

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİNİN
BİLGİSAYAR DESTEKLİ
MODELLEMESİ, BENZETİMİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlyas ÖZMEN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİNİN
BİLGİSAYAR DESTEKLİ
MODELLEMESİ, BENZETİMİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlyas ÖZMEN
(504111021)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İlyas ÖZMEN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEMESİ, BENZETİMİ VE ANALİZİ**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Y. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Faik MERGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 5 Mayıs 2014
Savunma Tarihi : 27 Mayıs 2014

Bitaneme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans bitirme tez çalışmamda beni yönlendiren ve bana daima yardımcı olan çok değerli hocam Y. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ' a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın konusu olan Yenikapı-Taksim-Hacıosman metrosunun işletmecisi olan İstanbul Ulaşım AŞ yöneticilerine ve mühendislerine tez için gerekli olan verileri benle paylaştıkları ve gösterdikleri anlayış sebebiyle teşekkür ederim.

Ayrıca şu anda çalışmakta olduğum Marmaray projesindeki tüm mühendis arkadaşlarıma bu tezin yazım sürecinde bana gösterdikleri yardımlardan dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak daima desteklerini arkamda hissettiğim aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2014

İlyas ÖZMEN
(Raylı Sistem Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Araştırmanın Motivasyonu.....	3
1.3 Literatür Araştırması	3
2. RAYLI SİSTEMLERDE CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİ	7
2.1 Elektrikli Cer Gücü tedarik Sistemine Genel Bir Bakış.....	7
2.2 Cer Trafo Merkezi.....	8
2.1.1 DC cer gücü tedarik sistemleri	10
2.1.2 AC cer gücü tedarik sistemleri	16
2.3 Akım Toplama Sistemleri	28
2.3.1 Standart katener sistemi	30
2.3.2 Rijit katener sistemi	39
2.3.3 Üçüncü ray sistemi.....	41
2.3.4 Geri dönüş akımları.....	46
2.4 Cer Motorları ve Sürücü Devreleri.....	50
2.4.1 DC motor sürücü devreleri	52
2.4.2 AC motor sürücü devreleri.....	54
3. 750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİ: M2 HATTI İNCELEMESİ... 63	63
3.1 Amaç	63
3.2 M2 Hattı Elektrik Sistemi Altyapısı.....	64
3.2.1 34.5kV OG dağıtım sistemi	65
3.2.2 750 V DC cer gücü dağıtım sistemi	68
3.2.3 400/230 V AC alçak gerilim dağıtım sistemi.....	72
3.2.4 110 V DC ve 400/230 V AC acil durum güç dağıtım sistemi	76
3.2.5 Transfer link sistemi.....	77
3.2.6 Topraklama sistemi	78
3.2.7 Scada sistemi	79
3.3 M2 Hattında Kullanılan Araçlar ve Özellikleri.....	79
3.3.1 Metro araçları genel özellikleri	80
4. 750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİ MATLAB/PSB MODELİ..... 93	93
4.1 OG Ring Sistemi ve 750 V DC Cer Gücü Temini Modeli.....	93
4.2 Akım Toplama Sistemi Modeli	94
4.3 Trenin Modeli.....	94
5. BENZETİM SONUÇLARI VE ANALİZİ	99

5.1 Trenin Kalkış Durumunun İncelenmesi	99
5.2 Harmonik FFT Analizi Sonuçları	106
6. SONUÇLAR	111
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	115

