daha düşük özgül güç değerlerine ( $\sim 4 \text{ kW/kg}$ ) sahiptirler (Holm vd., 2002) ve de özgül enerjileri elektrolitik kapasitörler ile elektrokimyasal depolama cihazları arasında bir yere denk gelir. Bu durum süperkapasitörleri tam deşarjın yaklaşık  $1 - 60 \text{ s}$  boyunca gerekli olacağı durumlar için uygun bir güç kaynağı yapmaktadır. Bu nedenle süperkapasitörler depolama cihazları olarak kısa dönem ile uzun dönem enerji depolama cihazları arasında yerleştirilirler. Bununla birlikte süperkapasitörler  $100 \text{ kW}$ 'a kadar güç transferini sağlayabilen tek uygulanabilir çözümdür. Süperkapasitörler tamamen tek yönlü olup uzun ömürlü cihazlardır. Öyle ki  $500 \text{ \$/KW}$  ortalama maliyetleriyle işletme süresince  $100.000$  çevrim

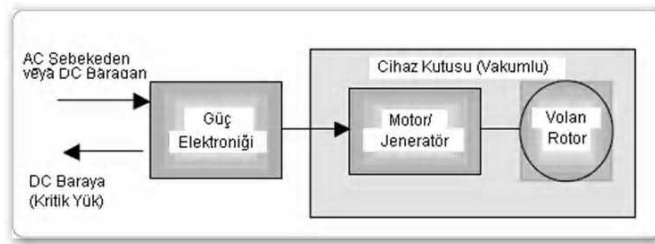
\* Montena Inc.

yapabilmektedirler (Holm vd., 2002). Bu gerçekler süperkapasitörleri düşük güç tüketimi ve ani darbe güç gereksinimi olan uygulamalarda göreceli olarak çekici kılmaktadır. Süperkapasitörlerin ESR'lerini düşürmeye dönük araştırmaların yapılmasına rağmen, bu değer hala oldukça yüksektir (150 kJ'luk bir modül için  $\sim 15 \text{ m}\Omega$ ). Bu Ek-1'de gösterilen başarılabilir özgül güç ve güç yoğunluk değerlerini sınırlamaktadır.

Günümüzde elektrikli ev cihazlarında, 7 ile 10 Watt arasında küçük ölçekli süper kapasitör uygulamaları ticari olarak mevcuttur. Bu cihazların kullanılma amaçları daha çok güç kalitesi uygulamaları içindir. Daha büyük ölçeklerdeki süper kapasitörlerin üzerinde ARGE çalışmaları elektrikli araçlar üzerinde yaygınlaşmıştır. Günümüzde süper kapasitörler, elektrikli araç uygulamalarında 250 kW'tan daha küçük ölçekli güçlerde ve enerji kalitesi düzeltme amaçlı olarak elektrikli cihazlarda kullanılmaktadırlar.

### 3.2.8 Volanlar

Temel, basit volanların kullanımı ile kinetik enerji depolanması yüzyıllardır uygulanmakta olan bilinen en eski yöntemlerden biridir. Volan, mekanik sistemlerde darbeli çalışan yüklerde, tahrik gücünün fazla olduğu periyotlarda fazla enerjiyi üzerine alır, yük talebinin arttığı periyotlarda bu enerjiyi yüke aktararak yük dengelemesi yapar. Özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine çevrildiği mekanik tahrik sistemleri için ideal bir çözümdür. Bu kapsamda volan, mekanik bir batarya görevi üstlenmektedir. Günümüzde önemli bir teknik haline gelmesinin nedeni ise yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin ve düşük kayıplı rulmanların geliştirilmiş olmalarıdır.



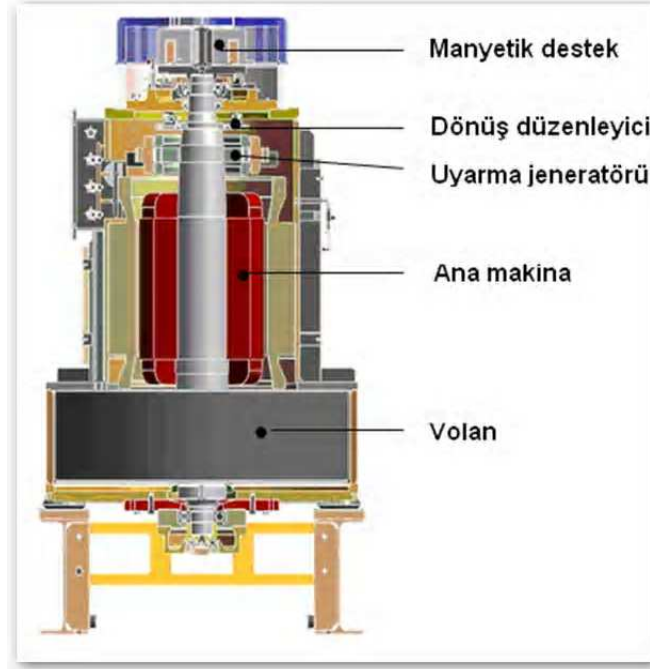
Şekil 3.6 Volan enerji depolama sistemi basitleştirilmiş şeması.

İlk uygulamalarda doğrudan mekanik enerjiyi depolayıp, ihtiyaç halinde kinetik enerji olarak vermekteyken, günümüzde gelişen teknoloji sayesinde elektrik – mekanik dönüşümlerinin yapıldığı uygulamalar ile verimleri artarken kullanım alanları gittikçe yaygınlaşmaktadır.

İlk kullanıma girdiği şekliyle, mekanik – mekanik dönüşümleri sadece döner bir demir

kütlesinden ibaret iken, günümüzde mekanik – elektrik dönüşümlerde daha hafif malzemelerden yapılmış döner kütlelerden oluşurlar.

Girişinde enerjiyi elektrik enerjisi olarak alır ve motor çalışmayla kinetik enerjiye dönüştürür. İhtiyaç halinde bu enerjiyi jeneratör çalışmayla tekrar elektrik enerjisi şeklinde çıkış olarak verir.



Şekil 3.7 Modern yüksek hızlı volan (flywheel) sistemi (Bryan ve Andrews, 2004).

### 3.2.8.1 Volanların Fiziksel Prensibi

Volanda enerji dönüşümü aşağıda ifade edilen bağıntılarla açıklanır (Ruddell, 2003):

Depolanan Enerji = Volanı Oluşturan Döner Kütlelerin Kinetik Enerjilerin Toplamı

$$E_k = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \quad (3.9)$$

Burada  $E_k$  cismin sahip olduğu kinetik enerjiyi,  $J$  cismin dönme hızını değiştirmeye olan direncini ifade eden atalet momentini,  $\omega$  cismin dönme hızını göstermektedir.

$$J = K \cdot m \cdot R^2 \quad (3.10)$$

İfadesi ise bize  $J$  atalet momentini vermektedir. Burada  $m$  cismin kütesine,  $R$  ise yarıçapını ifade etmektedir,  $K$  ise cismin geometrisine bağlı atalet sabitidir.

Ağır malzemedan yapılmış sistemler, (3.10) ifadesinden de görülebileceği gibi daha fazla enerji toplar, ancak daha büyük merkezkaç kuvvetlerine maruz kalırlar.

$$\text{MerkezkaçKuvvet} = m.R.\omega^2 \quad (3.11)$$

Bu yüzden daha yüksek hızlarda, daha düşük yoğunluktaki malzemelere göre verimleri azdır.

(3.10) ifadesini volanda mümkün olabilecek en yüksek enerji yoğunluğunu ifade etmek için malzeme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak kullanabiliriz:

$$\hat{e}_{k,v} = K\sigma \quad (3.12)$$

Burada  $\sigma$  malzemenin dayanabileceği maksimum tanjantsal gerilimi, K ise cismin şeklinden kaynaklanan biçim çarpanıdır. Bu parametre ise volanın geometrisine bağlıdır ve temelde atalet momentinden (J) kaynaklanmaktadır.

(3.12) ifadesinden kolaylıkla görülebileceği gibi yüksek enerji yoğunluğu oluşturmak için yüksek malzeme dayanımı gereklidir. Bu da neden volanların ancak son zamanlarda önemli bir enerji depolama tekniği haline geldiğini açıklamaktadır. Çünkü ancak günümüzde yüksek dayanıklı fiber kompozit malzemeler geliştirilebilmiştir. (3.12) ifadesini  $\rho$ 'ya bölersek en fazla elde edilebilecek özgül enerji,

$$\hat{e}_{k,v} = K \frac{\sigma}{\rho} \quad (3.13)$$

olacaktır.

(3.12) ifadesinden bir volanın özgül enerjisinin malzemenin kütle yoğunluğunu azaltarak yükseltilebileceği kolayca görülebilir. Hem düşük kütle yoğunluğuna hem de yüksek dayanıma sahip olduklarından yüksek dayanımlı fiber kompozit malzemeler volan yapımı için ideal malzemelerdir.

Fiber kompozitler anistropik\* malzemelerdir. Yani sadece yapılarındaki fiberlerin yerleşme doğrultusunda çok yüksek dayanıma sahiptirler. Bu yüzden de bu malzemelerle sadece belli bazı şekillerde volan tasarımı yapmak mümkündür. En iyi yöntem thin-rim denilen tarzıdır. İdeal bir thin-rim volanda, içerdeki madde ve dış çap birbirine eşittir ve biçim çarpanı  $K=0,5$ 'dir. Pratikte bu şekle, (0,5'den küçük bir değerle) yaklaşım kullanılır. Yani kompozit

---

\* (anisotropy) Bir malzemenin fiziksel özelliklerinin, karakteristiğinin malzemenin doğrultusuna göre değişmesi.

malzemeden yapılmış volanlar metallerle kıyaslandıklarında kullanılan hacim açısından daha kötü fakat kütle bakımından daha avantajlı durum arz ederler. Buna neden de kompozitlerin daha düşük kütle yoğunluğuna sahip olmaları, fakat güvenli bir yapıya sahip olmaları içinse daha az bir kütleye sahip olmaları demektir.

### 3.2.8.2 Volan Tipleri

Volanlar, yapıldıkları malzeme türüne göre iki gurup altında sınıflandırılırlar. Bunlar döner kütle elemanının çelik veya kompozit malzeme türü olmasına göre değişir. Demir malzemeden yapılanlar, geleneksel tipte yapılan ilk örneklerden olup, kompozit tiptekiler yeni nesil olarak isimlendirilirler. Bunlar, aynı sınıflandırma çerçevesinde demir malzemeler için düşük hızlı, kompozit olanlar için ise yüksek hızlı olarak da adlandırılırlar.



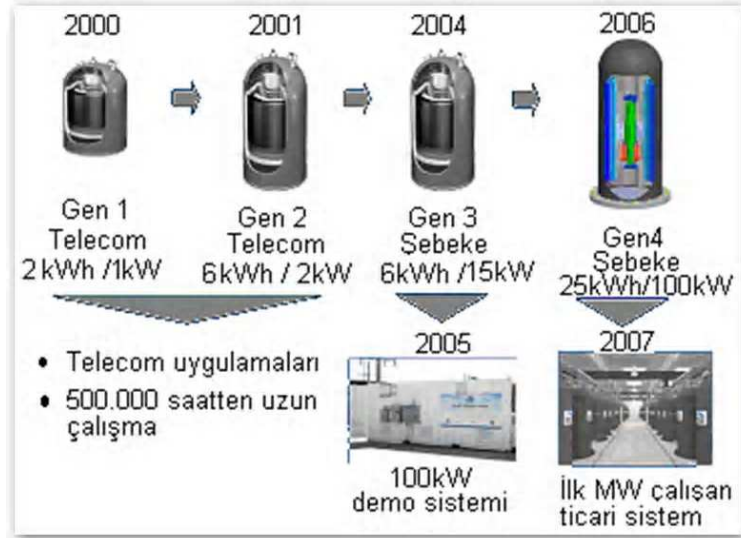
Şekil 3.8 Yüksek ve düşük hızlı Volan Enerji Depolama Sistemleri (FESS) (Furlong vd., 2003).

Çelik malzemeden yapılan düşük hızlı volanlar, genelde devir sayısı 8.000 rpm'e kadar kullanılırlar. Bu tip volanlarda depolanan enerji, rotorun momentumuyla orantılı değil, açısız momentumun karesiyle orantılıdır. Daha çok UPS uygulamaları için tercih edilirler. Kompozit tip yüksek hızlı volanlar ise 25000 – 90000 rpm hızlarında dönecek şekilde tasarlanırlar (Bryan ve Andrews, 2004).

### 3.2.8.3 Klasik ve Yeni Tip Volanların Karşılaştırılmaları

Son zamanlara kadar, güç kalitesi endüstrisinde volan uygulamaları beslemenin kesildiğinde daha uzun süreyle kesintisiz hizmet vermesini sağlayan kinetik enerji depolayıcı çelik kütle bağlantılı motor – jeneratör grupları ile sınırlıydı.

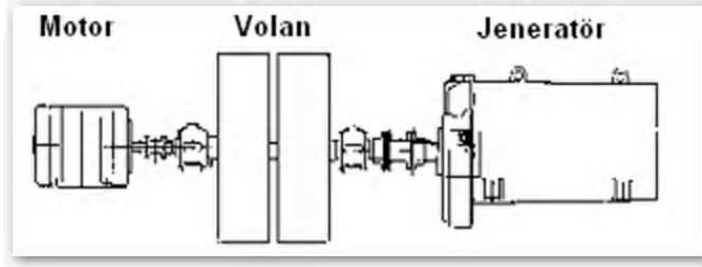
Bu tür sistemlerde anma yükü altında çalışma süresindeki artış nadiren bir saniyeyi aşmaktadır. Bu süre yaklaşık volanda depolanan ek enerjinin %5'inden daha az bir miktarına karşılık gelmektedir.



Şekil 3.9 Volanın evrim süreci.

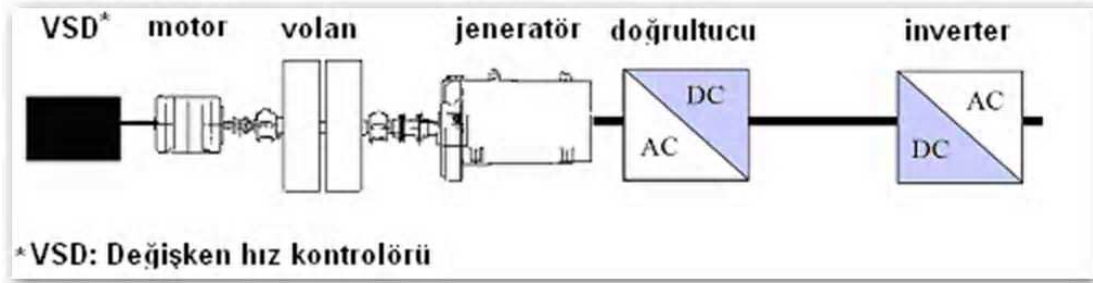
Volandan daha fazla enerjinin çekilmesi, dönme hızının azalması ve buna bağlı elektrik frekansının düşmesi sonucunu doğurur ki bu istenmeyen bir durumdur.

Bu tip sistemler geniş boyutlardaki güç düşümlerine ve kesintilerine karşı yeterli koruma sağlamalarına rağmen sistemde tam bir güç geri kazanımını sağlamaya yeterli değildirler. Şekil 3.10'da gösterilen geleneksel volan sisteminde yapılan birkaç iyileştirme ile depolanan enerjiden geri kazanılacak miktarın artırılması mümkün olmaktadır. Bir jeneratörden elde edilen gerilimin ve frekansın düşmesi, beslemekte olduğu hayati öneme sahip yükler için kabul edilemez bir durumdur. Bu durumu engellemek için volan çıkışı ile jeneratör arasına yerleştirilen bir doğrultucu ile volanın sahip olduğu enerjinin %75'i geri kazanılabilmektedir. Üretilen doğru akımın tekrar şebeke frekansına dönüştürülmesi gerekmektedir. Sisteme eklenen değişken hız sürücüsü sayesinde büyük ataletli motorların düşük hızlardan başlayarak daha yüksek hızlara verimli bir şekilde çıkarılmasını ve bu sayede bir stand by kaynağı olarak daha küçük motorların kullanılabilmesini mümkün kılar.



