

***YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ***

**ELEKTRİKLİ RAYLI SİSTEMLERİN İNCELENMESİ VE
KENT İÇİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ENERJİ
KALİTESİ VE GERİ KAZANIMI**

Elektrik Müh. A.Emin ŞİMŞEK

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Ferit ATTAR, YTÜ

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ: ULAŞIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	1
1.1 Ulaşım Türleri	1
1.1.1 Yaya ve Bisiklet	1
1.1.2 Bireysel Ulaşım	1
1.1.3 Lastik Tekerlekli Toplu Taşıma	1
1.1.4 Denizyolu	2
1.1.5 Raylı Toplu Taşıma	2
1.1.6 Şehiriçi Raylı Ulaşım Tipleri	3
1.1.6.1 Tramvay	3
1.1.6.2 Hafif Metro.....	4
1.1.6.3 Metro	5
2. CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMLERİ	6
2.1 Cer Gücü Tipleri.....	6
2.2 Cer Gücü Sistemlerinin Temel Yapısı	7
2.2.1 Cer Gücü Dağıtımı	7
2.2.2 DC Cer Sistemi.....	8
2.3 DC Cer Gücü Sistemi Bileşenleri.....	8
2.3.1 DC Sistem	9
2.3.1.1 Redresör Trafosu	9
2.3.1.2 Redresör	9
2.3.1.3 DC Şalt Hücreleri	9
2.3.2 OG Sistem	10
2.3.2.1 OG Şalt Hücreleri.....	10
2.3.2.2 34,5 / 0,4 kV Dağıtım Trafosu	10
2.3.2.3 6,3 / 0,4 kV Transfer Trafosu	10
2.3.3 AG ve Yedek Güç Sistemi	11
2.3.3.1 400 / 231 VAC Yardımcı Güç Panoları	11
2.3.3.2 Kesintisiz Güç Kaynağı.....	11
2.3.3.3 Kesintisiz Doğru Akım Güç Kaynağı	11

2.3.4	Cer Gücü Şebekesi	11
3.	CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL BAĞINTILAR.....	13
3.1	Hat Direnci / Empedansı	13
3.1.1	Birim Uzunluk Başına Direnç	13
3.2	Cer Hatlarında Gerilimin Düzenlenmesi.....	15
3.2.1	Temel Kabuller.....	15
3.2.2	Gerilim Düşümü Hesabı.....	17
3.2.2.1	Tek Uçlu Besleme	17
3.2.2.2	Çift Uçlu Besleme	20
4.	CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMİ KONTROLÜ.....	23
4.1	Gelişim ve Fonksiyon.....	23
4.2	Yerel Kontrol Ünitesi ve Uzaktan Kontrol Hatları	23
4.3	SCADA	24
4.4	SCADA Sistemi Bileşenleri	27
4.4.1	Uzak Terminal Birimleri	27
4.4.2	Güç Kaynağı Modülü	29
4.4.3	Merkezi İşleme Ünitesi	30
4.4.4	Haberleşme İşlemcisi Modülü.....	30
4.4.5	Giriş ve Çıkış Modülleri.....	31
4.4.5.1	Dijital Giriş Modülü	31
4.4.5.2	Dijital Çıkış Modülü (DO)	31
4.4.5.3	Analog Giriş Modülü	32
4.4.6	Ana Terminal Birimi (MTU).....	32
4.4.6.1	Bilgisayar Terminalleri	33
4.4.6.2	Yazıcılar	33
4.5	İletişim Sistemi.....	33
4.5.1	İletişim Ağı.....	33
4.5.1.1	LAN.....	34
4.5.1.2	WAN	34
4.5.2	İletişim Ortamları	34
4.5.2.1	Modülasyon:.....	35
4.5.3	Modemler	36
4.6	Kontrol Üniteleri	37
4.6.1	Programlanabilir Lojik Denetleyiciler	37
4.6.2	Elektrik Güç Dağıtım Panoları	38
4.6.3	Saha Elemanları.....	38
5.	KAÇAK AKIM KOROZYON KORUMA.....	40
5.1	Kaçak akımlar	41
5.2	Raylı Sistem Dönüş Akımı Devreleri Ray Bağlantıları	42
5.2.1	Hat Bağlantıları	42
5.2.2	Geri Dönüş İletken Bağlantıları	42
5.2.3	Raylı Sistem İstasyon Kısa Devre Sistemi	42
5.3	Kaçak Akım Korozyonu.....	43
5.3.1	Kaçak Akım Korozyon Önlemleri	47
5.3.1.1	Galvanik Katodik Koruma	48
5.3.1.2	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma.....	50

6.	ÖRNEK BİR METRO SİSTEMİNİN İNCELENMESİ	52
6.1	DC Cer Gücü Hesabı	52
6.1.1	Örnek Hattın Cer Gücü Hesabı	54
7.	DC BESLEMELİ RAYLI SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ ve VERİMLİLİĞİ	55
7.1	DC Beslemeli Raylı Sistemde Harmonikler	55
7.2	Pasif Güç Filtresi	56
7.3	Aktif Güç Filtresi	56
7.3.1	Aktif Güç Filtresinde Kompanzasyon Akımının Hesabı	58
7.4	Hibrit Filtreler	60
7.5	Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması	62
7.6	Bir Metro Sisteminde Güç Kalitesinin İncelenmesi	67
7.7	Raylı Sistemlerde Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı (Dinamik Frenleme)	70
7.8	Enerji Depolama Sistemleri	71
7.8.1	Enerji Depolama Sistemi Hesaplama Kriterleri	71
7.8.2	Volan Sistemleri	72
7.8.2.1	Volan Sistemlerinin Yapısı	73
7.8.2.2	Volan Sistemlerinin Uygulamaları	73
7.8.3	Çift Katmanlı Kapasitörler (Ultrakapasitörler)	75
7.8.4	Süperiletken Manyetik Enerji Depolayıcı (SMES)	76
8.	MEVCUT BİR HATTININ METRO OLARAK TASARLANMASI	78
8.1	Cer Gücü Hesap Metodu	78
8.1.1	Alternatif Metro Hattı Cer Gücü Hesabı	80
8.2	Gerilim Düşümü	82
8.2.1	Hat Direnci	82
8.2.2	Gerilim Düşümü Kontrolü	83
8.2.3	Tek Uçtan Besleme	83
9.	SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER	86
	KAYNAKLAR	88
	İNTERNET KAYNAKLARI	90
	ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGE LİSTESİ

A	Kesit (mm ²)
C	Metalin elektrokimyasal katsayısı
D	Trendeki araç sayısı
G	Tren setinin yüklü ağırlığı (ton)
G _B	Aracın boş ağırlığı (ton)
G _Y	Aracın yüklü ağırlığı (ton)
I	Akım (A)
I _{OHL}	İletken ray akımı (A)
I _{trc}	3.ray akımı (A)
I _L	Harmonik akımın etkin değeri (A)
I _K	Yük akımı (A)
I _P	Korozyon koruma akımı (A)
K	Yolcu yükü (yolcu/araç)
l	Uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
P	Aktif güç (W)
Q	Reaktif güç (VAR)
R(θ _B)	Belirli sıcaklıktaki direnç (Ω)
S	Görünür güç (VA)
s	Güzergah boyu (km)
U	Gerilim (V)
ΔU	Gerilim düşümü (V)
V	Ortalama hız (km/s)
Z	Empedans (Ω)
‰ s	Ortalama hat eğimi
θ _B	Ortam sıcaklığı (°C)
ρ(θ _B)	Belirli sıcaklıktaki özgül direnç (Ωmm ² /m)

KISALTIMA LİSTESİ

CPU	Central processor unit
DCS	Distributed control system
EMC	Electromagnetic compatibility
EN	European Norm
HMI	Human machine interface
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
I/O	Input/output
LAN	Local area network
MTU	Merkez terminal ünitesi
PLC	Programmable logic control
RTU	Remote terminal unit
SCADA	Supervisory control and data acquisition
WAN	Wide area network

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Cer gücü sistemi prensip şeması	13
Şekil 3.2 Cer gücü kontak hattında gerilim ilişkisi	16
Şekil 3.3 Tek uç beslemeli hatta gerilim düşümü	19
Şekil 3.4 Çift uç beslemeli hatta gerilim düşümü	21
Şekil 4.1 Genel SCADA sistemi özeti	25
Şekil 4.2 Güç kaynağı modülü	30
Şekil 4.3 Merkezi işlem ünitesi	30
Şekil 4.4 Haberleşme işlemcisi modülü	31
Şekil 4.5 Dijital giriş modülü	31
Şekil 4.6 Dijital çıkış modülü	32
Şekil 4.7 Analog giriş modülü	32
Şekil 4.8 Frekans kaydırmalı modülasyon	35
Şekil 5.1 DC beslemeli raylı sistemde dönüş akımı ve topraklama	41
Şekil 5.2 dx boyundaki ray boyunca gerilim düşümü	44
Şekil 5.4 Aktif koruma önlemleri	48
Şekil 5.5 Galvanik katodik koruma tesis edilmesi	50
Şekil 7.1 Tren setinin yaklaşık hız-zaman karakteristiği	55
Şekil 7.2 Örnek DC güç temin tesisi	57
Şekil 7.3 Akım kaynağı ile modellenen aktif güç filtresi eşdeğer devresi	57
Şekil 7.4 Eşdeğer kompanzasyon devresi	58
Şekil 7.5 Basitleştirilmiş aktif güç filtresi devre şeması	60
Şekil 7.6 Hibrit filtrelerin çeşitli bağlantı şekilleri	61
Şekil 7.7 Aktif güç filtresinin DC cer tesisine şematik bağlantı diyagramı	62
Şekil 7.8 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı akımı dalga şekilleri	64
Şekil 7.9 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı gerilim-akım dalga şekilleri	65
Şekil 7.10 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı aktif-reaktif güç dalga şekilleri	66
Şekil 7.11 Ters paralel bağlı tristörler ile devreye alınabilen şönt reaktör ve aktif filtre	68
Şekil 7.12 Enerji depolama üniteleri karşılaştırması	71
Şekil 7.13 Seyir halindeki trenin güç talep grafiği	72
Şekil 7.14 Volan kesiti	74
Şekil 7.15 Ultrakapasitör yapısı	76
Şekil 7.16 SMES prensip şeması	77
Şekil 8.1 Güzergah boyu araç ve istasyon yerleşimi	81

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 EN 50 163'ye göre demiryolu elektrifikasyonu gerilim seviyeleri.....	6
Çizelge 3.1 20°C'de, aşınma oranına göre birim uzunluk başına ray direnci.....	14
Çizelge 3.2 20°C'de hat empedansının ray tiplerine göre değerleri	14
Çizelge 3.3 Besleme tiplerine göre gerilim düşümleri	22
Çizelge 6.1 Örnek sistem güzergahı özellikleri	52
Çizelge 6.2 Örnek metro sistemi DC güç hesabında kullanılan kısaltmalar	52
Çizelge 7.1 Aktif ve pasif güç filtrelerinin karşılaştırılması	63
Çizelge 7.2 1.Fiderin akım harmonikleri	69
Çizelge 8.1 Alternatif metro sistemi güzergahı özellikleri	78
Çizelge 8.2 Alternatif metro sistemi istasyon yerleşimi ve mesafe tablosu.....	82
Çizelge 8.3 Tek tren seti bulunan hat tablosu	84
Çizelge 8.4 İki adet tren seti bulunan hat tablosu	85

ÖNSÖZ

Bu tezde, önemi gün geçtikçe artan raylı ulaşım sistemlerine güç temini ve kontrolü konuları incelenmiş ve güç kalitesi ve verimliliği için yapılabilecek çalışmalar ele alınmıştır. Gerek Türkiye’de ve gerek yakın coğrafyamızda hem kent içi hem de uzak mesafe raylı taşımacılıktaki yatırımların artmaktadır.

Ülkemizde uzun bir geçmişi olmayan bu konudaki araştırmalarımnda bana destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sn.Yrd.Doç.Dr. Ferit ATTAR’a, Sn. İsmail EROĞLU’na ve Sn. Hilmi TÖRE’ye teşekkürü borç bilirim.

Elektrik Müh. A.Emin ŞİMŞEK

ÖZET

Elektrikli ulaşım sistemleri günümüzün vazgeçilmezleri arasında yerini almıştır. Gerek şehir içi ve gerekse şehirler arası yolcu ve mal taşımacılığında önemi artmaktadır. Bu yüzden demiryolu araçlarına kesintisiz, kaliteli ve güvenli enerji temini amacıyla güç temin sistemleri tesis edilir. Elektrikli tren setlerine, iletken hatlar ile enerji sağlanması güç dağıtım şebekesi ile yerel şebeke kullanıcılar arasındaki güç teminininden farklılıklar göstermektedir.

Gereklilikleri sağlaması yanında güvenilir elektrikli raylı sistem işletimi için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır:

- İletken teller veya ray ile araçlara kesintisiz enerji sağlanması
- Demiryolu hattından frenleme enerjisini absorbe edebilme yeteneği
- Spesifik ve standart kalite parametrelerine uygun gerilim seviyelerinin sağlanması

Bu çalışmada, raylı ulaşım sistemlerine kaliteli güç temini ve bunun için yapılabilecek uygulamalar incelenmiş ve mevcut bir toplu taşıma hattının metro olarak yeniden tasarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistem, cer gücü, demiryolu, metro, enerji kalitesi, geri kazanım

ABSTRACT

Electrified rail transportation systems are indispensable in today's world. Its importance at both urban and suburban is increasing every other day. So that, traction power substations are installed for supplying continuous, safe and good quality energy to the rail vehicles. Energy supplement of electrical railroad vehicles is different from the consumer feeding.

Beside of all necessities, conditions explained below should be considered:

- Uninterrupted energy should be supplied by contact wires or third rails.
- Absorption ability of braking energy from running rails.
- To provide the voltage defined in international standards and other related specifications.

This study is about main rail energy supply, control concept and possibilities of quality energy and redesigning a public bus line as metro.

Keywords: Rail transit system, traction power, metro, regenerative braking, energy quality

1. GİRİŞ: ULAŞIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Ulaşım, ülkemizde hızla büyüyen kentli nüfusun günlük faaliyetlerini sürdürmek amacıyla gerçekleştirdiği yolcu ve mal hareketlerini kapsamaktadır. Kentlerimizde bir günde gerçekleştirilen 50 milyon düzeyindeki yolculuk, kentler arasında kara, demir, deniz ve hava yollarıyla bir günde gerçekleştirilen yolculuk sayısının (yaklaşık 3.8 milyon yolculuk) yaklaşık onbeş katıdır.

Ülke nüfusunundaki artışın yanısıra, kentsel nüfus oranının hızla büyümesi ve gelişen ekonomik eylemlerle birlikte kişi başına yapılan günlük yolculuk oranlarının yükselmekte oluşu, toplam kentsel yolculuk sayılarında büyük artışlar ortaya çıkarmaktadır. Sonuçta kentiçi ulaşım sektörünün boyutları hızla artarken kapsamı genişlemekte, her geçen gün biraz daha yayılan ve sayıları artan kentsel alanlardaki yolculukların uzunlukları da artmakta ve daha çok yaya yolculuğu motorlu taşıt yolculuğuna dönüşmektedir.

1.1 Ulaşım Türleri

1.1.1 Yaya ve Bisiklet

Kentlerimizde yaya ulaşımı pek çok engelle karşılaşmakta ve yaya hareketleri motorlu taşıtların baskısı sebebiyle gelişmemektedir. Kentsel gelişmeye ve nüfus artışına paralel olarak kent içindeki yolculuklardaki yaya hareketlerinin payı azalmaktadır.

1.1.2 Bireysel Ulaşım

Ülkemizde giderek hızlanan otomobilleşme sonucunda kentiçi karayolu altyapısı üzerinde büyük bir baskı oluşmakta, özellikle tarihi kent dokusu içinde yer alan yollar tıkanma noktasına gelmektedir. Toplutaşıma hizmetlerinin yeterli düzeye ulaştırılamaması, otomobilin bir ulaşım aracı ötesinde bir yatırım aracına dönüşmesi tüm türlerin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olmaktadır.

1.1.3 Lastik Tekerlekli Toplu Taşıma

Dolmuş, minibüs ve otobüslerden oluşan bu gruptaki toplu taşıma ve ara toplu taşıma araçları ülkemiz kentlerindeki yolculukların en büyük bölümüne cevap vermektedir.

Nüfusu bir milyona yaklaşan kentlerimizde lastik tekerlekli toplu taşıma sistemlerinin en yaygın sorunu, talep düzeylerinin bu türün kapasitesinin üstüne çıktığı koridorlarda bile, hala talebe bu araçlarla cevap vermeye çalışılmasıdır. Sonuçta ortaya çıkan otobüs yığılması, otobüslerin kendi kendilerinin hareketini aksatacak düzeye ulaşabilmektedir. Raylı sistemlerle cevap verilecek talep düzeylerine ulaşılmış koridorlarda otobüslerle hizmet vermeye çalışmanın getirdiği verimsizlikler kadar, tersi durumlarda ortaya çıkan verimsizlikler de sözkonusudur

1.1.4 Denizyolu

Büyük kentlerimizden özellikle İstanbul ve İzmir'de kentiçi deniz taşımacılığı önemli bir pay üstlenmiştir. Son zamanlarda önemi bir daha anlaşılması üzerine denizyolu ile kent içi ulaşım ivme kazanmıştır.

1.1.5 Raylı Toplu Taşıma

Büyük kentlerimizde yolculuk taleplerinin ulaştığı düzey, raylı sistemlerle hizmet verilmesini zorunlu kılmakta, kentsel raylı sistemlerin uygulanmasında gecikilmiş olması büyük kentlerimizde yaşanan trafik sorunların temelini oluşturmaktadır. Son yıllarda girişilen çabalarla yapımına başlanan kentiçi raylı toplu taşıma hatları gecikmiş ve birikmiş bir yatırım talebini gündeme getirmektedir.

Kentlerimizdeki mevcut raylı toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve yeni sistemlerin planlanıp uygulamaya geçirilmesi sırasında bir çok sorun ortaya çıkmaktadır. Uzun yıllardır kent içinde yeni raylı sistemlerin devreye girmemiş oluşu sebebiyle, gerekli tecrübe ve birikime yeni yeni ulaşabilmektedir. Hızla gelişen teknolojilerin yakından izlenememesi ve kentlerimizde çağdaş uygulamaların bulunmayışı nedeniyle, kentsel raylı sistemler konusunda ülkemizde her ölçekte bir birikim yetersizliği bulunmaktadır.

Kentiçi raylı sistemler konusundaki bu eksiklik sadece teknik konularda değil, raylı sistemlerin planlaması, projelendirilmesi, yapımı ve işletilmesi, yapım ve işletme finansmanının sağlanması gibi konulardaki yöntem ve işlemlerin belirsizliğinde de kendini göstermektedir. Kentlerine raylı sistem yapılmasını öneren yerel yöneticilerin, hangi gerekçelerle, nasıl bir yöntemle, hangi aşamalardan geçerek, ne tür teknik çalışmalar

sonucunda, hangi finansman olanaklarıyla raylı sistemlerin yapımını gerçekleştirecekleri konusundaki işlem, aşama ve standartlar henüz belirlenmemiştir.

1.1.6 Şehiriçi Raylı Ulaşım Tipleri

Artan nüfusa ve zorlaşan şehiriçi trafiğine yeni açılımlar getiren raylı toplu ulaşım sistemleri beraberinde birçok avantaj getirmektedir. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- a) Yeni kullanıcıların katılması:** Raylı sistem kullanıcılarının %30-%50'si, otomobili olup bunun yerine raylı sistemi tercih eden kitledir.
- b) Taşıma maliyetlerinin azalması:** Otobüs ile taşıma kıyaslandığında *yolcuxkilometre* başına maliyet çoğu durumda %50 oranında azalmaktadır. Bu da işletme maliyetlerini ve sübvansiyon giderlerini düşürmektedir. Ayrıca şehrin ana arterlerinde, trafiğin omurgasını oluşturan hatlara demiryolu hatları inşa edip otobüsleri trafikten almak, düşük yoğunluk bölgelere bu araçları kaydırarak yeni yatırım maliyetlerini azaltır.
- c) Güvenlik:** Raylı sistem ile ulaşım karayoluna göre oldukça güvenlidir. Bir tren seti, trafikte seyreden 60-125 adet otomobile eşdeğerdir. Sinyal ve otomatik kontrol/durdurma sistemleri güvenliği temin eder.
- d) Kirliliğin azalması:** Hiç şüphesiz elektrikli ulaşımın zararlı çevre etkisi karayolu taşıtlarının yanında yok denecek kadar azdır. Ayrıca trafikten eksilteceği taşıtlar da eklenirse önemli kazançlar sağlanır.
- e) Tesis ve altyapı inşası:** Metrolar yer altında, LRT sistemler yer üstünde yolun altı veya üstü her eksende veya kanal içinde ilerleyebilir. İstasyonlar kompakt ve işlevseldir. Böylece şehrin her noktasına bağlantı mümkün olabilir.
- f) Emlak değerlenmesi:** İstasyon civarı mahallerde emlak fiyatlarında artışlar olur. Artan değer ile kaliteli hizmet ve ürünler şehrin çeşitli noktalarına yayılırken yeni ticaret ve yerleşim odakları oluşur.

Günümüzde en yaygın olarak tercih edilen raylı sistemler aşağıda özetlenmiştir.

1.1.6.1 Tramvay

Tramvaylar, şehir içi toplu taşımacılık sistemleri arasında en eski sistem olma özelliğine sahiptir. Geçmişte toplu ulaşımın alternatifi olmayan tek sistemi olarak inşa edilen tramvay sistemleri, gelişen diğer alternatif ulaşım sistemlerine paralel olarak, atlı tramvaydan

başlayarak, önemli gelişmeler göstermiştir ve zaman içerisinde diğer ulaşım sistemleri ile entegre edilerek, toplu taşımacılıktaki etkinliği arttırılmıştır. Tramvay sistemleri, genellikle hemzemin güzergâhlar şeklinde inşa edilirler. Tramvay yolları inşa edilirken çok büyük çaplı kazı ve inşaat çalışmaları gerekmediği için maliyet açısından diğer sistemlere oranla oldukça ucuz sistemlerdir. Dünyanın pek çok şehrinde kullanılan tramvay sistemlerinde durak olarak mevcut otobüs durakları veya onlara benzer basit tesislerden faydalanılmaktadır. Tramvaylar için inşa edilen durak boyları en fazla 60 metre civarındadır. Araç genişlikleri 2200mm ile 2650mm arasında değişebilmektedir.

Enerji temini tramvaylarda katener diye bilinen havai besleme hatları ile sağlanmaktadır. Yaygın olarak 750 VDC kullanılır. Tüm bu özellikleri sebebiyle tramvay sistemleri, diğer raylı toplu ulaşım sistemlerine oranla oldukça ucuz maliyetlerle inşa edilebilmektedirler. Tramvay sistemleri, hemzemin yollardaki karma trafiğin etkisiyle düşük seyreden bir trafik rejimine sahiptirler ortalama ticari hızları genellikle 28-30 km/saat maksimum seyir hızı 50 km/saat şeklindedir. Ayrıca karma trafikte araç boylarının fazla uzun olması da mümkün olamamaktadır. Saydığımız sebeplerden dolayı tramvay sistemlerinin yolculuk kapasiteleri de diğer sistemlere oranla daha sınırlı kalmaktadır. Tramvay sistemlerinin saatteki maksimum yolcu taşıma kapasiteleri 15.000 yolcu/yön şeklinde açıklanabilir. Tramvay sistemleri nüfusu fazla olmayan yerleşim birimlerinde ana ulaşım sistemi olarak düşünülebilir ancak nüfusu fazla olan ve yolculuk talepleri tramvay sistemlerinin kapasitelerini aşan yerleşim merkezlerinde daha çok ana ulaşım sistemlerini besleyen ve yolcu transferlerini sağlayan tali ulaşım sistemleri olarak tercih edilmektedirler.

1.1.6.2 Hafif Metro

Hafif Metro Sistemi şehir içi raylı toplu taşımacılık sistemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Tramvay sistemlerine oranla daha yüksek yolculuk kapasitesine sahip sistemlerdir. Saatteki maksimum yolculuk kapasiteleri 35.000 yolcu/yön şeklindedir. Bu sistemler yolculuk taleplerinin yüksek olduğu ulaşım koridorlarında, ana ulaşım sistemleri olarak tercih edilmekle birlikte çok kalabalık şehirlerde daha yüksek kapasiteli sistemlerle entegre çalışan tali ulaşım sistemleri olarak da inşa edilebilmektedir. Hafif metro hatları tam tecritli güvenli sistemlerdir. Hemzemin, viyadük veya tünel olarak inşa edilebilirler. Sistem tecritli olduğu için yüksek ticari hızlarda seyre imkan sağlamaktadır. Hafif Metro Sistemlerinde ortalama ticari hız 42-45 km/saat, maksimum seyir hızı 80 km/saattir. İstasyon boyları ortalama 100 m

civarında ve araç genişliği genellikle 2650mm'dir. Enerji temini katener (konvansiyonel sistem), rijit katener veya 3. ray diye tabir edilen alttan besleme sistemleri ile sağlanabilmektedir. Yaygın olarak 750 VDC veya 1500 VDC akım tercih edilmektedir.

1.1.6.3 Metro

Günümüzde şehiriçi toplu ulaşım sistemleri arasında en yüksek yolculuk kapasitelerine sahip ulaşım sistemleri olarak kabul edilen metro sistemleri, dünyadaki pek çok büyük şehirde ana toplu ulaşım sistemi olarak çalıştırılmaktadır. Metrolar yüksek yolculuk kapasitesine sahip sistemlerdir. Maksimum saatteki yolcu kapasiteleri 70.000 yolcu/yön dür. Büyük şehirlerde en yüksek yolculuk taleplerinin tespit edildiği hatlarda metro sistemleri tercih edilmektedir. Tam tecritli raylı ulaşım sistemleri olan metrolar, genellikle yüzeydeki trafik yüklerini hafifletmek amacıyla derin tünel yöntemleri ile yeraltında inşa edilirler. Arazinin yapısına bağlı olarak aç kapa tünel veya delme olarak inşa edilebilen metro hatları bazen yüzeyde hemzemin şeklinde veya viyadük üzerinde de inşa edilebilmektedirler. Metro sistemlerinde ticari hız diğer sistemlere göre daha yüksektir, ortalama ticari hız 42-48 km/saattir. Maksimum hız 90 km/saate kadar çıkabilmektedir. İstasyon boyları genellikle 200 m civarında olan metro sistemlerinde araç boyları da 180-200 m ye kadar çıkabilmektedir. Metrolarda araç genişlikleri 2650mm ile 3050 arasında değişebilmektedir. Metrolar “Ağır Raylı Sistem” olarak da adlandırılır. Yolculuk hacimleri yüksek olduğu için tüm tesisler buna göre inşa edilmektedir. Enerji temini, hafif raylı sistemlerde olduğu gibi katener veya rijit katener şeklinde havai besleme hatlarından yapılabileceği gibi, 3.ray şeklinde tesis edilen alttan besleme sistemlerinden de sağlanabilmektedir. Yaygın olarak 750 VDC, 1500 VDC veya 3000 VDC gerilim de kullanılabilmektedir.

2. CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMLERİ

2.1 Cer Gücü Tipleri

Raylı sistem güç temin tipleri akım tipine göre ayrılmaktadır. Esas olarak DC gerilim kullanılmaktadır; çünkü raylı sistemlerde kullanılan seri komütatörlü motorlar için AC gerilime göre daha uygun, hiperbolik güç/hız eğrilerine sahiptir. Dünyada çoğunlukla DC sistemler hala tercih edilmesine rağmen, düşük gerilim kullanımı mevcut sistemlerde yüksek güç talebini karşılamak adına en büyük dezavantajını oluşturmaktadır.

20.yüzyıl başlarında seri motorları, AC gerilimin dönüştürülebilme yeteneği ile birleştirme çalışmaları yapıldı. Amaç tek fazlı seri AC motoru, monofaze AC gerilimde ve şebeke frekansında sürmektir. Teknik gelişmeler beraberinde kablolarda yüksek frekans orantılı endüktif girişim ve yüksek güçlü monofaze cer gücü temininin trifaze şebekede gerilim dengesizliği gibi problemler getirdi.

Güç elektroniği alanındaki büyük gelişmelere paralel olarak 25 kV AC-50 Hz'lik güç, birçok ülkenin demiryolu elektrifikasyonunda tercih etmesine sebep oldu.

Temel olarak yukarıda bahsi geçen üç tip ekseninde, kullanım amacına göre gerilim ve frekans değerleri farklı cer gücü sistemleri kullanılmaktadır. Bunlar Çizelge 1.1'de verilmiştir:

Çizelge 2.1 EN 50 163'ye göre demiryolu elektrifikasyonu gerilim seviyeleri

	Un	Umin2	Umin1	Umax1	Umax2	Umax3
DC 600 V	600	-	400	720	770	1015
DC 750 V	750	-	500	900	950	1269
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2538
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24311
AC 25kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38746

Un : Nominal gerilim

Umin1 : En düşük kalıcı gerilim

Umax1 : En yüksek kalıcı gerilim

Umin2 : En düşük geçici gerilim, max 10 dakika

Umax2 : En düşük geçici gerilim, max 5 dakika

Umax3 : Aşırı gerilim, 20ms'den uzun süreli

Şehir içi toplu taşımada 600, 750 ve 1500 VDC gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. AC gerilim özellikle yük ve uzun mesafe taşımacılığında tercih edilmektedir. Dünya üzerindeki

yaklaşık 200.000 km elektrikli demiryolu hattının %33'ü 25 kV AC-50 Hz, %18'i 25 kV AC-16,7 Hz ve geri kalanı DC gerilimli sistemlerdir.

2.2 Cer Gücü Sistemlerinin Temel Yapısı

DC ve AC - 50 Hz sistemlerde cer gücü enerjisi doğrudan yerel şebekeden sağlanabilir. AC 25kV-16,7 Hz sistemlerde ise enerji merkezi olmayan dönüştürücü istasyonlardan veya şebekeden sağlanabilir. DC sistemlerde enerji 34,5 kV trifaze şebeke geriliminden alınarak kullanılır. Monofaze AC cer gücü sistemleri ise genellikle 110 kV mertebelerindeki şebekeden doğrudan beslenir.