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
AIS	: Hava İzoleli Şalt Merkezi (Air Insulated Switchgear)
AT	: Oto Transformatör (Auto Transformer)
BCB	: Batarya Şarj Paneli
BT	: Yükseltici Transformatör (Booster Transformer)
DC	: Doğru Akım
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
GIS	: Gaz İzoleli Şalt Merkezi (Gas Insulated Switchgear)
IGBT	: İzole Edilmiş Kapılı Çift Kutuplu Transistör
M	: Motorlu Araç (Motorized Car)
MC	: Motorlu Kabinli Araç (Motorized Cabin Car)
PSD	: Yolcu Güvenlik Kapısı (Passenger Safety Door)
T	: Taşıyıcı Araç (Trailer Car)
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TPS	: Cer Gücü Tedarik (Traction Power Supply)
TRT	: Cer Transformatörü (Traction Transformer)
VF	: Değişken Frekans
VV	: Değişken Gerilim
VVVF	: Değişken Gerilim Değişken Frekans

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı raylı sistem uygulamalarında hat gerilimleri.....	9
Çizelge 2.2 : İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri.....	9
Çizelge 2.3 : İstanbul'da bazı hatlara ait cer gücü sistemleri	10
Çizelge 2.4 : 1500 V DC TPS sistemi karakteristikleri.....	11
Çizelge 2.5 : Siemens sitras doğrultucuları etiket bilgileri.....	13
Çizelge 2.6 : 750 V DC ve 1500 V DC kesiciler etiket bilgileri	15
Çizelge 2.7 : AC ve DC sistemler karşılaştırması.	17
Çizelge 2.8 : Vakum tipli ac kesici etiket bilgileri.	28
Çizelge 2.9 : 350 km/h hıza uygun seyir telinin karakteristikleri.....	34
Çizelge 2.10 : Üçüncü ray iletkeninin karakteristikleri.....	44
Çizelge 3.1 : Acil durum dizel jeneratörü etiket değerleri.....	66
Çizelge 3.2 : Dizel jeneratör trafosu etiket bilgileri	66
Çizelge 3.3 : Kesici hücreleri etiket değerleri.	67
Çizelge 3.4 : SF ₆ gazlı kesiciler etiket değerleri.....	68
Çizelge 3.5 : Az karbonlu çelik 3.rayın etiket değerleri.	68
Çizelge 3.6 : Redresör trafosu etiket değerleri.	70
Çizelge 3.7 : Doğrultucu ünitesine ait teknik bilgiler.....	70
Çizelge 3.8 : AG iç ihtiyaç trafosu etiket bilgileri.....	73
Çizelge 3.9 : Jeneratör binası iç ihtiyaç trafosu etiket bilgileri	73
Çizelge 3.10 : Transfer link trafosu etiket bilgileri.....	78
Çizelge 3.11 : Tren doğrultucu ünitesine ait teknik bilgiler	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : TPS alt sistemleri.....	8
Şekil 2.2 : 1500 V DC TPS konfigürasyonu	11
Şekil 2.3 : Doğrultucu ünitesi ve diyot	12
Şekil 2.4 : 6 darbeli tam dalga doğrultucu	13
Şekil 2.5 : Hat harmonikleri için AC filtreler	13
Şekil 2.6 : 12 darbeli tam dalga doğrultucu ve çıkış gerilimleri.....	14
Şekil 2.7 : 24 darbeli doğrultucunun kullanıldığı 1500 V DC sistem	15
Şekil 2.8 : Çekmeceli tip arabalı DC kesici	16
Şekil 2.9 : DC ve AC sistemler maliyet karşılaştırması.....	18
Şekil 2.10 : 25 kV AC katener besleme sistemi	19
Şekil 2.11 : Faz dengesizliğini azaltmak için scott trafo kullanımı	20
Şekil 2.12 : Üç transformatörlü AC sistem diyagramı	21
Şekil 2.13 : 2x25 kV AC AT besleme sistemi.....	22
Şekil 2.14 : 2x25 kV AC AT besleme sistemi ve katener bağlantıları	22
Şekil 2.15 : 25 kV AC BT tipli sistem.....	23
Şekil 2.16 : Katener direğine asılmış 1:1 yükseltici transformatör	24
Şekil 2.17 : Hong Kong'da üç farklı hattın ortak AC beslemesi	25
Şekil 2.18 : Marmaray projesi cer gücü tedarik sistemi	26
Şekil 2.19 : Gaz izoleli AC kesiciler	27
Şekil 2.20 : Hava izoleli AC kesiciler	28
Şekil 2.21 : Tren akım toplama sistemleri tipleri	29
Şekil 2.22 : Tipik bir pantografin parçaları	30
Şekil 2.23 : Trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf.....	30
Şekil 2.24 : Standart havai katener sistemi	32
Şekil 2.25 : Basit katener direği montaj şeması.....	32
Şekil 2.26 : (a) Basit katener sistemi. (b) Pandül. (c) Taşıyıcı tel	33
Şekil 2.27 : Farklı tipte havai katener hatları.....	33
Şekil 2.28 : Basit askı katener ve standart havai katener	34
Şekil 2.29 : Seyir teli ve kesiti	35
Şekil 2.30 : Seyir teli dezeksmanı.....	36
Şekil 2.31 : Tipik bir havai katener hattına ait FEA sonucu.....	36
Şekil 2.32 : Tren pantografinin seyir telinde oluşturduğu osilasyon	37
Şekil 2.33 : (a) Ağırlık sistemi. (b) Sabit gergili. (c) Otomatik gergili sistem	38
Şekil 2.34 : Otomatik gergi sistemi	38
Şekil 2.35 : Temas kuvveti bakımından rijit ve standart katener karşılaştırması	39
Şekil 2.36 : Rijit katener parçaları	40
Şekil 2.37 : Alüminyum profil ve bakır seyir teli karakteristikleri.....	41
Şekil 2.38 : (a) Normal askı. (b) Etap ortası. (c) Etap sonları	41
Şekil 2.39 : Taşıyıcı ray kotu seviyesine yerleştirilen üçüncü ray	42
Şekil 2.40 : Üçüncü ray sisteminin tipleri	43
Şekil 2.41 : (a) Üstten temaslı. (b) Alttan temaslı	43