Şekil 3.10 Geleneksel jeneratör/motor ile akuple edilmiş çelik volan uygulaması (Bryan ve Andrews, 2004).

Şekil 3.11’de görüleceği gibi üzerinde iyileştirilme yapılmış bir volan sistemi, klasik sistemlere göre daha iyi koruma sağlamaktadır. İşletme süresindeki iyileştirmenin yanı sıra ilave devre elemanı maliyeti ve daha fazla yer ihtiyacı ise olumsuz taraflarını oluşturmaktadır.



Şekil 3.11 Değişken hız kontrollü tahrik ve evirici/çevirici elektronik devreler (Bryan ve Andrews, 2004).

Klasik volan sistemlerinin yapım şekilleri dikkate alınmazsa modern teknoloji ile yapılmış olan benzerlerine göre bazı üstünlükleri vardır. Klasik volanlarda kullanılan çelik malzeme, mühendislikte çok bilinen ve bulunması kolay bir malzemedir. Çeliğin bu üstünlüğü tasarımcılara maliyetleri düşürme imkânı sunarken yeterli güvenlik faktörlerinin göz önüne alınmasını da gerekli kılmaktadır. Çelik volanlar kompozit volanlara göre daha ağır fakat daha düşük malzeme dayanımına sahip oldukları için (Çizelge 3.1) daha karışık yataklama sistemleri kullanılması ve nispeten daha düşük hızlarda döndürülmeleri gerekir.

Klasik volanlar modern kompozit volanlara göre daha düşük enerji ve güç yoğunluklarına sahiptir.

Klasik volanlar, genellikle hava ortamında çalışırlar. Bu nedenle daha çok aerodinamik çekme kuvvetlerine ve yüksek gürültüye sebep olurlar.

Çizelge 3.1 Geleneksel volanların olumlu ve olumsuz yanları

Üstünlükleri	Zayıf Tarafları
Çelik – bilinen ve güvenli bir malzeme	Düşük enerji/güç yoğunluğu
Düşük devir sayıları sistemi basitleştirir	Çoklu yataklama yapısı
Pahalı olmayan malzemelerin kullanılması, maliyetleri düşürür	Yüksek aerodinamik gürültü ve çekme kuvveti

#### 3.2.8.4 Volanların Genel Üstünlükleri ve Kullanım Yerleri

Kullanım yerleri,

- Elektriksel araçlarda enerji depolama cihazları olarak kullanılırlar.
- Hibrit kullanımları
  - Kurşun asit bataryalarla otomobillerde,
- Kırsal elektrifikasyon sistemleri (özellikle telekomünikasyon)

Üstünlükleri,

- Enerjiyi yüksek verimlilikte depolarlar,
- Kimyasal bataryalara göre çok daha fazla enerji depolarlar,
- Daha uzun ömürlüdür,
- Çevre sıcaklığından etkilenmezler,
- Daha kısa şarj zamanı ile daha fazla güç verebilirler,

Elektrikli araçlarda, şarj zamanının 1 saat seviyesinden birkaç dakikaya kadar düşürülmesi gereken uygulamalarda tercih edilirler.

Dezavantajları,

- Mevcut volanların özgül enerjisi düşüktür.
- Güvenlik sıkıntıları vardır.
- Yüksek motor hızlarına sahiptir.
- Kırılma olasılığı ve bütün enerjinin kontrolsüz bir şekilde çevreye dağılma riski vardır.

- Teknolojileri henüz olgunlaşmamıştır.
- Ticari rekabet için maliyetleri henüz yüksektir.

Volan, sahip olduğu kinetik enerjiyi jeneratör çalışması sırasında bırakırken hızı enerjisinin azalmasıyla yavaşlar. Bu bakımdan enerjiyi kimyasal olarak depolayan bataryalara göre bir üstünlük arz ederler.

Kullanımları havacılık ve otomobil sektöründe yaygınlaşmış olsa da günümüzde 150 KW ile 1 MW güç arasındaki elektrikli cihaz uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır.

Yüksek hızlı ünitelerin devreye girmesiyle volan uygulamalarındaki yatırım maliyetleri bataryalara göre azalmaya başlamıştır. Ömürleri bataryalardan çok daha uzundur. İşletme maliyetleri de özellikle yoğun yük talebi periyotlarında oldukça düşüktür.

### 3.3 Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Birçok enerji depolama sistemi geliştirilmiş olmasına rağmen hiç biri bütün uygulamaların ihtiyaç duyduğu özelliklere tam olarak sahip değildir. Kullanılacak bir uygulamada hangi depolama teknolojisinin seçileceği teknolojilerin sahip olduğu ortak anahtar özelliklerin karşılaştırılması ile belirlenebilir. Uygulamadaki sistem sayısının azlığı ve bazı teknolojilerin ticari olarak olgunlaşmamış olmaları nedeniyle birtakım ön kabullerde bulunmak gerekmektedir. Bu nedenle tablo 3.2'deki rakamların kesin değerlerden öte ilgili özelliğin göreceli büyüklük sırasını gösterdiği düşünülmelidir.

Depolama teknolojileri birbirlerinden teknik olarak özgül enerji, özgül güç değerleri, enerji kapasitesi ve maksimum depolama süresi bakımlarından farklılık gösterirler. Ekonomik açıdan ise işletme ve kurulum maliyetleri büyük değişiklikler arz eder. Yeni bir seçim yapılacağı zaman her bir enerji depolama sisteminin ilgili uygulamaya uygunluğu dikkatli bir şekilde analiz edilmelidir.

**Yakıt hücrelerinin** gelecekte çok geniş kullanım alanına sahip olacakları düşünülmektedir. Yakıt hücre ürün grubu içinde birçok farklı alt teknoloji bulunduğu için, kapasite bakımından oldukça geniş bir spektruma sahiptirler. Öte yandan sık aralıklarla yenilenmeleri gerektiğinden bakım maliyetleri yüksektir.

Yakıt hücrelerinin yakıt girişleri temiz, atıkları ise oldukça düşük kirletici maddelerdir. Bu nedenle ABD'nin birçok eyaletinde emisyon kriterlerinden muaf tutulurlar. Dolayısıyla yakıt pilleri bu özellikleriyle çevre kriterlerini gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge 3.2 Büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin anahtar özelliklerinin karşılaştırılması (Cheung vd., 2003)

<i>Depolama Yöntemi</i>	<i>Yakıt Hücresi</i>	<i>Volanlar (düşük hız)</i>	<i>Volanlar (yüksek hız)</i>	<i>Hidroelekt. Depolama</i>	<i>Basınçlı Hava Depolama</i>	<i>SMES</i>	<i>Süper kapasitör</i>
<i>Yatırım maliyeti/MW</i>	\$15.000	\$300.000	\$25.000.000	\$7.000	\$2.000	\$10.000	\$28.000.000
<i>Ağırlık/MWh</i>	30 kg	7.500 kg	3.000 kg	-	2,5 kg	10 kg	10.000 kg
<i>Verim</i>	0,45 - 0,8	0,9	0,93	0,8	0,85	0,97	0,95
<i>Bakım maliyeti/MWh</i>	\$10	\$3	\$4	\$4	\$3	\$1	\$5
<i>Bulunabilirlik</i>	Ticari	Ticari	Yeni ticari	Olgun.ticari	Ticari	Ticari	Ticari
<i>Kapasite</i>	0,3-2.000 kWh	50 kWh	750 kWh	22.000 MWh	2.400 MWh	0,8 kWh	0,5 kWh
<i>Ekonomik ömrü</i>	10 yıl	20 yıl	20 yıl	40 yıl	30 yıl	40 yıl	40 yıl

Yakıt hücreleri, elektrokimyasal prosesleri nedeniyle yüksek verime sahiptirler. Diğerlerinin gerektireceğinden daha az yakıtla aynı enerjiyi üretirler. Bu da aynı miktar enerji için daha az karbon emisyonuna neden olmak demektir.

**Volanlar**, az sayıda fakat özel bazı uygulamalar için önemli potansiyele sahiptirler. Özellikle otomobiller, elektrikli raylı ulaşım sistemleri, ticari/endüstriyel asansör, vinç uygulamaları vs. gibi kısa sürelerde büyük güçlerin üretilip/tüketilmesine uygun karakteristikli yük sistemlerinde önemli gelişme sağlayacaklardır. Fakat geniş çaplı enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamaktan uzaktırlar.

Volanların performansı dönme hızlarına bağlıdır. Bunun için de yüksek gerilime ve mekanik kararlılığa dayanacak malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu, daha düzgün ve verimli çalışma sağlayacaktır. Volan enerji depolama sistemleri yaklaşık 10 kW-10 MW güçlerde yaklaşık 300 \$/KW'lık maliyet ile kurulabilmektedir (Cheung vd., 2003). Buda volan teknolojisini incelenen enerji depolama teknolojileri içinde bataryalardan sonra en ucuz ikinci depolama sistemi yapmaktadır.

Ek-1 ve Ek-2'de volanlar 15-150 Wh/kg ve 2-11,9 kW/kg aralığında yerleştirilmişlerdir. Özgül güç kapasitesi bakımından tamamen iki yönlü çalışırlar, hem enerji alırken hem de enerji verirken aynı özgül güç kapasitesine sahiptirler. Ek-1'den görüleceği gibi volanlar alüminyum elektrolitik kondansatörlerden sonra, diğer tekniklerden de yüksek özgül güç değerine sahiptir. 3,6 s - 6 d sürede tamamen deşarj olabilirler (Furlong vd., 2003). Bu özellik onların kısa süreli yüksek genlikli güç kaynağı olarak kullanılabilmelerini olanaklı kılar. Bu nedenle de kısa süreli güç transfer depolamanın üst sınırından, uzun süreli güç transfer bölgesine kullanıma uygundur.

Bitterley US Flywheel System firmasına göre 200 Wh/kg özgül enerji değerine grafit fiber kompozit maddelerin kullanımı ile yakın gelecekte çıkmak mümkün olacaktır. Gelecekte 20.000 Mpa değerlerine sahip muazzam yüksek dayanımlı malzemelerin geliştirilmesi ve

volan üretiminde kullanılmasıyla enerji yoğunluk değerleri önemli ölçüde artacaktır (Furlong vd., 2003). Bu malzemeler çok düzgün tek kristal fiber tellerdir (whisker). Fakat ticari olarak henüz kendilerini kabul ettirememişlerdir.

Günümüzde volanlarla ilgili ilginç bir husus, diğer teknolojilerde olduğu gibi volanlarda güç iletiminin volan yapısında kullanılan maddelerin özellikleriyle değil elektrik makine dizaynı kaynaklı sorunlar nedeniyle sınırlandırılmış olmasıdır. Elektrik makine tasarımı, üretilecek yüksek gücü iletecek nitelikte yapılabilsen, volan sistemlerinde elde edilebilecek özgül güç değeri 30 kW/kg'a kadar çıkabilecektir.

Bataryalarda olduğu gibi volanlarda zamanla bozulma söz konusu olmaz ve yüksek sayıda tam şarj – deşarj çevrimine olanak tanır. Gelişen güç elektroniği, volanların %95'e kadar deşarj olabilmelerini sağlarken bu bataryaların sahip olduğundan çok daha yüksek bir değerdir. Fakat SMES sistemlerde tam deşarj oranı %100'dür. Pratikte ise tam boşalma oranı olarak genelde volanın maksimum dönme hızının yarısına karşılık gelen %75 oranı kullanılır.

Tüm faktörlerin dikkate alınması halinde, hem yüksek enerji hem de yüksek güç transfer kapasitesinin gerekli olduğu enerji depolama tipli bir dağınık enerji üretme sistemi tasarlanacaksa kinetik depolama en etkin teknolojidir. Bunun yanında diğer teknolojilerle kıyaslandığında düşük güç seviyelerinde (<100 kW) volanlar maliyet – etkin çözümler değildir. Bu durumda süperkapasitörler daha etkin çözümlerdir.

Bunlardan öte volanların çevre dostu bir teknoloji olması, uzun yıllar kullanımları nedeniyle haklarında deneyim sahibi olunması ve uzun ekonomik ömürleri bulunması önemli avantajlarındandır. Karışık yapıları nedeniyle kompleks güç ve kontrol elektroniği sistemlerine ihtiyaç duymaları, birçok elemanın belli aralıklarla bakıma ihtiyaç duyması (rulmanlar, vakum pompaları, soğutma fanları, kontrol sensörleri vs), bekleme anındaki yüksek kayıpları (<5%) ve de patlama riskleri sayılabilecek olumsuz özellikleridir.

**Süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri,** enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamaktan öte enerji kalitesini iyileştirici uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır. Bunun nedeni, gerilim değişimlerine karşı çok hızlı cevap verebilmeleri ve sahip oldukları büyük özgül enerji ve özgül güç değerleri nedeniyle çok kısa süreli muazzam miktarlarda akım verme/alma kabiliyetlerinin olmasıdır. Yüksek servis ömrü ve çevre dostu teknolojisi ile nispeten daha küçük çaplı endüstriyel ve KGK uygulamaları için henüz uygulanabilir değildir. Süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerinde süperiletkenliği sağlayan kritik sıcaklık değerlerinin aşılması önemli tehlikelere ve kayıplara neden olur. Direnç

kayıplarında ve soğutma için gerekli enerji konularında iyileştirmeler yapılabilir. Düşük sıcaklıkta bobin komponentlerinin büyük elektrodinamik güçlere karşı kararlılığı henüz yeterince incelenememiştir. SMES temelli sistemler diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında daha pahalı ve daha büyük çalışma hacmine ihtiyaç duymaktadırlar. Süperiletken Manyetik Enerji Depolayıcılar (SMES) 10 – 100 MW arasındaki güçlerde yapılırlar. 1 – 10 MW arasındaki güçler için daha küçük ölçekte uygulamaları da vardır. Bu güç aralığında daha ziyade enerji kalitesi uygulamaları için ticari olarak uygundur.

SMES sistemleri uzun ömürlü olmaları nedeniyle sürekli işletme gerektiren tam çevrimli uygulamalarda kullanılırlar.

**Süperkapasitörler**, elektrik enerjisini iki karbon elektrot arasında oluşturdukları elektrik alanında depolarlar. Yeniden kullanılacağı zaman bir dönüşüm işlemi olmadan buna izin verir. Süperkapasitörleri sınırlandıran elektronik devre tasarımıyla ilgili sınırlamalardır ve bu nedenle de elektronik tasarımları ve temelleri geliştirilmesi gereken ana konulardır.

Süperkapasitörler, süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri gibi çok yüksek özgül güç değerlerine sahiptir. Bu nedenle enerji kalitesi uygulamalarında kullanılabilirler.

Öte yandan süperkapasitör teknolojisinin sahip olduğu diğer avantajlar şu şekilde sıralanabilir: Çevre dostu bir teknolojidir. Çalışma prensipleri nedeniyle bünyelerinde kimyasal bir reaksiyon oluşmadığı için bataryalarda olduğu gibi toksinler, ağır metaller gibi tehlikeli atıklar üretmezler. Hareket eden parçaları yoktur. Bakım masrafları düşüktür. Bekleme anındaki kayıpları 0,2%’nin de altındadır (Furlong vd., 2003). Cebri soğutmaya gerek duymazlar. Enerji depolama/kullanma çevrimleri basittir, kompleks güç elektroniği sistemlerine gerek duymazlar.

Pratik uygulamalar için birçok modülün beraber (seri, paralel bağlı) kullanılması nedeniyle gözlenmesi gereken bir çok elemandan oluşmaları, henüz yeni bir teknoloji olması nedeniyle haklarında fazla deneyimin oluşmamış olması ve ömürleri konusunda onaylanmış uygulamalarının olmayışı süperkapasitör teknolojisinin dezavantajlarıdır.