2.2.1 Cer Gücü Dağıtımı

Cer gücü dağıtımının fonksiyonu, şalt tesisine belli gerilim ve frekans değerlerinde gelen enerjiyi, tüketiciye nominal değerleri sağlayacak şekilde ulaştırmaktır. Şalt tesisi tipleri şöyle özetlenebilir:

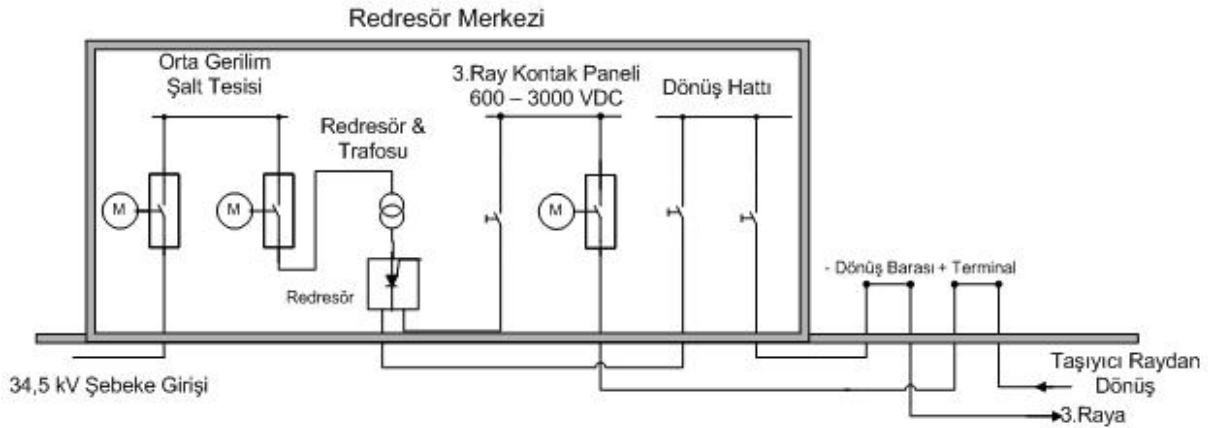
- Trafo Merkezleri: İletim hattından nominal frekansta alınan gerilim, cer gücü sistemine monofaze AC gerilim olarak verilmektedir.
- Cer Gücü Redresör Merkezi: Şebekeden alınan trifaze AC gerilimi gereken DC gerilime dönüştürerek sisteme veren merkezlerdir.
- Merkezi Olmayan Dönüştürücü Merkezi: Şebekeden alınan trifaze AC 50 HZ gerilim, makine veya güç elektroniği devreleri yardımı ile AC 16,7 Hz gerilime dönüştürülerek nominal değerlerinde sisteme verilir.
- Anahtarlama Postaları: Farklı şalt sistemlerinden enerjiyi alarak, besleyeceği kısmın özelliklerine uygun enerjiyi cer sistemine veren veya farklı kısımlar arasında bağlantı sağlayan gruplamalardır.

Şalt sistemleri, anahat boyunca güvenli enerji sağlamak üzere tesis edilirler. Belli bir şalt sisteminin enerjilendirdiği kısım “besleme bölgesi” olarak adlandırılır. “Nötr bölge” ise, ardışık besleme bölgelerinin izole edildiği ve pantograf veya 3.ray pabuçları ile köprülenemeyen hat bölümleridir. Şalt postalarında ayırıcı kullanılarak hat boyu veya çapraz kuplaj ile nötr bölgeler oluşturularak hattaki gerilim düşümleri ve kayıplar azaltılmak amaçlanır.

2.2.2 DC Cer Sistemi

Günümüzde raylı sistemlerin yarısından fazlası oranında DC tip besleme kullanılmaktadır. Toplu taşımada, daha yüksek gerilimlerin tehlikelerinden dolayı maksimum 1500 VDC mertebesine kadar gerilim tercih edilmektedir. En yaygın olarak 750 ve 600 VDC sistemler kullanılmaktadır. Bunlarda şalt tesisleri arası mesafe 1,5-6 km'yi bulurken 1500 ve 3000 VDC sistemlerde bu mesafeler 20 km'ye kadar çıkmaktadır. Şalt tesislerinin çıkış gücü tramvay sistemlerinde 1-2 MW arasında değişirken ağır metro sistemlerinde bu değer 10 MW mertebelerine kadar çıkmaktadır.

Yerel şebekeden trifaze olarak alınan gerilim redresör merkezlerinde, nominal işletme değerlerindeki DC gerilime dönüştürülür. Önceleri bu merkezlerde 6-darbeli dönüştürücü kullanılırken 12-darbeli dönüştürücüler daha sık tercih edilmektedir. Redresör merkezlerindeki anahtarlama elemanları EN 60 146-1-3 yük sınıflarına göre tasarlanmaktadır. Şekil 1.1'de temel DC beslemeli bir tramvay şeması verilmiştir. Bu tasarımlarda dikkat edilecek en kritik nokta, cer dönüş akımlarından kaynaklanan kaçak akım korozif etkilerdir.



Şekil 2.1 DC cer besleme sistemi prensip şeması (Kießling, 2001)

2.3 DC Cer Gücü Sistemi Bileşenleri

Elektrikli ulaşım sistemleri güç temininde iki temel tüketici bulunmaktadır: Cer gücü ve yardımcı güç. Cer (çekiş) gücü trenleri besler; yardımcı güç ise istasyon, trafo merkezleri, kontrol merkezleri vb. tarafından kullanılan aydınlatma, ısıtma-soğutma, havalandırma, haberleşme gibi sistemler tarafından kullanılmaktadır.

Yardımcı güç temin sistemi indirme, doğrultma ve dağıtım fonksiyonlarını sağlayan cer gücü trafo merkezi, istasyon trafo merkezi ve 34,5 kV ana iletim hattı ile entekonektedir.

DC Cer gücü sistemi trafo merkezi ve bu enerjiyi trenlere ileten 3.ray hattından oluşmaktadır.

Bir cer gücü trafo merkezi şu bileşenlerden oluşmaktadır:

- Redresör trafosu
- Redresör
- DC şalt hücreleri
- OG şalt hücreleri
- Ana dağıtım trafosu
- Dağıtım ve AG transfer trafosu
- Yardımcı güç panoları
- Kesintisiz güç kaynağı
- Kontrol donanımı

2.3.1 DC Sistem

750 VDC gerilimi sağlayan sistem redresör, bunları besleyen redresör trafosu ve DC gerilimi 3.raya ileten panolardan oluşmaktadır.

2.3.1.1 Redresör Trafosu

34,5 kV şalt hücresi üzerinden beslenmektedir. Şartnamelere ve standartlara uygun tipte ve izolasyonda olmaktadır. Redresör trafosunun, günümüz sistemlerinde sıklıkla kullanılan 12 darbeli redresör beslemesine uygun olacak şekilde tek primer ve çift sekonder bulunmaktadır. Bu sekonder sargılar üzerinden redresörün 6 darbeli köprüleri beslenmektedir. İhtiyaca göre trafo soğutması için fanlar da bulunabilir.

2.3.1.2 Redresör

AC gücü DC güç olarak doğrultan, darbeli tip redresördür. Uygulamada sık rastlanılan tip üç faz köprülü ve diyot doğrultmalı ünitedir

2.3.1.3 DC Şalt Hücreleri

Redresör trafosu-redresör ünitesinden cer gücü şebekesine giriş donanımıdır. Dahili kullanım olarak tesis edilen ve metal pano olarak monte edilen hücreler yüksek hızlı DC kesiciler, ayırıcılar, kontrol, izleme ve koruma ekipmanları bulundurmaktadır. Hücre tipleri şöyle

gruplanabilir: Giriş panosu, çıkış (besleme fideri) panosu, dönüş hattı panosu, bara kuplaj panosu.

Giriş şalt hücresi, redresörün (+) çıkışından cer gücü trafo merkezindeki cer gücü şebekesi (+) barasını beslemektedir. Ayrıca dönüş akımı kabloları bu hücrede bulunan (-) baraya bağlanacaktır.

Hat besleme hücresi (+) barası cer gücünün hatta dağıtımı için kullanılmaktadır. Herbir cer trafosunda iki adet hücre bulunur ve bunlar 3.ray bölgelerini besleyecektir. Hücreler ayrıca yüksek hızlı DC kesici, kontrol ve koruma donanımı içermektedir.

2.3.2 OG Sistem

Cer gücü sistemini ve istasyonları güvenli şekilde beslemek için tesis edilir.

2.3.2.1 OG Şalt Hücreleri

Uygulamada dahili tip, araba üzerine monte, kesicili kapalı hücrelerdir. Bu üniteye ayırıcı, kesici, gerilim ve akım trafoları, kontrol ve ölçüm cihazları vd. gereken tüm donanım içermektedir. AG bölmesinde kontrol ve röle koruma donanımı bulunmaktadır. Ana giriş hücresi şehir şebekesinden sisteme giriş için kullanılmaktadır. Giriş/çıkış şalt hücreleri şehir şebekesine bağlantı noktalarında kullanılmakta ve işletme esnasında besleme noktaları bypass olarak kullanılmakta, aynı zamanda şebeke bölümlendirmesini sağlamaktadır. Trafo besleme şalt hücresi redresör ve dağıtım trafolarının beslenmesi için kullanılmaktadır.

2.3.2.2 34,5 / 0,4 kV Dağıtım Trafosu

Cer gücü trafo merkezinin iç güç ve/veya şartlara bağlı olarak yakın istasyonun yardımcı güç ihtiyacını karşılamak üzere tesis edilir.

2.3.2.3 6.3 / 0,4 kV Transfer Trafosu

İstasyonun genelde iki farklı bölgesinde bulunan AG yüklerinin acil bir durumda diğer bölgelerden beslenebilmesi için kullanılmaktadır.

2.3.3 AG ve Yedek Güç Sistemi

2.3.3.1 400 / 231 VAC Yardımcı Güç Panoları

Trafo merkezindeki iç ihtiyaç dağılımını sağlayan trafolardır.

2.3.3.2 Kesintisiz Güç Kaynağı

İstasyonlarda haberleşme, sinyalizasyon, acil durum aydınlatma gibi kritik sistemlerin ana şebekedeki kesinti halinde beslenmesini sağlar. Beraberinde akü grupları bulunmaktadır. Ünitelerin durumu SCADA ile izlenmektedir.

2.3.3.3 Kesintisiz Doğru Akım Güç Kaynağı

Trafo merkezlerindeki kontrol gerilimi için, 110 VDC çıkışlı ünitelerdir. Bu donanımın da akü grupları olup izlenmesi SCADA üzerinden yapılmaktadır.

2.3.4 Cer Gücü Şebekesi

Cer gücü şebekesi, trenlere enerji taşıyan 3.ray ve trafo ile 3.rayı bağlayan kablolardan oluşmaktadır. Hat rayları, şebekede, akımın cer gücü trafo merkezlerindeki negatif baraya dönüş yolunu oluşturmaktadır.

3.ray sistemi, kompozit olmayan belirli boyda yekpare çelikten malzemedan yapılmaktadır. Genelde alüminyum gövde üzerine paslanmaz çelik temas yolundan oluşur. Ray monte edilen travers üzerine yerleştirilen izolatörlere monte edilir. Ayrıca sıcaklığa bağlı genleşmeleri önlemek için özel bağlantı parçaları ile bağlanır.

Sıcaklığa bağlı 3.ray direnci şu şekilde hesaplanır:

θ_B : Ortam sıcaklığı (°C)

$\rho(\theta_B)$: Belirli sıcaklıktaki özgül direnç ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

$R(\theta_B)$: Belirli sıcaklıktaki direnç (Ω)

l : Uzunluk (m)

A : Kesit (mm^2)

20 °C'deki özgül direncin hesabı:

$$\rho(\theta_B) = \rho_{20} \times [1 + \alpha (\theta_B - 20)] \quad (2.1)$$

$$R(\theta_B) = \rho(\theta_B) \times \frac{1}{A} \quad (2.2)$$

Buradan yola çıkarak paralel bağlı olan çelik alüminyum iletkenlerin toplam direncinden rayın toplam direnci bulunabilir.

Akımın ray iletkenleri arasındaki bölüşümü:

ρ_{Al} : Alüminyum temas tabakasının özgül direnci

$\rho_{Çel}$: Çelik gövdenin özgül direnci

Çelik / alüminyum arasındaki akım oranı şu şekilde olacaktır:

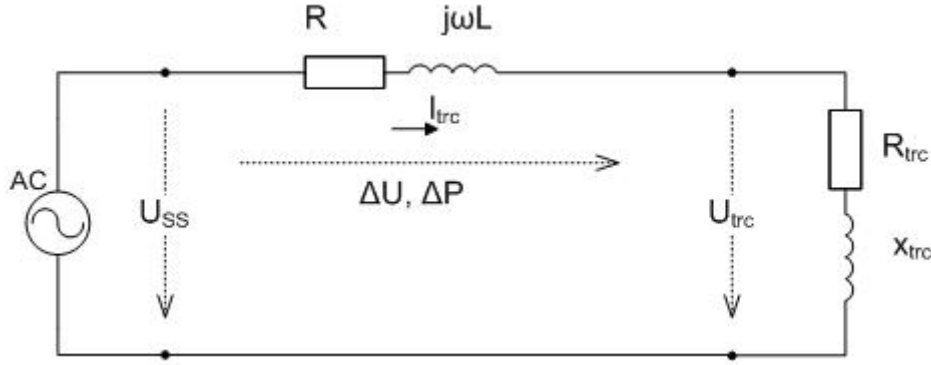
$$(\rho_{Al} / A_{Çel}) / (\rho_{Çel} / A_{Al})$$

Kesit oranları ray tipine göre değişse bile toplamda gövdenin alanı daha büyük olacağı için akımın yaklaşık %0,05'i gövdeden, geri kalanı alüminyum temas yüzeyinden geçecektir.

3. CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL BAĞINTILAR

Bu bölümde enerji taşıyıcı hattaki gerilim kararlılığının sürdürülebilirliği problemleri incelenecek ve sebepleri analiz edilerek işletilen sistemlerdeki örneklemeler verilecektir.

Empedans, akım dağılımı, toprak-demiryolu arası kaçaklar gibi elektriksel karakteristikler bir iletim hattının enerji iletim davranışını belirler. Hattın boyutlandırılması, gerekli koruma elemanları ve işletme ekipmanları iletilecek elektrik enerjisi tipi göz önüne alınarak tasarlanır.



Şekil 3.1 Cer gücü sistemi prensip şeması (Kießling, 2001)

Monofaze AC hatlar için formülasyonlar verilmiştir. DC gerilimde sanal bileşenler olmadığı için bu formüller basitleştirilerek DC hatlar için formülasyonlar elde edilebilir. Trenin ilerlemesini sağlayan güç, çekici araca kolektör veya pabuçlar üzerinden, uygun koşullarda ve $S_{trc}=U_{trc} \times I_{trc}$ miktarında araca aktarılır. Güç şalt tesisinden sağlanır ve iletken hat veya 3.ray üzerinden araca aktarılır. Bununla birlikte iletken hat ve dönüş akımı yolu güç iletimine direnç gösterecektir.

3.1 Hat Direnci / Empedansı

İletken hattı, ekipmanları ve dönüş akım devresinden oluşan çevrimin efektif empedansı “hat empedansı” olarak adlandırılır. DC sistemlerde hat empedansı, tüm paralel kontak hatlarının, fider iletkenlerinin veya kablolarının ve paralel dönüş kablolarını içeren efektif hat direncinin toplamından oluşur. Reel direnç bileşeni R ile sembolize edilir.

3.1.1 Birim Uzunluk Başına Direnç

İletkenlerin, taşıyıcı rayın, kabloların ve iletkenlerin birim uzunluk başına direnci yapıldığı malzemeye göre belirlenir.

İletkenler ve kablolar için birim uzunluk başına direnç, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R' = \frac{R}{l} = \rho \times l / (A \times l) = \frac{1}{\kappa \times A} \quad (3.1)$$

İletkenlik değeri ρ , sıcaklığın bir fonksiyonu olup bu değer 200 °C'ye kadar:

$$\rho = \rho(v) = \rho_{20} \times (1 + \alpha_R \times (v - 20)) \quad (3.2)$$

Taşıyıcı rayların birim uzunluk başına direnci AC sistemlerde frekansa bağlı olarak manyetik iletkenliğe göre değişmektedir. DC sistemlerde ise kullanılan ray tipine göre kesite bağlı değişmektedir. Toprak dönüşünde ise yine AC sistemde frekans ve manyetik iletkenliğe göre değişirken DC sistemde bu değer sıfırdır. Çizelge 3.1'de ray tiplerine göre birim uzunluk başına, Çizelge 3.2'de ise aşınma oranına göre direnç değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 20°C'de, aşınma oranına göre birim uzunluk başına ray direnci (Kießling, 2001)

<i>Ray Tipi</i>	<i>Aşınma (%)</i>	<i>R' (mΩ/km)</i>		
		<i>Ray</i>	<i>Tek Hat</i>	<i>Çift Hat</i>
S49	0	35,7	17,8	8,9
	15	42,0	21,0	10,5
UIC 54	0	32,0	16,0	8,0
	15	37,6	18,8	9,4
UIC 60	0	28,9	15,0	7,5
	15	34,0	17,0	8,5
R60	0	28,8	14,9	7,5
	15	33,0	17,0	8,5
R65	0	25,2	12,7	6,4
	15	29,9	14,9	7,5

Çizelge 3.2 20°C'de hat empedansının ray tiplerine göre değerleri (Kießling, 2001)

<i>f (Hz)</i>	<i>I_{hat} (A)</i>	<i>Z'_{HAT} (mΩ/km)</i>				
		<i>S49</i>	<i>S49²></i>	<i>UIC54</i>	<i>UIC60</i>	<i>R65</i>
0	Tüm değerler	35,1		32	28,9	25,2
16,7	100	100	98	85	73	85
	200		129	95	80	107
	300	190	136	120	95	129
50	100		180			160
	200		240			200
	300		290			250

3.2 *Cer Hatlarında Gerilimin Düzenlenmesi*

Trafo ve redresör merkezlerinden araçlara enerji iletimi esnasında hat boyunca gerilim düşümü meydana gelecektir. Ters durumda, eğer araç frenleme geri kazanım enerjisini hatta verebiliyorsa aracın bulunduğu konumda hatta gerilim yükselmesi olacaktır.

Bu sebeplerden dolayı araç kolektörlerinde gerilim sistemin yapısına, besleme bölgesindeki araçların güç tüketimine ve besleme noktalarına olan uzaklığa göre değişecektir. Normal işletme şartlarında gerilimin asla tolerans aralığını aşmasına veya nominal gerilim sınırının altına düşmesine müsaade edilmeyecektir. Yüksek hızla veya ağır yükte işleyen demiryolu hatlarında standartlar daha katı olup, hattın hiçbir bölgesinde nominal gerilim değerinden sapılmamaktadır.

3.2.1 *Temel Kabuller*

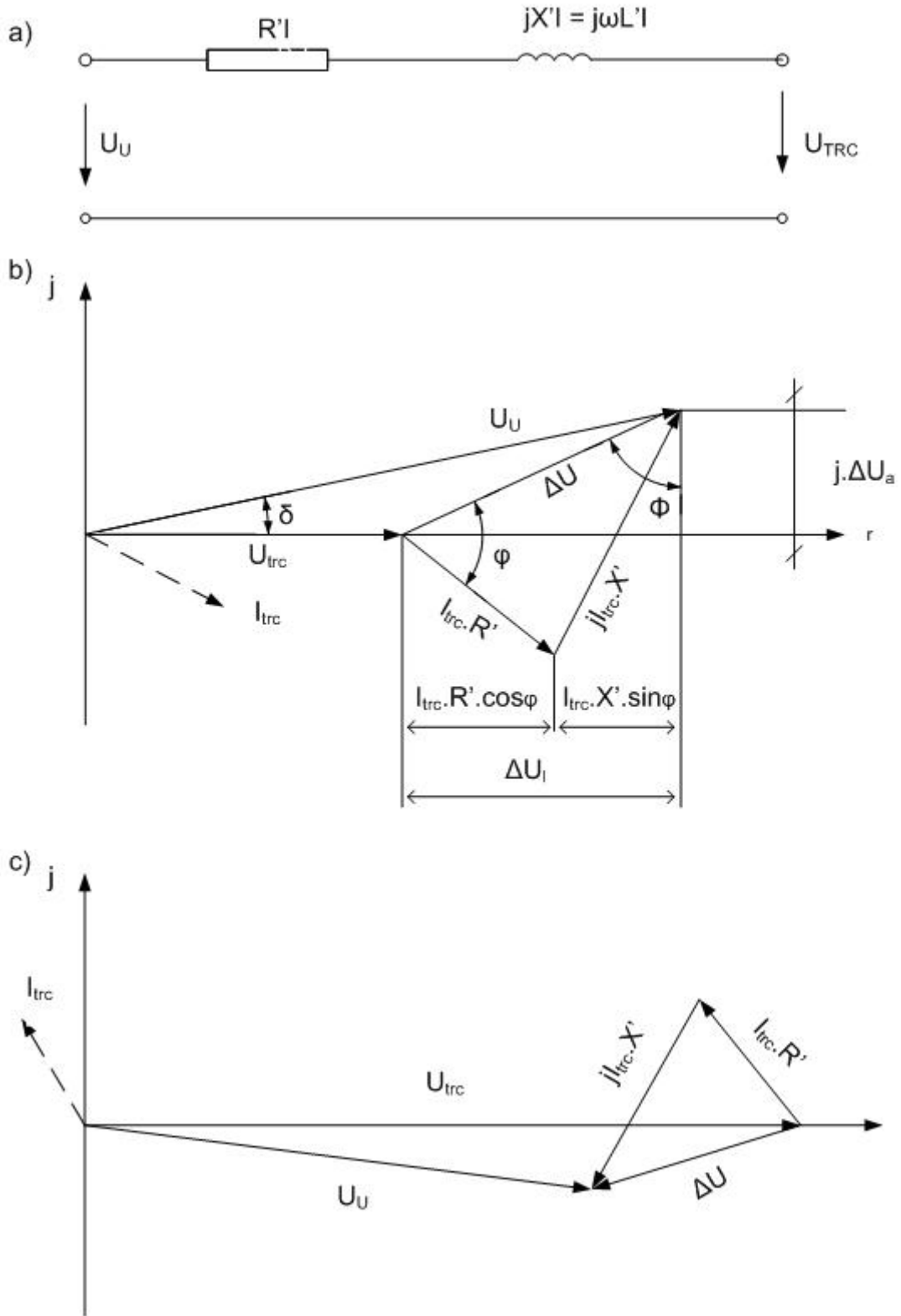
Şekil 3.2’de eşdeğer devre ve ilişkin vektör diyagramı verilmiştir.

AC sistemler için geçerli olan bu diyagramdan gerilim düşümleri hesaplanabilir. DC hatlarda ise bu eşitlik:

$$\Delta U = I_{trc} \times l \times R' \quad (3.3)$$

DC hat boyunca, rayın birim uzunluk başına direncinden veya AC hatta efektif dirençten kaynaklanan güç kaybı ise şöyle ifade edilebilir:

$$\Delta P' = I^2 \times \frac{R}{l} \quad (3.4)$$



Şekil 3.2 Cer gücü kontak hattında gerilim ilişkisi (Kießling, 2001)

- a) Eşdeğer devre
- b) Tren sürüş anında vektör diyagramı
- c) Tren frenleme anında vector diyagramı

3.2.2 Gerilim Düşümü Hesabı

Gerilim düşümünde, besleme noktası ile aynı besleme bölgesi içinde yer alan bir veya birden fazla trenin mevcut konumu arasındaki düşüm hesaplanır. Hat akımından ayrı olarak birim uzunluk başına empedans, besleme tipi ve mesafe gerilim düşümünü belirler. En az karmaşık hesaplama tek uçlu besleme durumunda yapılabilir.

3.2.2.1 Tek Uçlu Besleme

Şekil 3.3'te, besleme noktasından x konumuna kadar olan gerilim düşümü şu şekilde hesaplanabilir (Kießling, 2001):

$$\Delta U_z = I_{trc} \times Z' \times x \quad (3.5)$$

Maksimum gerilim düşümü ΔU_{max} ise, tren besleme noktasından en uzak noktaya ulaştığında oluşacaktır:

$$\Delta U_{max} = I_{trc} \times Z' \times l \quad (3.6)$$

Eğer araç, bir bölge boyunca sabit hızla ilerliyorsa grafik zaman-mesafe ekseninde oluşturulabilir. Beklenen gerilim düşümü ise (Kießling, 2001):

$$\Delta U = \frac{1}{l} \times \int \Delta U_x dx = \frac{1}{2} \times I_{trc} \times Z' l \quad (3.7)$$

Şekil 3.3'teki kabulleri kullanarak üçüncü bir tren seti ile besleme noktası arasındaki gerilim düşümü şöyle hesaplanabilir (Kießling, 2001):

$$\Delta U_3 = Z'(I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3) = Z'(I_{trc1} x_1 + I_{trc2} x_2 + I_{trc3} x l_3)$$

Bu ifade, n tren sayısını ifade edecek şekilde aşağıdaki gibi genelleştirilebilir (Kießling, 2001):

$$\Delta U_n = Z' \sum_{i=1}^n I_i l_i = Z' \sum_{i=1}^n I_{trci} x_i \quad (3.8)$$

Eğer besleme bölgesindeki tren sayısı çok fazla ise Şekil 3.3 c'de gösterilen düzgün dağıtılmış yük durumuna elde edilir. Besleme bölgesindeki hat yükü mesafeye bağlı olarak şu şekilde bulunur (Kießling, 2001):

$$I'_{ohl} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n I_{trci} \quad (3.9)$$

Besleme noktasından x kade uzaklıkta hat üzerindeki akım ise:

$$I_x = I'_{ohl} (l - x) \quad (3.10)$$

Düzgün hat yükü dağılımında besleme noktasından x noktasına kadar olan gerilim düşümü en genel ifadeyle aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Delta U_x = \int_0^x I_x Z' dx = \frac{Z'}{l} (lx - \frac{x^2}{2}) \sum_{i=1}^n I_{trci} \quad (3.11)$$

Eşit I_{trc} akımları ile çalışan n adet trenin bulunacağı durumda ise:

$$\Delta U_x = n I_{trc} Z' \times (lx - \frac{x^2}{2}) / l \quad (3.12)$$

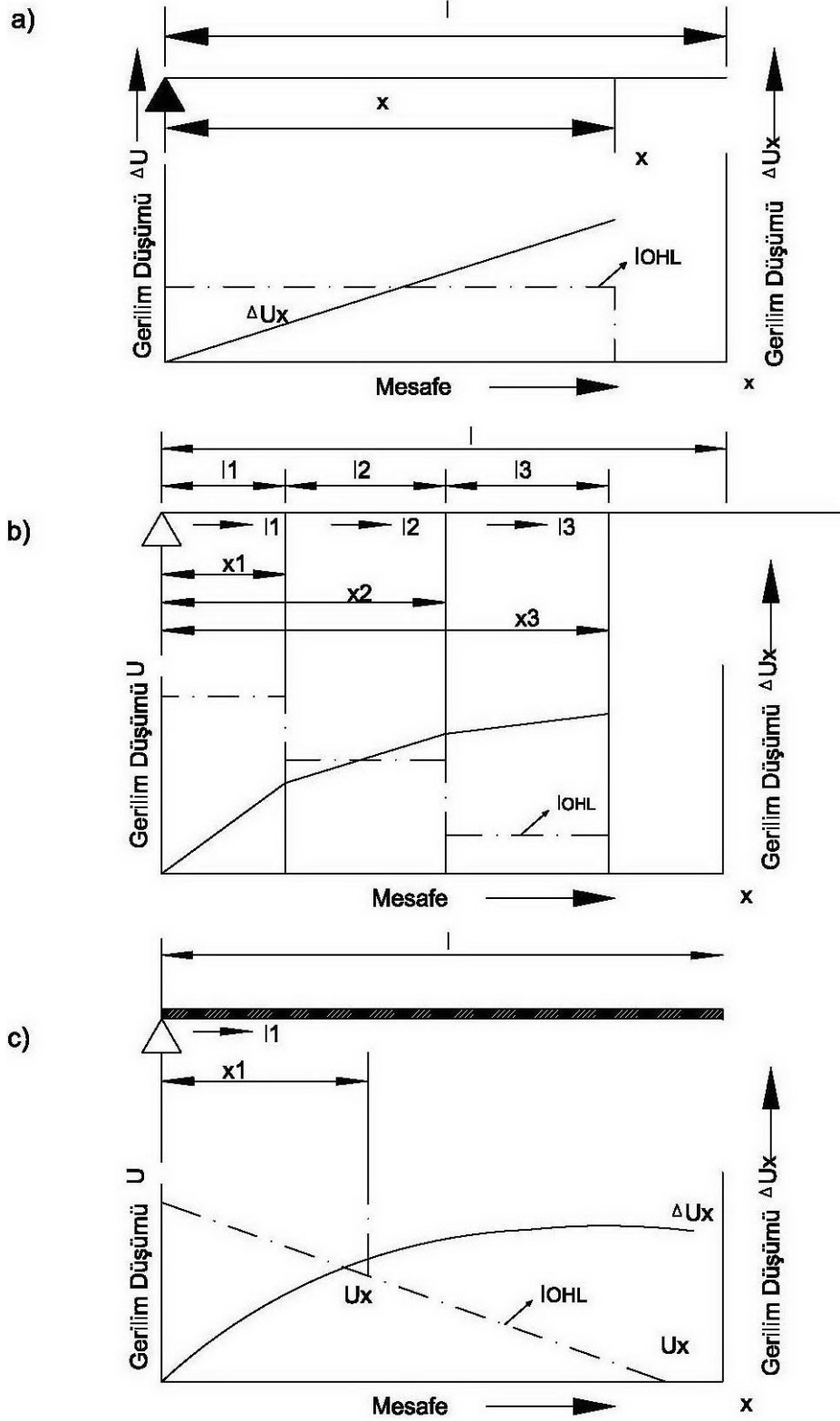
Trenlerin hat boyunca sabit hızda ilerlediği kabul edilirse 3.12 eşitliği ve bu gerilim düşümünün maksimum değeri aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\Delta U = \frac{1}{3} n \times I_{trc} Z' l \quad (3.13)$$

$$\Delta U_{\max} = \frac{1}{2} n \times I_{trc} Z' l \quad (3.14)$$

Pratikte ise gerilim düşümü 3.13 eşitliği ile hesaplanan değerden daha fazla olacaktır; çünkü tek bir hat besleme kısmından beslenen tren sayısı Eşitlik 3.11'de kabul edildiği üzere sonsuz sayıda olmayacaktır. Bu problemi çözmek için başka bir eşitlik geliştirilmiştir. Burada α iki ivmelenme işlemi arası periyot katsayısıdır. Ampirik metotlarla elde edilen bu katsayı düzenli işleyen sistemlerde 2 iken şehiriçi toplu taşıma sistemlerinde 4-6 arasında değişmektedir.

$$\Delta U = \frac{1}{3} I_{trc} Z' l \times (n + 1,5\alpha - 1) \quad (3.15)$$



Şekil 3.3 Tek uç beslemeli hatta gerilim düşümü (Kießling, 2001)

- a) Bölgede tek tren
- b) Bölgede iki tren
- c) Düzgün dağıtılmış yük (hat yükü)