Şekil 2.42 : Alttan temaslı sisteme ait trenüstü ekipmanları.....	44
Şekil 2.43 : PSD kapıları.....	45
Şekil 2.44 : Kaçak akımların izlediği yol	47
Şekil 2.45 : Ray-toprak dirençleri şematik gösterimi	47
Şekil 2.46 : Korozyona uğramış raydaki demir kayıpları	47
Şekil 2.47 : İzolasyonlu ray bağlantı klemensleri.....	48
Şekil 2.48 : Diyot üzerinden topraklı sistem.....	49
Şekil 2.49 : Metal topraklama ağının uygulaması	49
Şekil 2.50 : Dönüş iletkeni ve taşıyıcı ray arası bağlantı.....	49
Şekil 2.51 : AC sistemde topraklama bağlantıları	50
Şekil 2.52 : Seri DC motorun tork-hız grafiği	51
Şekil 2.53 : DC ve AC sistemler şematik diyagramı	52
Şekil 2.54 : Geleneksel direnç kontrollü DC motor kontrolü	52
Şekil 2.55 : kademe ayarlı trafo kontrollü DC motor beslemesi	53
Şekil 2.56 : Tristör kontrollü DC motor sürülmesi.....	53
Şekil 2.57 : Diyot ve tristör kontrollü tam dalga doğrultucu ve DC çıkışları.....	54
Şekil 2.58 : AC cer sürücü sistemi şematik diyagramı	55
Şekil 2.59 : Konvertör-invertör devresi ile AC motor beslemesi	55
Şekil 2.60 : 1500 V DC konvertöre ait değerler	56
Şekil 2.61 : 1500 V DC invertöre ait değerler	56
Şekil 2.62 : Modern bir AC lokomotif.....	56
Şekil 2.63 : 25 kV 50 hz AC sistem (marmaray örneği).....	57
Şekil 2.64 : IGBT etiket değerleri.....	58
Şekil 2.65 : Asenkron motorun kaymaya bağlı olarak tork-hız grafiği	59
Şekil 2.66 : Asenkron motorun değişken frekans kontrolü	60
Şekil 2.67 : Asenkron motorun değişken gerilim kontrolü.....	60
Şekil 2.68 : Farklı frekans-gerilim değerleri için tork-hız grafiği	61
Şekil 2.69 : VVVF ve CVVF bölgeleri.....	62
Şekil 2.70 : Dört farklı tren işletme bölgesi.....	62
Şekil 3.1 : Yenikapı haciosman metrosu hat haritası.....	64
Şekil 3.2 : İzolasyonlu kapaklı üstten temaslı üçüncü ray sistemi.....	65
Şekil 3.3 : Acil durum dizel jeneratörü ve jeneratör trafosu.....	66
Şekil 3.4 : OG pano grubu	67
Şekil 3.5 : (a) Redresör trafosu. (b) Doğrultucu ünitesi.....	69
Şekil 3.6 : (a) DC kesici arabası. (b) Negatif geri dönüş panosu. (c) Kesici.	72
Şekil 3.7 : (a) Yardımcı güç trafosu. (b) AG panolar. (c) AG sigortalar	74
Şekil 3.8 : (a) Batarya şarj devresi. (b) BCB panosu. (c) Ni-Cd bataryalar	76
Şekil 3.9 : (a) UPS. (b) Kuru tip aküler.	77
Şekil 3.10 : (a) Transfer link trafosu. (b) Transfer link panosu	78
Şekil 3.11 : M2 hattı araçları genel özellikleri.....	80
Şekil 3.12 : Aracın alüminyum gövde yapısı.....	81
Şekil 3.13 : Tren bojisi.....	82
Şekil 3.14 : Tekerlek takımı.....	82
Şekil 3.15 : Tren bojisi kesit	83
Şekil 3.16 : (a) Birincil süspansiyon. (b) İkincil süspansiyon	83
Şekil 3.17 : (a) Otomatik kuplör. (b) Sabit kuplör	84
Şekil 3.18 : 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru	85
Şekil 3.19 : Asenkron cer motoru sürme devresi.....	87
Şekil 3.20 : Vektör kontrol ve kayma frekansı kontrolü.....	88
Şekil 3.21 : IGBT kutusu	89