**Büyük ölçekli enerji** santrallerinde enerji depolama için kullanılacak en uygun metotlar yeraltı termal enerji depolama, hidroelektrik enerji depolama ve basınçlı hava enerji depolama yöntemleridir. Her üç yöntemin de enerji kayıplarının çok az olması bunların yıllık enerji dalgalanmalarını kararlı kılmada bile kullanılabilirlerine imkan tanır.

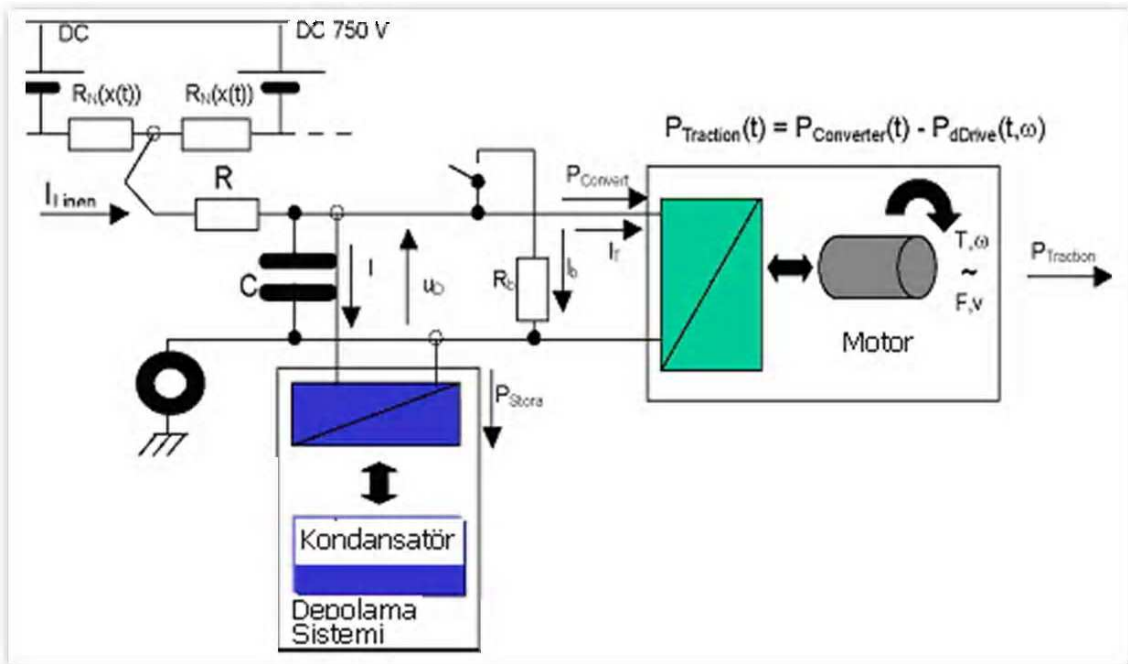
Basınçlı hava ile enerji depolama endüstride oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur. Öte

yandan küçük ölçekli basınçlı hava enerji depolama sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalar daha çok sistem tasarımları ve kontrol stratejileri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yeraltı termal, hidroelektrik enerji depolama ve basınçlı hava enerji depolama sistemleri büyük çaplı sistemlere daha uygundur. Büyük projeler için kullanılmalı ve bu nedenle de büyük yatırımlar gerektirirler. Dolayısıyla uygulama için daha geniş alana ihtiyaç duyarlar. Öte yandan bu üç depolama sisteminin belli jeolojik özelliklere bağımlı olduğu ve sadece coğrafyanın imkan verdiği ölçüde inşa edilebilecekleri unutulmamalıdır.

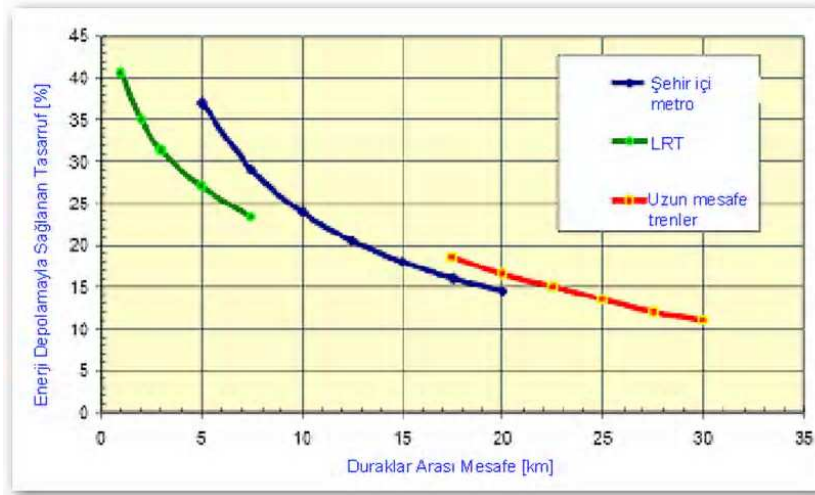
### 3.4 Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Uygulamaları İçin İncelenmesi

Raylı sistemlerde enerji depolama sistemleri, araçların frenlemesi esnasında elektrik motorlarının dinamik frenleme bölgesinde ürettikleri, elektrik enerjisinden faydalanmak amacıyla kullanılırlar. Ortaya çıkan enerji, aracın frenleme ihtiyacına göre belirir. Modern DC sürücülü hız kontrollü makine ve tezgâhlarda da benzer sebeplerden ötürü, açığa çıkan bu enerjiyi tüketen frenleme dirençleri kullanılmaktadır.



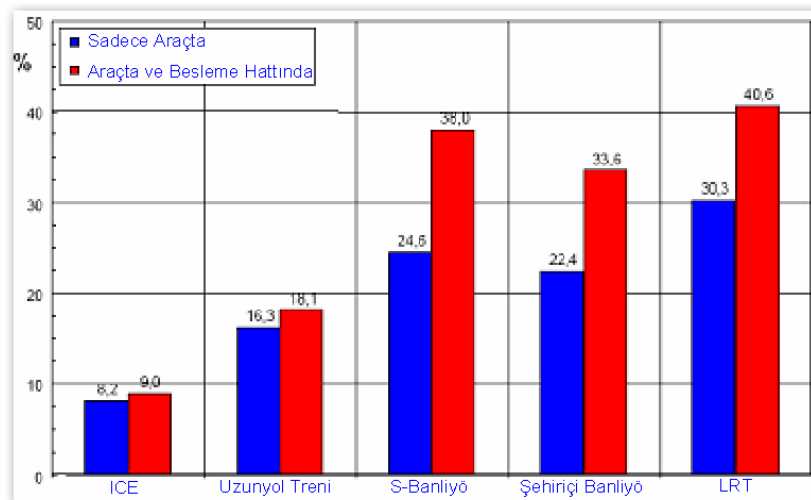
Şekil 3.12 Bir tren aracında enerji depolama sistemi bağlantısı (Caputo, 2000).

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



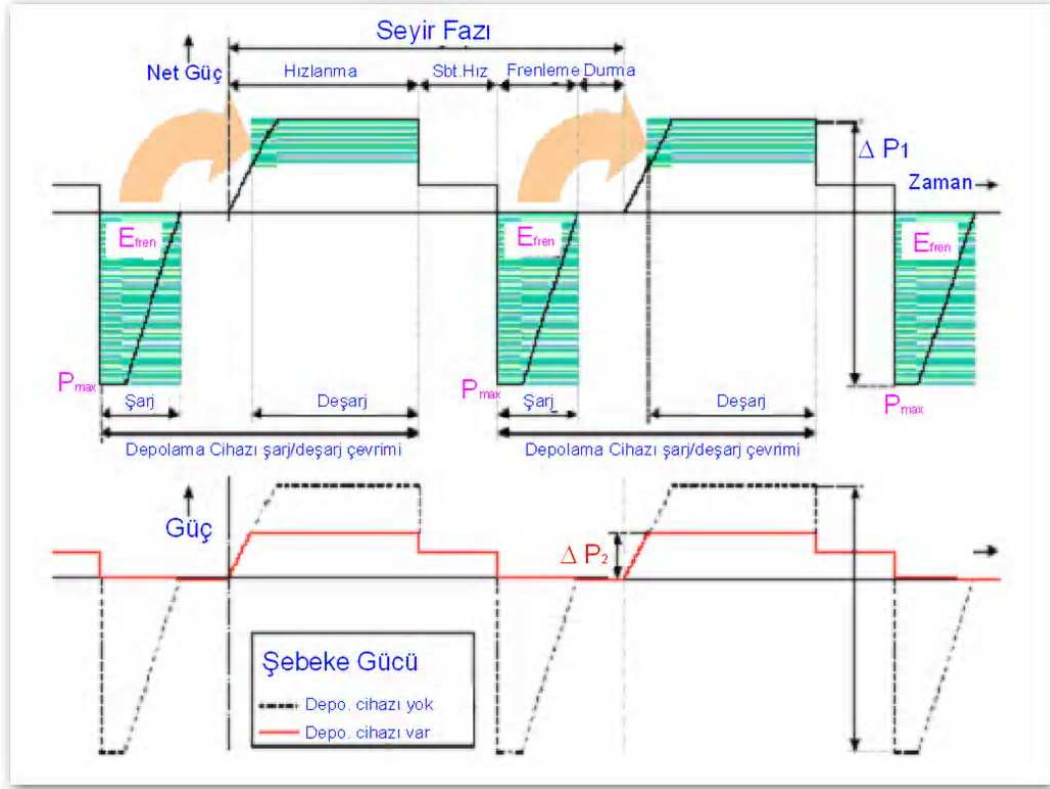
Şekil 3.13 Farklı duruş frekansına sahip raylı ulaşım sistemlerinin enerji depolama kapasiteleri (Caputo, 2000).

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). 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 3.13'de LRV sistemi ve değişik tren grupları için de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.14 Araçlarda ve araçlarla birlikte tesisler üzerinde elde edilen kazançlar (Caputo, 2000).

Şekil 3.15’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 olacaktır.



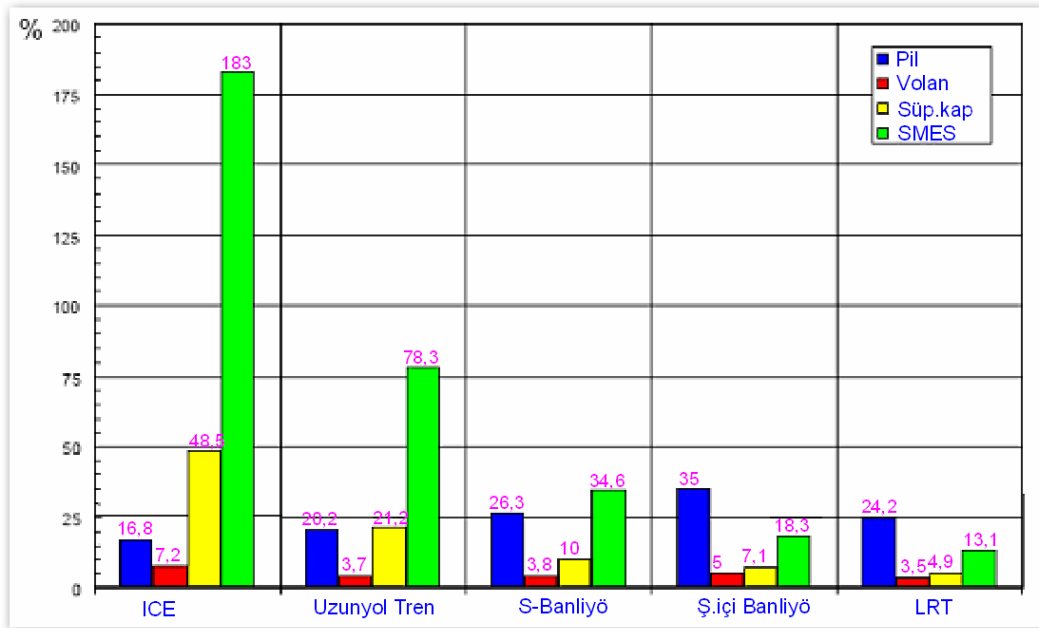
Şekil 3.15 Bir tren hareketi sırasında enerji sarfiyatı ve depolaması (Caputo, 2000).

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 zamanını demek olan frenleme zamanını belirler.

Konuyla ilgili yapılan araştırmalar frenleme enerjisi depolama uygulamaları için en iyi teknolojinin volanlar ve süperkapasitörler olduğunu göstermiştir. Şekil 3.16 farklı tren

gruplarında oluşmakta olan frenleme enerjisinin depolanabilmesi için gerekli olan EDS kütlesinin araç toplam kütlesine oranını vermektedir. Burada mavi renk EDS içinde batarya, kırmızı renk volan, sarı renk süperkapasitör, yeşil renk ise SMES kullanılması durumunda trenin kütlesine oranla gerekli olacak EDS kütlesini göstermektedir. 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.



Şekil 3.16 Tren gruplarına ve EDS teknolojilerine göre EDS kütlesi/tren kütlesi karşılaştırması (Caputo, 2000).

### 3.4.1 Raylı Sistemlerde Örnek Bir Volan Uygulaması

2002 yılında Almanya Hannover’de yapılan bir çalışma elektrikli kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji depolama cihazlarının kullanımının büyük faydalar sağlayacağını göstermiştir.

Çalışma işletme gerilimi 680 V olan bir LRV sisteminde iki komşu istasyon (Fasanenkrug ve Buchholz) arasında yapılmıştır. Her biri AC sürücü ile tahrik edilen 4 ayrı vagonlardan oluşan iki trene birer adet “Piller” firmasının ürettiği teknik özellikleri çizelge 3.3’de verilen volanlar monte edilmiştir.

Tren Fasanenkrug istasyonu bitiminden başlayarak hızlı bir şekilde 0’dan 60km/h hıza

çıkarılmış, tam hıza ulaştığında aniden frenlenmiştir. Bu esnada gerilim ve akım değerleri trenlerde, Buchholz cer istasyonunda ve volanın bağlandığı DC barada ölçülmüştür. Bu arada volanların hızları da ölçülmüştür. Ölçümler her defasında volanlar devredeyken ve devrede değilken olmak üzere iki kere yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20’de verilen grafiklerde ayrı ayrı gösterilmiştir (RWE Piller, 2002).