3.2.2.2 Çift Uçlu Besleme

Besleme koşulları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. L iki besleme merkezi arası mesafedir. Çift uçlu besleme durumlarında bir merkezin besleme bölgesi $l = L/2$ olarak tanımlanır; ayrıca iki merkezin R' değeri sabit ve $U_A = U_B = U$ olarak kabul edilir. Gerilim bölüşümüne göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Kießling, 2001):

$$\frac{I_A}{I_{trc}} = Z' \times (L - x) / (Z' \times L)$$

A merkezi referans alınarak, aşağıdaki kabullere göre herhangi bir x noktasındaki gerilim düşümü ve $x=L/2$ noktasındaki maksimum değeri şöyle elde edilebilir:

$$\Delta U_x = I_{trc} Z' \times \left(x - \frac{x^2}{L}\right) \quad (3.16)$$

$$\Delta U_{\max} = \frac{1}{4} I_{trc} Z' L$$

Benzer şekilde ortalama değerler ise şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta U = \frac{1}{6} I_{trc} Z' L = \frac{1}{3} I_{trc} Z' l \quad (3.17)$$

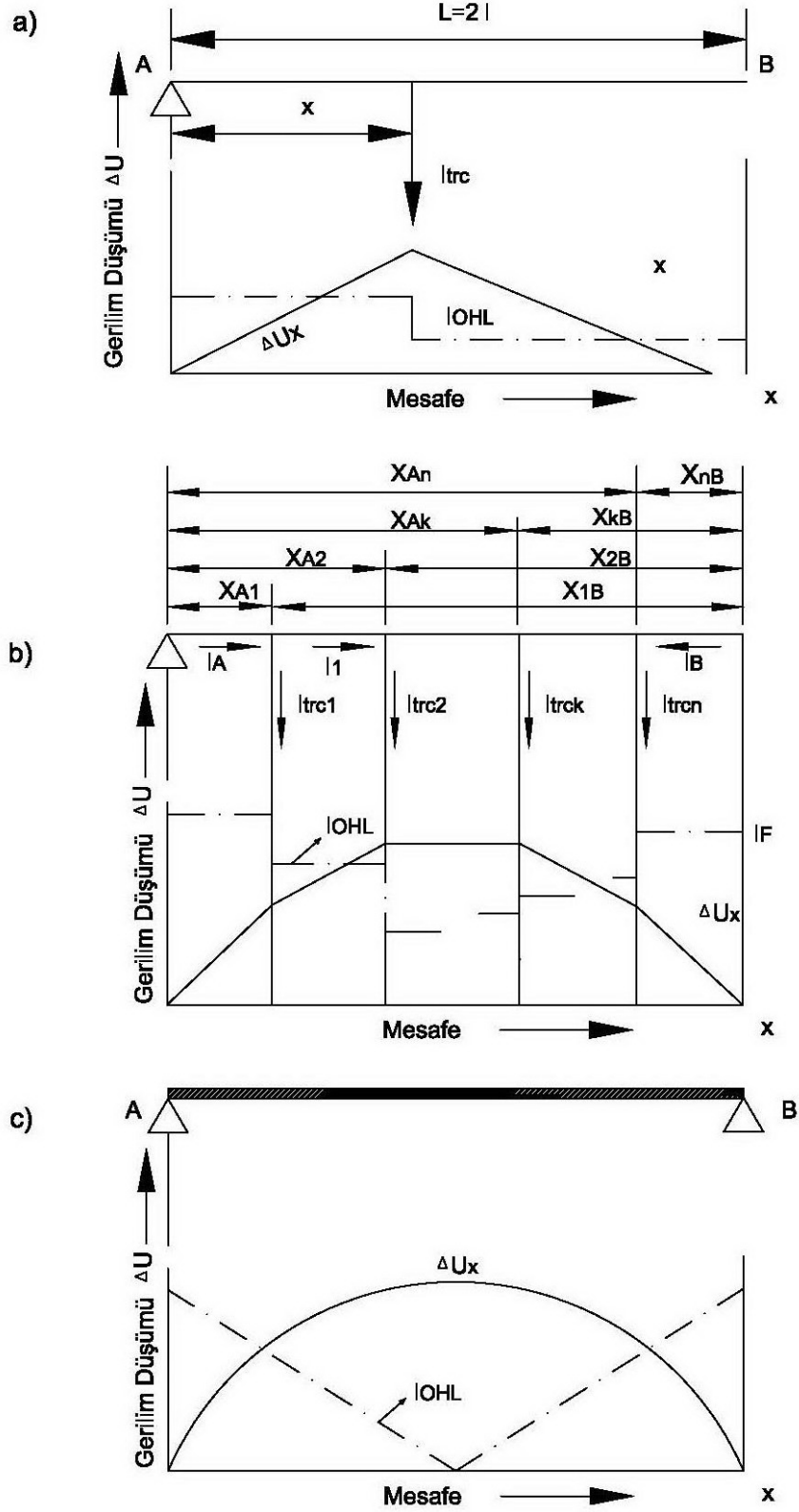
Çift hat sistemin kontak hattı veya 3.ray montajında, besleme bölgesinin orta noktasında kros kuplaj yapılmışsa paralel hattın herhangi birinde seyreden trende meydana gelecek gerilim düşümü bağıntıları aşağıda verilmiştir:

$$\Delta U_x = I_{trc} Z' \left(x - \frac{3x^2}{2L}\right)$$

$$\Delta U_{\max} = \frac{1}{6} I_{trc} Z' L = \frac{1}{3} I_{trc} Z' l$$

$$\Delta U = \frac{1}{8} I_{trc} Z' L = \frac{1}{4} I_{trc} Z' l \quad (3.18)$$

Besleme bölgesinde fazla sayıda tren bulunması durumunda eşitlikler değişecektir. Yukarıda geçen kabul ve şartlar altında A besleme merkezi ile k .tren arasındaki ani gerilim düşümü aşağıdaki gibi olacaktır:



Şekil 3.4 Çift uç beslemeli hatta gerilim düşümü (Kießling, 2001)

- a) Bölgede tek tren
- b) Bölgede iki tren
- c) Düzgün dağıtılmış yük (hat yükü)

$$\Delta U_{A,k} = \frac{Z'}{L} ((L - x_{A,k}) \sum_{i=1}^k I_{trc,i} x_{A,k} + \sum_{i=k+1}^n I_{trc,i} (L - x_{A,i})) \quad (3.19)$$

Eğer A ve B besleme merkezlerinin gerilimleri eşit değilse 3.19 eşitliğinin sağ yanına $x_{A,k} \times (U_A - U_B) / L$ değeri eklenir. Bu durumda eğer besleme bölümü boyunca yük yoksa, bir merkezden diğerine I_a değerinde kompanze edici bir akım akar.

$$I_a = (U_A - U_B) / (Z' \times L) \quad (3.20)$$

Eğer α faktörü ve besleme bölgesindeki n tren adeti biliniyorsa ortalama değer:

$$\Delta U = \frac{I_{trc} Z' L}{12(n + 2\alpha - 1)} = \frac{I_{trc} Z' l}{6(n + 2\alpha - 1)} \quad (3.21)$$

Çizelge 2.3'te çeşitli besleme tiplerine göre gerilim düşümü hesabı için kullanılan eşitliklerin özeti verilmiştir. Karşılaştırma kolaylığı açısından hat bölümü uzunluğu l olarak verilmiş, çift uçlu beslemede ise kısım uzunluğu $L = 2l$ olarak alınmıştır.

Çizelge 3.3 Besleme tiplerine göre gerilim düşümleri (Kießling, 2001)

<i>Besleme Tipi</i>	<i>Bölümdeki Tren Sayısı</i>	<i>Anlık Değer</i> ΔU_x	<i>Ortalama Değer</i> ΔU	<i>Maksimum Değer</i> ΔU_{max}
Tek Uçlu	n bağımsız yük	x	$l/2$	l
	n , dağınık yük		$l \cdot n / 3$	$l \cdot n / 2$
	1	$(\sum_{i=1}^n I_{trc,i} x_i) / I_{trc}$	$l \cdot (n + 1,5\alpha - 1) / 3$	$l \cdot (n + 1,5\alpha - 1) / 2$
Çift Uçlu	N bağımsız yük	$x (1-x/(2l))$	$l/3$	$l/2$
	N , dağınık yük		$l \cdot n / 6$	$l \cdot n / 4$
	1	Eşitlik 3.19	$l \cdot (n + 2\alpha - 1) / 6$	$l \cdot (n + 2\alpha - 1) / 4$
NOT: DC sistemler için tüm eşitlikler $I_{trc} R'$ değeriyle çarpılmalıdır.				

4. CER GÜCÜ TEMİN SİSTEMİ KONTROLÜ

4.1 Gelişim ve Fonksiyon

Güç sistem kontrolü cer gücü, 3.ray veya kontak hattı, trafo-redresör merkezi ile ilgili tüm ekipmanları kapsar. Kontrol sisteminin dizaynı ve konsepti güç beslemesi ile yakından ilişkilidir.

Önceleri kontrol sisteminin görevi yüksek gerilim kesici ve ayırıcılarının kontrolü üzerineydi. Bu ekipmanlar kilitlemeler, kontrol merkezleri gibi röle tabanlı lokal işletme donanımları ile kontrol edilmekteydi.

Artan güvenlik gereklilikleri ve ekonomik işletme talepleri, kontrol sistemleri üzerinde etkisini belirgin ölçüde göstermiştir. Kontrol merkezi ile şalt tesisleri arasındaki mesafenin artmasıyla da uzaktan kontrol kavramı doğmuştur. Uzaktan kontrol, ekipman ve personel arası haberleşmeyi sağlayan haberleşme sistemini de beraberinde getirir. Bu sebepten dolayı telekom altyapısı, güç sistem kontrolü ile beraber gelir. Böylece şalt tesisleri ile kontrol merkezleri kalıcı hatlar ile bağlanmış olur.

Otomatik sistemlerin işletmesinde anahtarlama, koruma ve yardımcı ekipmanların durumu hakkında daha geniş bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece hata durumunda denetleyici personele uzun kesintilere mahal vermeden durumu analiz etme, düzeltici faaliyetlere başlayabilme ve hatayı bertaraf etme olanağı sunmaktadır. Bu proses için gereken donanım sinyalleri, yüksek seviyeli güç sistem kontrol ağındaki bilgi hacmini büyütecektir. Ayrıca bu dataların kaydedilmesi ve iletilmesi gerekecektir. Gereğinden fazla bilgi transferi ve iş yükünü önlemek için bilgiler düşük seviyelerde ön işleme tabi tutularak prosedürler otomatikleştirilir. Uzaktan tanımlama ise hızlı hata algılama sağlayarak özelleşmiş merkezi kontrol sistemine imkan tanır.

4.2 Yerel Kontrol Ünitesi ve Uzaktan Kontrol Hatları

Bozulmalara ve bakım işlerine rağmen yüksek gereksinim imkanlarını karşılayabilmek için kontrol sistemi çeşitli miktarda ana ve yardımcı devrelere bölünmüştür. Bağımsız hat

bölümleri elektrikle sürülen kesiciler ile beslenir ve kesicilere paralel, seri bağlı trafolar aracılığı ile izlenir. İstasyonlarda ana gruplara bağlanır.

Lokal kontrol üniteleri de kesicilerin kontrolü ve izlenmesi için kullanılır.

4.3 SCADA

“*Supervisory control and data acquisition system (SCADA)*” olarak adlandırılan, gereken ihtiyaçları gerçeklemek üzere kurulan ve sistemi kontrol eden, otomasyonunu yöneten, data işleyip transfer edebilen merkezi sistemdir. 1970’ler ortasında kayıt kontrol sistemi olarak kullanılmış, data görüntüleme teknolojisi ile birlikte çok fonksiyonlu kontrol merkezi olarak gelişmeye devam etmiştir. Sistemin demiryolu hattına, şalt ekipmanlarına, yüksek gerilim elemanları, güç dağıtım ünitelerine vd. bağlantısı özel olarak monte edilen esnek, ekranlı, çift uçtan topraklı ve EMC gereklerine uygun kablolar ile yapılır. Yüksek gerilim tarafında tüm anahtarlama ekipmanları ve akım trafoları hiçbir ara hücre veya panele ihtiyaç duyulmadan doğrudan bağlanır.

SCADA sistemi, dağınık bir kontrol sisteminden farklıdır. Şöyle ki, dağınık kontrol sistemi belirli bir alanda, proses kontrolüne odaklanmıştır. Dağınık kontrol sistemleri kontrol edilen ekipmana doğrudan bağlanır ve ekipman ile anlık haberleşebileceği kabulüyle dizayn edilir. SCADA sistemi ise coğrafi olarak dağılmış sistem veya proseslerin izlenebilmesine ve kontrol edilebilmesine olanak verecek şekilde oluşturulur. Periyodik ve aralıklı heberleşme temeline dayanır. Yüksek doğruluklu uygulamalar için SCADA sistemleri veri iletimi onaylama, kontrol doğrulama ve yetkilendirme , şüpheli veri tanımlama yeteneklerine sahiptir.

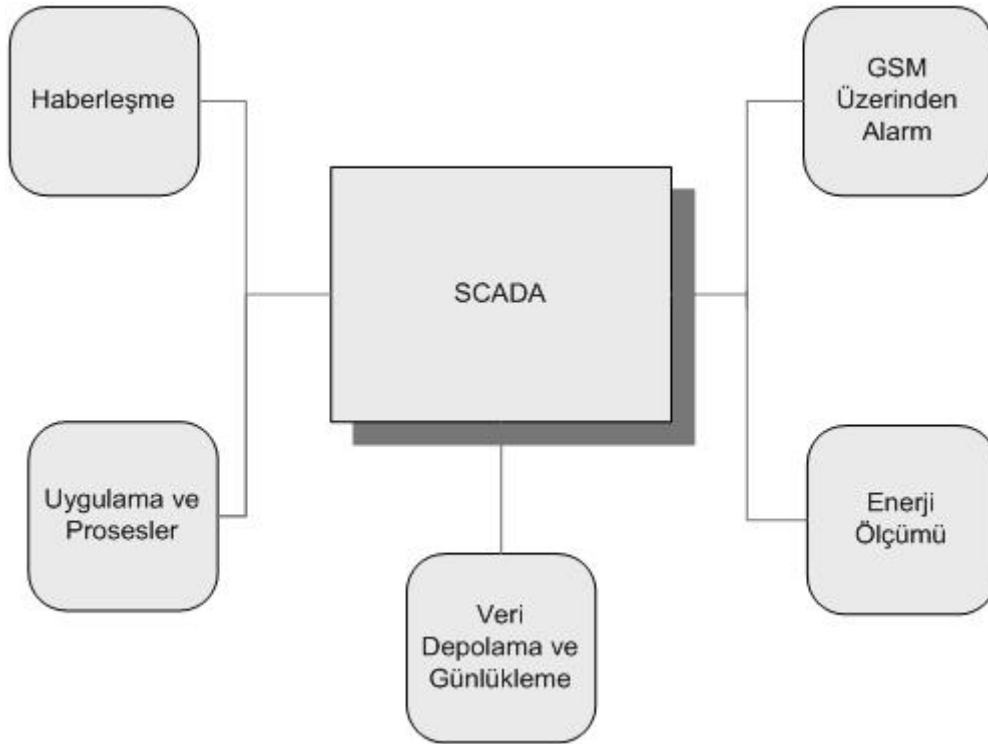
Dağınık kontrol sistemleri “durum paradigmasına” göre çalışırlar. Yani sistem, mevcut durumun herhangi bir andaki anlık durumunu görmeye dayanır. Birçok SCADA uygulamasında ise geçici durumların raporlandığı durum raporlama paradigması geçerlidir.

SCADA sistemi aşağıdaki fonksiyonel bölümlerden oluşur:

- Yerel kontrol
- Alarm İşleme
- Sinyal ve veri işleme
- Dijital ölçüm görüntüleme ve işleme

- Uzaktan kontrol sistemi
- Kilitleme
- İşletme

Güvenlik, depolama, bilgilendirme, hata raporlama, operasyon günlükleme, parametre ayarlama gibi çeşitli ilave fonksiyonlar operatör ile SCADA arasında iletişimi sağlar.



Şekil 4.1 Genel SCADA sistemi özeti

Gerçek zamanlı veri işleme SCADA fonksiyonlarının başında gelmektedir. Operasyonel veritabanları ve gerçek zaman arayüzleri ile çeşitli uygulamaların temel gerçek zaman fonksiyonlarını yürütmesini sağlar. SCADA işlevleri alt sistemlerden veri akışı, değişiklik görüntüleme ve dahili arayüzler ve haberleşme modülleri ile diğer alt sistemlere veri yayılımı ile veri alışverişi ile sağlanır. SCADA'nın veri işlemesi ile diğer altsistemlere veri dağıtımı, kaynak seçimi, durum ve alarm işleme, gerçek zamanlı hesaplamalar ve işlemler, limit görüntüleme, etiketleme gibi fonksiyonlar gerçekleştirilir.

Alarm/durum işlemede güç sistem proseslerinden operasyon merkezine iki tip mesaj gelebilir:

- Durum mesajı: Operatör bilgilendirmesine gerek olmaz. Günlük bilgilere kaydedilir.

- Alarm Mesajı: Operatör tarafından dikkate alınması gereken mesajlardır. Operatör bilgilendirilir ve kayıtlar hem günlük hem de alarm raporlarına geçirilir.

İnsanlı kontrol merkezlerinde her alarm, operatör alarmı farkedip durdurmadığı sürece sinyal vermeye devam eder. Operatör akustik sesler, konsol veya ilgili sistem diyagramları üzerinde yanıp sönen ikonlar ile uyarılır. Uyarılar da kritik, az kritik, elektrik, gaz, normal durum, anormal durum veya bilgilendirme gibi mesaj tiplerini verirler.

Alarm algılanmasından sonra operatör ilgili herbir saha cihazlarına alarm işlendi bilgisini etiketleyebilir. Bu etiketleme durum yönetimlerine imkan tanırken alarm bilgisi üretirmeyebilir.

Alarm yönetim sistemleri yalnızca kontrol odasında klaksonları çalıştırarak uyarı vermekle kalmayıp alarmı kablosuz olarak da iletebilir. Yerel telekomünikasyon işletmecilerinin servisleri ile uyumlu olmak üzere cep telefonlarına kısa mesaj, faks ya da sesli mesaj olarak tanımlı personele bu alarmlar iletilebilir. Bu personel de sesli yanıt veya ön tanımlı kodlar ile bilgilendirme, alarm işleme fonksiyonlarını başlatabilir.

Merkezi denetim şu işlevlerden oluşur: Kontrol ekipmanı işlemleri, kilitleme, kontrol yürütümü görüntüleme. Merkezi denetim ile gerçekleştirilebilen uzaktan kontrol özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Tek anahtarlama cihazları (ON/OFF, AÇIK/KAPALI)
- Vana, musluk değişimleri
- Sürekli düzenlenen bant, valfler
- Generatörler

Merkezi kontrolde aynı saha elemanı, aynı anda sadece bir operatör tarafından kontrol edilebilir. Güvenlik nedeni ile merkezi kontrol iki adımlı prosedürle uygulanır: Seç, yürüt. Bu uygulamalar aynı zamanda konsol üzerindeki tek hat şemalarından da yapılabilir. Başarılı her kontrol uygulaması günlüklere not olarak işlenir. Yürütme programları aynı zamanda yerel RTU'lara da yüklenerek buradan da operatörün başlatabilmesi sağlanır.

Kilitleme fonksiyonunda, aşağıda belirtilen durumlar anatarlama durdurma aksiyonu olarak değerlendirilerek kilitleme durumuna geçilir:

- Saha ekipmanı uzaktan kontrol için konfigüre edilmemişse
- Farklı bir konsoldan kontrol prosesi yürütülüyorsa
- Transformatör maksimum veya minimum sınırdaysa
- Ağ yapısı gereği topraklı, enerjili veya enerjisiz olması

4.4 SCADA Sistemi Bileşenleri

SCADA sistemini temel olarak dört bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlar uzak terminal birimleri, Ana terminal birimi, iletişim sistemi ve kontrol üniteleri olarak sıralanabilir.

4.4.1 Uzak Terminal Birimleri

Uzak terminal birimleri bulundukları yerde ölçüm ve denetleme işlemleri yürüten birimler, RTU (Remote Terminal Unit) olarak adlandırılmaktadır. SCADA sistemleri içerisinde yerel ölçüm ve kontrol noktalarını oluşturan RTU'lar, birbirlerine bağlanabilen çeşitli cihazları (enerji gözetleme sistemlerinde, kesici ayırıcı) kumanda edebilir; ölçülmesi gereken akım, gerilim, aktif ve reaktif güç, güç faktörü gibi değerleri ölçebilir.

RTU yardımıyla merkezi kontrol ve izlemeyi sağlayabilmek için RTU'lar tüm ölçüm sonuçları ile cihazların çalışma durumlarını (Kesici açık, Ayırıcı kapalı) merkeze iletirler ve merkezden gelen komutlar doğrultusunda (Kesici Aç, Ayırıcı Kapa) işlemlerini yaparlar. Böylece merkezi denetim birimlerinin başında bulunan sistem operatörünün tüm ölçüm sonuçlarını görmesi ve gerekli komutları göndererek sistemin denetlenmesini sağlar. Fakat RTU'nun görevi sadece ölçüm yapmak ve komut uygulamak değil, ölçüm sonuçlarının belirli sınırlar içerisinde olup olmadığını da denetleyerek normal dışı ya da alarm durumlarını merkeze bildirmektir.

RTU'lar gelişen teknoloji ile birlikte bir çok aşamadan geçmişlerdir. İlk zamanlarda kontrol sistemlerinde kullanılan RTU'lar mikro işlemcisizdi. Mikro işlemcisiz RTU'lar sadece ölçüm yaparak bu ölçüm bilgilerini merkeze bildirir ve merkezden gelen komutlar doğrultusunda işlem görürlerdi. Bu tür RTU'lar ile oluşturulan SCADA sistemlerinde bir çok olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Alarm durumlarında ve diğer bütün işlemlerin merkezi denetim sistemi üzerinde yapılmasından dolayı ortaya çıkan problemleri şu şekilde sıralanabilir:

- Merkezin devre dışı kaldığı yada merkezle RTU'ların iletişiminin kesildiği durumlarda oluşacak sorunlara müdahale edilememekte ve sistemin işletimi aksamaktadır.
- Alarm durumlarında, merkezin alarm kararı verip RTU'ya komut göndermesi belli bir süre almaktadır. Bu da anında müdahale edilmesi gereken durumlarda sakıncalara yol açmaktadır.
- Akıllı olmayan RTU'lar ile oluşturulan SCADA isteminin çalışabilmesi için merkezin sürekli olarak RTU'lar ile sürekli iletişim halinde olması gerekmektedir. Ancak bu sayede merkez, denetlenen cihazlar hakkında bilgi sahibi olup istenilen işlemleri yerine getirebilir. Bu durumda çok yoğun iletişim trafiğinin yaşandığı SCADA istemlerinde özel bir iletişim hattının bulunması gerekir.
- Mikroişlemcisiz RTU'lar özel kullanıcı gereksinimlerine ihtiyaç duyulan ya da karmaşık kontrol algoritmalarının uygulandığı durumlarda yetersiz kalmaktadır.
- Tüm SCADA sisteminin yükü merkez bilgisayarı üzerinde olacağından çok hızlı, yüksek işlem gücü olan, yüksek maliyetli sunucuların kullanılması gerekmektedir. Bu da ek ekonomik yük getirmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi mikroişlemcisiz RTU'ların temel amacı kontrolden çok bilgi toplama özelliği taşır. Sanayide Dağıtılmış Kontrol Sistemleri (DCS) hem bilgi toplama hem de toplanan bilgidan yararlanarak kontrol amaçlı olduğu için mikroşlemcili RTU'lar geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mikroşlemcili RTU'lar, programlanabilir cihazlar olup, merkezi bilgisayarın işlem yükünün bir kısmını üzerine alarak, sistem veriminin ve performansının artmasını sağlamaktadır. İşlemcili RTU'lar tüm olumsuz durumları sinayarak alarm uyarıları üretebilir ve bu durumlarda ne yapılacağına anında kendileri karar vererek yerinde müdahale edebilir. Aynı zamanda mikroşlemcili RTU'lar kullanıcının özel isteklerini yerine getirecek şekilde programlanabilir ki böylece denetleyici cihazların kullanıcı gereksinmelerini karşılayacak şekilde çalışması sağlanmış olur. Bu esnada diğer işlemcili RTU'larla haberleşerek işlemlerin yerine getirilmesi sağlanmış olur. Birbirleri arasındaki iletişimi sağlarken aynı zamanda merkezi birim tarafından sürekli gözetlenerek sistemin tümünün denetlenmesine izin verirler. İşlemcili RTU'ların endüstrideki avantajları:

- Mikroişlemcili RTU'lar en karmaşık kontrol yöntemlerinin dahi uygulanmasını sağlarlar.
- Mikroişlemcili RTU'lar kendi başlarına karar verebildikleri için, çoğu zaman merkez birimine gerek duymadan uygulamanın devamı için gerekli işlemleri yerine getirirler. Bu da toplam sistem performansını önemli ölçüde artırır ve tepki süresini azaltır. Böylece kalıcı yada ölümlü sonuçlanabilecek hasar durumlara acil müdahale edilebildiği için tüm istemin güvenilirliği sağlanır.
- Mikroişlemcili RTU'lar normalde kullanılan pek çok elektromekanik ya da mekanik cihazın işlevini üstlenmektedir. Mekanik cihazlar uzun kullanım süreleri sonucunda aşınmakta, verimleri düşmekte ve güvenilirlikleri azalmaktadır. Tamamıyla elektronik yapıdaki RTU ise hassasiyetinde hiçbir değişiklik olmadan daha uzun süre çalışabilmektedir.
- Mikroişlemcili RTU'lar kendi başlarına karar verebildikleri için, merkez bilgisayarın yapacağı pek çok işi de üstlenmiş olur. Bu genel sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Merkez birimin durması veya iletişimin kesilmesi durumunda akıllı RTU hiç durmadan görevini icra etmekte ve gerekli tüm işlevleri yerine getirmektedir.
- Merkezin İşlem Yükünün RTU'lara dağılması sonucunda, merkezin RTU'lar ile sık iletişim kurma gereksinimi kalmayacak, iletişim trafiği hafifleyecek, İletişim ortamı daha verimli kılınacaktır.

RTU elemanı, aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

4.4.2 Güç Kaynağı Modülü

Güç kaynağı modülü şebeke geriliminden otomasyon ekipmanı elektronik cihazları için gerilim üretir. Bu gerilimin en yüksek değeri 24 V kadar etmektedir. 24 V' a sarkan sensör sinyalleri, erişim düzenekleri ve uyarı lambaları için gerilimler, güç kaynağı üniteleri ve/veya kontrol transformatörleri için ilave gerilim sağlar.



Şekil 4.2 Güç kaynağı modülü

4.4.3 Merkezi İşleme Ünitesi

Orta büyüklükten geniş program hafızalı, ikili ve kayan noktalı aritmetikte yüksek işlem performanslı CPU, geniş kapsamlı I/O konfigürasyonu ve dağıtık I/O yapısının kurulması içindir. Bozulmaz CPU'lar daha yüksek emniyet gereklilikleri olan tesislerde kullanılmaktadır.

CPU kontrolörün düzgün işletimini düzenli öz sınamalar, komut testleri ve mantıksal ve kronolojik program çalıştırma kontrolleri vasıtasıyla kontrol eder. Ek olarak, dağıtık I/O yaşam sinyalleri istenerek kontrol edilir. Eğer sistemde bir hata teşhis edilirse, sistem güvenli duruma getirilir.



Şekil 4.3 Merkezi işlem ünitesi

4.4.4 Haberleşme İşlemcisi Modülü

Haberleşme modülünde veri aktarımı çeşitli protokoller yoluyla sağlanır.



Şekil 4.4 Haberleşme işlemcisi modülü

4.4.5 Giriş ve Çıkış Modülleri

4.4.5.1 Dijital Giriş Modülü

Dijital girişler modülü, anahtarların bağlantılarından ve 2 tel giriş şekilli yaklaşma anahtarlarından gelen sinyalleri CPU'nun dahili sinyal seviyesine uyarlar.



Şekil 4.5 Dijital giriş modülü

4.4.5.2 Dijital Çıkış Modülü (DO)

Dijital çıkış modülleri CPU'nun dahili sinyal seviyesini Dijital İşlem sinyaline, manyetik vanaların bağlantılarına, kontaktörlere, küçük motorlara, lambalara ve motor marşlarına dönüştürür.



Şekil 4.6 Dijital çıkış modülü

4.4.5.3 Analog Giriş Modülü

Analog giriş modülleri gerilim ve akım sensörleri, ısı çift, rezistans ve rezistanslı termometre bağlantılarından gelen analog işleme sinyallerini dijital olarak çalışan CPU'ya uyarlar.



Şekil 4.7 Analog giriş modülü

4.4.6 Ana Terminal Birimi (MTU)

SCADA sisteminde geniş bir alana yayılmış RTU'ların koordineli çalışması, RTU'lardan gelen bilgilerin yorumlanması, kullanıcılara sunulması ve ayrıca kullanıcıların isteklerini RTU'lara ileterek merkezi kumandanın sağlanması işlevlerini SCADA sisteminde merkezi sistem birimi yerine getirir.

Merkezi bilgisayar RTU'lardan periyodik olarak gelen verileri, sistem üzerinden alınan ikazları, istenilen bilgileri düzenli olarak saklar. Merkezi yazılım bu bilgileri değerlendirerek kontrol eder. SCADA sistemlerinde merkezi bilgisayar vasıtası ile, RTU'lardan ve sistemin diğer elemanlarından toplanan bilgiler, gerek duyulan hallerde, her türlü raporlar çıktı olarak

kullanıcının istemine sunulur. Merkezi sistemde, denetlenen sistemin akış diyagramının ekran üzerinde görüntülenmesi sağlanır. Dolayısıyla operatör tüm sistemi ekran üzerinde gözlemleyerek sistem takibini yapabilir. Sistemin çalışması açısından RTU'lerden gelen alarm ve arıza uyarıları çok önemli olduğundan merkezi yazılım bu durumları görsel ve sesli olarak operatöre bildirir.

Merkezi sistem birimi yöneticilerin işletme operatörlerine ve bakım elemanlarının tüm işletim sisteminin gerçek zamanlı görsel olarak izleyebildikleri fiziksel çevredir. Kontrol merkezinde, merkezi bilgisayardan başka bulunan kullanıcı arabirimleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

4.4.6.1 Bilgisayar Terminalleri

Bir çok kullanıcıya çalışma imkanı veren bu terminaller operatörlerin sistemi takip edebilmelerini sağlar. Sistemin kontrolü için gerekli bilgilerin girilmesi veya değiştirilmesi mümkün olabilmektedir. Ekranlar ile dinamik işletme noktası (kesici, ayırıcı, motor, vana, ölçü noktası) sürekli gözlenmesi sağlanır.

4.4.6.2 Yazıcılar

İşletmeye ve sisteme ait tüm durum ve arıza hallerini raporlama imkanı sağlar.