Şekil 3.22 :MC1, M ve MC2 araçları hızlanma performansı grafiği.....	90
Şekil 3.23 : Cer motorları sürme devresi şematik diyagramı	91
Şekil 4.1 : 750 V DC üçüncü ray gerilimi elde edilmesi	94
Şekil 4.2 : Üçüncü ray, kolektör pabucu ve taşıyıcı rayların modeli.....	94
Şekil 4.3 : Tren ana bloğu.....	95
Şekil 4.4 : MC1, M ve MC2 araçlarını gösteren alt bloklar	95
Şekil 4.5 : Herbir araçta bulunan 2 adet bojiyi simgeleyen alt bloklar.....	96
Şekil 4.6 : IGBT ünitesi ve cer motorları blokları	96
Şekil 4.7 : 150kW, 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru	96
Şekil 4.8 : Tam sistem modeli	97
Şekil 5.1 : Üçüncü ray gerilimi.....	100
Şekil 5.2 : Üçüncü ray gerilimi (büyütülmüş görüntü).....	100
Şekil 5.3 : Kısa devre ve tren kalkış anı akımları karşılaştırması.....	101
Şekil 5.4 : İki trenin aynı anda kalkış yaptığı durumda akım-zaman grafiği	102
Şekil 5.5 : Hat akımı.	102
Şekil 5.6 : Yalnızca bir trenin kalkış yaptığı durumda akım-zaman grafiği.....	103
Şekil 5.7 : TEİAŞ 154 kv barası akım ve gerilimler	103
Şekil 5.8 : TEİAŞ 154 kv barası aktif ve reaktif güçler.....	104
Şekil 5.9 : IGBT çıkışı fazlar arası gerilim.....	104
Şekil 5.10 : Cer motoru rotor ve stator akımları	105
Şekil 5.11 : Cer motorunun hız-zaman grafiği	105
Şekil 5.12 : Cer motoru stator gerilimi	106
Şekil 5.13 : Elektromanyetik tork- zaman grafiği	106
Şekil 5.14 : TEİAŞ 154 kV barası gerilim dalgası frekans spektrumu.....	107
Şekil 5.15 : TEİAŞ 154 kV barası akım dalgası frekans spektrumu	108
Şekil 5.16 : Cer motoru rotor akımı frekans spektrumu	109
Şekil 5.17 : Cer motoru stator akımı frekans spektrumu	110