Çizelge 3.3 Hannover LRV sistemi çalışmasında kullanılan volanların teknik özellikleri

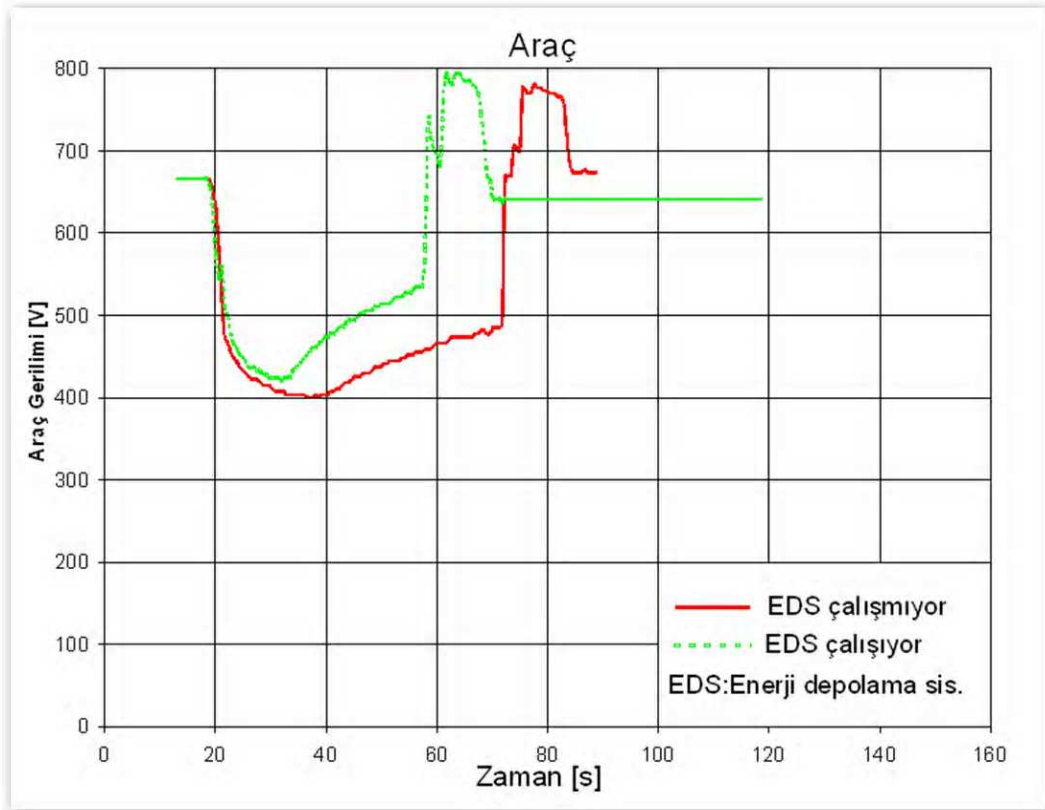
Üretici firma	:	Piller
Nominal gerilim	:	600V-750V (1500V)
Nonimal güç	:	1000kW, 1670kVA
Akım	:	1500A
Devir aralığı	:	3300-1800min-1
Enerji depolama kapasitesi	:	16,5MJ (4,6kWh)
Ağırlık	:	6000kg
Rotor ağırlığı	:	2950kg
Çalışma sıcaklığı	:	0-40°C
Gürültü seviyesi	:	<74dB(A)
Standby şarjı	:	5-10kW
Gerekli hava sirkülasyonu	:	9000m <sup>3</sup> /h

Ölçüm sırasında araç girişindeki gerilim değeri değişimi Şekil 3.17’de görülmektedir. Burada yeşil renk ile ifade edilen eğri enerji depolama sistemi (volanlar) devrede iken alınan sonuçları, kırmızı ile ifade edilen eğri ise depolama cihazının çalışmadığı durumu göstermektedir.

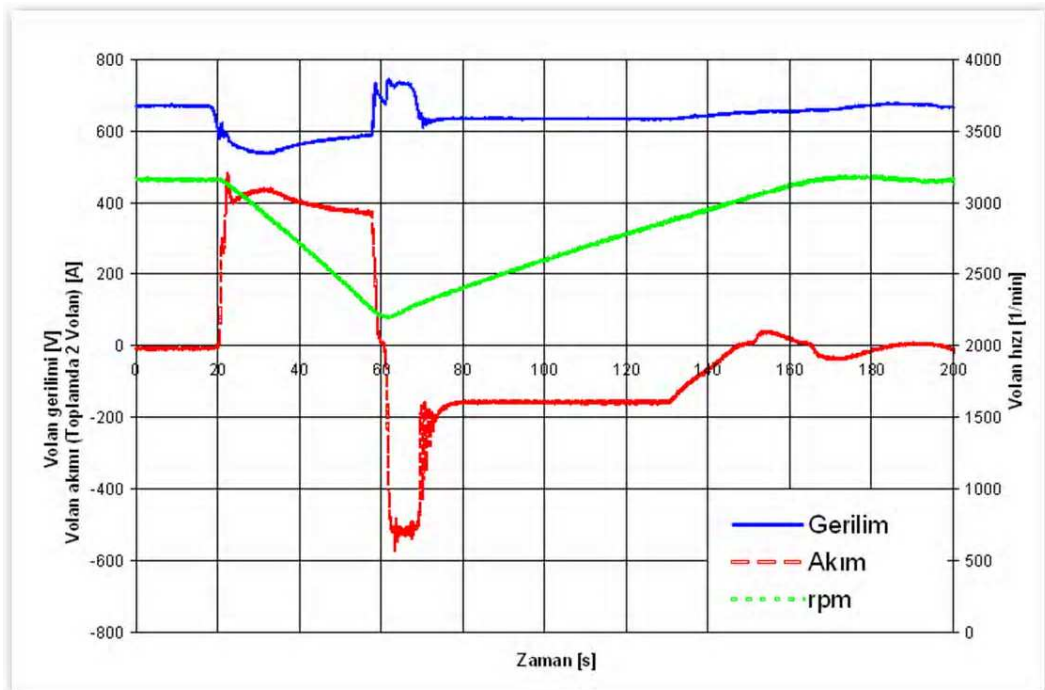
Grafikten de kolayca görülebileceği gibi enerji depolama cihazı çalışırken araç tam hıza daha çabuk ulaşmıştır. Ayrıca yavaşlama periyodunda volan frenleme enerjisini depolamıştır.

Daha sonra volanların akım, gerilim ve hızlarının ölçülmesi için örnekleme periyodu 1 saniye olan bir cihaz kullanılmıştır. Bu cihazla bir işletme gününe ait veriler alınmış ve aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Volanın dinamik karakteristiği 1 saniyelik örnekleme hızından çok daha fazla olması nedeniyle ölçüm sonuçları gerçek değerlerinden farklı olmakla birlikte genel trendi göstermesi açısından önemlidir.

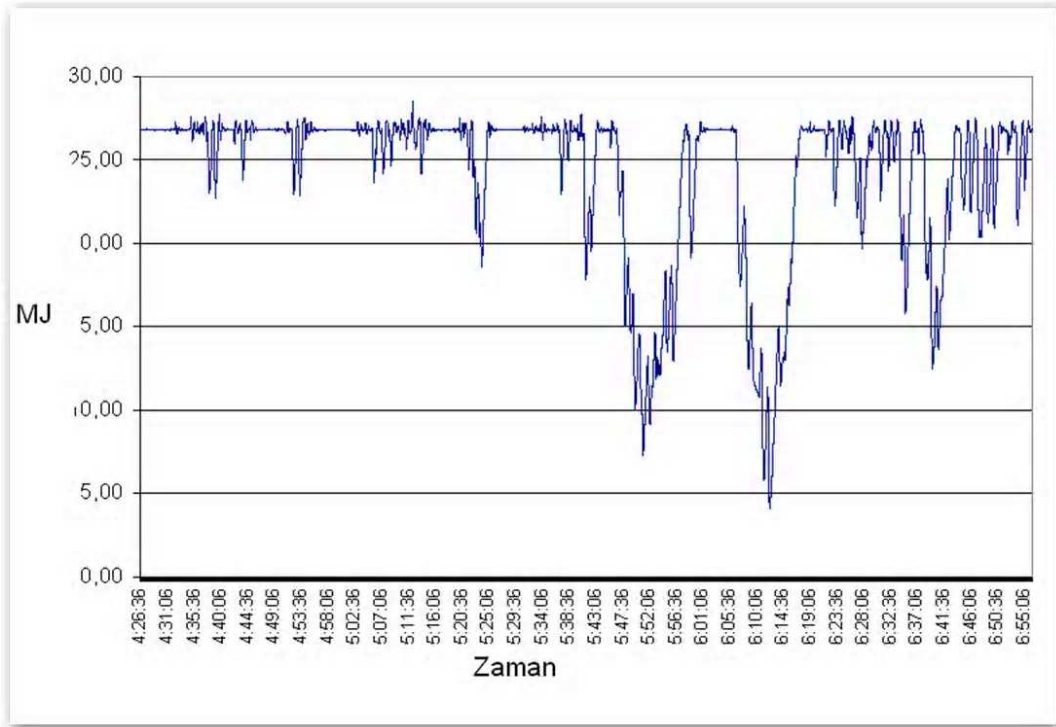
Volanlar gerilim değerleri 620V’a düştüğünde deşarj, 695 V’ta yükseldiğinde şarj olacak şekilde ayarlanmışlardır. Hat geriliminin 620V ile 695V arasında olması durumunda volanlar nominal işletme hızlarına çıkabilmek için gerekli enerjiyi en yakın cer istasyonundan alırlar (RWE Piller, 2002).



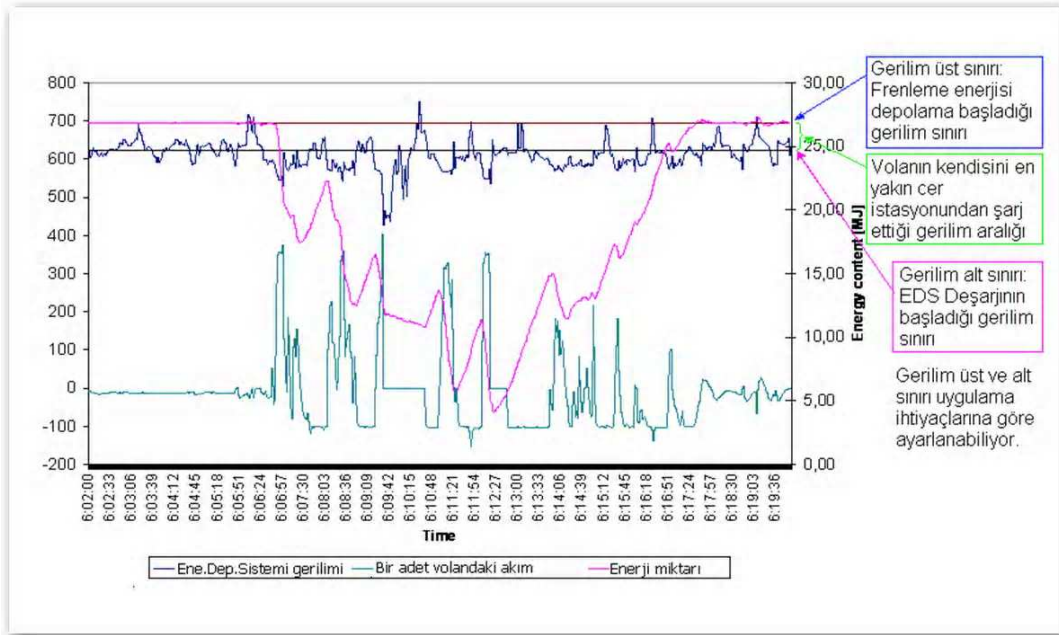
Şekil 3.17 İşletme modlarına göre (EDS çalışıyor/çalışmıyor) araç gerilimi değişimi (RWE Piller, 2002).



Şekil 3.18 Enerji depolama cihazları çalışırken akım, gerilim, d/d (rpm) değişimleri (RWE Piller, 2002).



Şekil 3.19 Depolanan enerji miktarı – zaman (RWE Piller, 2002).



Şekil 3.20 Toplam enerji miktarı, bir volana ait gerilim ve akım değerleri (RWE Piller, 2002).

#### 4. FRENLEME ENERJİSİ POTANSİYEL BELİRLEME ÇALIŞMASI

Çalışmada İstanbul kent içi raylı ulaşım sistemlerinin önemli bir halkasını oluşturan hafif metro sistemi araçları incelenmiştir. Söz konusu sistemin işletme ve aracın teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 4.1 İstanbul LRV sistemi teknik verileri

<b><i>Kataner enerjisi:</i></b>	
Hattın normal gerilimi	750 VDC
Hattın maksimum gerilimi	825 VDC
Hattın minimum gerilimi	500 VDC
Hattın akımı	386 A
Elektrodinamik frenlemedeki hattın gerilimi	900 VDC
<b><i>Tahrik Motoru Verileri:</i></b>	
Araçtaki toplam motor gücü	4x75 KW
Armatür akımı min./max	252 A/460 A
Motor kontrol akımı	195 A
Motor gerilimi	320 V
Modül kontrol akımı	193 A
Frenleme diyot akımı	160 A
Uyarma alan akımı	16,9 A
Motorun nominal devir sayısı/max. devir sayısı	2200 / 4580 d/d
<b><i>Aracın Ulaştığı Değerler:</i></b>	
Max. ivmelendirme oranı	0–35 km/h
Max. durdurma ivmesi oranı	1,14 m/s <sup>2</sup>
<b><i>Ray Seviyesinde Harcanan Enerji:</i></b>	
İvmelendirmede harcanan	3,86 kWh
Dinamik frenlemede harcanan	2,41 kWh
<b><i>Kıyıcıdaki Enerji:</i></b>	
İvmelendirmedeki giriş enerjisi	4,78 kWh
Dinamik frenlemedeki çıkış enerjisi	1,96 kWh
<b><i>Pantograftaki Enerji:</i></b>	
Harcanan enerji	5,21 kWh
Geri verilen enerji	1,71 kWh
Geri verilen enerji oranı	32,78%
İvmelendirme süresi	63,2 sn
Frenleme süresi	19,9 sn
Durma süresi	20,0 sn
Toplam süre	103,2 sn
İvmelendirme mesafesi	947 m
Frenleme mesafesi	222 m
Toplam mesafe	1169 m



oluşturmaktadır. Burada,

P	: Pantograf	OCH	: Yüksek gerilim kıyıcısı
LA	: Yıldırıma karşı koruyucu	MC	: Motor modül kontaktörü
MIS	: Ana izolatör ayırıcısı	FD	: Serbest geçiş diyotu
CF	: Şarj ünitesi koruma sigortaları	TCH	: Ana kıyıcı
CC	: Şarj kontaktörü	TMI	: Tahrik motor endüktansı
CR	: Şarj direnci	AW	: Armatür sargıları
MCB	: Ana devre kesicisi	FW	: Uyarma sargıları
LL	: Hat endüktansı	PC	: Motor kontaktörü
LC	: Hat kapasitansı	BD	: Frenleme diyotları
BR	: Frenleme direnci	ED	: Topraklama ünitesi

Pantograf (P), aracın üst kısmının arka bogisinin üzerine monte edilmiştir. Görevi, 750 VDC kataner hattından araca enerjinin iletilmesini sağlamaktır.

Ana izolatör ayırıcısı (MIS), tipik elektrik devre ayırıcılarına benzer. Eğer araçta çalışma yapılacaksa ayırıcı açılarak pantografla ana devreyi birbirinden ayırır ve hat kapasitesini boşaltır.

Ana devre kesicisi (MCB), araçtaki güç devresinin en önemli koruma elemanıdır. Temel vazifesi aşırı yüklenme veya herhangi bir arıza durumunda aracın güç sistemini besleme kaynağından ayırmada kullanılır. Esas itibariyle bir DC kontaktörden ibarettir. Arıza durumunda 5–9 ms arasında açılma emrini alır. Açılma emri akım seviyesinin belli bir değere ulaşmasına müteakip verilir. Yeniden kesici kapanmadan sürücü tarafından resetlenmesi gerekir. Reset sinyali ana devre kesicisindeki bir resetleme bobini ile sağlanır (ABB Traction, 1989).

Hat filtresi, bir endüktans bobini ile bir hat kapasitansından oluşur. Temel görevi, kıyıcı tarafından oluşturulan ve DC bileşen üzerine binen harmonikleri azaltmaktır. AC devrede oluşan harmoniklerin de toplam harmoniği artırıcı etkisi vardır. Toplam harmoniğin belli bir değer üzerinde çıkması durumunda haberleşme ve kontrol sistemlerinin olumsuz şekilde etkilenmesi olasıdır.

Hat filtresi hem ivmelenme hem de elektrodinamik frenleme modunda devrededir. Ana devreler, aktif hale geçmeden önce hat kapasitesi doldurulur. Kapasite büyük olduğu için yüksek bir akımla dolar. Akım değerinin MCB'yi açtırmasına mani olmak için kapasiteye seri

CR şarj direnci bağlanmıştır. CR, şarj kontaktörü (CC) ile anahtarlanmaktadır ve sadece LC şarj olurken devrededir.

Tüm bu işlemler otomatik olarak tahrik bilgisayarından kontrol edilmektedir. Şarj kontaktörünün (CC) kapatılması ardından şarj kapasitesi (LC) gerilimi artacaktır. Bu değer 500 VDC'e ulaştıktan 1,5 sn sonra kontrol sistemi ana devre kesicisine devreyi kapatma emri verecektir (ABB Traction, 1989).