4.5 İletişim Sistemi

4.5.1 İletişim Ağı

SCADA sisteminin hız performansını etkileyen en önemli kısımdır. Kontrolü yapılan sistemlerin çeşitli otomasyon seviyelerinde birbirine bağlanan birimleri arasındaki veri transferi ve güncelleştirilmesini içeren tüm işlemler iletişim ağları üzerinden yapılır. Bu nedenle SCADA uygulamalarında haberleşmenin önemi çok büyüktür.

Dağıtılmış denetim sistemlerinde RTU'ların birbirine bağlanması farklı biçimde olabilir. SCADA sistemlerinde kullanılan en genel ağ bağlantıları yıldız ve halka şeklinde gerçekleştirilir. Bağlantı türleri fiziksel bağlantı biçimine ve ağ bileşenlerinin coğrafi konumuna göre yerel (LAN:Local Area Network) ve geniş alan ağları (WAN :Wide Area Network) olarak sınıflandırılırlar.

4.5.1.1 LAN

Bu ağlar küçük boyutludur. Şayet SCADA istemlerinde ana terminal ile yerel terminal birimleri küçük bir alan içerisinde kuruluyorsa bu durumda iletişim bağlantısı yerel alan ağı şeklini alır.

4.5.1.2 WAN

Yerel alan ağı bir ortam ile sınırlıdır. Halbuki Wan, birbirinden çok uzak olan sistemleri birbirine bağlar. Birimler birbirinden coğrafi olarak uzak mesafelerde bulunuyorsa bu durumda iletişim bağlantısı bu ağ türüne dönüşür.

Wan ve Lan sistemleri SCADA kontrol sisteminde geniş bir alana yayılmış birden fazla operatör istasyonunun birbirine bağlanması ve işletmeye ait tüm verilerin transferi için kullanılır. Bu ağlar sayesinde her terminal ünitesine sistemin kaynakları açık hale getirilir.

Kontrol sisteminde herhangi bir terminal birimi başka bir bilgisayarın yazıcısından çıkış alabilir ve herhangi bir birimin bilgisayarı diğer birimdeki bilgisayarın ana belleğinde mevcut olan bir dosyayı bulup kopyalama işlemini gerçekleştirebilir.

4.5.2 İletişim Ortamları

SCADA sistemlerinde merkez ile RTU'lar arasındaki ve RTU'ların kendi aralarındaki iletişim için kullanılan fiziksel elemanlar, oluşturulan ağ türüne göre değişir. Bunlar; özel kablo hatları, fiber optik kablolar, telefon hatları, telsiz ve uydu hatlarıdır.

Yerel alan ağlarında ethernet en çok kullanılan iletişim şeklidir. Ethernet yerel ağ altına alınacak sistemleri (MTU,RTU) birbirine bağlayacak kablolar ve sinyalleşme biçimidir. Ethernet bağlantıları zırhsız iki kablo (UTP), zırlı iki kablo (STP) ya da fiber optik kablo ile gerçekleştirilir.

Geniş alan ağlarında ise iletişim ortamı telefon, telsiz, uydu hatları ve fiber optik kablolarla teşkil edilir. Telsiz hatlarında terminaller arası haberleşme, tahsis edilen bir frekans aralığında telsizler sayesinde gerçekleştirilir. İletişim telefon hatları üzerinden kurulması istendiğinde telekomdan veri iletişim hattı (leased line) kiralamak gerekmektedir. Bu hatlar vasıtası ile

kesintisiz iletişim sağlanır. Coğrafi engellerin söz konusu olduğu yerlerde uydu hatları kullanılır. Fiber optik kablolarda yüksek iletim kapasitesi, yüksek değerdeki band genişliği ve uzak mesafelerdeki düşük kayıpları nedeniyle ağ iletişimde günümüzde en çok kullanılan iletişim elemanıdır.

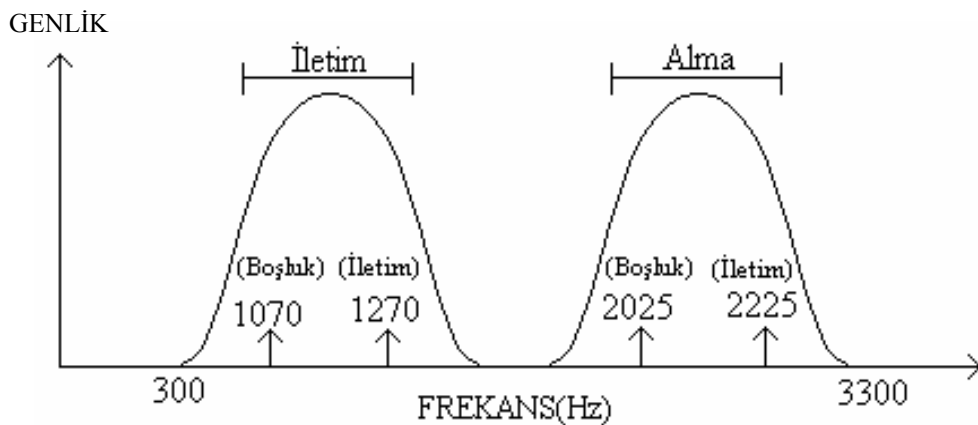
SCADA sistemlerinde ana terminal ve uzak terminal arası haberleşmesinde iletişim ortamları taşınan veri üzerinde bazı olumsuz etkiler gösterir. Dış ortamdaki değişimler ve diğer veri sinyalleri iletilen sinyalin bozulmasına neden olabilir. Bu sebeple veri sinyallerinin mümkün olduğunca az bozunuma uğraması için sinyalin taşındığı ortama uygun hale getirilmesi, yani modüle edilmesi gerekir.

4.5.2.1 Modülasyon:

Veri sinyalinin istenilen yapıya dönüştürülmesi işlemine modülasyon denir. Modülasyonda amaç iletilmesi gereken veri sinyalinde meydana gelen değişikliklerin taşıyıcı sinyali şekillendirmesini sağlamaktır. Böylece iletilmesi gereken veri sinyali, taşıyıcı sinyal üzerinde ifade edilir.

SCADA sistemlerinde kullanılan modülasyonlar:

- **Genlik Modülasyonu:** İletim güçlükleri ve gürültü hassasiyetinden dolayı sık kullanılmaz.



Şekil 4.8 Frekans kaydırmalı modülasyon

- **Frekans Modülasyonu:** En genel frekans modülasyonu 3 kHz band genişliği içinde dört frekansı kullanılan frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK). FSK yarı çift yönlü iletim üzerinde çift yönlü iletim yeteneği ile çalışabilir. Dört frekans iki kanal içinde veri alma ve gönderme işlemine eş zamanlı olarak izin verebilir.

Modülasyon işleminden sonra veri, iletişim hattının konfigürasyonuna bağlı olarak tek yönlü, yarı çift yönlü yada çift yönlü olarak uzak terminal birimlerine iletilir.

Modülasyon tersine çevrilen bir işlem olduğundan bu yöntemlerin herhangi birisiyle gönderilen mesaj alıcı tarafındaki demodülatör tarafından alınır ve oluşan sinyalden gerekli mesaj çıkartılır.

Bir alıcıya farklı iletiler yerlerinden birçok parça bilgi göndermek istenebilir. Her parça veriye ayrı haberleşme kanalı sağlamak mümkündür. Bununla beraber çok yönlü iletiler ve alıcılar gibi haberleşme kanallarının pahalılığı yüzünden bu ekonomik bir çözüm olmaz. Bir çok parça bilgi için tek haberleşme kanalı kullanmak daha ekonomiktir. Bunun için kullanılan teknik çoklama olarak adlandırılır. İki temel çoklama tekniği ; frekans bölme çoklaması (FDM) ve zaman bölme çoklamasıdır.

4.5.3 Modemler

Sayısal veriyi analog iletişim ortamına aktarılmasında görevlidir, aktarımı yapmadan önce modüle eder. Alıcı kısımda ters işlem yapılır. İki türdür; asenkron ve senkron modem.

- **Asenkron modem:** Aynı anda veri alış verişi gerçekleştiremezler. Asenkron modemler iletiler tarafında modüle edilen yaklaşık olarak aynı orandaki veriyi alıcının demodüle etmesi için her veri sonunda ayrı zaman kaynakları kullanır. Mesajı küçük bloklara yada karakterlere bölmeye her bir veri mesajı sık sık senkronize edilir. Bu hızlı senkronizasyonun istendiği yerlerde kısa mesajlar için avantajdır. Düşük senkronizasyon nedeni ile verim yüksektir.
- **Senkron Modem :** Aynı anda veri alımı ve gönderimi yapabilir. Alıcının iletiler ile tam senkron olması için veri akışı ile beraber bir senkronize saat işareti iletir. Bu teknik senkronizasyonla problemsiz olarak çok uzun mesajları ve yüksek veri oranları iletimine izin verir. Senkronizasyonu kurmak uzun bir zaman periyodu gerektirir.

Dataya olan bu ek yükten dolayı kısa mesajlar için dezavantajdır. SCADA sistemlerinde kullanılan modemlerde hata düzeltme ve veri sıkıştırma özellikleri vardır.

4.6 Kontrol Üniteleri

Kontrol üniteleri SCADA sistemlerinin diğer önemli birimini oluşturur. Kontrol üniteleri, kontrol odası seviyesinden çeşitli yardımcı işletmelerin kontrol ünitelerinden işletme ve yönetim seviyesine kadar tüm veri ve bilgileri yüksek hızlarda işleyecek bir yapıdadır. Kontrol alt birimlerine, işletme ünitelerine, çalışma sahasına ait enstrumantasyon ve detektörlere bağlanarak gerekli bilgi ve veri alış verişini sağlarlar.

4.6.1 Programlanabilir Lojik Denetleyiciler

Programlanabilir Lojik Denetleyiciler, ikili ve üst denetimsel kontrolü sağlayan, mikroişlemci tabanlı elektronik ünitelerdir. Bu üniteler, kontrol sisteminde tek veya entegre bir işlem istasyonu olarak, diğer programlanabilir elektronik üniteler ve ekipmanlar ile haberleşme ağı üzerinden iletişim kurarak kullanılır.

PLC'ler, biriken bilgi ve verileri bir yandan SCADA sistemine iletirken bir yandan da işletme fonksiyonlarını yerine getirmek için yazılım programlarına uygun olarak lojik kontrol denetimini sağlarlar. Genel bir kontrol modülü yapısı şu elamanlardan oluşur.

- **Güç Kartı:** Kontrol modülünün ve I/O kartlarının güç gereksinimini sağlar.
- **Uzak Giriş/Çıkış Kartı:** Bu kart kontrol modülünün, iletişim yoluna bağlı diğer sistem elemanları ile haberleşmesini sağlar. Uzaktan kumanda I/O üniteleri, programlanabilir elektronik denetleyiciler ile yüksek hızlı seri haberleşme ağı ile iletişim kurarlar. Uzaktan I/O üniteleri vasıtasıyla programlanabilir elektronik denetleyicilere bağlanan işletme değişkenleri, sistemin veritabanında, aynen lokal olarak bağlanan değişkenler gibidir. Haberleşme ağının yüksek performansı, seri iletişimden dolayı meydana gelebilecek gecikmeleri önemsiz hale getirir.
- **RAM (Random Access Memory):** Gerçek zaman verilerini ve denetim parametrelerini saklamak için kilobyte mertebesinde RAM kullanılır.
- **ROM (Read Only Memory):** Denetim algoritmaları ve sürekli olarak saklanması gerekli bilgiler burada saklanır.

- **A/D Çevirici ve Çoklayıcı:** Denetlenen süreç değişkenlerinin mikrokontrolöre verilebilmesi için gerekli olan analogdan sayısal çevrim işini gerçekleştirir. Çoklayıcı kullanımı ile aynı anda birden fazla kanaldan bilgi girişi yapılabilir.
- **Yerel Giriş/Çıkış Kartı:** Programlanabilir elektronik denetleyici, lokal analog/dijital sinyal giriş ve çıkışlar için çok sayıda sinyal toplama (I/O) kartı içerirler I/O kartları, saha cihaz ve detektörlerine doğrudan bağlanabildiği gibi, kontrol panosunda bulunan alçak gerilim cihazlarına da bağlanabilirler. Saha cihazlarına I/O kartları ile bağlantıları 0-10V veya 4-20mA sinyal kablolarıyla sağlanır. Analog değerler otomatik olarak proses veya iletişim ilişkili değerlere çevrilir.
- **Merkez İşlem Ünitesi (CPU):** Gelişmiş programlanabilir elektronik üniteleri yüksek performanslı mikroişlemci (CPU) kullanırlar. Sistemin yazılımı, arzulanan fonksiyonel konfigürasyonu oluşturmak üzere ana kartlardaki salt okunur bellek (Eprom) modüllerinde saklanır. Uygulama programları ise RAM bellekte toplanır. Programlanabilir elektronik üniteleri sistem yazılımı, bir gerçek-zamanlı işletme sistemi ve bir de uygulama mekanizmasına sahiptirler. Bu ünitelerin programları, öncelik düzeylerinde çevrimli olarak yürütülür. Çevrim süreleri 10msn ile 2sn arasında seçilebilir

4.6.2 Elektrik Güç Dağıtım Panoları

SCADA kontrol sistemlerinde alçak gerilim cihazları, elektronik kontrol ünitelerinin yerleşimi bu panolara yapılır. Bunlar kontaktörler, röleler, sigortalar vb. elemanlar ihtiva ederler.

4.6.3 Saha Elemanları

Saha, süreç ve işletmeye ait verilerin toplandığı SCADA kontrol sistemlerinin en alt seviyesini oluştururlar. Bunlar fiziksel ve elektronik iletişim cihazları olup, işletme için gerekli lokal denetleyicilerdir. Fiziksel çevrenin bilgileri bu seviyede elektrik/elektronik işaretlerine çevrilerek SCADA sistemine girerler. SCADA sisteminden verilen komutlar ile bu seviyede elektrik/elektronik işaretlerden fiziksel büyüklüklere çevrilerek, gerçek dünyada istenen hareketler (kesicilerin açılıp-kapıtılması, motorların start-stop edilmesi vb.) gerçekleştirilmiş olur.

Programlanabilir Kontrol sistemlerinde merkezi bilgisayardaki yazılımdan başka bir de programlanabilir kontrol ünitelerinin yazılım kısmı vardır. Kontrol edilen sistemde en önemli

Özellik elektronik kontrol ünitelerinin sistemin işlevlerine göre programlanabilmesidir. Programlama dili her fonksiyonun girişi ve çıkışı olan bloklarla karakterize edilir. PLC'de böyle bir bloğun görevi lojik AND, OR fonksiyonu gibi olabilir. Yazılım programı uygun modüllere bölünebilir. Bu modüllere ayrı zaman öncelikleri verilerek, hem hızlı hem de yavaş kontrol işlemleri gerçekleştirilir. Herhangi bir elamanın giriş ve ıkışları, bir başka elamanın giriş ve çıkışlarına bağlanabilir. Bu şekilde PLC tarafında oluşan yazılım ana bilgisayarın yazılımı kullanılarak PLC donanımları ile haberleşebilmek grafik ortamlarına aktarılır.

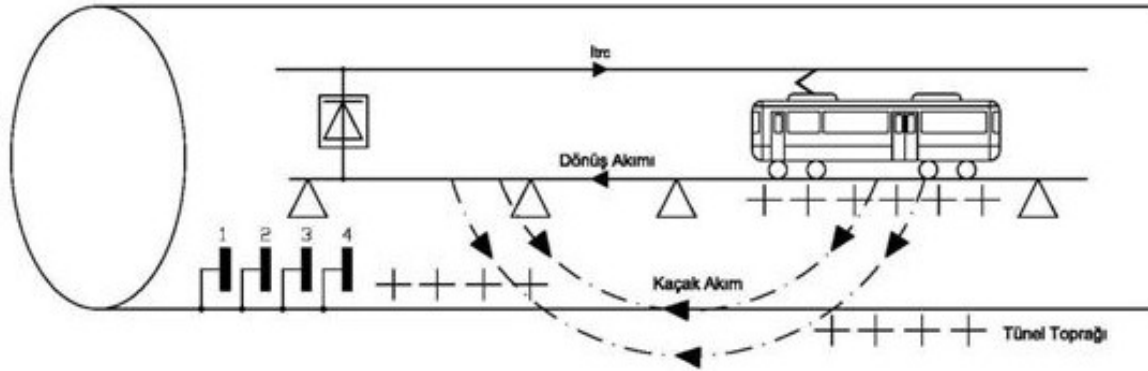
5. **KAÇAK AKIM KOROZYON KORUMA**

Taşıyıcı ray ile araçlara iletilen cer gücü akımının bir dönüş yolu olmalıdır. Akım yolunun kapalı devre oluşturacağı kabul edilirse, toplam dönüş akımı da iletken raylardan akan akıma eşit olmalıdır. Hatboyunca rayların ve ray ile toprak arasındaki sonlu bir direnç, dönüş akımının bir kısmının toprak ile şalt tesisine ve bir kısmının ise toprağa akmasına neden olur. Şalt tesisine yakın bölgede bu dönüş akımı raylara ve topraklama sistemine geri döner. Ray, toprak ve ray bölgesi civarındaki boru, kablo zırhı vb. metaller üzerinden geçen akım toplamı, araca iletilen akıma eşittir.

DC gerilim ile tahrik edilen raylı sistemlerde topraktan akan akım kaçak akım korozyonuna sebep olmaktadır ki bu akım minimize edilmelidir. Özellikle tünellerdeki raylı sistem uygulamaları için kaçak akımdan dolayı oluşacak korozyonun önlenmesi için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu konularla ilgili taleplerin sağlanması amacıyla ilgili standartlar çerçevesinde tesis topraklama koseptinin belirlenmesi ve seçilmesi gereklidir. Bu kurallar gerek inşaat işleri yapım aşamasında ve gerekse elektrik montaj aşamasında uygulanmalıdır.

- **Ray toprağı:** Raylar, geri dönüş kabloları ve doğrultucu geri dönüş barası ray toprağını oluşturmaktadır.
- **Tünel toprağı:** Elektriksel olarak birbiri ile irtibatlandırılmış tünel donatı elemanları tünel toprağını oluşturmaktadır. Ortak eşit potansiyel bağlantı iletkenleri ile birlikte oluşan yapı aynı zamanda orta gerilim ve alçak gerilim koruma toprağı olarak kullanılmaktadır.
- **Nötr Toprağı:** Nötr toprağı harici toprak potansiyeli olup topraklama iletkenleri ile tünel toprağı ve hemzemin ray montajları ile irtibatlandırılmıştır.
- **Ray Potansiyeli:** Ray potansiyeli ray toprağı ile tünel toprağı arasındaki potansiyel farkıdır.
- **Temas gerilimi:** İki tesis arasında insanlar tarafında köprülenerek oluşturulan gerilim farkıdır.
- **Kaçak akım:** Kaçak akım geri dönüş akımının bileşeni olup trafo merkezlerine doğru geri dönüş iletkeni dışında akan akımdır.

Nemli toprak gibi elektrolitikler ile sürekli temas halinde olan metaller üzerinde, aynı zamanda sürekli aynı yönde akan akım varsa bu metallerde kimyasal tepkime beklenir. Bu yüzden, raylardan şalt tesislerine dönen ve toprağa akan kaçak DC akımlardan dolayı DC raylı sistem civarında korozyon oluşur. Kaçak akım korozyonundan korunmak için dönüş devreleri dizaynı, rayların toprak ve tünel, viyadük, hemzemin istasyon gibi inşai yapılardan izolasyonu yapılmalıdır.



- 1 – Yüksek ve orta gerilim topraklaması
- 2 – Alçak gerilim topraklaması
- 3 – Haberleşme ve sinyalizasyon sistemi topraklaması
- 4 – Yıldırım koruma
- +++ Olası korozyon bölgeleri

Şekil 5.1 DC beslemeli raylı sistemde dönüş akımı ve topraklama (Kießling, 2001)

5.1 Kaçak akımlar

Kaçak akımlar, cer sistemi dönüş akımının toprak veya tünel donatısı gibi harici iletkenler üzerinden akmasıdır. Bu kaçak akımlar donatı üzerinden toprağa geçişlerde donatıda elektrolitik paslanma ve aşındırmaya neden olurlar. Bu nedenle sistem tasarımı aşamasında bu kaçak akımı minimize edecek önlemlerin alınması gerekmektedir. Kaçak akım değerinin mümkün olduğunca düşük olabilmesi için dönüş iletken sistemindeki gerilim düşümünün az olması ve rayların tünelden iyi izole edilmesi gerekmektedir. Raylar ile tünel toprağı arasında elektriksel iletkenliği olan bağlantılara izin verilmez. Sinyal ekipmanları, ray devreleri, makas motorları gibi ekipmanların raya bağlanması zorunlu olduğu durumlarda kaçak akımı önlemek amacıyla bu ekipmanların tünel toprağından izole edilmeleri gerekmektedir.

Tren işletme esnasındaki potansiyel farkının değeri ile işletmede olmadığı esnadaki potansiyel farkının değeri, Avrupa Normları'na göre (EN 50122-2 bölüm 7.2.3) +100mV değerinin altında olması gerekmektedir.

5.2 Raylı Sistem Dönüş Akımı Devreleri Ray Bağlantıları

5.2.1 Hat Bağlantıları

Raylardan biri nötr rayı olarak seçilmiş olup geri dönüş bağlantıları bu raya yapılır. Hat üzerinde ses frekansında çalışan ray devreleri olduğundan hat üzerindeki her iki rayı birbirine olan bağlantıları sinyalizasyon ekipmanlarının yerleşimine göre ayrıca belirlenir. Sinyal sisteminin izin verdiği ölçüde belirli aralıklarla bir hat üzerindeki iki ray birbirine bağlanır. Ayrıca sinyal sistemine ve sistemin tünel yapısına göre her 250 m'de bir ise her iki hat birbirine bağlanır. Böylece dönüş akımının hatlar arasında eşit paylaşımı sağlanmış olur.

5.2.2 Geri Dönüş İletken Bağlantıları

Geri dönüş bağlantı noktalarında hat geri dönüşleri ve doğrultucu merkezleri negatif kutbu izole kablolarla bağlanır. Geri dönüş kabloları trafo merkezlerinden her hattın toprak rayına bağlanacağından bu noktada S bağlantı yapılarak rayların dönüş akımını eşit paylaşımları sağlanmış olur.

5.2.3 Raylı Sistem İstasyon Kısa Devre Sistemi

DC Raylı sistemlerde normal işletme koşullarında ve kısa devre anında 3. ray (besleme devresi), raylar ve geri dönüş iletkenleri üzerinde gerilim düşümleri oluşur.

Geri dönüş iletkenleri üzerinde tünel toprağına göre bir gerilim farkı oluşur ve bu gerilime ray potansiyeli denir.

Boylamasına ray gerilimleri, özel yazılımlar aracılığı ile yapılan DC simülasyon sonucu elde edilir ve bu gerilim seviyesi bazı koşullarda müsaade edilen dokunma gerilim seviyesi olan 92 VDC değerini aşar. Bu nedenle demiryolu istasyonlarında kısa devre sistemi kurulur. Bu sistem ray toprağı ile tünel toprağı arasındaki potansiyel farkını ölçer ve arasındaki fark maksimum dokunma gerilimi seviyesi olan 92 VDC değerini geçtiği anda ray toprağı ile tünel toprağını kısa devre eder. Yaklaşık 10 saniye sonra tekrar ray ile tünel toprakları arasındaki bağlantı açılarak kaçak akımların oluşması önlenir.

DC raylı sistemlere güç temini AC orta gerilim şebeke beslemesi, cer gücü temini ve aydınlatma ve diğer ekipmanlar için yardımcı alçak gerilim temininden ibarettir. Cer gücü dönüş akımları ve topraklaması için çeşitli konfigürasyonlar olup yeni ekipmanlar ve montajlar için de bunlara uyulması beklenir. Ayrıca elektrik ekipmanların korunmasını ve can güvenliğini de sağlamalıdır.

Kaçak akım korozyonu metal iletkenden elektrolite akım geçişi olan bölgelerde oluşur. Metal erozyonunun derecesi akıma, metalin tipine, maruz kalma süresine bağlıdır. tünel toprağı dönüş alımına bağlanmaz ve trifaze yüksek ve orta gerilim tesisatlarına, sinyal ve haberleşme ekipmanlarına koruyucu toprak özelliğı sağlar.

5.3 Kaçak Akım Korozyonu

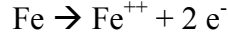
DC beslemeli raylı sistemlerde güç temini kapsamında yerel AC şebekeden orta veya yüksek gerilim beslemesi, cer gücü temini ve teknik ekipmanlar ile aydınlatma ve iç ihtiyaçlar için alçak gerilim dağılımı yer alır. Çeşitli konfigürasyonlardaki topraklama ve dönüş akım devreleri bu sistemleri ve ilave edilecek her yeni tesisi kapsamalıdır. Bunlar hem can güvenliğini sağlamalı hem de kaçak akımın koruyucu etkilerini önlemelidir.

Korozyon olayında metal aşınması akımın değerine, metalin tipine ve akıma maruz kalma süresine bağlıdır. tünel toprağı, orta ve yüksek gerilim ekipmanları, telekom ve sinyal sistemi cihazları ve diğer donanımlara koruyucu toprak görevi yapacağı için dönüş devresine bağlanmaz.

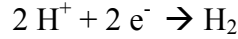
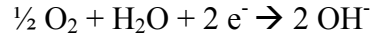
Raylar, zemin üzerinde izolasyon malzemesi, balast & alt balast (hat altındaki kırma taş) veya beton yola traversler üzerine monte edilir. Yüksek değerli hat-toprak direnci, iyi izole edilmiş kuru kumlu zemin üzerine döşenmiş raylarda sağlanabilir. Birçok durumda hat-toprak direnci, toprağın elektrolit gibi davrandığı durumda dönüş akımında toprağı dönüş yolunun parçasıdır. Bu nedenle ray dönüş akımları, hattın geçtiğı bölgede tesis edilmiş boru hatları, tesisatlar vb. metal ekipmanlarda kaçak akım korozyonuna neden olabilir.

Elektrolit içindeki her metal cisim, normalde dengede bulunan osmotik basıncın ve çözelti basıncının etkisindedir. Eğer bu denge, raydan toprağa akan bir elektrik akımı tarafından bozulursa korozyon oluşur. Bu durumda iki paralel tepkime oluşur :

- Anodik reaksiyon:



- Katodik reaksiyon:

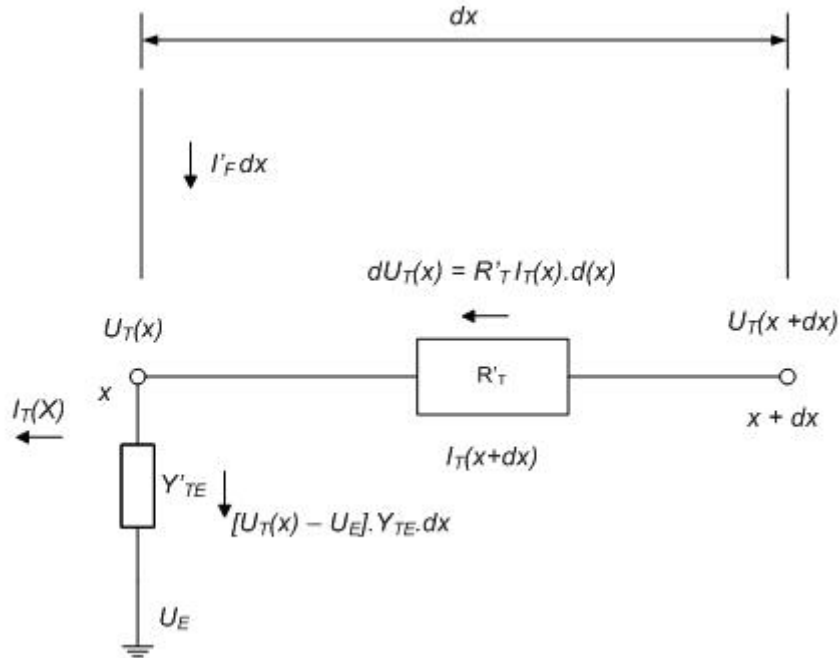


Anotik tepkime metalden elektrolite doğru anot akımı bileşeni I_a akar. Katodik tepkimede ise tam tersi yönde, yani elektrolitten metale doğru I_k akımı akar. Dış bir akım olmadığı sürece bu denge homojen elektrolit içinde, homojen metal yüzeyde devam eder.

$$I_a + (-I_k) = I_{toplamlam} = 0 \quad (5.1)$$

Bu dengenin bir dış akım tarafından bozulması durumunda iki olası durum oluşur:

- Toplam akım sıfırdan büyükse anotik tepkime artacak, korozyon oluşacaktır.
- Toplam sıfırdan küçükse katodik reaksiyon artacak, katodik koruma prensibi geçerli olacaktır.



Şekil 5.2 dx boyundaki ray boyunca gerilim düşümü (Kießling, 2001)

Korozyon oluştuğunda metal parçaları, akımın iletken den toprağa karıştığı aktığı noktada toprağa ayrılmaya başlar. Aşınan metal kütlesi m , Faraday'ın elektroliz kanununa göre hesaplanabilir (Kieşling, 2001):

$$m = C \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (5.2)$$

C metalin elektrokimyasal katsayısı, $i(t)$ ise belirli zaman aralığında geçen akımdır. Bir yılda, 1 A akım ile aşınan metal kütlesi demir için 9,1 kg, kurşun için 33,4 kg, bakır için ise 10,4 kg olarak hesaplanmıştır.