750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEMESİ, BENZETİMİ ve ANALİZİ

ÖZET

Raylı sistemlerde cer gücü tedarik sisteminin birincil fonksiyonu trenlere hareketi için gerekli olan elektrik gücünü mümkün olan en verimli ve en ekonomik şekilde iletmektedir. Bu fonksiyonu sebebiyle cer gücü tedarik sistemleri kesintisiz ve kaliteli bir metro taşımacılığı için hayati öneme sahiptir.

Genel olarak cer gücü tedarik sistemi 3 temel sistemden oluşmaktadır. DC veya AC ihtiyaç duyulan hat geriliminin elde edildiği trafo merkezleri, elde edilen bu hat geriliminin akım toplayıcı sistemler tarafından trenlere taşındığı akım toplama sistemleri ve son olarak elektrik enerjisini tren hareketine dönüştüren cer elektrik motorları ve sürücü devreleri. Tüm bu sistemlerin herbirinin altında daha birçok bileşenler de olması sebebiyle cer gücü tedarik sistemi oldukça kapsamlı ve önemlidir. DC cer gücü tedarik sisteminin karakteristiklerini bilgisayar destekli inceleyebilmek, çeşitli benzetim ve analizler yapabilmek için öncelikle sistemin modeli oluşturulmalıdır. Ancak bileşenlerin çokluğu ve karmaşıklığı sebebiyle bu işlem oldukça zordur.

Yapılan bu tezde 750 V DC hat gerilimi kullanılan bir metro sisteminin cer gücü tedarik sisteminin modellenmesi MATLAB ® Simulink ortamında Güç Sistemleri Blok Seti (Power System Blockset, PSB) kullanılarak yapılmıştır. Oldukça kapsamlı olarak yapılan bu modellemede Enerji İletim Şirketinin 154kV iletim hatlarından alınan enerji, öncelikle indirici trafo merkezlerinde indirilerek istasyonlar arasında 34,5kV orta gerilim ring sistemi oluşturulmuştur. 34,5kV gerilim seviyesi trenleri beslemek için ihtiyaç duyulan 750 V DC üçüncü ray gerilimine redresör trafosu ve doğrultucu üniteleri vasıtasıyla dönüştürülmüştür. Daha sonra eşdeğer direnç olarak modellenmiş olan üçüncü ray iletkeni üzerinden trenüstü kolektör pabucu vasıtasıyla trende bulunan toplam 12 adet 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoruna enerjilendirilmektedir. Toplam 4 araçtan oluşan tren setinin yalnızca 3 aracı motorlu olup her bir araçta 2 boji ve 4 cer motoru olduğundan toplam 12 adet asenkron cer motoru bulunmaktadır. Modelde cer motorları PWM sinyali tarafından kontrol edilen 3 fazlı IGBT invertörü tarafından sürülmektedir. Tüm bu bahsedilen ana gruplar ve alt bileşenlerin her biri ayrı ayrı MATLAB ® Simulink altında modellenmiş ve bu alt birimler ile gruplar bloklar halinde işletme şekline göre birbiri ile irtibatlanmıştır. Çalışma için örnek olarak toplam iki adet 4'lü tren setinin aynı bölgeden kalkış yaptığı durum incelenmiştir. Fakat istenildiği takdirde tren sayısı ve istasyon sayısı rahatlıkla artırılabilir ve bloklar içindeki veriler rahatlıkla değiştirilebilir. İstasyonlar arası mesafe üçüncü ray eşdeğer direnç değeri değiştirilerek rahatlıkla ayarlanabilirken trenler birbiriyle eş olması sebebiyle bir tren bloğu kopyalanarak hatda bulunan toplam tren sayısı da rahatlıkla artırabilir. Böylece tüm hattın modellenmesini ve benzetimi yapmak mümkün olacaktır.