DC tahrik motorları, araca ihtiyacı olan itme gücünü sağlarlar. Serbest uyarımalı DC motorlardan oluşmuştur. Her bir araçta ikişer adet DC motor içeren iki adet motor modülü vardır. İki motorun armatür devreleri seri bağlıdır. Tek bir DC/DC kıyıcısı ile beslenir. Bunların uyarıma sargıları da seri bağlıdır ve bir doğrultucu devresi ile beslenirler. Her iki modül de birbirinden bağımsız olarak araç bilgisayarı tarafından kumanda edilirler.

Tahrik motoru kıyıcıları, temel görevleri hat gerilimini kontrol ederek tahrik motorlarına uygulamaktır. GTO tristör ve diyotlardan kurulu yarı iletken DC/DC kıyıcı devrelerden oluşurlar. Hat gerilimi değişik oranlarda kıyılarak motor armatür devresine filtre edildikten sonra uygulanırlar. Şekil 4.1'de aracın iki kıyıcı ünitesiyle dört adet DC motorun nasıl beslendiği gösterilmiştir. Her bir kıyıcıda bir GTO tristör ve bir serbest geçiş diyotu vardır (ABB Traction, 1989).

DC tahrik motoru uyarıma alan doğrultucusu, esas itibariyle DC motorun uyarıma alanı akımını kontrol etmede kullanılır. Dört ana tristör içeren köprü doğrultucu temeline dayanır. Araç bilgisayarı, bir referans sinyalle doğrultucudan alınan akımı her bir motor modülünün uyarıma alanına uygulayarak uyarıma akımını kontrol eder.

Motor modül kontakları, ana devrenin ivmelendirme modunda çalışmasını sağlar. Kontaklar ivmelenme durumunda kapatılırken elektrodinamik frenlemede açılırlar. Kontaklar bilgisayardan aldığı emre göre kapanmakta ve içinden akım geçtiği sürece hiç açılmamaktadır. Bilgisayar, armatür akımını kontrol ederek armatür kıyıcı ünitesine bloke edilmesi durumunda kontakları açtırmaktadır.

Motor modül kontaklarının ana amacı, motor modülünü herhangi bir arıza anında veya test durumunda elektriksel olarak ana devreden ayırmaktır.

Faz endüktansı, motordaki akım dalgalanmasını sınırlandırarak komütatörde ark oluşmasına mani olmaktadır. Bu nedenle her kıyıcı ünitesi fazında bir adet bulunmaktadır. Akım dalgalanması, motor çalışma modunda veya frenleme modunda ayarlanır (ABB Traction,

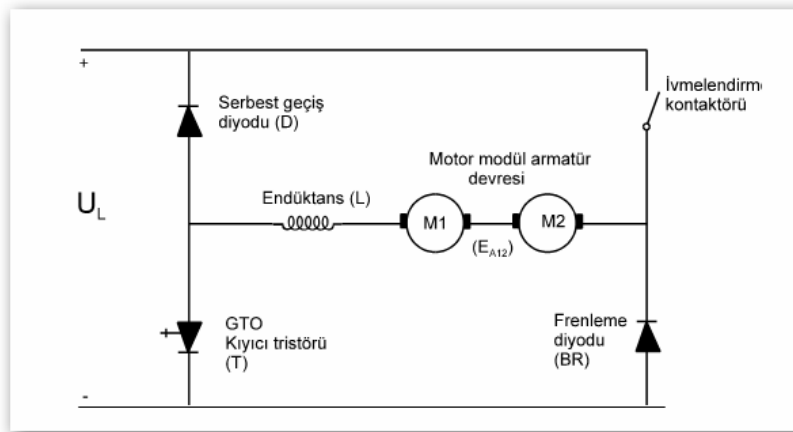
1989).

Frenleme direnci (BR), aracın elektrodinamik frenleme nedeniyle geri kazanacağı enerjinin hat geriliminin sınır değerine ulaşması durumunda hatta enjekte edilemeyeceği kısmının ısıya çevrilerek harcanmasını sağlar. Frenleme dirençleri, motor modüllerinin her frenleme sırasında meydana getirecekleri gücü kaldırabilecek büyüklükte tasarlanırlar.

Aşırı akım koruma devresi, ana devrede oluşacak bir elektriksel arızanın giderilmesi için kullanılır. Akım değeri üst sınıra ulaştığı zaman aşırı akım rölesine paralel bağlı bir devre aracılığı ile kontrol sistemi uyarılır, kontrol sistemi de devreyi açmakla görevli eleman olan ana devre kesicisini (MCB) açtırarak aşırı akıma karşı motor modülleri koruma fonksiyonunu yerine getirmiş olur.

Aşırı gerilim koruma devresi, nominal işletme gerilimi aralığı üzerinde oluşacak aşırı gerilimlerin emniyetli bir biçimde bertaraf edilmesini sağlar. Gerilimin aşırı yükselmesi çeşitli nedenlerden ötürü olabilir. Mesela kataner hattına düşecek bir yıldırım hat gerilimini çok yükseltebilir. Bu tip aşırı gerilime karşı korunma yıldırım parafudurlarıyla sağlanır. Ayrıca ana devrede aşırı gerilime karşı bir de koruyucu üniteler bulunur. Bu ünite bir tristöre seri bağlı bir dirençten ibarettir. Bu devre hat kapasitesine paralel bağlanmıştır. Gerilim değerinin belirlenen sınırlara ulaşması durumunda tristör tetiklenerek direnç üzerinden koruma altına alınır (ABB Traction, 1989).

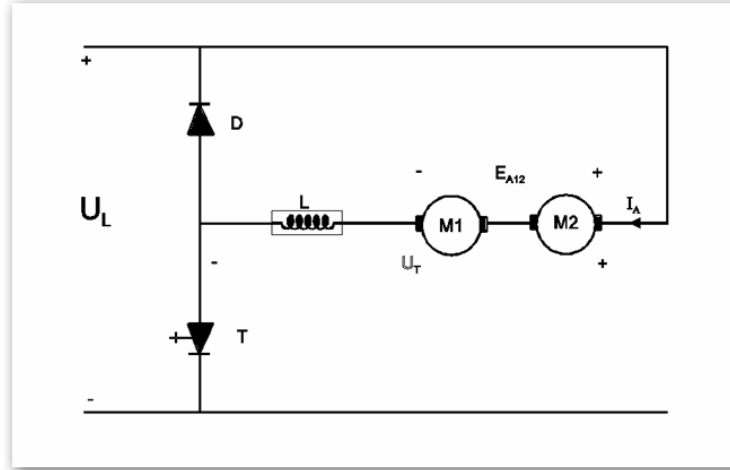
#### 4.1.2 İvmelenme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi



Şekil 4.2 LRV aracı motor modülü ivmelendirme, frenleme devresi.

Bu ünitenin amacı, belirtildiği gibi, DC olan hat gerilimini daha düşük ve kontrol edilebilir gerilim seviyelerine indirerek DC motorların armatür sargılarını beslemektir. Bu darbeler

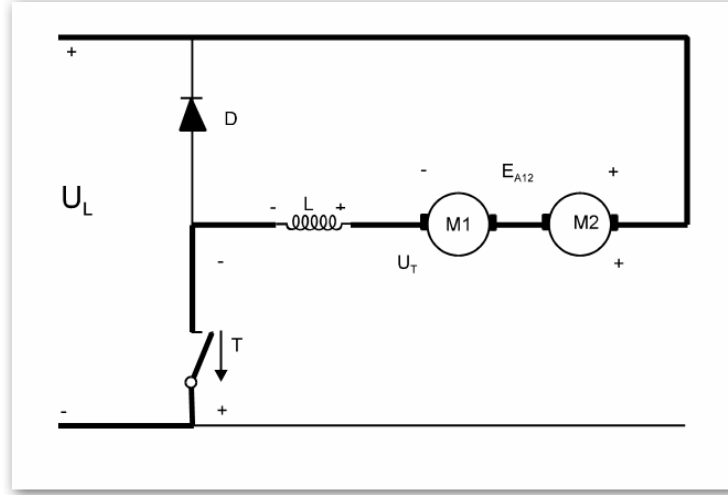
motorun armatür devresini beslemeden önce filtre edilirler. Araçların ana devresi, iki kıyıcı üniteden oluşmuş her bir motor modülünün armatür devresi bir kıyıcı ünitesinden beslenmektedir (ABB Traction, 1989). Güç modu için basit bir kıyıcı devresi Şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 İvmelenme modunda kıyıcı eşdeğer devresi.

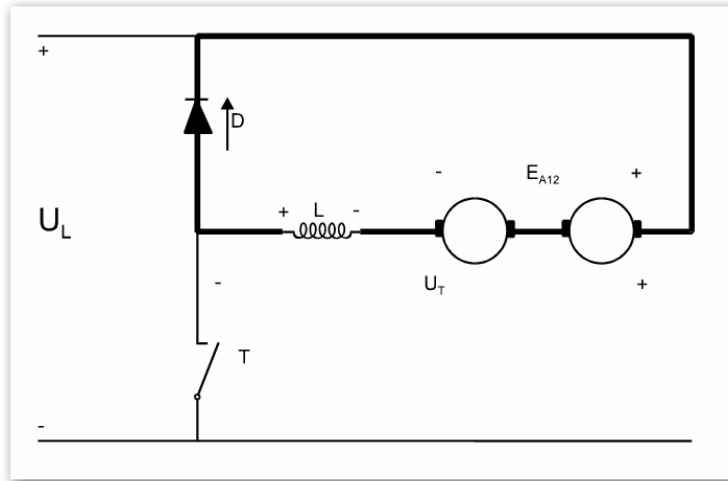
$U_L$  hat gerilimi olup, ünitenin giriş tarafına uygulanan gerilimdir. Kıyıcının çıkış gerilimi  $U_T$  gerilimidir.  $U_T$  geriliminin, motorda bir DC bileşeni ve  $L$  bobininden dolayı da AC bileşeni mevcuttur.

Motorun armatür devresine, kıyıcı tarafından oluşturulan sert darbeleri filtre etmek için, bir  $L$  bobini seri bağlanmıştır. Kıyıcı ünitesi, GTO tristörü  $T$ 'nin iletim ve tıkama durumlarının, ortalama saniyede birkaç yüz devirle değişmelerine izin vererek çalışır. Motor durduğu zaman, sıfır hızda indüklenmiş EA gerilimi sıfırdır. Bu sebepten dolayı kıyıcı, motoru sadece  $(R \cdot I_A)$  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 4.4 İvmeleme modunda akım yolu.

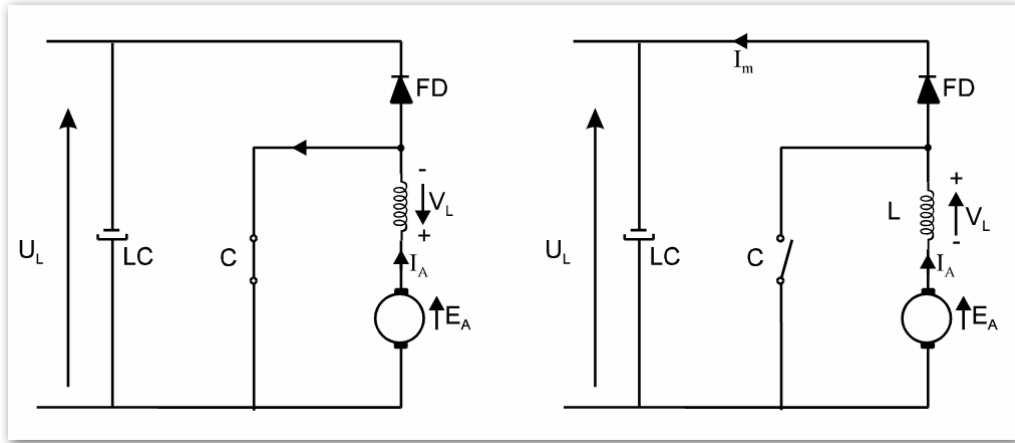
Şekil 4.4'de, kıyıcı devresinin ivmelendirme durumunu göstermektedir. Kalın çizgiler GTO tristörü ilettime geçtiği andaki akım yolunu gösterir. GTO, ilettime çok kısa süre için geçirilir ve sonra yeniden tıkamaya sokulur. GTO tıkamaya girdiğinde, Şekil 4.5'deki akım yolunu izler.



Şekil 4.5 Serbest geçiş aralığında akım yolu.

GTO tıkamaya girdiği zaman, akım, yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Akım, GTO 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.

### 4.1.3 Frenleme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi



Şekil 4.6 (a) C kontağı kapalıyken  $I_A$  şarj akımı, (b) C kontağı açıkken  $I_m$  faydalı frenleme akım.

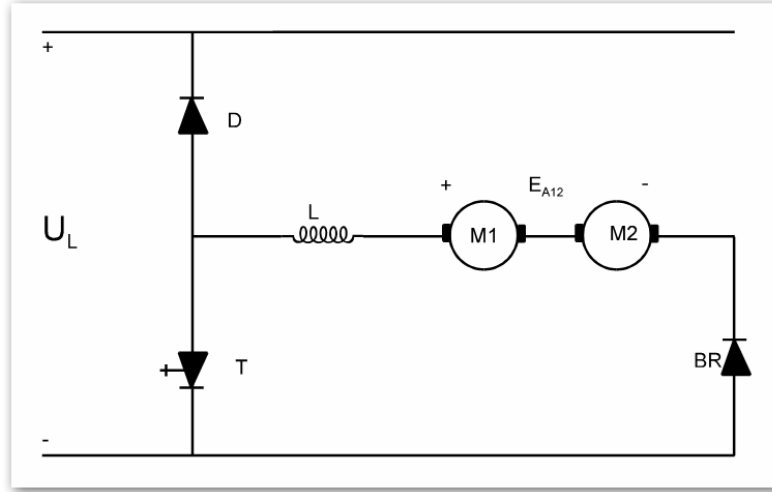
Kıyıcılar, frenlemede hat akımını kısa aralıklarla kıyarak endüktans bobini üzerinden motora uygularlar. Eğer  $E_A$  armatür gerilimi,  $U_L$  hat geriliminden küçükse, motor akımı hattı beslemeye başlar.

Şekil 4.6'da frenleme devresi ve gerilim, akımın zamana bağlı olarak değişim grafikleri verilmiştir. C kontağı kapalı olduğu zaman, motorun endüktansında ( $L$ ) enerji depolanır. C kontağı açıldığı zaman bu enerji hatta geri verilir. Endüktans, C kontağının durumuna bağlı olarak polaritesini değiştirir ve üzerinden akım her zaman aynı yönde akar. C kontağı kapandığı zaman gerilim frenleme diyotundan (polaritesi değişmiş olan  $BD$ 'den) geçer ve motoru hattan ayırır.

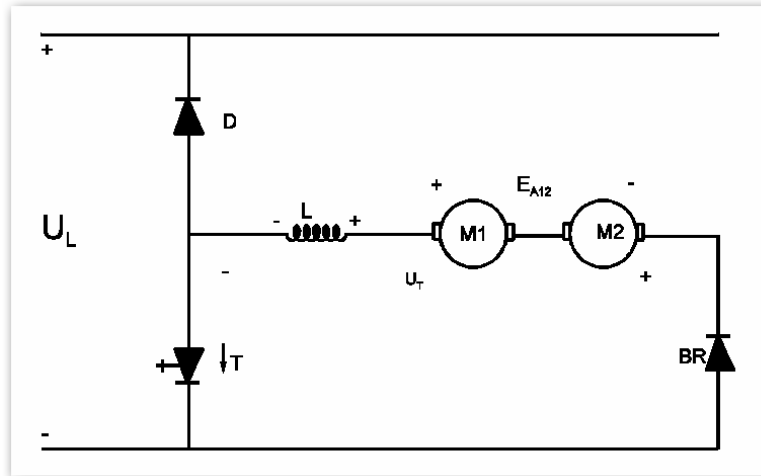
Elektrodinamik frenlemedeki kıyıcı devresinin çalışma prensibi, ivmelendirme modundakiyle aynıdır. Frenleme modunun ivmelendirme modundan farkı, motor geriliminin polaritesinin ters olmasıdır.