şekil 5.2'deki eşdeğer devreye göre, düzgün dağılmış elektrik yüküne göre hat parçasının potansiyeli dağılımını aşağıdaki gibi çıkartılabilir (Kieşling, 2001):

$$\frac{dU_T(x)}{dx} = I_T(x) \cdot R'_T \quad (5.3)$$

Kirchoof akım kanunlarına göre:

$$\frac{dI_T(x)}{dx} + I'_F = (U_T(x) - U_E) \cdot Y'_{TE} \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte I'_F hat yüküdür, yani sabit hızla hareket eden aracın akımıdır. Propagasyon sabiti α 'yı bu eşitlikte yerleştirirsek:

$$\alpha = \sqrt{R'_T \cdot Y'_{TE}}$$

$$I_T(x) = A \cdot \exp[-\alpha(l - x)] + B \cdot \exp[\alpha(L - x)] \quad (5.5)$$

Besleme noktası ve yük noktası gibi sınır şartları da eklenirse:

$$I_T(x) = \frac{I'_F}{\sinh(\alpha L)} \cdot \sinh[\alpha(L - x)] \quad (5.6)$$

I'_F hat yükü akımı eklenirse, toprağa akan akım için elde edilen eşitlik:

$$I_E(x) = I'_F \cdot (L - x) - I_T(x)$$

$$I_E(x) = I_{trc} \left(\frac{L - x}{L} - \frac{\sinh[\alpha(L - x)]}{\sinh(\alpha L)} \right) \quad (5.7)$$

Besleme bölgesindeki bir noktada, tek yükten oluşan akım:

$$I_E(x) = I_{trc} \left(1 - \frac{\cosh[\alpha(L/2 - x)]}{\cosh(\alpha L/2)}\right) \quad (5.8)$$

Hat boyunca düzgün dağılmış yük kabulü ile rayın potansiyeli:

$$U_{TE} = U_T(x) - U_E = \frac{I_{trc} \cdot L}{Y'_{TE}} \left(1 - \alpha L \frac{\cosh[\alpha(L - x)]}{\sinh(\alpha L)}\right) \quad (5.9)$$

Besleme bölgesindeki bir noktadaki tek bir yük için potansiyel:

$$U_{TE} = \frac{I_{trc} \cdot \alpha}{Y'_{TE}} \cdot \frac{\sinh[\alpha(L/2 - x)]}{\cosh(\alpha L/2)} \quad (5.10)$$

Uygulamada, korozyona maruz kalabilecek bölgeler ile bu riski taşımayan bölgeleri birbirinden ayırmak gerekir. Şekil 5.3'te gösterildiği üzere, hattaki kaçak akım bölgesi ile topraktan hatta geri akan akım arasındaki sınır x_{gr} noktasıdır. Bu nokta aynı zamanda pozitif ve negatif hat gerilimlerinin de sınır noktasıdır ki, en yüksek kaçak akım da bu noktada oluşur. 5.10 eşitliğinde $x=0$ koyarak:

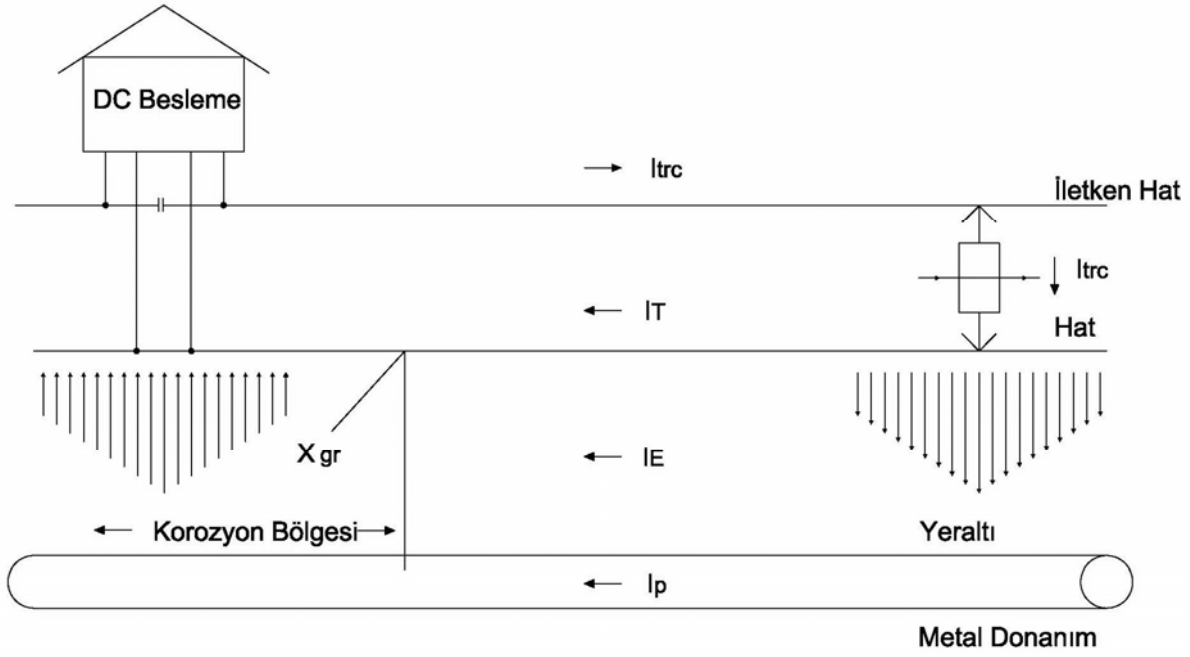
$$U_{TE} = \frac{I_{trc} \cdot L}{Y'_{TE}} \cdot [1 - \alpha L \coth(\alpha L)]$$

Burada $\alpha L \coth(\alpha L)$ terimi daima 1'den büyüktür. Eğer iletken ray veya kontak teli değerliği pozitifse U_{TE} gerilimi negatif olacaktır. Anotik ile katodik bölge arasındaki x_{gr} sınır mesafesinde U_{TE} gerilimi sıfırdır ve bu durumda 4.9 eşitliği şu hale getirilebilir:

$$\sinh(\alpha L) = \alpha L \cdot \cosh[\alpha(L - x_{gr})]$$

$$\alpha \rightarrow 0$$

$$x_{gr} \approx L(1 - \sqrt{3}/3) = 0,42 \cdot L \quad (5.11)$$



Şekil 5.3 Kaçak akım korozyonu (Kießling, 2001)

5.3.1 Kaçak Akım Korozyon Önlemleri

Koruyucu önlemlerin amacı, kaçak akımların neden olduğu korozif etkilerden üçüncü parti ekipmanları ve demiryolu tesislerini korumaktır. Bir yandan kaçak akımlar sınırlandırılırken, diğer yandan dönüş devresindeki hatalar tanımlanıp düzeltilerek sistem ömrünün uzatılması amaçlanır.

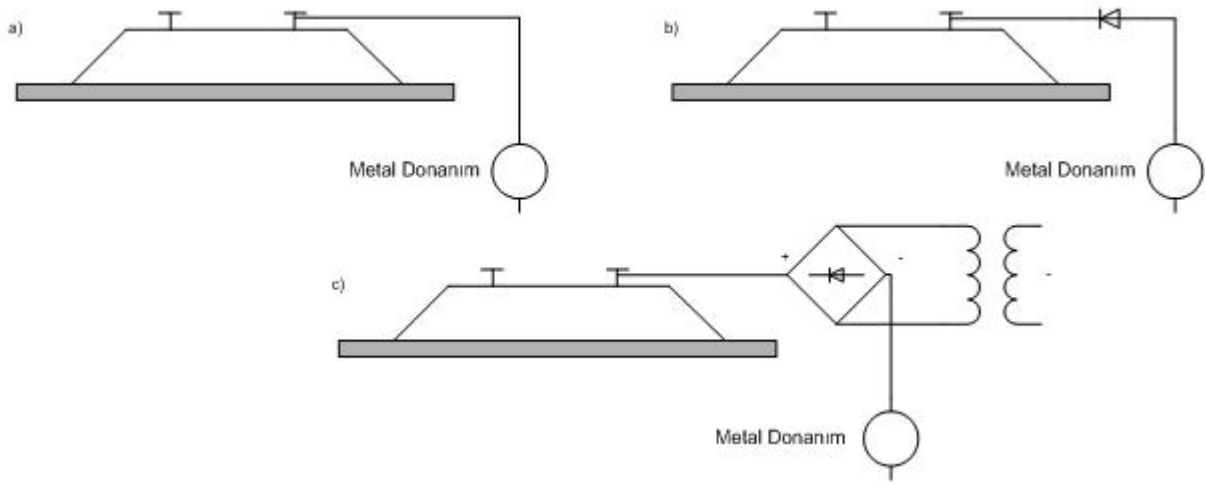
Dönüş devresinden düşük değerli boylamasına gerilim düşümü ve taşıyıcı rayların toprak izolasyonunun iyi derecede olması kaçak akımları sınırlamada en önemli faktörlerdir. Boylamasına gerilim düşümü şalt tesisleri arası mesafelere ve dönüş devresinin direncine bağlı olsa da kaçak akım koruması gereken şalt tesisi sayısını ve dolayısı ile proje maliyetlerini de etkilmektedir.

Aktif ve pasif koruma önlemleri arasındaki ayrıt belirtilmesi faydalıdır. Pasif koruma ilgili metal donanımların izolasyon malzemesi ile kaplanması veya bu tesisatların korozyona dirençli metaller ile yapılmasıdır. Aktif koruma ise cer gücü temini sistemine aşağıdaki önlemlerin uygulanmasını içerir (Naval Eng.Dept.Handbook):

- Şalt tesisleri arası mesafenin azaltılması

- Hat dönüş sistemi boyunu, hat dönüş bağlantısını şalt tesisinden uzağa taşıyarak azaltmak.
- Taşıyıcı raylar ile toprak arası birim uzunluk başına kaçakları azaltmak.
- Dönüş akım sistemi birim uzunluk başına direncini azaltmak.
- Hatta paralel destek hatları oluşturmak ve hatları belirli mesafelerde bağlamak.

Aktif koruma, aynı zamanda katodik koruma uygulamaları da içerir. Katodik korumanın prensibi, korunacak metal üzerinde anotik tepkime oluşmasını önlemek üzerine kuruludur. Şekil 5.4’te katodik koruma prensip şemaları verilmiştir.



Şekil 5.4 Aktif koruma önlemleri (J.G.Yu., 1998)

- Doğrudan kaçak akım saptırma
- Yönlendirilmiş kaçak akım saptırma
- Zorlanmış kaçak akım drenajı

“Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi” de denilen zorlanmış kaçak akım drenajında, metalin yüzeyini korumak için doğrultucu aracılığı ile metale doğru akım sağlanır. Anotla katot arasındaki potansiyel farkı, doğrultucu tarafından sağlanan ilave akım ile kapatılır.

5.3.1.1 Galvanik Katodik Koruma

Galvanik anot sisteminde gerekli katodik koruma akımı aktif olan bir metali korozyona uğratarak sağlanır. Galvanik anotlu, farklı metal veya alaşımlarından meydana gelen korozyon reaksiyonları vasıtasıyla kurulan korozyon hücresi potansiyelindeki farklılıklara göre çalışır. Örneğin demirin bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre arasındaki potansiyel farkı -0,4 ve 0,6’dır. Çinkonun bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre potansiyel farkı -1,1 V’dır. Eğer bu iki metal elektriksel olarak birbirleriyle bağlanırsa demir ve çinko arasında 0,5-0,7 V

potansiyel farkı olacak ve çinko anot olarak çalışacak korozyona uğrayacak ve aynı zamanda koruma akımı sağlayan bir akım kaynağı olacak ve demiri katot haline geçirerek demirin korozyona uğraması önlenecektir.

Çinko, magnezyum, alüminyum alaşımlarının hepsi demir veya çeliğe göre daha fazla negatif potansiyele sahip olduğundan anot durumuna geçerek ve demir veya çeliği katod yaparak korozyona karşı koruyacaktır.

Boru hatlarında olduğu gibi yer altı yapılarının katodik korumasında anotlar yapıya çoğunlukla doğrudan bağlanmayıp test kutusu üzerinden bağlanırlar.

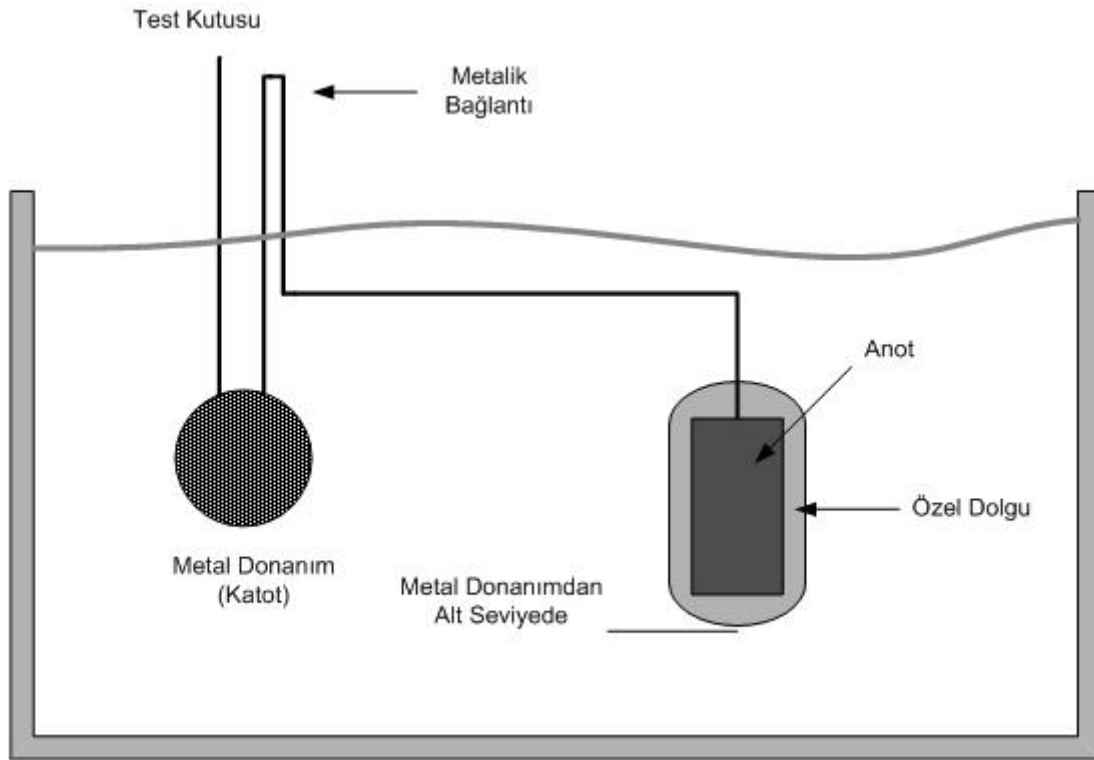
Galvanik katodik koruma sistemlerinin avantajları:

- Tesis edilmesi ekonomik olarak uygundur
- İşletilmesi ve bakımı kolaydır
- Aşırı koruma potansiyeli yönünden oldukça uygundur.
- Diğer metalik yapılar üzerindeki kaçak akım etkileri oldukça azdır
- Dış akım kaynağına gerek yoktur
- Kurulumu kolaydır
- Minimum katodik enterferans vardır
- Düşük bakım ve işletim masrafları
- Tankların korunmasında tankın dış çapı etrafında uniform akım dağılışı
- Minimum istimlak ve irtifak maliyeti
- Koruma akımının verimli kullanımı

Galvanik katodik koruma sistemlerinin dezavantajları:

- Küçük koruma geriliminin elde edilmesi (sınırlı potansiyel farkı)
- Yüksek dirençli elektrolitlerde oldukça küçük akımların elde edilmesi
(tipik 1-2 A)
- Büyük veya genişletilen yapılarda yeni anotların yerleştirilmesi ve tesisi ekonomik olarak uygun değildir
- Yüksek özgül dirençli ortamlarda etkisiz kalması(özellikle 5000 ohm.cm den daha büyük ortamlarda bu sistem kullanılamaz)

- Tank korumada bir sistem ancak bir tankı koruyabilir. Diğerleri için ayrı bir sistem yapılması gerekir.
- Korozyonu ve sistemi kontrol ve izleme zorluğu



Şekil 5.5 Galvanik katodik koruma tesis edilmesi (Naval Eng.Dept.Handbook)

5.3.1.2 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma

Pratikte dış akım kaynaklı koruma sisteminin anotları grafit yüksek silikonlu dökme demir, platin veya metal oksit kaplı titanyumdur. Üniform elektrolit daha küçük değerlerde toprak direnci ve gaz, asit çıkışı sağlamak için anot yataklarında özel dolgu kullanılır. Toprak temas dolgusu normal olarak kok tozu veya petrol kokudur. Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde anotlar ve anot yatağı periyodik olarak kontrol edilmeli; eğer tükenen ve zarara uğrayan anot varsa değiştirilmelidir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi bu sistemdeki doğrultucu ve diğer akım kaynakları göz önüne alınmadığında işletme mantığı olarak galvanik sistemle aynıdır. Bu sistemde diğer doğru akı kaynakları olarak güneş pilleri, doğru akım generatörü kullanılabilir. Fakat genellikle yakınlarda bulunan alternatif akım kaynağından alınan enerji doğrultucu vasıtasıyla

doğru akıma çevrilerek dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde kullanılır.Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin avantajları:

- Büyük veya mevcut yapılar için tesis edildiğinde ekonomik olarak uygun
- Geniş gerilim elde edebilme imkanı (potansiyel farkı ancak doğru akım besleme sisteminin büyüklüğü ile sınırlıdır)
- Kaplamasız, yetersiz kaplamalı veya geniş yapıların korunması için gerekli akım sağlanır
- Anotların değiştirilmesi ekonomik olarak uygun
- Yüksek toprak (elektrolit) dirençli ortamlarda uygulanabilme
- Zayıf kaplanmış veya kaplamasız yapılar için etkili koruma
- Koruma etkinliği her zaman kontrol edilebilir.
- Akım ve gerilim çıkışı her zaman değiştirilebilir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin dezavantajları:

- Önemli derecede işletme ve bakım ihtiyaçları
- Diğer komşu metalik yapılara kaçak akımlardan dolayı önemli ölçüde enterferans etkileri
- Dış güç besleme gerekliliği

6. ÖRNEK BİR METRO SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Dört istasyonlu örnek sistemin özellikleri:

Çizelge 6.1 Örnek sistem güzergahı özellikleri

1. Güzergah Şartları:	
Güzergah boyu:	7,5 (km)
Ortalama hat eğimi:	‰ 11
2. İşletme Şartları:	
Ortalama tren hızı:	40 (km/h)
Tren aralığı:	1,5 (dk.)
Yolcu yükü:	339 (yolcu/araç)
Trendeki araç sayısı:	8
Aracın boş ağırlığı:	30 (ton)
Aracın yüklü ağırlığı:	$30+339 \times 70 \times 0,001=53,73$ (ton)
Tren setinin yüklü ağırlığı:	$8 \times 53,73=429,84$ (ton)

6.1 DC Cer Gücü Hesabı

S km. Uzunluktaki bir demiryolunda trenin sabit hızla işletilebilmesi için hareketli taşıtın uyguladığı cer kuvveti Z olmak üzere yapılan iş (Erişin, 1998):

$$A_{kgm} = 1000 \times Z_{kg} \times S_{km} \quad (6.1)$$

Bu işletme t saniyede gerçekleştiriliyorsa hareketli ortalama üretilen güç:

Çizelge 6.2 Örnek metro sistemi DC güç hesabında kullanılan kısaltmalar

1. Güzergah Şartları:	
Güzergah boyu:	S (km)
Ortalama hat eğimi:	‰ s
2. İşletme Şartları:	
Ortalama tren hızı:	V (km/h)
Tren aralığı:	t (dk.)
Yolcu yükü:	k (yolcu/araç)
Trendeki araç sayısı:	D
Aracın boş ağırlığı:	G_B (ton)
Aracın yüklü ağırlığı:	G_Y (ton)
Tren setinin yüklü ağırlığı:	G (ton)

Yukarıda S km uzunluğundaki demiryolunda bir trenin sabit bir hızla çalıştırılabilmesi için hareketli taşıtın tatbik ettiği cer kuvveti Z ise yapılan iş:

$$A = 1000 \times Z \times S \quad (6.2)$$

Bu sevk işi t saniyede meydana geliyorsa üretilen ortalama güç

$$P \text{ (kgm/s)} = 1000 \times Z \times S = 1000 \times Z \times V \quad (6.3)$$

$$P \text{ (ps)} = 1000/75 \times Z \times V = 1000/(3600 \cdot 75) \times Z \times V = Z \times V/270 \quad (6.4)$$

Hareketli taşıtın verimi η olmak üzere hareketli taşıtın dönen tekerlekleri çevresindeki güç:

$$P \text{ (ps)} = (Z \times V/270) \cdot \eta \quad (6.5)$$

1kW = 1,36 ps olmak üzere bunu kW cinsinden yazarsak:

$$N = (Z \times V) / (270 \cdot 1,36 \cdot \eta) \quad (6.6)$$

Bu güç, akım alıcı ile seyir iletkeninden çekilen güce tekabül eder. Ortalama verim 0.75 alınır:

$$N = Z \times V / 275 \quad (6.7)$$

İşletilen trenin toplam ağırlığı G olmak üzere, Z cer kuvveti ile arasındaki ilişki şu şekilde verilebilir:

$$Z = W \times G \quad (6.8)$$

Burada W, sürtünme kuvvetlerinin toplamını yani tekerlekler ile ray arasındaki yuvarlanma sürtünmesine karşılık gelen mukavemetleri içerir. Demiryolu mukavemeti olarak da isimlendirilir.

İncelenen yol %s eğimde ise, G ağırlığında V hızı ile işletilen trenin aldığı güç genel olarak şöyle yazılabilir:

$$N = [(W + s) \times G \times V] / 275 \quad (6.9)$$

Ampirik W demiryolu toplam mukavemeti ise:

$$W = 2,5 + 0,0005 \times V^2$$

$$N = [(2,5 + 0,0005 \times V^2 + s) \times G \times V] / 275 \quad (6.10)$$

Trenin kullandığı soğutma, klima, kompresör, aydınlatma vb. Yardımcı iç güçleri de eklersek (Erişin, 1998):

$$N_{\text{TOPLAM}} = [(2,5 + 0,0005 \times V^2 + s) \times G \times V] / 275 + N_{\text{iç}} \quad (6.11)$$

$$\text{Parkur süresi (gidiş, geliş)} = 2 \times S \times 60 / V$$

$$\text{Tren sayısı} = \text{Parkur süresi} / \text{Tren aralığı} = 2 \times S \times 60 / V \times t = TS \text{ olsun}$$

Tüm hat için gereken elektrik enerjisi ise:

$$Q (kW) = N_{\text{TOPLAM}} \times TS \quad (6.12)$$

6.1.1 Örnek Hattın Cer Gücü Hesabı

$$8' \text{li tren setinin çekeceği güç: } N = (2,5 \times 0,0005 \times V^2 + s) \times Gt \times V / 275$$

$N = 894 \text{ kW}$, her bir araç için iç güç olarak yaklaşık 85 kW alınırsa tren seti için gereken toplam güç:

$$N_{\text{TOPLAM}} = 894 + 8 \times 85 = 1574 \text{ kW}$$

$$\text{Parkur süresi: } 2 \times 7,5 \times 60 / 40 = 22,5 \text{ dk.}$$

$$\text{Tren sayısı: } 22,5 / 1,5 = 15 \text{ tren}$$

$$\text{Tüm hat için gereken enerji : } Q = 15 \times 1574 = 24 \text{ MW}$$

İlave olarak %10 kalkışta çekilen demaraj akımları da eklenirse toplam $26,4 \text{ MW}$ cer gücü ortaya çıkar.

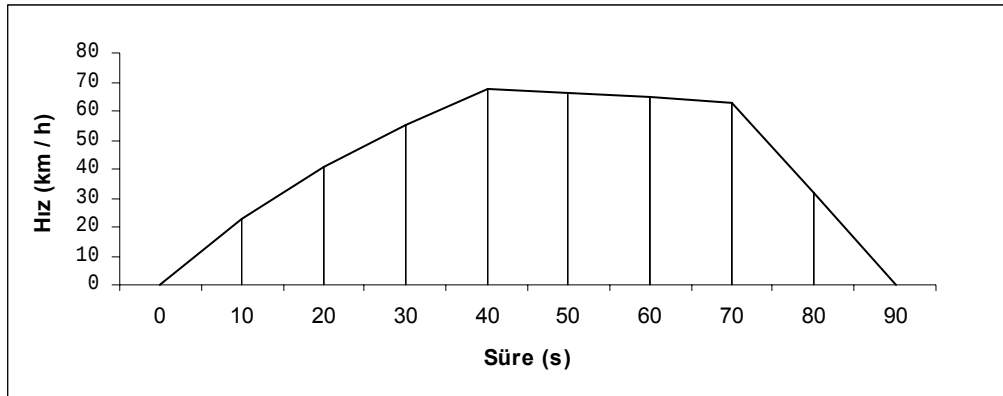
7. *DC BESLEMELİ RAYLI SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ ve VERİMLİLİĞİ*

7.1 *DC Beslemeli Raylı Sistemde Harmonikler*

Kent içi raylı sistemler modern hayatta önemli rol oynamasına rağmen enerji dağıtım hatlarında harmonik oluşumu, reaktif güç ve düşük güç faktörü gibi problemlere neden olmaktadır. DC beslemeli raylı sistemlerde redresör merkezleri, AC güç temin sistemindeki harmoniklerin başlıca sebebidir. Sistem akımındaki yüksek toplam harmonik distorsiyon, harmonikler, reaktif güç tüketimi, gerilim kararsızlığı gibi nedenler ile cer gücünü sağlayan enerji dağıtım hatlarında sorunlar yaşanabilmektedir.

DC beslemeli raylı sistemin güç temini, ana hatları ile, yerel şebekeden alınan yüksek gerilimi düşüren (34,5 / 0,6 kV'a kadar) üç sargılı trifaze trafolar ve bu gerilimi DC gerilime çeviren (750 V) 12-darbeli redresörlerden oluşmaktadır.

Dağıtım hattının yük akış analizinin yapılması için tren işletmesindeki güç tüketimi ve iletken ray boyunca meydana gelen yüklerin dinamik davranışları belirlenmelidir. Çünkü hat boyunca trenin ivmelenme, seyir ve frenleme esnasındaki güç akışı farklılık gösterecektir ki dağıtım hattından güç talebi bu trende göre şekillenecektir. Tren setinin hız karakteristik eğrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.1 Tren setinin yaklaşık hız-zaman karakteristiği

Güç kalitesini yükseltmek için dinamik gerilim regülatörleri, kompanzasyon üniteleri ve harmonik filtreleri uygulanmaktadır. Böylece harmonik akımlar elimine edilebilir, kaynak akımlarını dengesi sağlanabilir, reaktif güç kompanse edilebilir ve güç faktörü iyileştirilebilir.

7.2 *Pasif Güç Filtresi*

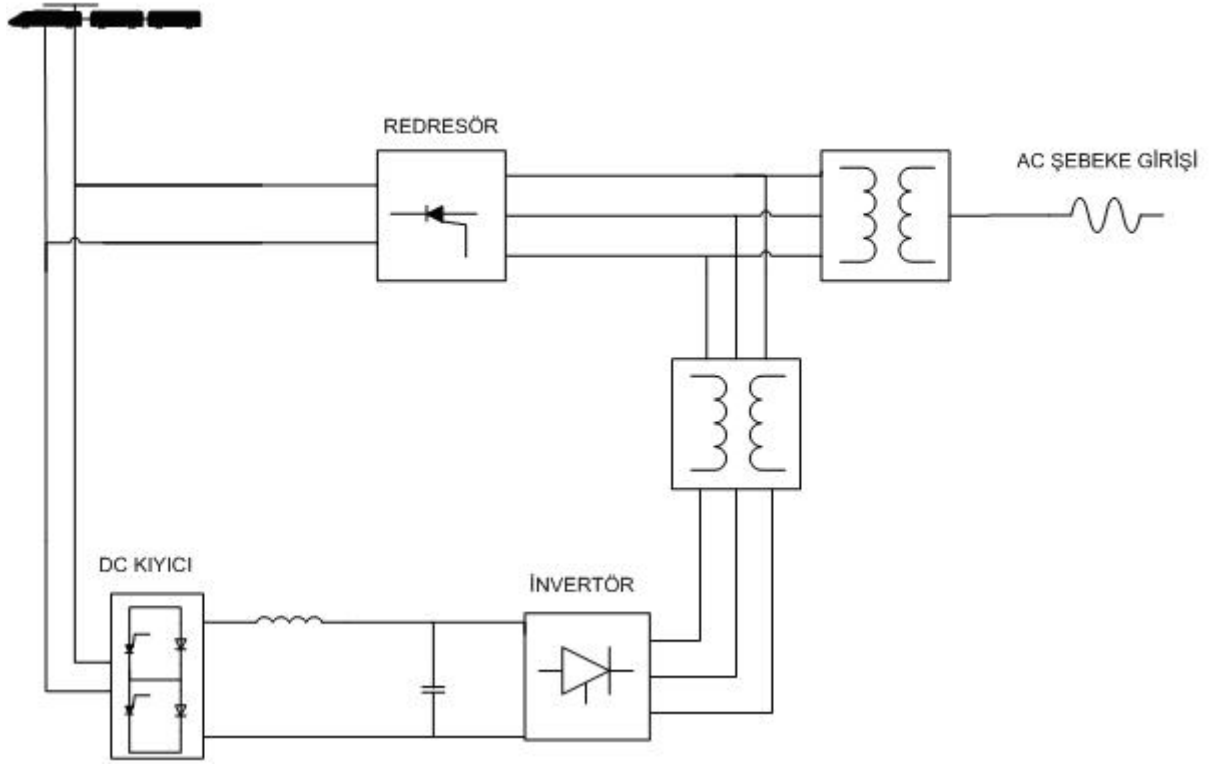
Güç kalitesi iyileştirmede kullanılan klasik metotlardan olan pasif filtreler, spesifik bir harmoniği ve/veya nonlinear yük akımlarından meydana gelen şiddetli harmonikleri yok etmek için LC devrelerinden oluşur. Pasif filtrede amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek LC değerlerini belirlemektir. Her bileşen için, onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu eklenmelidir. Bu filtrelerde, sistem empedansı ile kıyaslandığında, özellikle yok edeceği harmonik için daha düşük empedansa sahip olmasıdır (Kocatepe, 2003).

Düşük maliyet, pasif filtrelerin en büyük avantajıdır. Çünkü sabit bir LC parametresine sahiptirler. Öte yandan bu sabit parametre, dinamik nonlinear yük içeren tesislerin güç kalitesini iyileştirmede efektif olamamaktadır. Pasif filtrelerde karşılaşılan diğer bir problem de filtre empedansı ile sistem empedansının farkının sistem akımındaki harmonikte olası yükselmelere neden olmasıdır.

7.3 *Aktif Güç Filtresi*

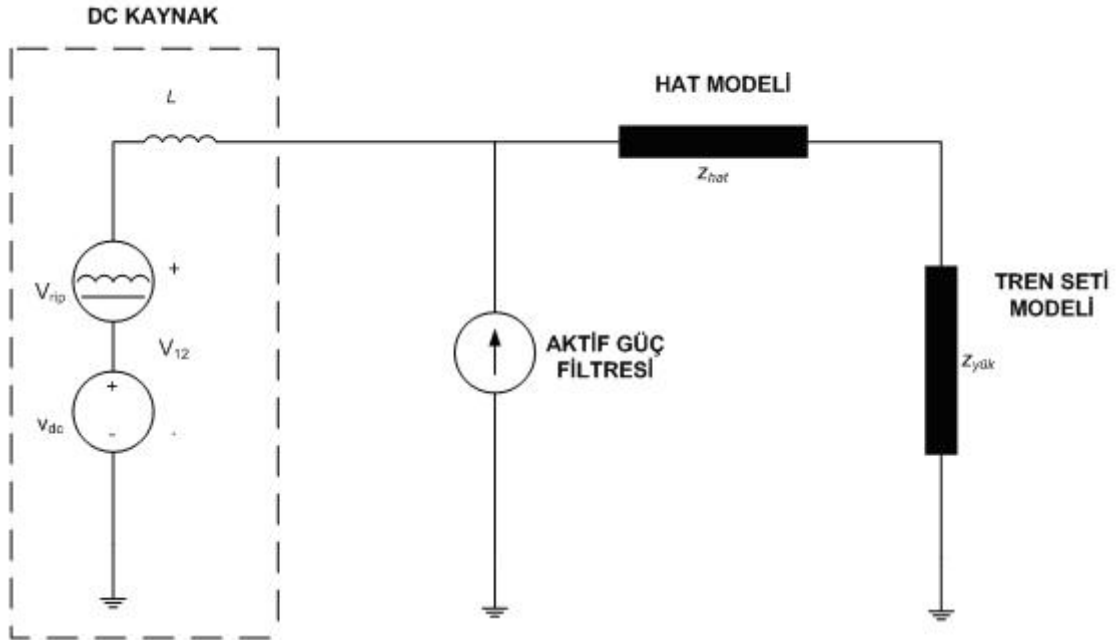
Aktif güç filtreleri (APF), modern güç elektroniği uygulamalarından olan invertörler ile oluşturulup, dinamik şartlarda harmonikleri kompanze etmektedir. Şönt aktif filtreler, dağıtım sisteminin ana barasında kullanılarak olası harmoniklerin yüksek gerilim hattına geçişini engellemektedir. Bu filtreler, akım kaynağı gibi kontrol edilerek sinüsoidal olmayan yüklere karşı sinüsoidal olmayan akım üreterek harmonikleri yok eder ve sistemin akımını sinüsodal forma dönüştürmeye çalışır.

Cer gücü tesislerinde gelişmiş güç kalitesi için aktif güç filtreleri kullanılmaktadır. Redresöre ters paralel bir dönüştürücü devresi ile DC besleme gerilimi regüle edilebilir ve harmonik bileşenler filtrelenebilir. Bu dönüştürücü devre çok seviyeli, yüksek gerilim kıyıcısı ve buna seri bağlı düşük gerilimli bir invertörden oluşur. Kıyıcının yüksek dinamik cevap verebilme yeteneğinden dolayı DC taraftaki harmonikler kompanze edilebilir ve iletken hatta geçişi önlenir. Şekil 7.2’de önerilen cer tesisinin tipik şeması verilmiştir.



Şekil 7.2 Örnek DC güç temin tesisi (Kießling, 2001)

DC şalt tesislerinde genellikle 12-darbeleri redresörler kullanılmaktadır ve bu redresörler, p redresörün darbe sayısı ve m sabit tamsayıdır olmak üzere, DC yanda pm harmonik üretir.

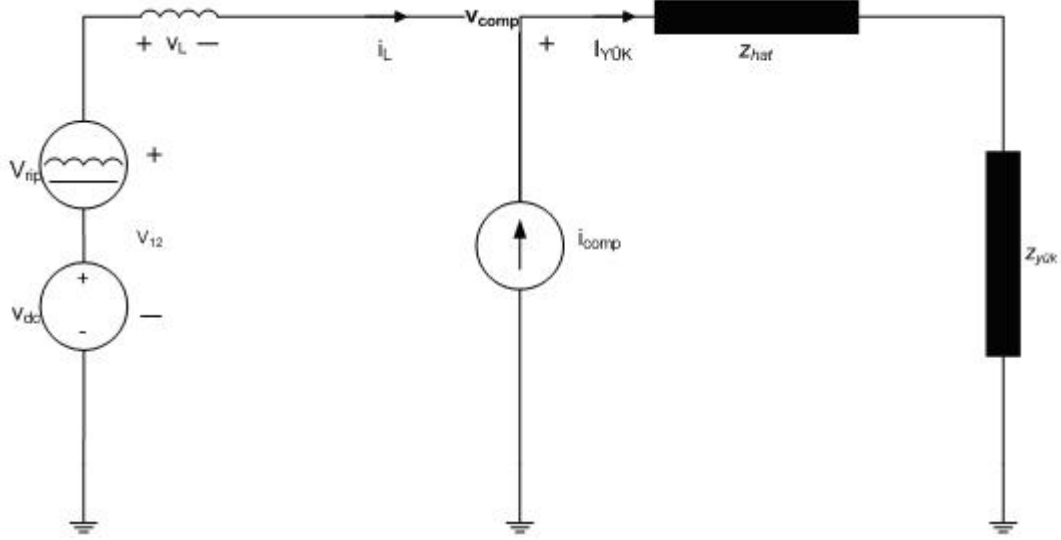


Şekil 7.3 Akım kaynağı ile modellenen aktif güç filtresi eşdeğer devresi (Kießling, 2001)

Şekil 7.3'te, akım kaynağı olarak modellenen aktif güç filtresinin eşdeğer devresi verilmiştir.

7.3.1 Aktif Güç Filtresinde Kompanzasyon Akımının Hesabı

Şekil 7.4'te eşdeğer harmonik kompanzasyon devresi verilmiştir. Burada V_{dc} DC besleme gerilimi, V_{rip} harmonik gerilimi, V_{12} toplam gerilim, L_σ eşdeğer trafo ve redresör endüktansı, Z_{LOAD} değişken yük empedansı, Z_{line} DC hat eşdeğer empedansı, I_{LOAD} yük akımı ve i_{comp} kompanzasyon akımıdır.



Şekil 7.4 Eşdeğer kompanzasyon devresi (Kießling, 2001)

L_σ endüktansından akan i_L akımı harmonik ve DC bileşen içermektedir. Harmonik akımı i_{HARM} ve akımın DC bileşeni i_{DC} olsun. Endüktans uçlarındaki gerilim aşağıdaki birinci dereceden diferansiyel denklem ile gösterilse buradan yük akımına ulaşılabilir (Kießling, 2001):

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (7.1)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt + I_0$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int (v_{12} - v_{comp}) dt + I_0 \quad (7.2)$$

Yük akımının entegrasyon sabiti olan I_0 değeri, DC bileşen olarak kabul edilirse akımın harmonik bileşeni:

$$i_{harm} = \frac{1}{L} \int (v_{12} - v_{comp}) dt \quad (7.3)$$

Harmonik akımı bulunmuş olup bundan sonraki adımda kompanzasyon akımı bulunacaktır. Kirchhoff kanunlarına göre kompanzasyon akımı ile i_L akımı toplamı bize yük akımını vermektedir:

$$I_{LOAD} = i_L + i_{comp} \quad (7.4)$$

Harmonik kompensatörü uçlarındaki gerilim:

$$v_{comp} = v_{12} - v_L \quad (7.5)$$

7.5 eşitliğinde v_L değeri yerine 7.1 eşitliği koyulursa:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_{12} - v_{comp}) \quad (7.6)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int (v_{12} - v_{comp}) dt + I_0 \quad (7.7)$$

Başlangıç koşullarında ilk DC akım bileşeni göz önüne alınırsa, $I_0 = I_{LOAD}$ olacaktır. Buradan da 7.7 eşitliğinde 7.4 eşitliği yerine koyulursa kompanzasyon akımı aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$i_{comp} = -\frac{1}{L} \int (v_{12} - v_{comp}) dt \quad (7.8)$$

i_L akımı ölçülür ve ve belirli ölçümlerin ortalaması ışığında ortalama DC akım şu şekilde bulunabilir:

$$I_{dc} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_L(k) \quad (7.9)$$

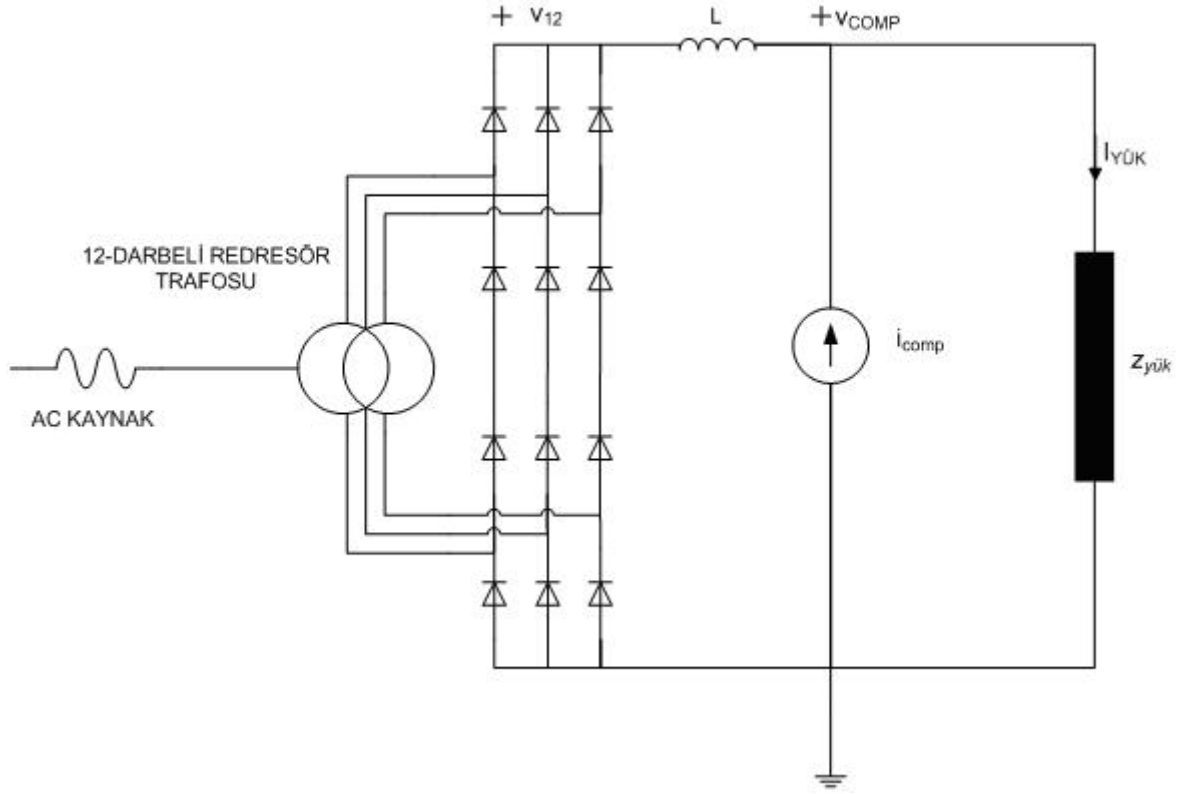
Yük akımının DC akıma eşit olacağı kabulü ile, aktif güç filtresinin sağlayacağı kompanzasyon akımının 7.4 eşitliğinde yerine koyularak kompanzasyon akımı şu şekilde hesaplanabilir:

$$i_{comp}(k) = -i_L(k) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_L(k) \quad (7.10)$$

Burada N örnek sayısı, k örnek sırasını belirtmektedir.

Aktif güç filtresinin pratik uygulamasında ise, modüle edilmiş akım kaynağı olarak yüksek performanslı, IGBT tabanlı kıyıcı önerilebilir. DC taraf harmonik kompanzasyonu geniş bir bant aralığına ihtiyaç duyacaktır. IGBT tabanlı ekipmanlar ile yüksek anahtarlama frekansı elde edilebilir ve küçük hacimli filtreler oluşturulabilir. IGBT'lerin dezavantaj

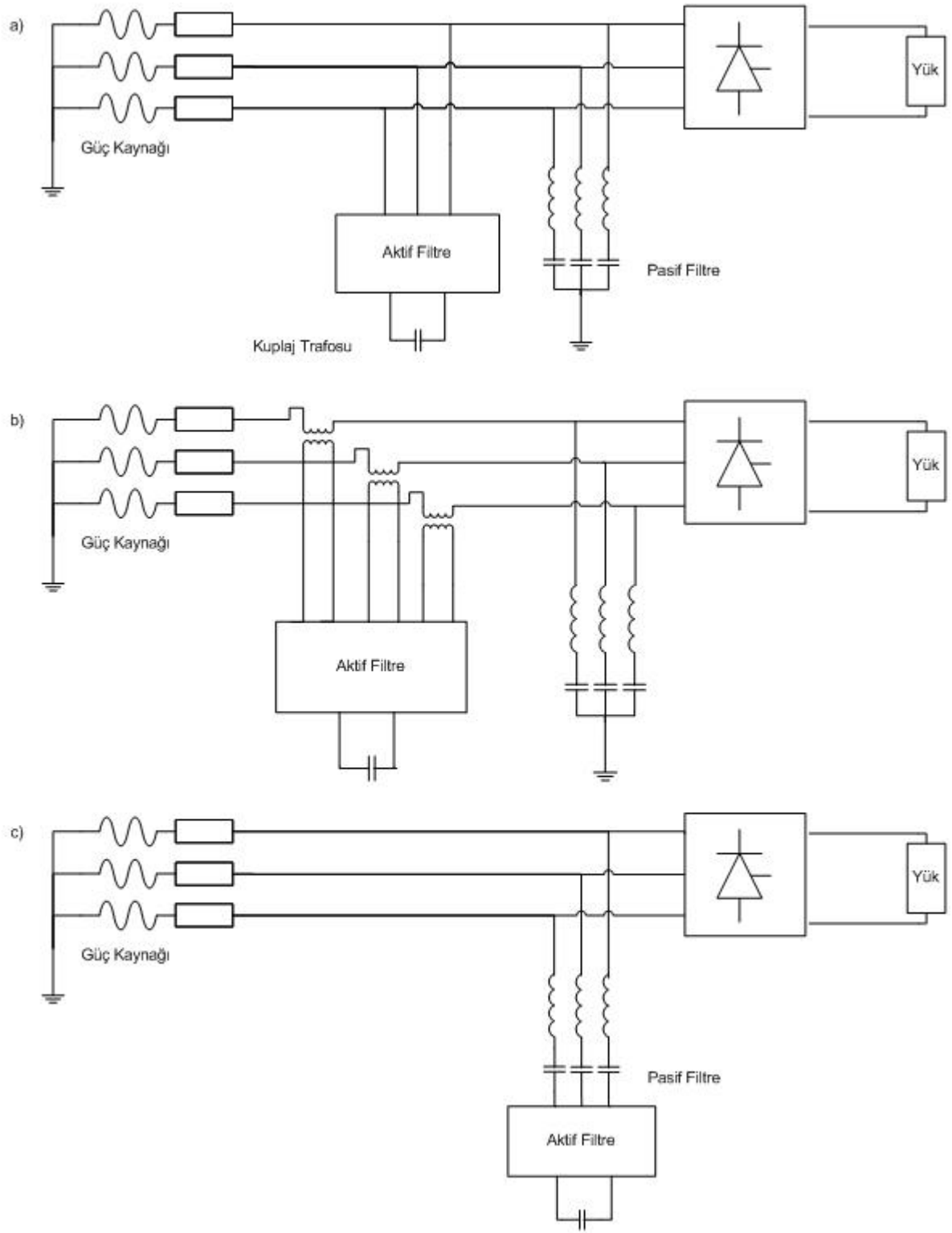
oluşturabileceği nokta yüksek kesme gerilimi özellikle 3000 V ve üzeri gerilimde beslenen raylı sistemlerde iletken ray nominal geriliminin bu kesme voltajı üzerinde olmasıdır.



Şekil 7.5 Basitleştirilmiş aktif güç filtresi devre şeması

7.4 Hibrit Filtreler

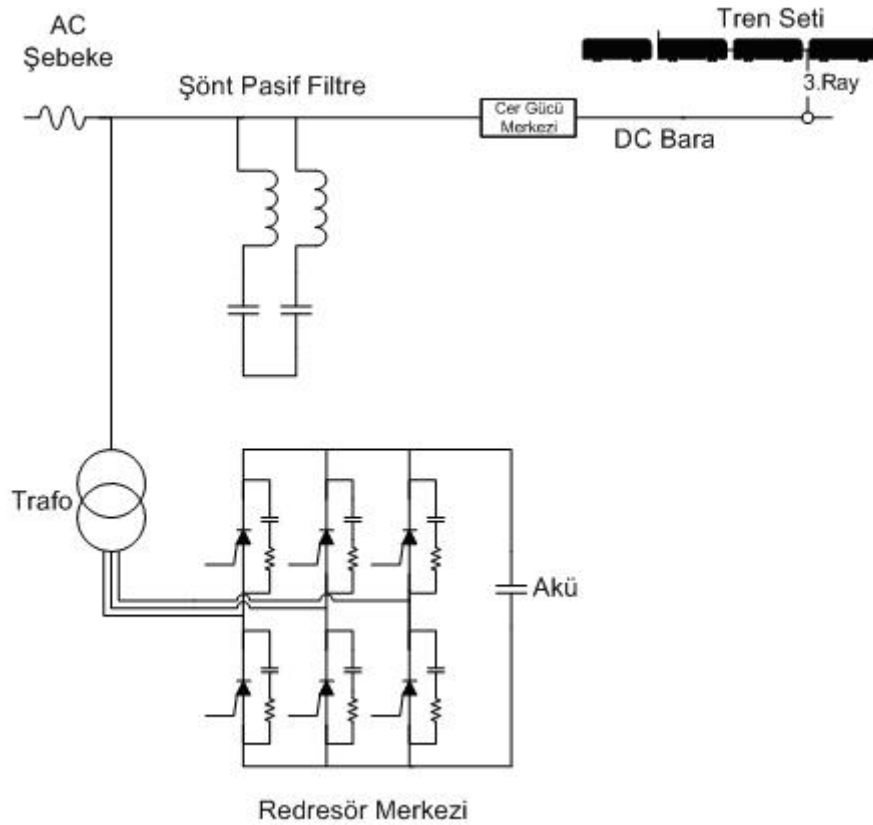
Hibrit filtreler, aktif ve pasif filtrelerin çeşitli kombinasyonlardaki birleşimlerinden oluşur ki böylece pasif filtrelerin rezonans oluşturma olasılığı ve dinamik olmayan tepkileri, aktif filtrelerin yüksek maliyeti gibi dezavantajlar ortadan kaldırılabilir. Nonlineer yüklere seri ve paralel kombinasyonlarda bağlanabilirler. Çeşitli bağlantı tipleri Şekil 7.6'da verilmiştir (Hosseini, 2004).



Şekil 7.6 Hibrit filtrelerin çeşitli bağlantı şekilleri (Hosseini, 2004)

7.5 Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması

Aktif güç filtreleri, güç dağıtım sistemlerinde yükten kaynaklanan harmoniklerin şebekeye etkisini önleyerek güç kalitesini artırmada en sık kullanılan filtre tipidir. Ayrıca reaktif güç kompanzasyonunda ve trifaze akım dengemelerinde de kullanılabilir. Aktif güç filtresinde, bir kontrolör yok edilecek harmoniği ve kompanze edilecek reaktif gücü belirler. Bu kontrolörün çıkışı, trifaze akım kontrollü invertörün referansıdır. Şekil 7.7’de, DC beslemeli cer gücü şalt tesisindeki şematik bağlantı diyagramı verilmiştir.



Şekil 7.7 Aktif güç filtresinin DC cer tesisine şematik bağlantı diyagramı (Kießling, 2001)

Aktif ve pasif güç filtrelerinin karşılaştırılması Tablo 7.1’de verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere aktif güç filtreleri, güç kalitesini iyileştirmede çoğu yönden pasif filtrelerden daha etkilidir.

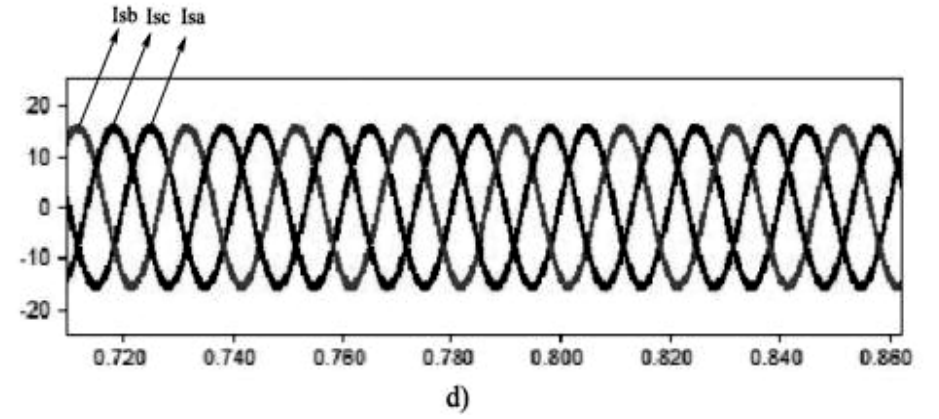
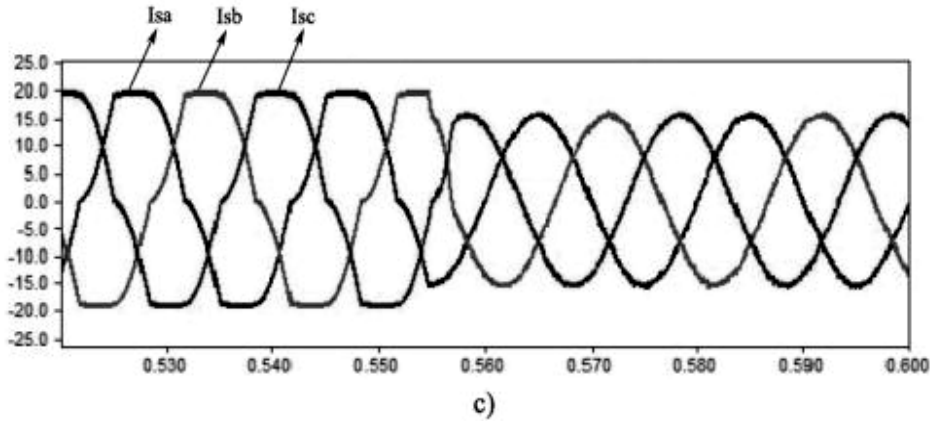
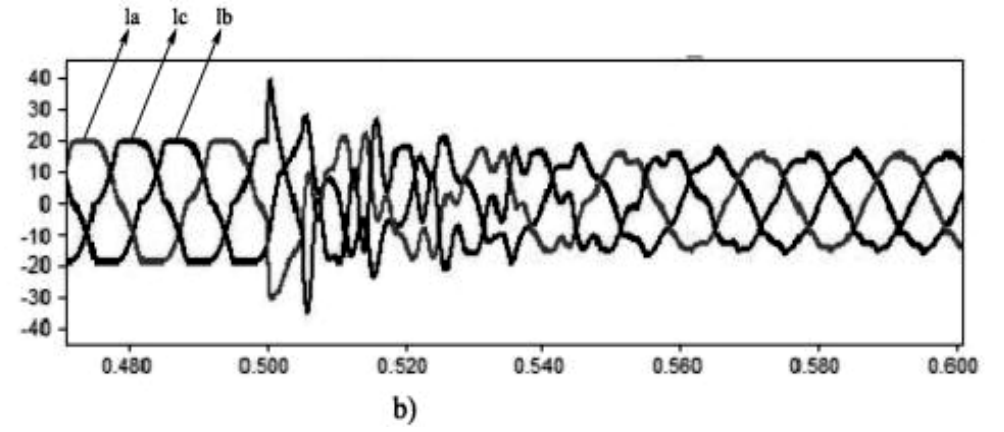
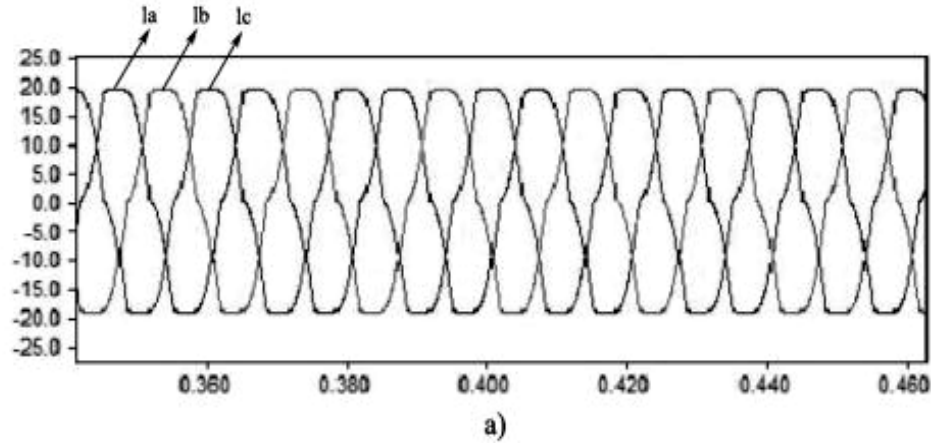
Aşağıdaki 7.8 - 7.9 - 7.10 no.lu şekillerde, şebeke geriliminin ve yukarıda söz edilen üç tip filtresinin cer gücü temin sistemine eklenmesi sonucu elde edilen değişimler verilmiştir. Buna göre şönt pasif güç filtreleri, belirli harmonikleri azaltabilir ve reaktif gücü yük değişimlerinde

daha düşük performans ile kompanze edebilir. Harmonik eliminasyonunda ve reaktif güç kompanzasyonunda aktif güç filtresinin daha iyi performans gösterdiği Şekil 7.8-7.9-7.10'da görülmektedir. Ayrıca aktif güç filtreleri reaktif güç kompanzasyonuna daha hızlı başlayabilmektedir. Fakat buradaki temel fark, aktif güç filtresinin maliyetinin pasif güç filtresine göre yüksek olmasıdır.

Çizelge 7.1 Aktif ve pasif güç filtrelerinin karşılaştırılması (Kocatepe, 2001)

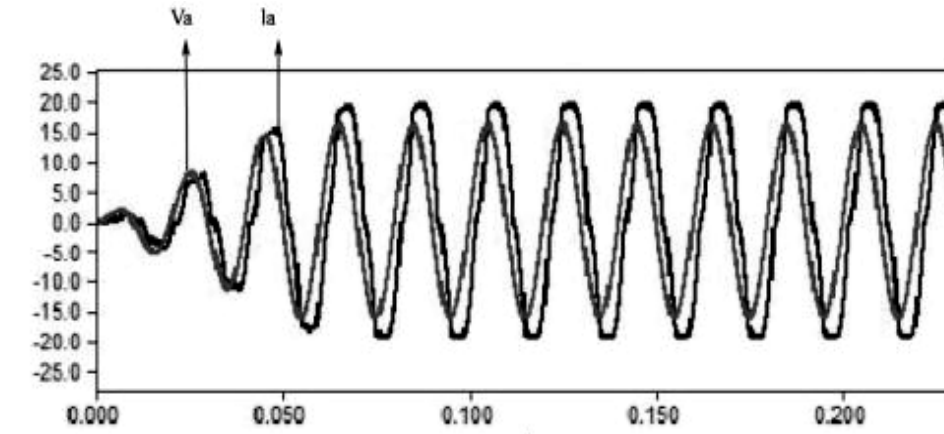
<i>Karşılaştırma Kriteri</i>	<i>Pasif Filtre</i>	<i>Aktif Filtre</i>
Harmonik akım kontrolü	Her harmonik frekansı için ayrı filtre gerekir	Birden fazla harmoniğin aynı anda kontrolü mümkün
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Filtre etkinliği azalır	Etkilenme olmaz
Empedans değişiminin etkisi	Rezonans riski mevcut	Etkilenme olmaz
Akım yükselme riski	Aşırı yüklenme riski mevcut	Aşırı yüklenme riski yok
Yeni yük ilavesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekir	Filtrede değişikliğe gerek duyulmaz
Sistemin temel dalga frekansının değişmesi	Modifikasyon yapılamaz, filtrenin değiştirilmesi gerekir	Ayarlama ile adaptasyon sağlanabilir
Boyutlar	Harmonik genliğine ve derecesine bağlı	Oldukça küçük
Maliyet	Kurulum maliyeti düşük, bakım gideri yüksek	Kurulum maliyeti yüksek, bakım gideri düşük

Şönt aktif güç filtresi ile 5. ve 7. harmonikler için şönt pasif güç filtresi ile oluşturulan hibrit güç filtresinin harmonik azaltılması, güç faktörü iyileştirme ve reaktif güç kompanzasyonu performansı grafiklerden görülebilmektedir. Dahası hibrit güç filtreleri dinamik durumlarda bahsi geçen filtrelere göre daha az aktif güç tüketimi ve daha az maliyet ile fonksiyonlarını gerçekleştirebilmektedir. Sonuç olarak, hibrit filtreler tek başına aktif veya pasif güç filtrelerinden daha etkili performans göstermektedir. Maliyet kıyası uygulamalara göre yapılarak en uygun çözüm uygulanabilir.