Motor yüksek devirde çalışırken uyarma alanına akım verildiğinde, motorun  $E_A$  gerilimi birkaç yüz volta ulaşır ve GTO bobinle motora bağlanır.

GTO iletme geçtiği an armatür akımı ivmelendirme durumundaki gibi artacaktır. Şekil 4.8'de, frenleme konumunda armatür akımının izlediği yol kalın çizgilerle ifade edilmiştir.



Şekil 4.7 Frenlemede kıyıcı devresi (Akım sıfır olana kadar).

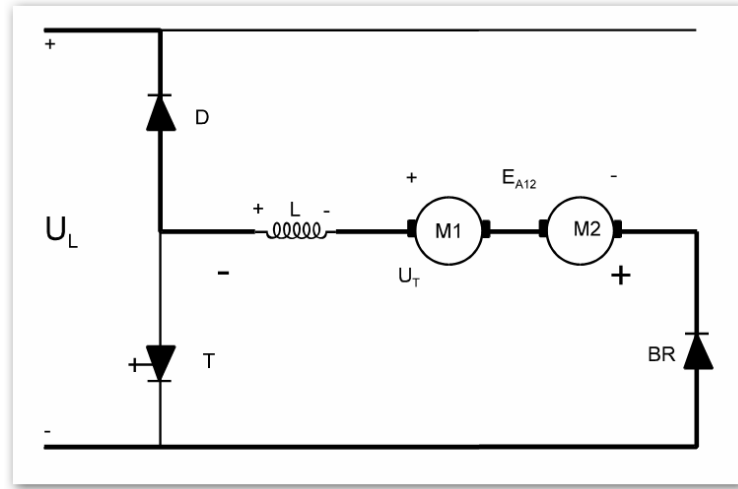


Şekil 4.8 Kıyıcının frenlemede izlediği akım yolu.

GTO tıkamaya girdiğinde, armatür akımı belirli bir oranda düşecek ve yolunu Şekil 4.9'da gösterildiği gibi tamamlayacaktır.

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.

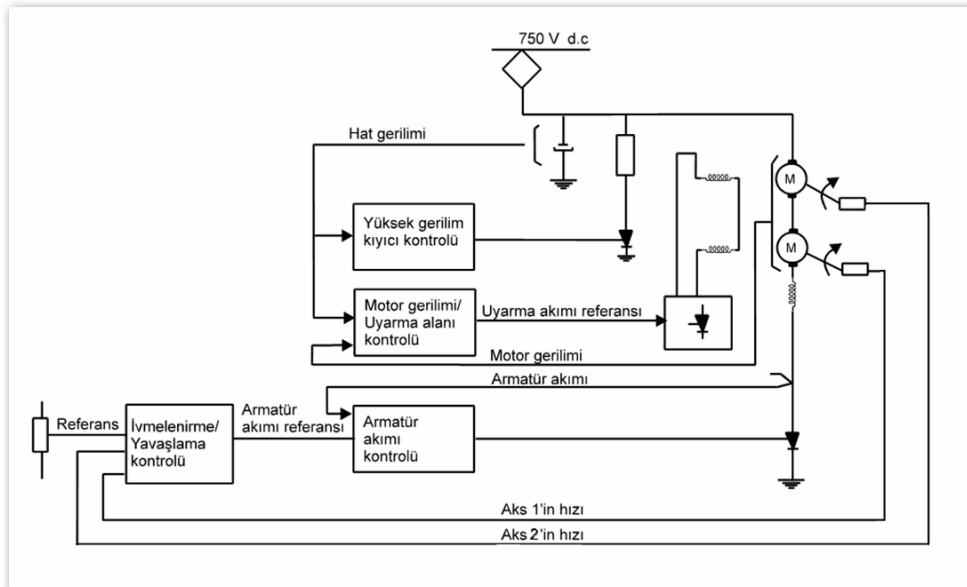


Şekil 4.9 GTO tıkamadayken akım yolu.

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

#### 4.1.4 Kontrol ve Denetleme Sistemleri

##### 4.1.4.1 Kontrol Prensipleri



Şekil 4.10 Tahrik sisteminin kontrol devresi.

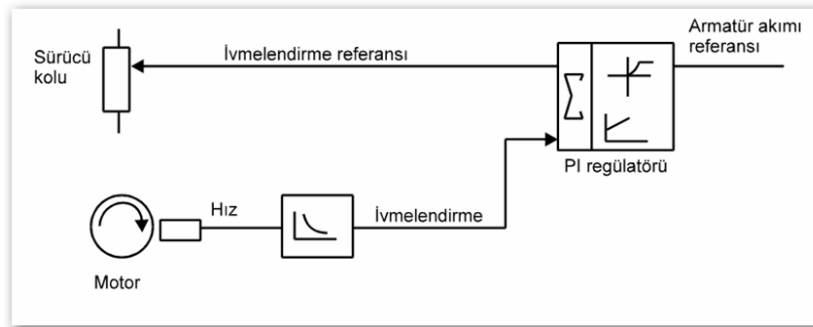
Sürücü kabinindeki sürücü koluyla istenilen oranda değiştirilen hızlanma ve yavaşlama

ivmesi bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Hızlanma-yavaşlama durumundaki ivme referansları, armatür akım referansına dönüştürülür. Yavaşlama ivmesinde, mekanik frenleme referansı hesaplanır ve armatür akım referansıyla, armatür akım kontrolü beslenir (ABB Traction, 1988).

Tahrik motorlarında moment, armatür akımı ile uyarma akımına bağlıdır. Düşük hızlarda uyarma alan akımı (akı) sabit tutulur ve moment armatür akımı vasıtasıyla değiştirilir. Akımın sabit tutulmasıyla motor gerilimi hızla artarak hat gerilimi değerine ulaşacaktır. Aslında motor geriliminin (temel hız bazında) hat gerilim seviyesine erişmesine izin verilmez. Her iki büyüklüğün arasında küçük bir fark her zaman için bırakılır. Motor gerilimi hat gerilimi seviyesine ulaştığında kıyıcı çıkış gerilimi maksimum değerine ulaşır ve hız artırılamaz. Bunun nedeni ise motor geriliminin hızla artmasıdır. Aracın hızının temel hız değerinin üstüne çıkarılabilmesi için uyarma alan akımı (akı) temel hız seviyesinin üstünde azaltılır. Bu durumda motor gerilim değeri düşmeye başlar. Frenleme modunda mekanik frenleme kontrol altına alınır. Elektriksel frenleme (elektrodinamik frenleme) maksimum seviyede uygulanır. Yetersiz olduğunda buna mekanik frenleme de eklenir.

Elektriksel frenleme süresince motordan hatta geri verilen enerji nedeniyle hattın gerilimi yükselir. Hattın geriliminin fazla yükselmesini engellemek için yüksek gerilim kıyıcı ünitesi bulunmaktadır. Bu ünite yüksek gerilim kıyıcı kontrol ünitesiyle kontrol edilir. Şekil 4.10'da tahrik kontrol sistemi gösterilmiştir. Şekil sadece bir motor modülü içindir.

#### 4.1.4.2 İvmelendirme Kontrolü



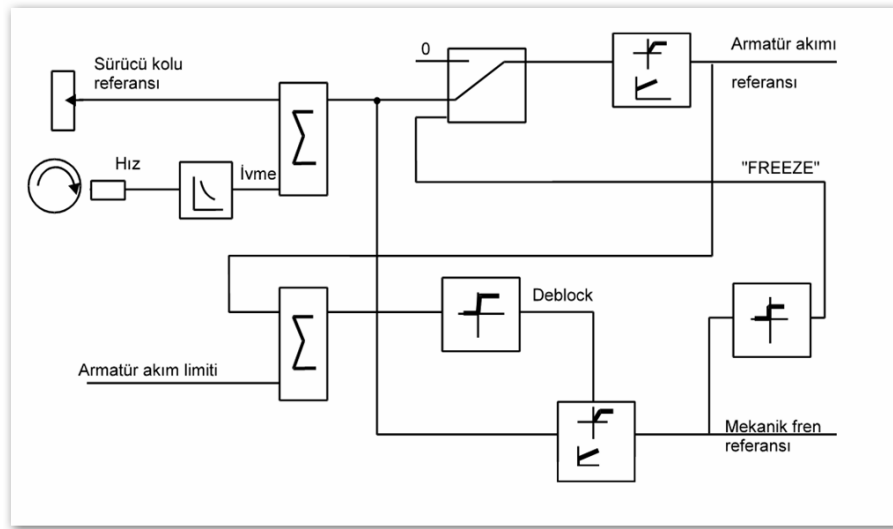
Şekil 4.11 İvmelendirme kontrolü.

İvmelendirme konumunda ivme PI regülâtörü ile kontrol edilir (Şekil 4.11). Sürücüden gelen referansa göre hızın türeviyle karşılaştırılarak PI regülâtörüne gönderilir. İvmelendirme modunda regülâtörün çıkışından alınan armatür akım referansı armatür akım kontrol ünitesine

gönderilir. İvme kontrolü için kullanılan hız 3. ve 4. aksların maksimum hızlarıdır. Bunun sebebi 3. ve 4. aksların tahrik edilmemeleri nedeniyle serbest olmaları ve bu nedenle de kaymaya sebebiyet vermemesidir. İvmelendirme kontrolü bilgisayardaki ivmelendirme kontrol lojjiyle oluşturulmuş programla kontrol edilir (ABB Traction, 1989).

#### 4.1.4.3 Yavaşlatma İvme Kontrolü

Fren modunda yavaşlatma ivmesi PI regülâtörü tarafından kontrol edilir. Sürücüden gelen referans hızın türevi ile karşılaştırılmakta ve PI regülâtörüne gönderilmektedir. Frenleme sırasında regülâtörün çıkış seviyesi armatür akımını belirler ve bu akımla frenleme armatür akım kontrolünü besler. İzin verilen maksimum akıma ulaşıldığında daha fazla yavaşlama ivmesi gerekiyorsa mekanik frenleme de devreye sokulur (ABB Traction, 1989).

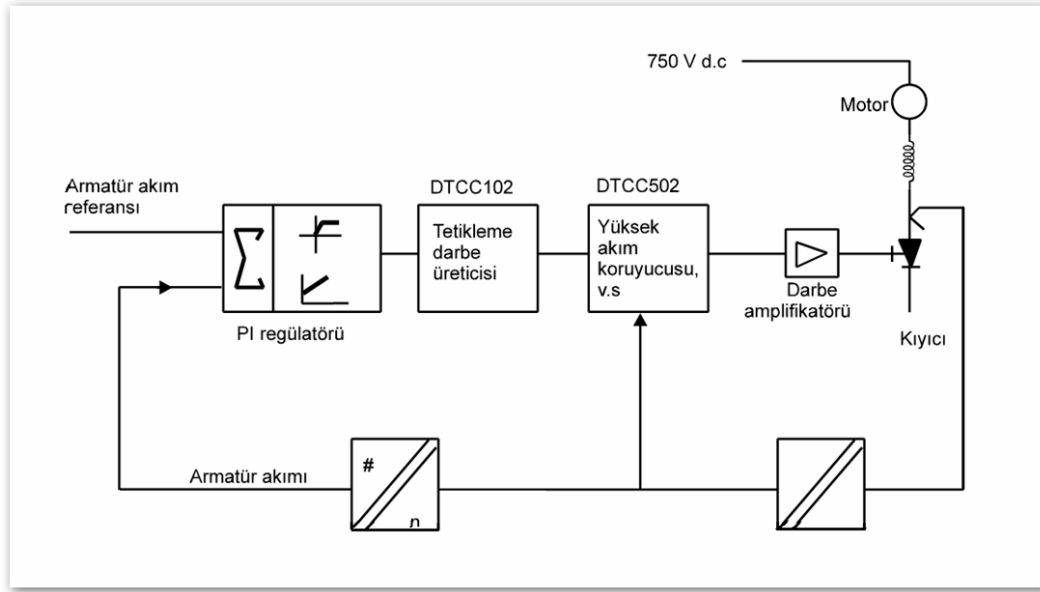


Şekil 4.12 Yavaşlatma ivmesi kontrolü.

“DEBLOC” sinyali gerçekleşerek mekanik fren kontrolü serbest bırakılır. Mekanik fren referansı sıfırı geçer geçmez “FREEZE” sinyali gerçekleşir. Bu sinyal armatür akım referansını sabit tutarak mekanik frenleme referansının tekrar sıfır olmasına kadar sürer. Bunun bu şekilde olmasının nedeni yavaşlamayı kontrol edecek iki regülâtörün aynı anda birlikte çalışmasının mümkün olamamasındandır. Bu nedenle elektriksel fren etkili olduğu sürece uygulanır ve ihtiyaç olduğunda mekanik fren devreye sokulur. Mekanik fren devreye girdiğinde armatür akımı sabit tutulur. Yavaşlatma ivmesinin kontrolü için kullanılan hız bütün aksların maksimum hızıdır. Bunun sebebi kullanılan hızın kayan bir akstan gelmesini önlemektir. Yavaşlatma ivmesinin kontrolü bilgisayardaki yavaşlatma lojji programıyla kontrol edilir (Şekil 4.12) (ABB Traction, 1989).

#### 4.1.4.4 Armatür Akım Kontrolü

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi hızlanma ve yavaşlama ivmelerinin kontrolündeki armatür akım referansı armatür akım kontrolüne gönderilir ve ölçülen armatür akımıyla karşılaştırılır. Elde edilen sonuç PI regülâtörüne gönderilir. PI regülâtöründen gelen çıkış kıyıcıdaki GTO’nun iletme girme süresiyle orantılı olmalıdır. Tetikleme zamanı armatür akım kontrolü ünitesinden gelir ve bu sinyal DTCC 102 A bilgisayar bordundan üretilir. Bu bordtan GTO için tetikleme darbeleri üretilir. Bu tetikleme darbeleri DTCC 502 A borduna gider ve bu bord aynı zamanda aşırı akıma karşı korumayı sağlar (ABB Traction, 1989).



Şekil 4.13 Armatür akım kontrolü.

DTCC 502 A kartından alınan darbeler kıyıcıdaki GTO’ya bağlanmış olan bir darbe amplifikatörüne gönderilir. Armatür akım kontrolü bilgisayar tarafından aşağıdaki düzende oluşturulur:

- IA12P: Güç konumunda motor modül 1’de armatür akım kontrolü
- IA34P: Güç konumunda motor modül 1’de armatür akım kontrolü
- IA12B: Frenleme konumunda motor modül armatür akım kontrolü
- IA34B: Frenleme konumunda motor modül armatür akım kontrolü

#### 4.1.4.5 Motor Gerilimi Kontrolü – Uyarma Alanı Kontrol

Önceki bölümde belirtildiği üzere tahrik motorunun gerilimi motor hızı ve akısıyla orantılıdır. Akı veya uyarma alanı akımı sabit tutularak motor geriliminin hızla birlikte

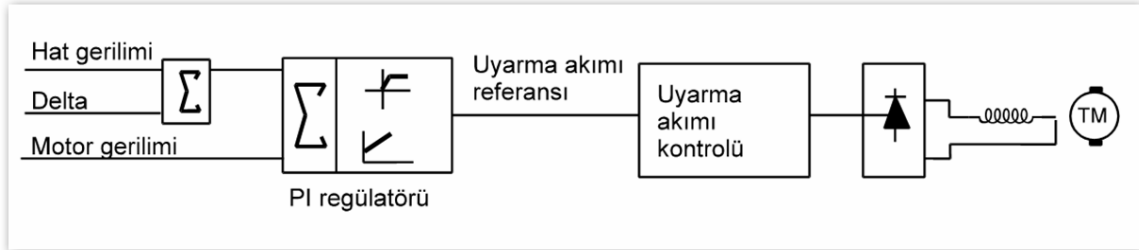
artması sağlanır.