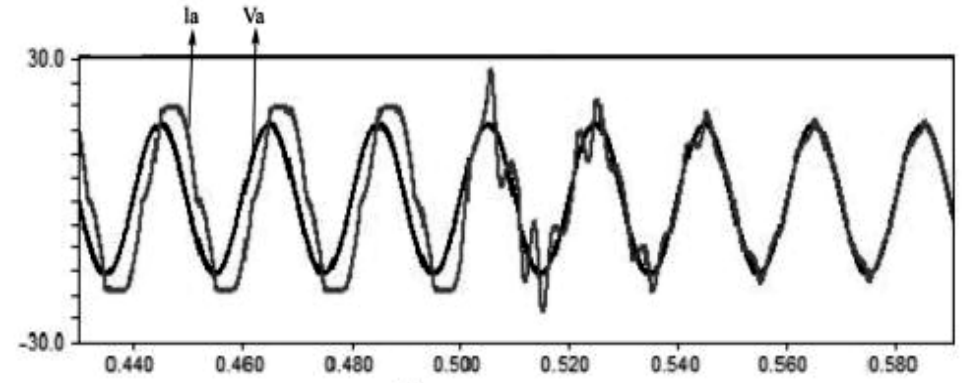


Şekil 7.8 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı akımı dalga şekilleri (Hosseini, 2004)

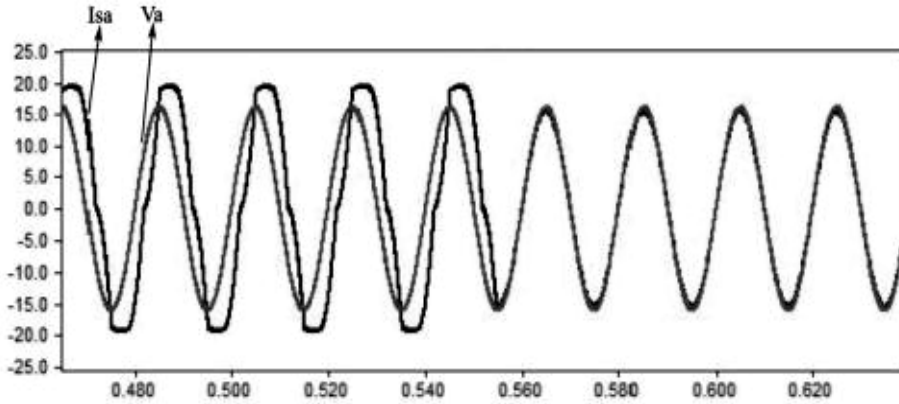
- a) Filtre yok
- b) Pasif güç filtresi ile
- c) Şönt aktif güç filtresi ile
- d) Hibrit filtre ile



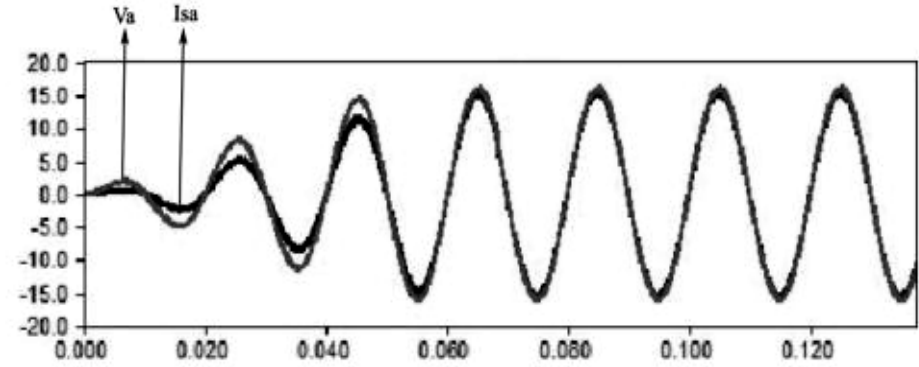
a)



b)



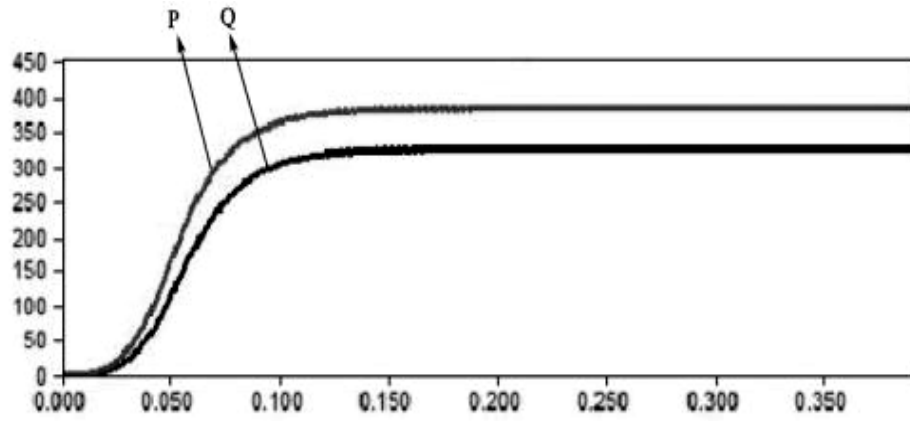
c)



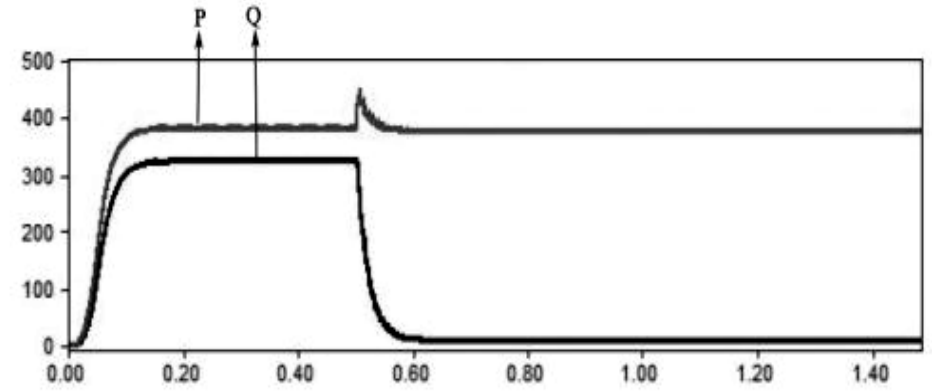
d)

Şekil 7.9 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı gerilim-akım dalga şekilleri (Hosseini, 2004)

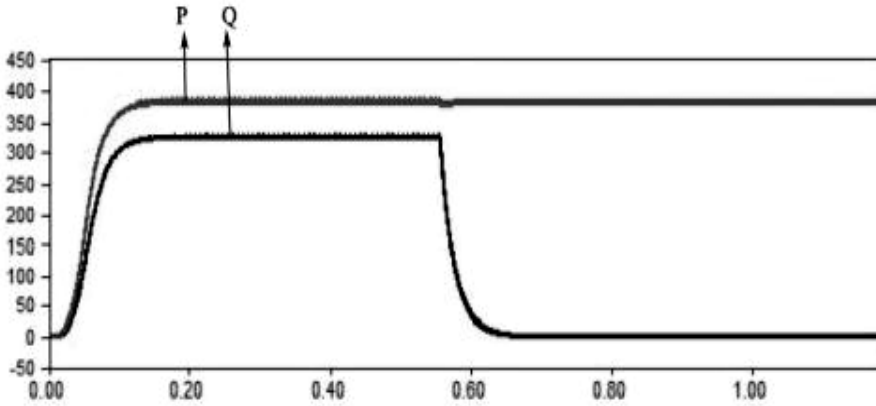
- a) Filtre yok
- b) Pasif güç filtresi ile
- c) Şönt aktif güç filtresi ile
- d) Hibrit filtre ile



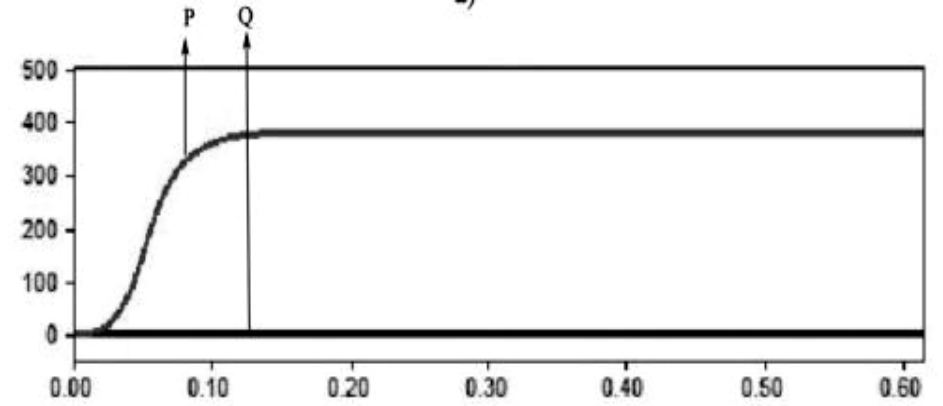
a)



b)



c)



d)

Şekil 7.10 DC beslemeli raylı sistem enerji besleme hattı aktif-reaktif güç dalga şekilleri (Hosseini, 2004)

- a) Filtre yok
- b) Pasif güç filtresi ile
- c) Şönt aktif güç filtresi ile
- d) Hibrit filtre ile

7.6 Bir Metro Sisteminde Güç Kalitesinin İncelenmesi

Örnekte, Bursa hafif raylı sisteminde yapılan ölçümler incelenmiştir. Temin edilen 750 VDC gerilim 34,5 kV fiderler üzerinden redresörler ile sağlanmaktadır. Gerilim değişimlerine bağlı güç kalitesi ve kararlılığındaki değişimler hem sistem güvenilirliğine hem de işletme maliyetlerine yük getirmektedir.

Buradaki sistemde bulunan reaktif güç ve harmonik problemlerine alternatif çözümler üretilmeye çalışılmıştır.

Reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili ihtiyaçların tespiti için reel durumda oldukça çok veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için aylık aktif/reaktif enerji giderleri, fiderlerde ve istasyonlarda günboyu yapılan ölçümler, işletme stratejileri vb. bilgiler temin edilmiştir. Günün saatlerine göre değişen yük ihtiyacı göz önüne alınırsa, ölçümler günün farklı saatlerinde ve sık aralıklarla tekrar edilmiştir.

Ana fiderlerde görünür güç, aktif güç, reaktif güç, akımın gerçek etkin değeri, gerilimin gerçek etkin değeri, güç faktörü, toplam harmonik bozulma, akımın harmonik bileşenlerinin etkin değerleri ölçümlenir. Ayrıca güç kalitesi analizörü ile akım ve gerilimin periyodik olarak gün boyu ölçümü yapılır.

Kurgulanan sistem için, bir saatlik zaman aralığında şu veriler elde edilmiştir:

Aktif güç: 33.660 kWh

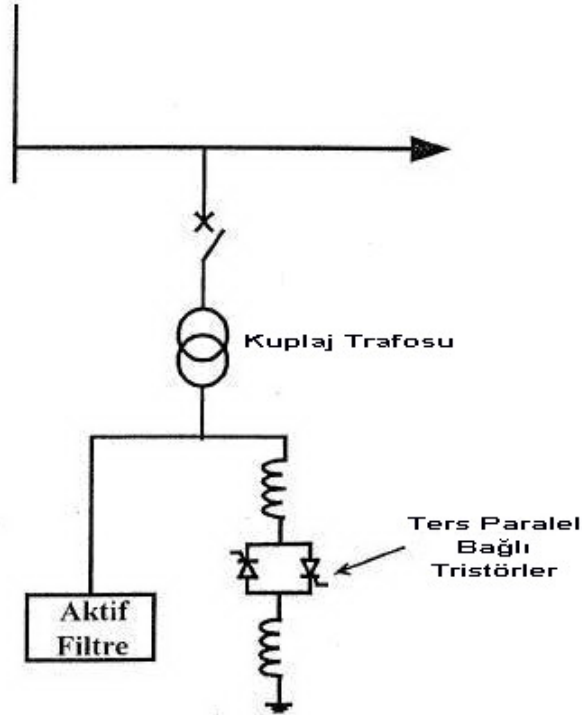
Endüktif reaktif güç: 396 kVARh

Kapasitif reaktif güç: 10.296 kVARh

Çizelge 7.2’de, Bursa hafif raylı sisteminin 1 no.lu fiderinde ölçülen harmoniklerin minimum, maksimum ve ortalama etkin değerleri ve maksimum yük akımı yüzdesi oranları verilmiştir. Buradaki değerlendirmede I_{SC}/I_n 50-100 arasında kabul edilecektir. Ayrıca 1.fider için 15 dakikalık maksimum güç talebi 2,00 MVA ve buna karşılık gelen I_n 32,50 A olarak;2.fider için ise maksimum güç talebi 2,25 MVA ve I_n 37,15 A olarak kabul edilmiştir.

1.fiderin kapasitif olarak davrandığı söylenebilir. Bunun nedeni, bu fiderden beslenen 34,5 kV dönüştürücü trafoların ve yardımcı güç ihtiyacını sağlayan trafoların 34,5 kV kabloları (185-240 mm² kesitli) bağlanmasıdır ki, bu kabloların kaçak kapasitansları nedeniyle, boşta durması halinde 750 kVAr reaktif güç üretmesidir.

Tek kademeli şönt reaktörün 34,5 kV gerilim seviyesine ya da 34,5/0,4 kV servis trafosunun 0,4 kV tarafına bağlanması bir çözüm olabilir. Ancak en uygun bağlantı noktasının doğru olarak tespit edilebilmesi için akım harmoniklerine ilişkin problemin nasıl çözüleceğinin ve iç ihtiyaçlar için kullanılan servis trafosunun kurulu gücünün ve onun beslediği kritik yüklerin bu bağlantıya izin verip vermediği hususlarının da dikkate alınması gerekmektedir. 34,5/0,4 kV servis trafosunun sekonderinin bu bağlantıya uygun olup olmadığını tespit etmek amacıyla bu trafonun primerinde ölçüm gerçekleştirilmelidir.



Şekil 7.11 Ters paralel bağlı tristörler ile devreye alınabilen şönt reaktör ve aktif filtre

Fiderin hat akımlarının harmonik akım içeriği açısından değerlendirilmesi yapıldığında 11, 13, 23 ve 25. harmonik bileşenlerinin ilgili standartlara göre sınır değerlerin üzerinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Ülkemizde şu anda, genellikle, elektrik dağıtım şirketleri bu tür durumlara cezai bir yaptırım uygulamamaktadır. Bu nedenle fiderin reaktif güç probleminin çözümünde harmonik akım probleminin çözümü de gerçekleştirilmeli veya en azından seçilecek olan

reaktif güç kompanzasyon sisteminin gelecekte harmonik akım probleminin çözümüne de olanak tanıyacak bir topolojiye sahip olmasına dikkat edilmesi uygun olacaktır.

Çizelge 7.2 1.Fiderin akım harmonikleri

Harmonik Sırası	Toplam Yük Akımının Yüzdesi % (I_K / I_L)				Etkin Değer (I_L)		
	Minimum	Ortalama	Maksimum	Sınır	Minimum	Ortalama	Maksimum
2	0.45	0.58	6.67	2.5	0.15	0.19	2.17
3	0.85	1.48	5.66	10	0.28	0.48	1.84
4	0.53	0.63	4.49	2.5	0.17	0.20	1.46
5	0.55	1.99	7.96	10	0.18	0.65	2.58
6	0.44	0.53	2.26	2.5	0.14	0.17	0.73
7	0.47	1.15	4.25	10	0.15	0.37	1.38
8	0.44	0.51	0.96	2.5	0.16	0.17	0.31
9	0.44	0.56	1.00	10	0.16	0.18	0.33
10	0.43	0.52	0.89	2.5	0.14	0.17	0.29
11	0.48	4.21	17.71	4.5	0.16	1.37	5.75
12	0.43	0.54	1.03	1.13	0.14	0.17	0.34
13	0.48	2.43	13.79	4.5	0.16	0.79	4.48
14	0.43	0.52	0.78	1.13	0.14	0.17	0.25
15	0.45	0.59	1.76	4.5	0.15	0.19	0.57
16	0.43	0.52	0.72	1.13	0.14	0.17	0.23
17	0.45	0.98	3.73	4.0	0.15	0.32	1.21
18	0.43	0.52	0.71	1.0	0.14	0.17	0.23
19	0.45	0.67	2.03	4.0	0.15	0.22	0.66
20	0.43	0.52	0.65	1.0	0.14	0.17	0.21
21	0.45	0.60	1.68	4.0	0.15	0.20	0.54
22	0.43	0.52	0.77	1.0	0.14	0.17	0.25
23	0.48	1.26	6.44	1.5	0.16	0.41	2.09
24	0.43	0.54	0.81	0.38	0.14	0.17	0.26
25	0.46	0.91	5.00	1.5	0.15	0.29	1.62
26	0.43	0.52	0.69	0.38	0.14	0.17	0.22
27	0.45	0.70	2.67	1.5	0.15	0.23	0.87
28	0.43	0.52	0.71	0.38	0.14	0.17	0.23
29	0.47	1.05	4.15	1.5	0.15	0.34	1.35
30	0.43	0.52	0.70	0.38	0.14	0.17	0.23
31	0.45	0.59	1.44	1.5	0.15	0.19	0.47

Harmonik akım problemini çözmek amacıyla aktif güç filtresi düşünülebilir. Aktif güç filtresinin kurulu gücünün çok düşük olması nedeniyle 34,5 kV seviyesine bağlanması ekonomik bir çözüm olarak mümkün görülmemektedir. Bu nedenle, aktif güç filtresi 34,5 kV seviyesine dolaylı olarak bağlanmalıdır. Böyle bir çözüm teknik ve ekonomik olarak yapılabilir, genişletilebilir bir çözüm olması da mümkündür.

7.7 Raylı Sistemlerde Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı (Dinamik Frenleme)

Son yıllarda enerji, gerek ekonomik ve gerekse çevrenin korunması anlamında önem kazanan ve gündemden düşmeyen bir konu olmuştur. Hemen hemen her endüstri kolunun ihtiyaç duyması, kaynakların azalması, erişiminin zorlaşması ve atıklarının çevreye etkileri nedeni ile enerji politikalarında sürdürülebilirlik, verimlilik ve geri kazanım konuları sık gündeme gelmektedir.

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan araçların frenleme esnasında açığa çıkardıkları enerji frenleme reostaları ile harcanmaktadır. Tünellerde ısınma problemine yol açan, boşa harcanması nedeni ile de enerji verimliliğini düşürerek enerji giderlerini artmaktadır.

Frenleme akımı, araç üzerindeki reosta bankları üzerinden boşaltılır. Frenleme gücü, kıyıcı ile akım kontrolü yapılarak kontrol edilebilir. Frenleme enerjisi boşaltıldığında ısı açığa çıkar. Ortaya çıkan bu ısı soğuk şartlarda aracın ısınmasında kullanılabilir veya ortama dağıtılabilir. Eğer sistem tüneller içinde ise ortaya çıkan bu ısı tünelde sıcaklığın yükselmesine neden olur. Frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin, motorların bu anda jeneratör olarak çalışması ile, iletken raya geri verilmesine “dinamik frenleme“ denir. Dinamik frenleme ile kazanılmış olan enerji şu amaçlar için kullanılabilir (Açıkbaş, 2006):

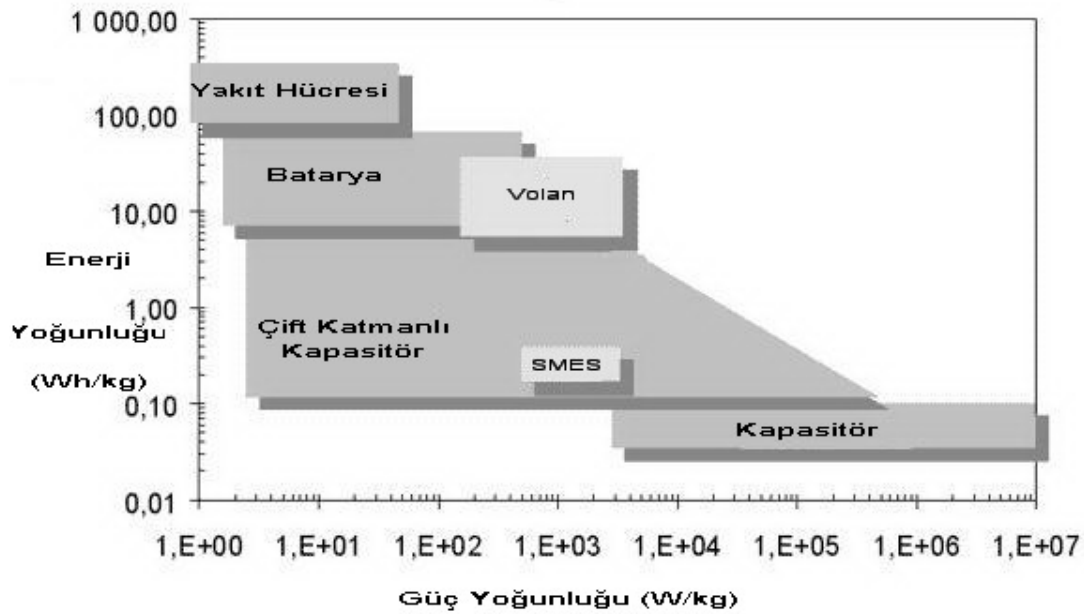
- Trenin kendisinin kullanması.
- Yeteri kadar yakında bulunan diğer araçların kalkış anında kullanması amacıyla.
- Eğer DC istasyonlar tristör evirici üniteleri ile donatılmışsa, bunlar enerjiyi elektrik şebekesine geri verebilirler.

Dinamik frenleme ile geri kazanılan enerji sistem verimliliğini artıracak gibi gerilim yükselmelerine de sebep olacağı için güç kalitesinde problemler çıkaraktır. İşletme açısından iletken ray gerilimi sınırlanmıştır; bu da dinamik frenleme ile açığa çıkan enerjinin kontrol edilmesi gerekliliğini doğurur. Dinamik frenlemenin etkisi, sistemin bu enerjiyi kabul

edebilirliğine bağlıdır. Eğer frenleme bölgesi civarında kalkış yapan başka bir tren yoksa üretilen enerji kullanılamaz ve dolayısıyla reosta bankları üzerinden harcanması gerekir.

7.8 Enerji Depolama Sistemleri

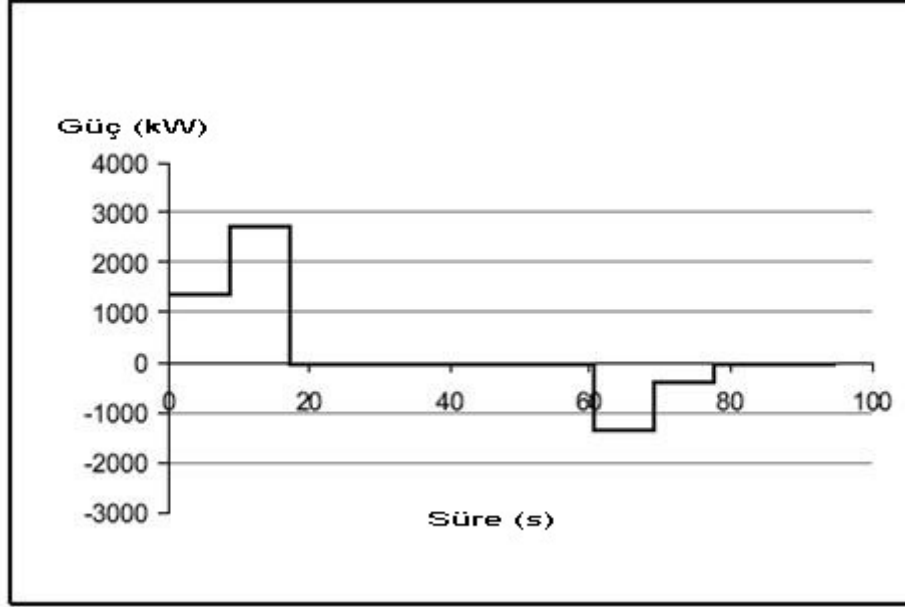
Enerji depolama konusunda özellikle elektrikli araçlar, güç sistemleri ve uzay araştırmalarında son yıllarda yaşanan gelişmeler ışığında dinamik frenleme enerjisinin depolaması konusunda raylı sistem araçlarında da gelişmeler olmuştur. Yüksek güç yoğunluğu gereken raylı sistemlerde süperkapasitörler, volanlı sistemler ve çift katmanlı kapasitörler en sık rastlanılan enerji depolama olarak gösterilebilir.



Şekil 7.12 Enerji depolama üniteleri karşılaştırması (Açıkbaş, 2006)

7.8.1 Enerji Depolama Sistemi Hesaplama Kriterleri

Raylı sistemlerde enerji depolama konusunda önemli adımlardan biri güç akışı ve buna bağlı dinamik frenleme enerjisinin hesabı ile özellikle yeraltı hatlarındaki yerleşim analizleridir. Cer gücü planlamasına paralel depolama sistemi ihtiyaçları, hattın özel durumları da göz önüne alınarak belirlenir.



Şekil 7.13 Seyir halindeki trenin güç talep grafiği (Brenna,2002)

İki istasyon arasında işleyen bir adet tren seti olacağı kabulü ile, bu tren setine ait güç grafiği Şekil 7.13'te verilmiştir. Güç grafiği altında kalan alanlar, aracın çektiği ve frenleme esnasında açığa çıkardığı gücü vermektedir.

Enerji depolama sistemi boyutlandırılırken maksimum ve minimum sınırlar belirlenir. Alt limit, acil durumda sağlanacak enerji miktarı olarak kabul edilir. Depolama sisteminin minimum boyutu, acil durumda, örneğin kesinti durumunda, treni en yakın istasyona erişmesini sağlayacak enerji miktarına eşit olmalıdır. İşletme senaryosuna göre bir cer merkezinin aynı anda besleyeceği tren sayısı ve bu trenlerin acil durum işletme şartları bu hesapta baz alınır. Buna göre en kötü senaryo, cer merkezine bağlı araçların hepsinin istasyonu terk eder etmez enerji kesintisi olması ve tüm bu trenlerin gidecekleri istasyona ulaştırılmasıdır (Brenna,2002).

Maksimum enerji durumu, aynı cer merkezinden beslenen trenlerin aynı anda frenleme durumuna geçmesi anıdır. Bu durum çok mümkün olmasa da enerji depolama sistemini boyutlandırmanın kriteridir.

7.8.2 Volan Sistemleri

“Kinetik enerji depolama sistemleri” olarak da bilinen yüksek hızlı volanlar çeşitli sanayi kollarında ve raylı ulaşımında enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır. Volanların

Çalışma prensibi enerji depolamak için hızlanan ve enerjiyi sisteme vermek için ters yönde ivmelenen invertör beslemeli motor-generatör düzeneği ile gerçekleşir. Bu kapasite ile sistem genişletilebilir ve böylece dinamik frenleme enerjisi kazancı sağlanabilir.

7.8.2.1 Volan Sistemlerinin Yapısı

Volan sistemi temel olarak elik şasi içinde, yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir depolama ortamını içeren bir rotordan oluşur.

Hareketli rotor kısmı karbon ve fiberglastan oluşan kompozit malzemeden teşkil edilir. Rotorun i kımını oluşturan depolama tüpü, geçici mıknatısıyet özellikte toz ile, genellikle neodim-demir-bor (NeFeB), kaplanarak manyetik bir ortam oluşması sağlanır. Manyetik toz, bir uca yayılarak st rulmanı pasif manyetik rulman yarısı oluşturur. Rotorun geri kalanı oniki adet kutup ile manyetik özellik gösterir ve böylece geçici manyetik makine oluşturulur.

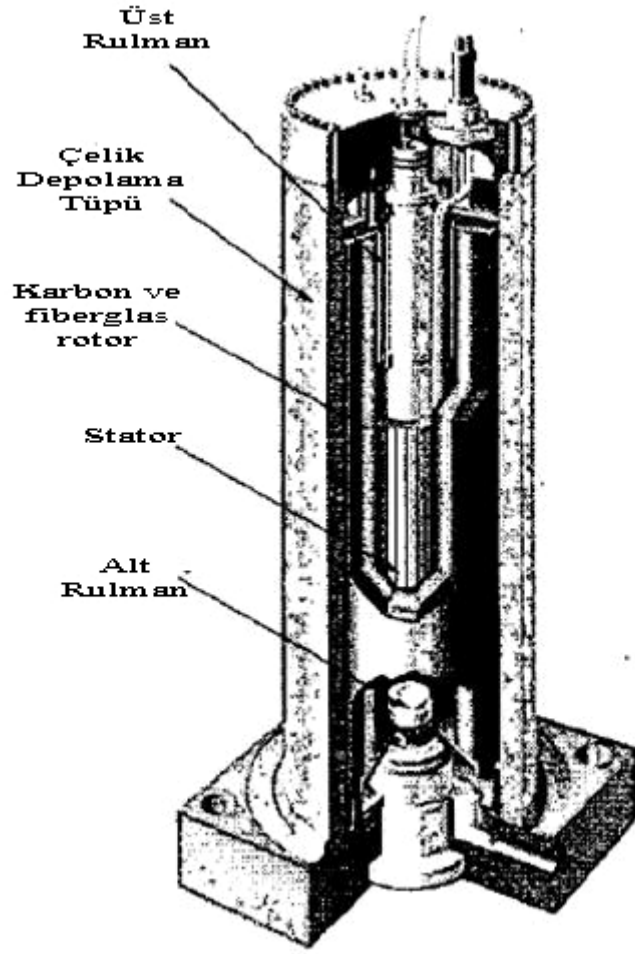
Silindir ortasında bulunan elik mil, st rulmanın kalan yarısını ve motor-generatör yapının statorunu oluşturur. Stator elik lameller ve trifaze yıldız bağlı sargılardan teşkil edilir. Motor ve generatör modlarında statordaki enerji akışları elektronik devreler ile kontrol edilir. Isınma problemi, elik mil etrafında soğutucu dolaştırılarak üzülür.

Dinamik yapının alt kısmını oluşturan alt rulman yağlı yatak-bilye takımından oluşur ve rotora mekanik destek sağlar. Yüksek hızda çalışmaya rağmen rulmanlarda mekanik temas olmaması nedeniyle bakıma gerek duyulmamaktadır.

Hareketli tüm bu kısımlar vakumlanmış kanallı yapıdaki elik bir gövde içine alınır. Bu elik gövde altta ağır elik bir bloka kaynatılarak montaj zemini oluşturulur. Tüm soğutucu ve elektrik bağlantıları volan sisteminin st kısmından yapılır.

7.8.2.2 Volan Sistemlerinin Uygulamaları

Volanlar çoğunlukla gerilim desteklemelerinde ve ani kşleri yumuşatmada, azami işletme hızında çalıştırılarak cer besleme hattındaki gerilim dalgalanmaları, kesintiler ve çöküntüler durumunda kritik yüklere kısa dönemli besleme kaynağı kullanılır. Diğer uygulama alanı ise, volanın ortalama hızda çalışarak gerilim üreticisi veya alıcısı olarak görev yapmasıdır ki böylece gerilim dalga şekli düzenlenebilir.



Şekil 7.14 Volan kesiti (Wheeler, 2004)

Modüler olarak tasarlanabilen volanlar, enerji depolama kapasitesine göre farklı sayıda tesis edilir ve ihtiyaca göre miktarı artırılıp azaltılabilir. Her bir volan DC baraya bağlanır ve sistemin esnekliğinden dolayı ayrı ayrı kontrol edilebilir.

Volanlı enerji depolama sistemleri yük talebi değişimlerine çok hızlı cevap verebilmektedir; öyle ki tam yük motor güç talebinden generatör moduna geçiş 5 ms mertebesindedir. Kompozit silindirden oluşan depolama ortamı, milyon mertebesinde güç çevriminde herhangi bir bozulma olmadan fonksiyonunu sürdürebilmektedir. Diğer depolama araçlarına göre bakım maliyetleri düşük, modüler yapıda ve ısı değişimlerine karşı yüksek toleransı olmasıdır.

Fransa'da Lyon ve ABD'de New York metrolarında bu sistem uygulamaları bulunmaktadır.

7.8.3 Çift Katmanlı Kapasitörler (Ultrakapasitörler)

Ultrakapasitörler, elektrolitik sıvı içine batırılan elektrotlar ve aradaki izolasyon tabakası ile teşkil edilir. Çift katmanlı yapı elektrot, delikli karbon membran ve aradaki elektrolitik sıvı ile oluşur. Eğer uygulanan gerilim elektroliz geriliminden düşükse elektrotlar arası boşluk korunur ve oldukça ince ara membran ile enerji depolanabilir. Ultrakapasitörün yapısı Şekil 7.15'te gösterilmiştir.