Motor geriliminin hat gerilimini geçmesine müsaade edilmemelidir. Bu nedendir ki kontrol sistemi motor gerilim kontrol sistemini kapsamı içine alır.

Kıyıcı ünitesi tetiklendiğinde kıyıcının çıkış gerilimi uzun bir süre artırılamayacaktır. Motor gerilimi hızla birlikte artar. Dolayısıyla eğer bir sinyal alınmazsa hız da artmayacaktır. Hızın temel hıza kadar artmasına izin verilir. Bu kontrol sistemi uyarma alanının kontrol sistemini de içerir.

#### 4.1.4.6 İvmelendirme ve Frenleme Durumunda

İvmelendirme ve frenleme konumunda motor gerilimi hattın gerilimiyle karşılaştırılır ve elde edilen karşılaştırma değeri PI regülâtörüne gönderilir. Eğer motor gerilimi hat gerilimi değerini aşarsa  $\Delta$  kadar bir azalma sinyali gönderilerek PI çıkışındaki uyarma akımı referansı azaltılır ve buna bağlı olarak da motor gerilimi azaltılır (Şekil 4.14). PI çıkışındaki uyarma akımı referansı uyarma alanı akım kontrolünü besler. Motor geriliminin ivmelendirme ve frenleme konumundaki kontrolü bilgisayar tarafından aşağıdaki sırayla kontrol edilir (ABB Traction, 1989):



Şekil 4.14 Uyarma alanı güç ve frenleme modu kontrolü

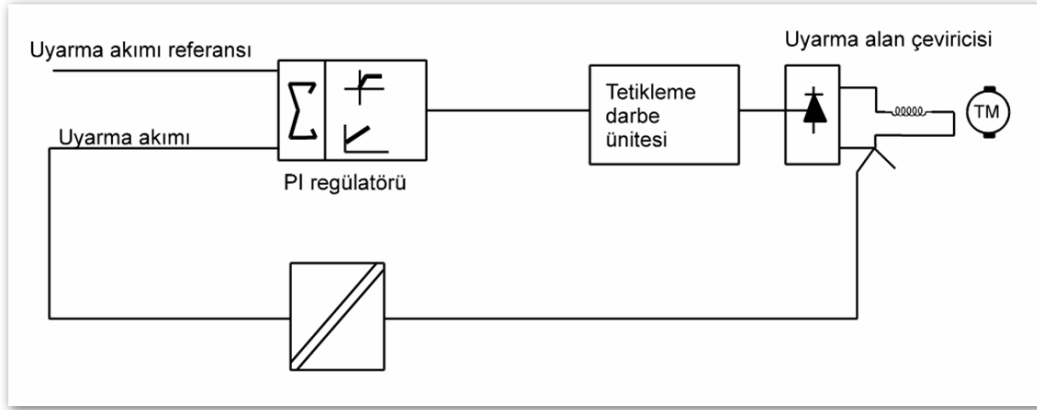
VC12P : Motor modülü 1'in motor gerilim kontrolü ivmelendirilme durumunda

VC34P : Motor modülü 2'nin motor gerilim kontrolü ivmelendirilme durumunda

VC12B : Motor modülü 1'in motor gerilim kontrolü frenleme durumunda

VC34B : Motor modülü 2'nin motor gerilim kontrolü frenleme durumunda

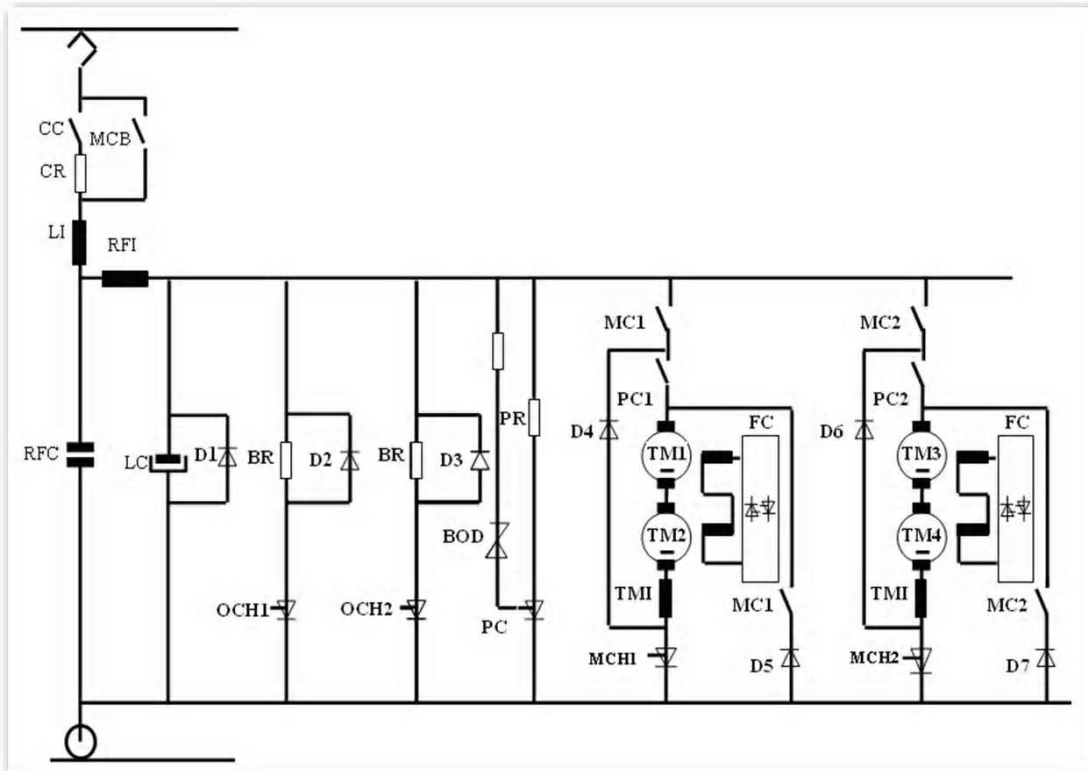
#### 4.1.4.7 Uyarma Alan Akımının Kontrolü



Şekil 4.15 Uyarma alanı akım kontrolü

Uyarma akımı kontrolü Şekil 4.15'deki blok şemada gösterildiği gibi yapılmaktadır. Bu kontrol uyarma alanı çeviricisinde bulunan analog yöntem kullanılarak yaptırılır. Bu sistem bilgisayar tarafından yapılmaz. Uyarma akım referansı bilgisayarın motor gerilimi-uyarma alanı kontrolü kısmından gelir (ABB Traction, 1989).

#### 4.2 Faydalı Frenleme Enerjisi Ölçüm Yöntemleri

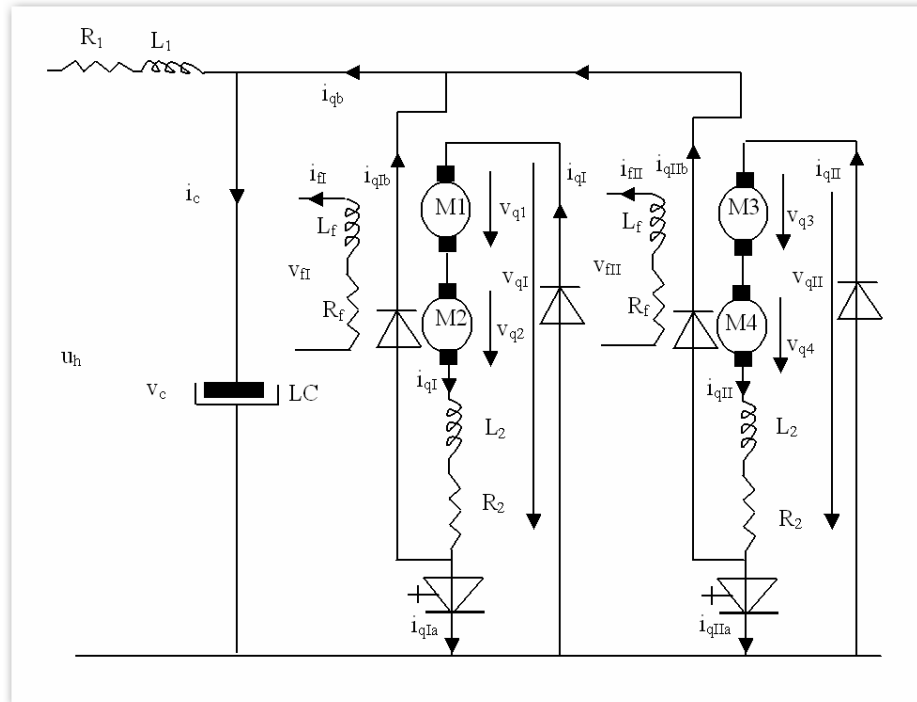


Şekil 4.16 LRV aracı tahrik sistemi güç devresi.

Daha önce belirtildiği gibi, frenleme sırasında motordan akım çekilerek jeneratör olarak çalışması sağlanmaktadır. Motorların frenleme yapabilmesi için moment yönlerinin değiştirilmesi gerekmektedir. GTO'dan sadece bir yönde akım akabileceği için momentin çarpımdaki diğer bileşeni olan uyarma akımının yönü değiştirilmelidir. Uyarma devresi birbirine zıt paralel bağlı bir faz tam dalga kontrollü doğrultuculardan oluştuğu için uyarma akımındaki yön değişikliği bir doğrultucu grubundan diğerine geçilerek sağlanabilir. Bu amaçla önce motorun endüvi akımının sıfıra gitmesi sağlanır. Daha sonra ise uyarma akımı, bir doğrultucu grubu kesime gittikten sonra ters bağlı diğer doğrultucu grubun iletime geçirilmesi ile ters çevrilir. Endüvi akımı hala aynı yönde akmakta olduğuna göre motorların momentlerinin ve indüklenen gerilimlerinin yönü değiştirilmiş olur.

Frenleme sırasında PC1 ve PC2 anahtarları açılarak motorun endüvi akımı için iki yol sağlanır. Bunlar:

- GTO'ların iletimde olduğu MCH1 ve MCH2 GTO'ları ile D5 ve D7 diyotları üzerinden motorların frenlendiği,
- GTO'ların kesimde olduğu D4, D5, D6 ve D7 diyotları, LC kondansatör grubu ve motorlardan oluşan yol olup, frenleme akımını DC şebekeye basan indüklenen gerilimin  $V_c$  den büyük olduğu zaman geçerli olan yoldur.



Şekil 4.17 Frenleme durumunda eşdeğer devre.

### ***GTO'nun İletim Durumu***

GTO'ların iletimde olduğu durumda genel denklemlerde,

$$v_{qI} = 0 \quad (4.1)$$

$$v_{qII} = 0 \quad (4.2)$$

$$i_q = i_{qI} = i_{qII} \quad (4.3)$$

ve  $\phi$  yön değiştirdiği için  $e_b$  de yön değiştireceğinden ifade

$$2 R_q i_q + 2 L_q \frac{di_q}{dt} + R_2 i_q + L_2 \frac{di_q}{dt} = e_b \quad (4.4)$$

Şeklini alacaktır. Biriktirilen enerji GTO'lar yardımı ile kontrollü olarak motor sargılarında ısıya dönüştürülür. Bu arada kondansatör hat gerilimi tarafından doldurulacaktır. Yani,

$$i = i_c \quad (4.5)$$

olup hat gerilimi ile kondansatör gerilimi arasındaki transfer fonksiyonu (4.6)'daki gibi olur.

$$V_c(s) = \frac{1}{s^2 L_1 C + s R_1 C + 1} U_h(s) \quad (4.6)$$

### ***GTO'nun Kesim Durumu***

GTO kesime gittiği anlarda ise yukarıda bahsedilen kapalı akım çevrimlerinden,

$$v_c + 2 R_q i_{qI} + 2 L_q \frac{di_{qI}}{dt} + R_2 i_{qI} + L_2 \frac{di_{qI}}{dt} = e_{bI} \quad (4.7)$$

$$v_c + 2 R_q i_{qII} + 2 L_q \frac{di_{qII}}{dt} + R_2 i_{qII} + L_2 \frac{di_{qII}}{dt} = e_{bII} \quad (4.8)$$

denklemleri yazılabilir. Bu durumda eşdeğer devredeki akım denklemi de,

$$\left. \begin{array}{l} i_c = i + i_{qI} + i_{qII} \\ i_q = i_{qI} = i_{qII} \end{array} \right\} \Rightarrow i_c = i + 2i_q \quad (4.9)$$

şeklindedir. Bu durumda kondansatör grubu hem hat gerilimi hem de makinelerin frenleme akımları tarafından beslenecektir.

$$V_c(s) = \frac{1}{s^2 L_1 C + s R_1 C + 1} U_h(s) + \frac{2(s L_1 + R_1)}{s^2 L_1 C + s R_1 C + 1} I_q(s) \quad (4.10)$$

Buradaki  $2I_q$  DC bataryaya aktarılan akımdır. Frenlemede elektriksel frenleme gücünün yetersiz kalması durumunda mekanik disk fren kontrollü olarak devreye girer. İstenen frenleme ivmesi bu şekilde sağlanır.

Buradan da görülebileceği gibi frenleme enerjisinden GTO'ların kesimde olduğu durumda yararlanabilme ihtimali vardır. Çünkü kondansatör gerilimi (LC) ve hat gerilimi (UH) arasındaki ilişki faydalı frenlemeden ne kadar yararlanılabileceğini belirler. Her t anında hat gerilimi ve kondansatör gerilimi bulunulan besleme bölgesi içindeki araçların o anki konumu ve çalışma moduyla ilişkilidir. Eğer hattan yük çekilmekte ise hat gerilimi düşecektir. Bu araç tarafından üretilen frenleme enerjisi faydalı olarak kullanılacak, aracın hat kondansatörü bir gerilim kaynağı gibi hattı besleyecektir.

Fakat frenleme esnasında aynı besleme bölgesinde akım çeken başka bir araç yoksa hat gerilimi yükselmeye başlayacaktır. Dolayısıyla hat kondansatörünün gerilimi de yükselecektir. Bu süreç kondansatör geriliminin maksimum set değerine ulaşmaya kadar sürecektir. Hat kondansatör gerilimi limit değere ulaştığında araç kontrol sistemi hat gerilim yükselişini durdurmak için ortaya çıkan fazla enerjiyi araç üstünde yer alan BR frenleme dirençleri üzerinde yakar. Dirençler OCH1 ve OCH2 kısıyıcılarının ilettime geçirilmesiyle devreye girer.

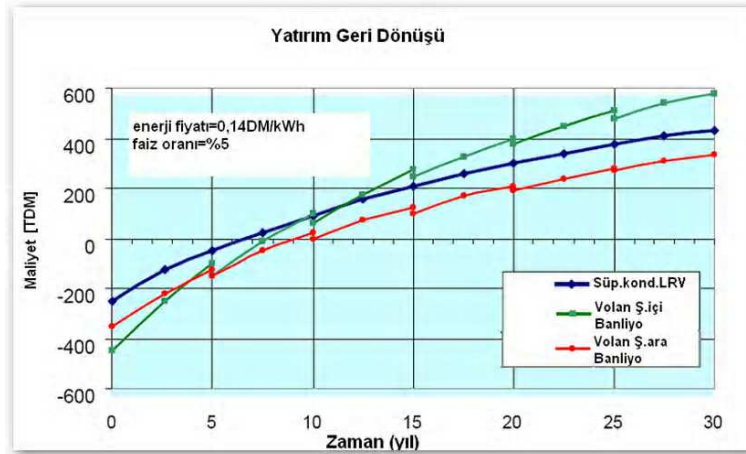
Aracın frenleme esnasında ürettiği faydalı frenleme enerjisi miktarını belirleyebilmek için kullanılması muhtemel ölçüm yönteminde motor gerilimleri, hat gerilimi, hat kondansatör gerilim değerleri eş zamanlı olarak bir data logger ile toplanır, elde edilecek veriler incelenecek olursa frenleme enerjisinden ne oranda yararlanılabileceği deneysel olarak da bulunabilir.