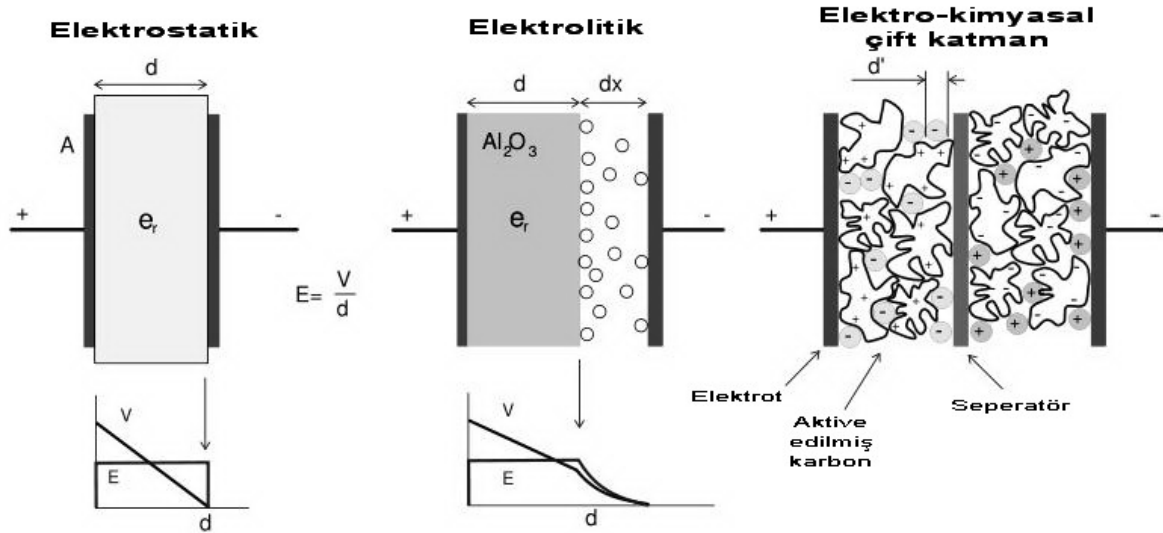
Elektrokimyasal bir ünite olmasına rağmen yapısında bataryalardaki gibi kimyasal tepkime gerçekleşmediği için enerjiyi elektrostatik olarak depolar. Uygulanan elektrik alan, elektrolitik sıvı içindeki iyonların elektrot etrafında çok ince bir tabaka halinde toplanmasına neden olur, yani elektrotlar elektroliti polarize eder. Pozitif elektrotta uygulanan gerilim, elektrolit içindeki negatif iyonları, negatif elektrotta uygulanan gerilim de pozitif iyonları çekerek şarj tabakası oluşur.

Ultrakapasitörlerin güç yoğunlukları ortalama 4 kW/kg civarındadır. Bu durum, tam deşarjın 1-60 saniye süreceği uygulamalar için ultrakapasitörleri uygun depolama cihazı yapmaktadır ki böylece kısa veya uzun vade depolama üniteleri sınıfına sokmaktadır. Ayrıca 100 kW'a kadar güç transferi sağlayabilmektedirler.

Ultrakapasitörün eşdeğer devresi, seri bağlı RC devresinden oluşur. Uzun vadeli işlemler göz ardı edilirse bu model en iyi yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Kapasitör uç gerilimi v ve şarj/deşarj akımları i arasındaki ilişki eşdeğer devre ile çözülebilir

Ultrakapasitörler enerjiyi, elektrokimyasal bir çift katmanın elektrik alanında depolarlar. Frenleme enerjisinin geri kazanılmasında olduğu gibi, trenlerin ivmelenme anında ve eğitim çıkışlarında da güç desteği sağlamak için birincil enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

Çift katmanlı kapasitörler diğer kapasitörlere nazaran çok yüksek bir enerji yoğunluğu için geliştirilmişlerdir. Ultrakapasitörler enerji depolama boyutlar bakımından oldukça esnektir ve değişik gerilim, güç aralığı ve yüklenen enerji miktarına göre seri ve paralel bağlama yapılarak basit adaptasyon imkânı sağlarlar.



Şekil 7.15 Ultrakapasitör yapısı (Konishi, 2004)

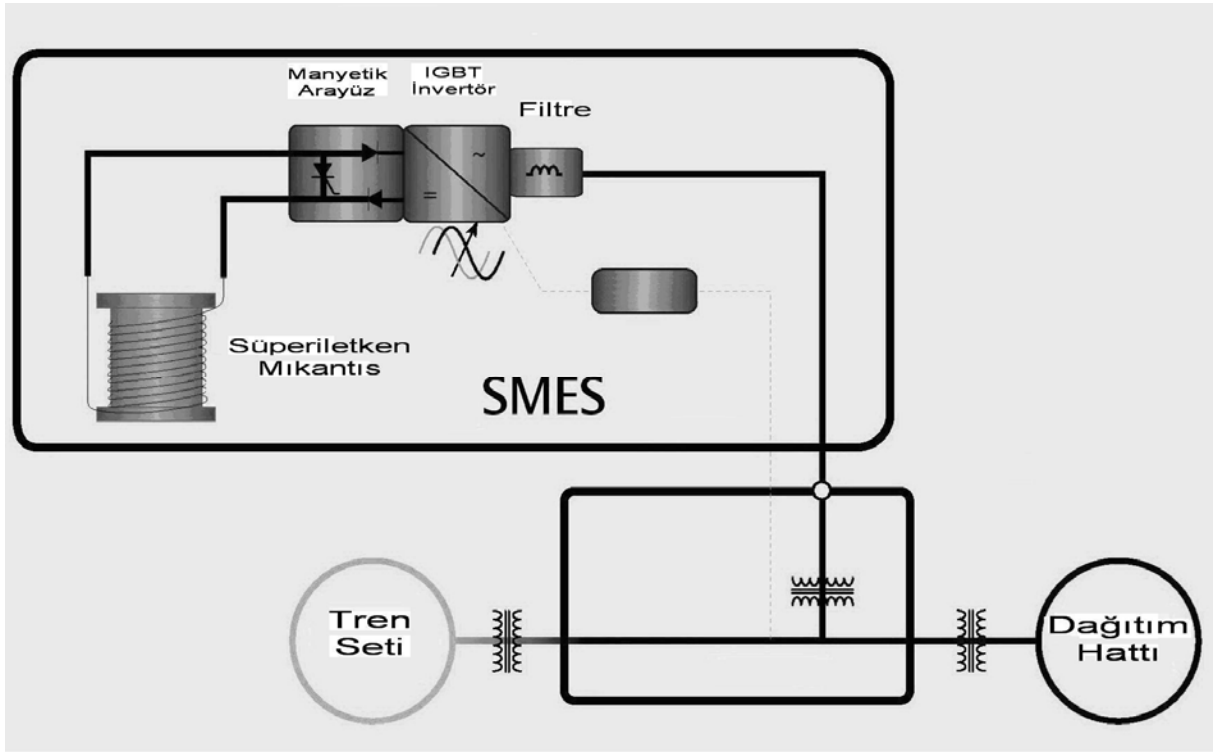
7.8.4 Süperiletken Manyetik Enerji Depolayıcı (SMES)

Bir SMES ünitesi süperiletken malzemeden yapılmış bir bobin içinden doğru akım geçirilerek oluşturulan manyetik alan içinde enerji depolar. SMES ünitesi üç ana unsurdan oluşur:

- Bobin
- Soğutma tankı ve bağlantılarından oluşan soğuk komponentler ile soğutucu ünite
- Sebeke bağlantısı.

Bir manyetik alan için en basit uygulama, bir telden akım geçirmektir ki üzerinden akım bu telin etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Bu manyetik alan $E = \frac{1}{2} I L^2$ eşitliği ile ifade edilir. Manyetik alanı artırmak için bobinden geçen akımı artırmak gerektiği görülmektedir. Fakat raylı sistem uygulamalarında bu akım sınırlı olacağı için endüktans değeri önem kazanmaktadır.

SMES ünitelerinin güç yoğunlukları 200 – 1500 W/kg dolaylarındadır. SMES’ler, ultrakapasitörler ile yaklaşık aynı güç yoğunluğu mertebesindedir. 100 ms – 60 s aralığında tam deşarj olabilen SMES’ler, kısa vadeli güç transferi için uygundur. Bu süreler deşarjın yanı sıra şarj sürecinde geçerli olup, şarj-deşarj için de özgül güçler yakın değerler de olduğundan SMES’ler iki yönlü olabilmektedir. Yaklaşık 1 GW’a kadar güç değerine sahiptirler. Enerji depolama sistemleri içinde yakıt hücrelerinden sonra en pahalı sistem olmasına rağmen teorikte sınırsız şarj-deşarj döngüsü vardır. Şekil 7.16’da SMES’in prensip şeması verilmiştir.



Şekil 7.16 SMES prensip şeması

8. MEVCUT BİR HATTININ METRO OLARAK TASARLANMASI

Bu bölümde, lastik tekerlekli toplu taşıma olarak tasarlanan ve işletmede olan Avcılar-Zincirlikuyu arası metrobüs hattının metro olarak tasarlanması durumunda karşılaşılabilecek elektrikli güç hesaplarına yer verilmiştir.

29 km uzunluğundaki Avcılar-Zincirlikuyu metrobüs hattı gerek fiziksel ve gerekse metrobüs araçlarının teknik özelliklerinden ötürü 25 duraklı hat olarak çalışmaktadır. Eğer bu hat metro olarak inşa edilecek olursa, hattın ve istasyonların tamamının yeraltına alınacağı kabulü ile hattın sabit eğimli olacağı ve kurpların raylı sistem standartlarına uygun ve dolayısı ile durak sayısının da değişeceği açıktır. Alternatif bu metro sisteminin güzergah özellikleri Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Alternatif metro sistemi güzergahı özellikleri

1. Güzergah Şartları:		
Güzergah boyu:	$S \text{ (km)}$	29
Ortalama hat eğimi:	$\% s$	$\% 11$
2. İşletme Şartları:		
Ortalama tren hızı:	$V \text{ (km/h)}$	50,00
Tren aralığı:	$t \text{ (dk.)}$	1,50
Yolcu yükü:	$k \text{ (yolcu/araç)}$	233,00
Trendeki araç sayısı:	D	8
Aracın Hızlanma ivmesi	a	0,90
Aracın yavaşlama ivmesi:	d	1,10
Aracın boş ağırlığı:	$G_B \text{ (ton)}$	29,54
Aracın yüklü ağırlığı:	$G_Y \text{ (ton)}$	45,85
Tren setinin yüklü ağırlığı:	$G \text{ (ton)}$	366,80

8.1 Cer Gücü Hesap Metodu

6.Bölüm’de incelenen örnek metro sistemindeki hesaplama metodundan yola çıkarak alternatif metro sisteminde tren setinin sabit hızda işletilebilmesi için yapılan iş (Erişin, 1998):

$$A_{kgm} = 1000 \times Z_{kg} \times S_{km} \quad (8.1)$$

Bu işletme t saniyede gerçekleştiriliyorsa hareketli ortalama üretilen güç:

$$P(\text{kgm/s}) = 1000 \times Z \times S = 1000 \times Z \times V \quad (8.3)$$

$$P(\text{ps}) = 1000/75 \times Z \times V = 1000/(3600 \cdot 75) \times Z \times V = Z \times V/270 \quad (8.4)$$

Hareketli taşıtın verimi η olmak üzere hareketli taşıtın dönen tekerlekleri çevresindeki güç:

$$P(\text{ps}) = (Z \times V/270) \cdot \eta \quad (8.5)$$

1kW = 1,36 ps olmak üzere bunu kW cinsinden yazarsak:

$$N = (Z \times V) / (270 \cdot 1,36 \cdot \eta) \quad (8.6)$$

Bu güç, akım alıcı ile seyir iletkeninden çekilen güce tekabül eder. Ortalama verim 0.75 alınır:

$$N = Z \times V / 275 \quad (8.7)$$

İşletilen trenin toplam ağırlığı G olmak üzere, Z cer kuvveti ile arasındaki ilişki şu şekilde verilebilir:

$$Z = W \times G \quad (8.8)$$

Burada W , sürtünme kuvvetlerinin toplamını yani tekerlekler ile ray arasındaki yuvarlanma sürtünmesine karşılık gelen mukavemetleri içerir. Demiryolu mukavemeti olarak da isimlendirilir.

İncelenen yol %s eğimde ise, G ağırlığında V hızı ile işletilen trenin aldığı güç genel olarak şöyle yazılabilir:

$$N = [(W + s) \times G \times V] / 275 \quad (8.9)$$

Ampirik W demiryolu toplam mukavemeti ise:

$$W = 2,5 + 0,0005 \times V^2$$
$$N = [(2,5 + 0,0005 \times V^2 + s) \times G \times V] / 275 \quad (8.10)$$

Trenin kullandığı soğutma, klima, kompresör, aydınlatma vb. Yardımcı iç güçleri de eklersek:

$$N_{\text{TOPLAM}} = [(2,5 + 0,0005 \times V^2 + s) \times G \times V] / 275 + N_{\text{iç}} \quad (8.11)$$

$$Parkur\ süresi\ (gidiş,\ geliş) = 2 \times S \times 60 / V$$

$$Tren\ sayısı = Parkur\ süresi / Tren\ aralığı = 2 \times S \times 60 / V \times t = TS\ olsun$$

Tüm hat için gereken elektrik enerjisi ise:

$$Q\ (kW) = N_{TOPLAM} \times TS \quad (8.12)$$

8.1.1 Alternatif Metro Hattı Cer Gücü Hesabı

$$\begin{aligned} 8'li\ tren\ setinin\ çekeceği\ güç: \quad N &= (2,5 \times 0,0005 \times V^2 + s) \times Gt \times V / 275 \\ &= (2,5 \times 0,0005 \times 50^2 + 11) \times 366,80 \times V / 275 \\ &= 942\ kW \end{aligned}$$

Her bir araç için iç güç olarak yaklaşık 85 kW alınırsa tren seti için gerekecek toplam güç:

$$N_T = 942 + 8 \times 85 = 1622\ kW$$

$$Parkur\ süresi: 2 \times 29 \times 60 / 50 = 69,6\ dk.$$

$$Tren\ sayısı: 69,6 / 1,5 \cong 46\ tren\ seti$$

$$Tüm\ hat\ için\ gereken\ enerji : Q = 46 \times 1622 = 74.612\ kW$$

İlave olarak %10 kalkışta çekilen demaraj akımları da eklenirse toplam 82,7 MW cer gücü ortaya çıkar.

Metro sisteminin, planlanan tren aralığı ve araçların hız karakteristiklerine göre ortaya çıkan tek hat araç ve istasyon yerleşimi Şekil 8.1'de verilmiştir.

İstasyon Konumu	i1								i2								i3									i4						
+km. Sonu	0				1				2				3				4				5				6				7			
Tren Konumu	0+000				1+250				2+500				3+750				5+000				6+250				7+500							
Tren No.	T1				T2				T3				T4				T5				T6				T7							

İstasyon Konumu			i5						i6						i7							i8				
+km. Başlangıcı	8			9			10			11			12			13			14			15				
Tren Konumu			8+750				10+000				11+250				12+500				13+750				15+000			
Tren No.			T8				T9				T10				T11				T12				T13			

İstasyon Konumu			i9						i10						i11							i12					
+km. Başlangıcı	16			17			18			19			20			21			22			23					
Tren Konumu		16+250				17+500			18+750				20+000				21+250				22+500					23+750	
Tren No.		T14				T15			T16				T17				T18				T19					T20	

İstasyon Konumu		i13						i14						i15		
+km. Başlangıcı	25				26				27				28			
Tren Konumu	25+000				26+250					27+500						
Tren No.	T21				T22					T23						

Şekil 8.1 Güzergah boyu araç ve istasyon yerleşimi

Bu duruma göre hatta 23 adet tren seti seyrederken toplamda 15 istasyon inşa edilmesi gerekecektir. İstasyon konumları Çizelge 8.2’de verilmiştir:

Çizelge 8.2 Alternatif metro sistemi istasyon yerleşimi ve mesafe tablosu

İSTASYON NO	PLATFORM BAŞLANGIÇ (m)	PLATFORM BİTİŞ (m)	SEYAHAT MESAFESİ (m)	ORTALAMA HIZ (km/h)	TOPLAM SEYAHAT SÜRESİ (dk)	PLATFORMDA BEKLEME SÜRESİ (dk)
İ1	0	250				
İ2	2.250	2.500	2.000	50	2,4	0,31
İ3	4.500	4.750	2.000	50	2,4	0,31
İ4	6.750	7.000	2.000	50	2,4	0,31
İ5	8.750	9.000	1.750	50	2,1	0,31
İ6	10.750	11.000	1.750	50	2,1	0,31
İ7	12.750	13.000	1.750	50	2,1	0,31
İ8	14.750	15.000	1.750	50	2,1	0,31
İ9	16.750	17.000	1.750	50	2,1	0,31
İ10	18.750	19.000	1.750	50	2,1	0,31
İ11	20.750	21.000	1.750	50	2,1	0,31
İ12	22.500	22.750	1.500	50	1,8	0,31
İ13	25.250	25.500	1.500	50	2,7	0,31
İ14	27.000	27.250	1.500	50	1,8	0,31
İ15	28.750	29.000	1.500	50	2,1	0,63

Her istasyonda bir tane olmak üzere 15 cer gücü temin merkezi ve bu merkezlerde herbiri yedekli $15 \times 2 = 30$ adet redresör trafosu tesis edilmesi gerekecektir. Bu trafoların herbirinin karşılaması gereken asgari güç ise:

$$82,07 / 30 = 2,73 \text{ MW} \quad (8.13)$$

8.2 Gerilim Düşümü

Alternatif metro hattını tasarlarken İstanbul Metrosu’nun mevcut sistemi baz alınmıştır. Farklı olarak 8’li tren setinin bu hatta işleyeceği düşünülerek güç hesabı yapılmıştır. Şekil 8.1’de de görüldüğü üzere, iki istasyon arasında iki tren olacağı ve tek cer merkezinden besleme yapılacağı öngörülerek, hatta ileteilecek akım değeri şöyle olacaktır:

$$I = N_T / V \quad (8.14)$$

$$I = 1622 \times 10^3 \times 2 / 750 = 4324 \text{ A}$$

8.2.1 Hat Direnci

Mevcut sistemde taşıyıcı ray olarak S49 tipi ray ve akım taşıyıcı 3.ray olarak da alüminyum kompozitli iletken ray kullanılmaktadır. İşletme şartları gözönünde bulundurularak, Çizelge

3.2’de birim uzunluk başına ray dirençleri verilmiştir. Buna göre taşıyıcı S49 rayı, çift hat olarak %15 aşınma ile kullanılacağı kabulü ile 10,5 mohm / km; alüminyum kompozitli iletken ray ise 20 ° C işletme sıcaklığı ve %0 aşınma kabulü ile 6,87 mohm / km dirence sahiptir.

Cer gücü şebekesinde 3.ray ile taşınan akımın dönüş hattını taşıyıcı raylar oluşturacağı için birim uzunluk başına eşdeğer direnç değeri:

$$R = 10,5 + 6,87 = 17,37 \text{ mohm / km olacaktır.}$$

8.2.2 Gerilim Düşümü Kontrolü

Cer gücü merkezlerinin tespit edilen yerlerine bağlı olarak, özellikle hat üzerinde seyreden trenlerin bu cer gücü merkezlerine uzak noktalarda yeterli hat gerilimini aldıklarının kontrolü gerekmektedir.

DC akım yolundaki tüm iletkenler göz önüne alınarak, en kritik durum kabul edilen trenlerin kalkış anında çektikleri akıma göre, IEC normlarına göre 3.ray pabucundaki gerilim değişimini %25’ine kadar sağlayacak maksimum mesafe hesaplanmalıdır. Bu mesafe, trenler ile cer merkezi arasındaki maksimum mesafeyi vermektedir.

$$L_{\max} = \Delta U_{3r} / (I_{\max} \times R) \quad (8.15)$$

$$\Delta U_{3r} = 750 \times 0,25 = 187 \text{ V}$$

$$L_{\max} = 187 / 4162 \times 17,37 \times 10^{-3} = 2,58 \text{ km}$$

Tasarlanan alternatif metro hattındaki istasyon yerleşimleri, Çizelge 8.2’de de görüldüğü üzere, trenler ile cer merkezi arası maksimum mesafe sınırının altında kaldıklarından problem teşkil etmemektedir.

8.2.3 Tek Uçtan Besleme

Tasarlanan bu sistemde, mevcut sistemdeki gibi tek taraflı besleme yapılması düşünülmüştür. Çizelge 8.1’den de görüleceği üzere iki cer merkezi arasında en fazla iki tren seti olmakta ve bunlar tek bir merkez tarafından beslenmektedir. Fiziksel koşullar ve tünel yapısından kaynaklanan hava sürtünmesi, 34,5 kV şebeke giriş noktaları gibi etmenler göz önüne alınır ve sonucunda özel yazılımlarla gerçekleştirilebilen DC simülasyon çalışmaları sonucu cer gücü merkezlerinin tam yerleri ve aralarındaki bağlantılar kesin olarak belirlenir. Burada

sadece hesaplamalara olanak tanıyacak cer gücü merkezi yerleşimleri ve aralarındaki bağlantıları için kabul yapılmıştır.

3.Bölüm’de verilen metotlardan yola çıkarak her bir hat aralığı için gerilim düşümleri hesaplanabilir. Hat boyunca trenlerin sabit hızla ilerlediği ve I_{trc} sabit akımı çektiği kabul edilirse (3.12) eşitliğinden yararlanarak gerilim düşümleri bulunur.

Tek araç bulunan iki istasyon arasındaki hatta gerilim düşümü trenin konumuna bağlı olmakla beraber maksimum gerilim düşümü, cer gücü merkezinden en uzak noktada gerçekleşir ki bu değer (3.6) eşitliğinden yola çıkarak hesaplanabilir:

$$\Delta U_{\max} = I_{trc} \times R \times l \quad (8.16)$$

Burada n araç sayısını, l iki istasyon arası mesafeyi, x araçlar arası mesafeyi belirtmek üzere:

$$\Delta U_x = n I_{trc} R \times (lx - \frac{x^2}{2}) / l \quad (8.17)$$

Çizelge 8.3’te hatboyu tek tren seti, Çizelge 8.4’te ise iki adet tren seti bulunan aralıklar verilmiştir.

Çizelge 8.3 Tek tren seti bulunan hat tablosu

HAT ARALIĞI	İSTASYONLAR ARASI MESAFE (l)	HATTA BULUNAN TREN SAYISI (n)	ÇEKİLEN AKIM (I_{trc})
İ5-İ6	1,75	1	1.622
İ7-İ8	1,75	1	1.622
İ10-İ11	1,75	1	1.622
İ13-İ14	1,50	1	1.622
İ14-İ15	1,50	1	1.622

(8.16) eşitliğinden faydalanarak her bir aralıktaki maksimum gerilim düşümü:

1. İ5 – İ6 hattı için: $\Delta U_{\max} = 1622 \times 17,37 \times 10^{-3} \times 1,75 = 49,30 \text{ V}$
2. İ7 – İ8 hattı için: $\Delta U_{\max} = 1622 \times 17,37 \times 10^{-3} \times 1,75 = 49,30 \text{ V}$
3. İ10 – İ11 hattı için: $\Delta U_{\max} = 1622 \times 17,37 \times 10^{-3} \times 1,75 = 49,30 \text{ V}$
4. İ13 – İ14 hattı için: $\Delta U_{\max} = 1622 \times 17,37 \times 10^{-3} \times 1,50 = 42,26 \text{ V}$
5. İ14 – İ15 hattı için: $\Delta U_{\max} = 1622 \times 17,37 \times 10^{-3} \times 1,50 = 42,26 \text{ V}$

Çizelge 8.4 İki adet tren seti bulunan hat tablosu

HAT ARALIĞI	İSTASYONLAR ARASI MESAFE (<i>l</i>)	HATTA BULUNAN TREN SAYISI (<i>n</i>)	ÇEKİLEN AKIM (<i>I_{trc}</i>)	TRENLER ARASI MESAFE (<i>x</i>)
İ1-İ2	2,00	2	3.244	1250
İ2-İ3	2,00	2	3.244	1250
İ3-İ4	2,00	2	3.244	1250
İ4-İ5	1,75	2	3.244	1250
İ6-İ7	1,75	2	3.244	1250
İ8-İ9	1,75	2	3.244	1250
İ9-İ10	1,75	2	3.244	1250
İ11-İ12	1,50	2	3.244	1250
İ12-İ13	1,50	2	3.244	1250

(8.17) eşitliğinden faydalananarak her bir aralıktaki gerilim düşümleri:

1. İ1 – İ2 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (2 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 2 = 96,85 \text{ V}$
2. İ2 – İ3 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (2 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 2 = 96,85 \text{ V}$
3. İ3 – İ4 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (2 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 2 = 96,85 \text{ V}$
4. İ4 – İ5 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,75 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,75 = 90,56 \text{ V}$
5. İ6 – İ7 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,75 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,75 = 90,56 \text{ V}$
6. İ8 – İ9 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,75 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,75 = 90,56 \text{ V}$
7. İ9 – İ10 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,75 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,75 = 90,56 \text{ V}$
8. İ11 – İ12 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,5 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,5 = 82,17 \text{ V}$
9. İ12 – İ13 hattı için: $\Delta U_x = 2 \times 3.244 \times 17,37 \cdot 10^{-3} \times (1,5 \times 1,25 - 1,25^2 / 2) / 1,5 = 82,17 \text{ V}$

9. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada ana hatlarıyla raylı sistemler, elektrikli raylı sistemler ve DC beslemeli raylı sistemlerin özellikleri aktarılmış ve ardından mevcut bir lastik tekerlekli toplu taşıma sisteminin metro olarak tasarlanarak güç hesaplarına yer verilmiştir.

Günümüzde ülkemiz şartlarında önemli atılımlar yaşanan raylı taşıma projeleri iki ana başlık altında incelenebilir:

1. İnşaat işleri
 - a. Kaba yapı işleri (tünel, hat, istasyon yapımı)
 - b. Diğer inşai yapılar (köprü, viyadük, su geçişleri)
 - c. Tesisler (Depo, atölye, istasyon)
2. Demiryolu işleri
 - a. Altyapı – Zemin işleri, balast/altbalast ve beton işleri
 - b. İnşai yapılar – Köprü, viyadük, akarsu geçişleri
 - c. Üstyapı – Demiryolu,ray - hat döşeme
3. Elektromekanik işler
 - a. Cer gücü temin merkezleri
 - b. İletken hatlar (Katener veya 3.ray)
 - c. Sinyalizasyon, haberleşme ve otomasyon
 - d. Mekanik sistemler (Havalandırma, su tesisatları, yangın algılama & söndürme, yürüyen merdiven, asansör vb.)

Demiryolu elektrifikasyonu DC veya AC gerilimle yapılabilir. Ülkemizde 12,5 - 25 kV ve 16,7-50 Hz AC gerilimle yük taşımacılığı ve/veya uzun mesafe yolcu taşımacılığı; 600 - 3000 V DC gerilim ise şehiriçi yolcu taşımacılığında tercih edilmektedir.

Bu çalışmada incelen DC raylı ulaşım sistemlerinde, özellikle metro sistemlerinde, 750 V DC gerilim ile işletme yapılmaktadır. Bunun nedeni olarak güç temin merkezleri arası mesafe de göz önüne alındığında, taşınacak enerji miktarının özellikle pik saatlerde artan yolcu talebini karşılamak adına tren sefer sıklığının yükseltilmesi nedeniyle yüksek güce ihtiyaç duyulması gösterilebilir. Öte yandan artan gerilim değeri nedeniyle, gerilim düşümünün artması önlenmelidir. Çünkü uluslararası normlara göre araca iletilmesi gereken gerilim değeri belirli

sınırlar dahilinde olmalıdır. Burada malzeme seçiminin yanısıra işletme şartlarının, ortam sıcaklığı, aşınma oranı gibi, iyi değerlendirilmesi gerektiği söylenebilir.

Yeraltı raylı sistemlerde karşılaşılan diğer bir önemli sıkıntı da korozyondur. Gerek inşai yapının ve gerekse raylı sistem hat donanımlarının aşınmasını önlemek adına dikkate alınması gerektiği gösterilmiştir. Bunun için iyi teçhiz topraklama sistemi yanısıra korozyon koruma sistemlerinin de tesis edilmesi, yüksek maliyetli raylı sistem yatırımlarının işletme ömrünü uzatmak ve güvenilirliğini sağlamak adına önemli olacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

Acha,E., Madrigal,M. 2002, “Power Systems Harmonics”, Wiley

Açıkbaş, S., Alataş,A., 2006, “Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş ve Enerji Geri Kazanımı”, Ulaşım AŞ, İstanbul.

Brenna,M., Foiadelli,F., Tironi,E., Zaninelli, 2002, “Ultracapacitor Applications For Energy Saving in Subway Transportation Systems”, Politecnico di Milano

Caputo,L., 2000, “Control of Energy Devices for Rail Vehicles”, (Yayımlanmamış master Tezi), Lund Institute of Technology

Cegrell,T., “Power System Control Technology”, Prentice-Hall International Series, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

Chymera,M., Renfrew,A., Barnes,M., “Energy Storage Devices in Railway Systems”, University of Manchester

De La Rosa, Francisco, 2006, “Harmonics and Power Systems”, Taylor & Francis

Electrical Engineering Cathodic Protection Maintenance &Operation of Cathodic Protection Handbook NAVAL Engineering Department, USA

Erişin, H., 1998, “Raylı Ulaşımda Enerji Hesabı ve Katener Dizaynı”,

Hosseini, S.H., Shahnia,F., Sarhangzadeh,M., Babai,E., 2004, “Power Quality Improvement of DC Electrified Railway Distribution Systems Using Hybrid Filters”, University of Tabriz

J.G.Yu., 1998, “The Effects of Earthing Strategies on Rail Potential and Stray Currents in DC Transit Railways”, Int.Conf. on Developments in Mass Transit Systems, pp. 303-309

Kießling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., 2001, “Contact Lines for Electrical Railways:Planning – Design - Implementation”, Publicis Corporate Publishing, Germany

Kocatepe,C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş,A., Arıkan,O., 2003,“Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi

Konishi,T., Hase,S., Nakamichi,Y., 2004, “Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC”, Power Supply Systems, Japan

Kumar,O.R., Karinakara,K., Kumar,E.M., Nambudiri,P.V.V., Srinivasan,K.N., “Harmonic Levels in a Traction System – An Overview”, Central Power Research Institute, Bangalore-India

Okada,Y., Koseki,T., Hisatomi,K., “Power Management Control in DC-Electrified Railways for Regenerative Braking Systems of Electric Trains”, University of Tokyo, Shin-Keisei Electric Railway, Japan

Wheeler,N., 2004, “Voltage Regulation Application of a Kinetic Energy Storage System”, Urenco Power Technologies

Wilkinson,R.H., Putter,C., Enslin,J.H.R., “DC-Side Harmonic Compensation in DC Traction Applications”, University of Stellenbosch, South Africa

Zhongming,Y., Lo,E.W.C., Yuen,K.H., Tang,P., Yes,G., “A study of Current Harmonics of Electrical Traction Power Supply System”, Ryerson Polytechnic University, Toronto

İNTERNET KAYNAKLARI

www.tuik.gov.tr

www.ibb.gov.tr

www.istanbul-ulasim.com.tr

www.railway-energy.org

www.dlh.gov.tr

www.jstage.jst.go.jp

www.siemens.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi:	07.01.1982	
Doğum yeri	Konya-Ereğli	
Lise	1997-2000	Konya Meram Fen Lisesi
Lisans	2000-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü

İş Tecrübesi

2006-Devam ediyor	Alarko Taahhüt Grubu / Taksim-Yenikapı Metro Projesi
2006	Alarko Taahhüt Grubu/Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi
2004-2006	Demta End.Tesisler Ltd Şti./ Levent Kanyon Projesi