## 5. SONUÇLAR

Şehir içi elektrikli ulaşım sistemleri gibi kısa mesafeli sistemlerde enerji akışı, sık sık yapılan hızlanma ve yavaşlama nedeniyle çok daha düzensizdir. Bu nedenle aracın ve sabit tesisin enerji gereksinimini ortalama gücün üstünde belirlemek gerekmektedir. Bunun sonuçları yüksek enerji kaybı ve yüksek gerilim değişimleri ile kendini göstermektedir. Araçlarda kurulacak uygun enerji depolama sistemleri ile enerji akışını daha düzgün bir hale getirmek büyük avantajlar sağlayacaktır.

Hafif raylı sistemler üzerinde yapılan birçok çalışma enerji depolama sistemlerinin işletme maliyetleri yanında yatırım maliyetlerinde de önemli tasarruflar sağladığını göstermiştir. Enerji depolama sisteminin boyutlarını belirleyen etkenler trafik hattı (duraklar arası mesafe, durak sayısı, hattın eğimi, maksimum hız, izin verilen frenleme hızı) ve işletme programıdır. Sabit enerji tesislerini genişletmeden enerji depolama sistemleri ile daha efektif araçlara ulaşmak mümkündür.

Enerji depolama sistemlerinin faydaları arasında en önemlileri sağlayacağı enerji tasarrufu ve enerji sistem kararlılığını artırmalarıdır. Fakat bu faydaların ekonomik getirisi depolama sistemi kurulum ve işletme giderleri nedeniyle azalacaktır. Bu nedenle işletme giderlerindeki muhtemel tasarruflar ilk yatırım maliyetleri ile dengelenmek zorundadır. Zamanın fonksiyonu olarak kredi dengesi, tasarruf edilecek enerji, depolama ekipmanı, işletme, vs gibi tahmin edilebilir maliyetler, faiz oranları gibi finansal koşullar, bakım masrafları vs gibi güvenilirlikle ilgili maliyetler ve araca ilave edilen ek kütlenin sebep olacağı maliyetler gibi faktörler de dikkate alınarak hesaplanır.



Şekil 5.1 Farklı demiryolu sistemleri arasında enerji depolama sistem yatırım geri dönüş karşılaştırması (Caputo, 2000).

Şekil 5.1’de işletme süresi boyunca tipik yatırım kredi dengesinin süperkondansatör ve volanlarla donatılmış değişik tip kısa mesafeli trenler için değişimleri verilmiştir.

Caputo’ya (2000) göre enerji depolama sisteminin amortisman süresi aracın toplam ekonomik ömrünün %10 ila %30’u arasında, araç tipine ve depolama sistemine bağlı olarak değişmektedir. Kütle, hacim, güvenilirlik, bulunabilirlik, güvenlik ve fiyat gibi konularda depolama teknolojilerinin daha da geliştirilmesi ile şüphesiz ki bu oran iyileşecektir.

Kısa mesafe trenler için araç üzerinde kurulacak depolama sistemleri ekonomik ömürleri süresince oluşacak maliyetlerin azaltılması bakımından daha uygun bir yöntemdir. Araç üzerinde tesis edilen sistemler frenleme enerjisini bir sonraki ivmelenme periyodunda yeniden kullanabilir ve bu şekilde enerji tüketimini %35 nispetinde düşürebilirler (Caputo, 2000). Bunun yanında güç piklerini düşürmesi nedeniyle hat kayıpları da düşecektir.

Sağlanacak enerji tasarrufu sayesinde düşük işletme maliyetleri ve daha düşük yatırım maliyeti söz konusu olacaktır.

Günümüzde yapılan çalışmalar bu tip raylı sistemlerde depolama sisteminin geri dönüşü 3 ila 10 yıl arasında olacağını göstermektedir (Caputo, 2000). Enerji depolama sistemleri, belli bir uygulama için ekonomik hale geldiği zaman ticari ürünlere dönüşecektir. Bunun için enerji depolama sisteminin tesisine karar vermede dikkate alınacak kriterler; uygulamaya, projeye uygunluk, yatırım maliyetleri, işletme süresi boyunca sağlayacağı enerji tasarrufu, gelecekte beklenen enerji maliyetleri ve sistem ve komponentlerin güvenilirliği olacaktır.

Enerji depolama sistemleri belki on yıl önce ticari kullanımı mümkün olmayan laboratuvar çalışmalarından ibaretti. Fakat günümüzde hızla gelişen teknoloji özellikle cer sistemlerinin aşırı dalgalı enerji taleplerini çok daha kararlı kılacak sistemler üretebilmektedir.

Volanlar ve süperkapasitörler özellikle kent içi raylı ulaşım tesislerinde önemli enerji tasarruf imkanı sağlayacak sistemler olarak öne çıkmaktadırlar. Ülkemizin enerji kaynakları açısından zengin olmadığı bilinciyle enerji verimliliğini artırıcı böyle bir imkandan bir an önce yararlanması kaçınılmazdır. Bu amaçla yapılması gereken, mevcut raylı sistemlerimizde enerji depolama sistemleri ile ilgili deneysel araştırmalar yaparak enerji tasarruf imkanlarını tespit etmek ve bu imkanların kullanılabilmesi için proje geliştirmek olmalıdır.

**KAYNAKLAR**

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

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

Bassett J.R., Charmund J.D., (1989), “Optimized Diodes Reduce GTO Stress”, Railway Technology International.

Bryan, B. P., Andrews, J. A., (2004), “Advance in Flywell Energy Storage Systems”, Texas.

Caputo, L., (2000), “Control of Energy Storage Devices for Rail Vehicles”, Master Thesis, Department of Automatic Control Lund Institute of Technology (yayımlanmamış).

Cheung, Y. C. K., Cheung, T. H. S., De Silva, R. G. N., Juvonen, M. P. T., Singh, R. ve Woo, J. J., (2003), Large Scale Energy Storage Systems, Imperial College, London.

Furlong, E. R., Piemontesi, M., Prasad, P. ve Sukumar, D., (2003), “Advances in Energy Storage Techniques for Critical Power Systems”, General Electric, Atlanta.

Gandy, S., (2000), “A Guide to the Range and Suitability of Electrical Energy Storage Systems for Various Applications, and an Assessment of Possible Policy Effects”, Master Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, (yayımlanmamış).

Garg G. C., (1997), Utilization of Electric Power and Electric Traction, Khanha Publishers, Delhi.

Garip, M. ve Tuna, S., (2005), “Kentsel Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Verimliliği Üzerine Örnek Bir Çalışma”

Holm, S. R., Polinder, H., Ferreira, J. A., van Gelder, P. ve Dill, R., (2002), “A Comparison of Energy Storage Technologies as Energy Buffer in Renewable Energy Sources with Respect to Power Capability”, IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Theme: Distributed Generation., (pp. 1-6)., 2002, Piscataway, NJ, USA.

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

Lander W. C., (1989), Power Electronics, Mc Graw Hill Publishing Company, 207, England.

Ruddell, A., (2003), “Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and Recommended R&D strategy”, WT. Report.

RWE Piller GmbH., (2002), “Powerbridge Application at Uestra, Hannover”, Germany.

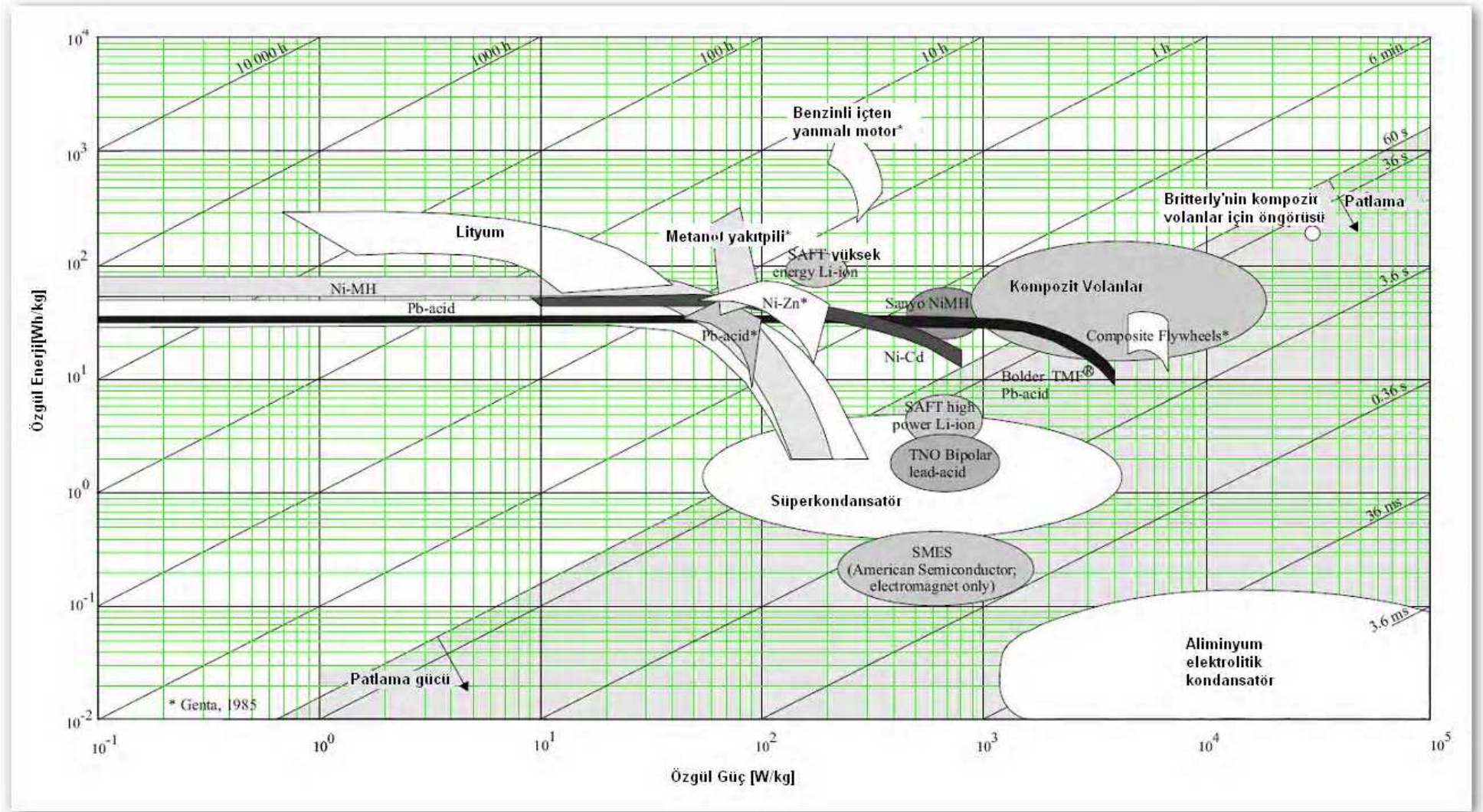
Sels, T., Dragu, C., Craenenbroeck, T. ve Belmans, R., (2001), “New Energy Storage Devices for an Improved Load Managing on Distribution Level”

Steiner, M., Scholten, J., (2004), “Energy Storage on Board of DC Fed Railway Vehicles”, PESC Conference 2004, Aachen, Germany.

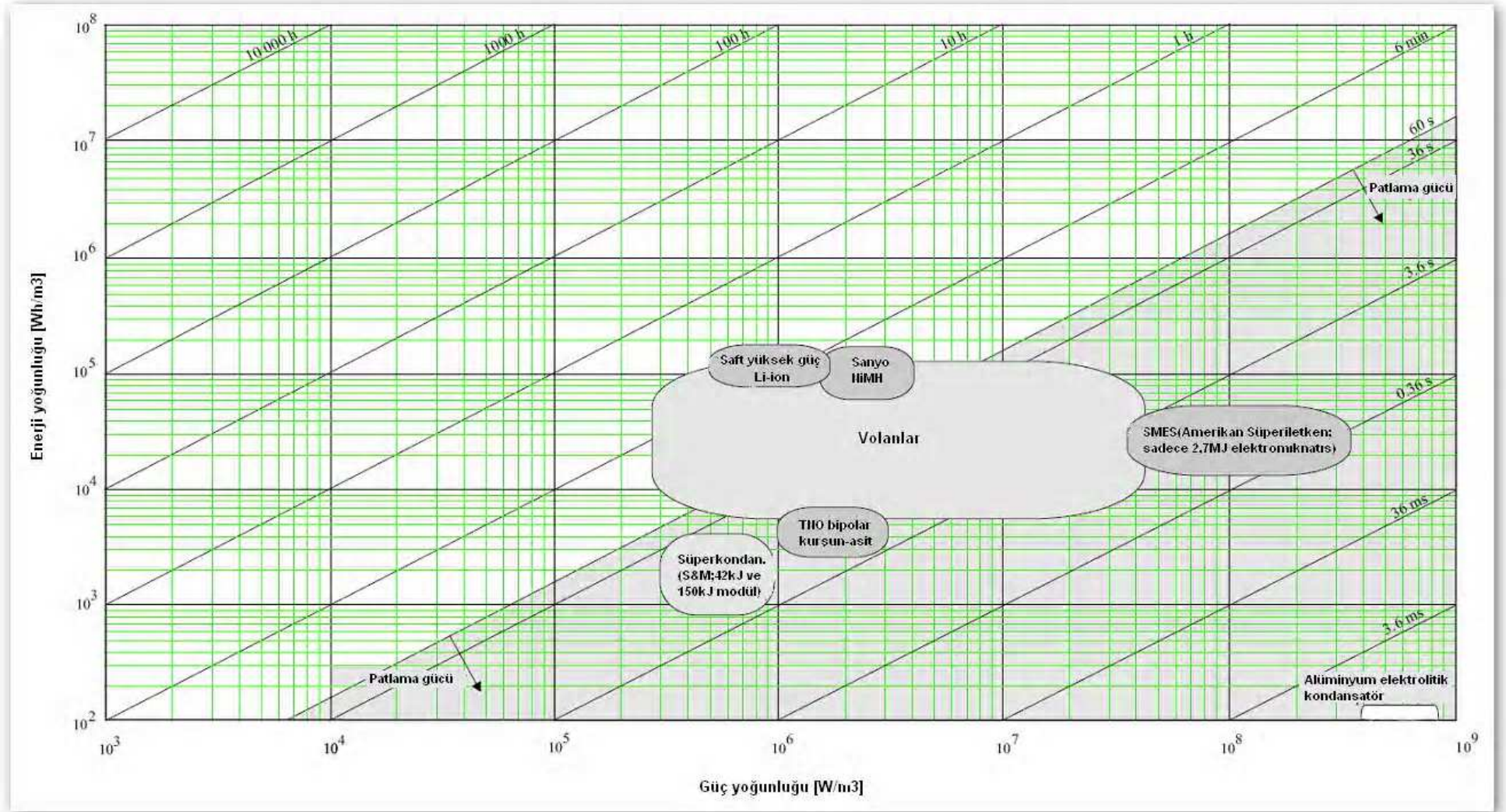
**EKLER**

- Ek1 Özgül enerjinin enerji depolama sistemlerinin özgül güç değerlerine göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003)
- Ek2 Enerji yoğunluğunun enerji depolama teknolojilerinin güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003)

Ek 1 Özgül enerjinin enerji depolama sistemlerinin özgül güç değerlerine göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003)



Ek 2 Enerji yoğunluğunun enerji depolama teknolojilerinin güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması (Holm vd., 2003)



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	31.08.1972	
Doğum yeri	Çayeli	
Lise	1986–1989	İstanbul Şişli Mecidiyeköy Lisesi
Lisans	1990–1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

**Çalıştığı kurumlar**

1995–1996	Panel Elektro Ltd.Şti.
1996–1998	Piomak Otomasyon Makine A.Ş.
1998–1999	Tahaş Tazyikli Hava Sanayi A.Ş.
1999–2000	İstanbul Ulaşım A.Ş.
2000-Devam ediyor	Honeywell Measurex Ölçüm Aletleri.Ltd. Şti.