Oluşturulan bu model genişletilebilir ve geliştirilebilir olup farklı işletme koşullarının kapsamlı incelemesini gerçekleştirmeye uygundur. Bu incelemede tren kalkış anı karakteristikleri ile birlikte trenlerin çektiği büyük reaktif akımlardan dolayı oluşan harmoniklerin incelemesi yapılmıştır. Tren kalkış anı akım karakteristiklerinin kısa devre hata akımlarına olan benzerliği incelenmiştir.

MODELING, SIMULATION and ANALYSIS OF 750 V DC METRO TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM USING MATLAB PSB

SUMMARY

The primary function of railway traction power supply system is to provide necessary electrical power to operate the trains in the most efficient and the most cost-effective manner. This is especially important in today urban transportation where passengers cannot even accept minutes of delays. Reliability and availability of traction power supply systems at all the time is the key. Since, traction power supply system is vital for an efficient and reliable railway transport, it is important to study on modelling and simulation of this system which will enable to study and analyze different operating conditions including short circuit faults and energy quality issues.

A typical traction power supply system has three main subsystems which are power supply system, current collection system and traction drives and motors. The train draws electrical power from the distribution network via suitably spaced substations along the railway line. The electrical power from the substations is transferred to moving trains through a continuous conductor. In the case of overhead current collection system, the power is received from a contact wire that is suspended above track. Pantograph, which is an apparatus mounted on the roof of the car, is used to collect power through contact wire. In the case of third rail current collection, the power is received from a third rail laid along the side of the track by the help of trainborne collector shoes. In both cases return current usually flows through running rails when only one overhead contact wire or conductor rail is provided. The final part of traction power supply system consists of traction drives and electric motors. Either DC or AC traction motors are used to drive the trains.

Substations suitably spaced along the line obtain electric power from the national high voltage power network. In substations, the characteristic of the electrical energy is changed to feed electric traction motors on the train. Depends on the types of traction power supply system employed voltage is stepped down, frequency converted or AC is rectified into DC by means of typical substation equipment such as transformers, rectifiers and switchgears. There are two main types of electric traction system; DC and AC systems. Depends on the application each system has different voltage levels and different frequency level (in the case of AC traction). DC system is preferred mostly for urban transportation such as tram and metro lines whereas AC system is preferred for mainline and high speed rail lines. The converted electrical power is then drawn from the substations to the trains through a continuous contact conductors. There are mainly two types of current collection systems. Overhead current collection and track-level current collection. In the case of overhead current collection the power is received from a contact wire that is suspended above track. Pantograph is an apparatus mounted on the roof of the car to use for collecting power through contact wire. There are also two main types of

overhead collection: flexible catenary and overhead rigid conductor system. On the other hand, in the case of third rail current collection, the power is received from a third rail laid along the side of the track by the help of trainborne collector shoes. The next step in delivering the power to trains is traction drives and motors. Up to 20 years ago DC traction motors had been the standard for trains. The reason for that is the torque-speed characteristics of DC series wound traction motors are ideal for railway traction applications. Because a series wound DC motor has a low resistance field and armature circuit, therefore when a voltage is applied to it, the current becomes high. High currents produce a strong magnetic field inside the motor, which together with the high armature current produces a very high starting torque. With the advance of power electronics AC 3-phase induction motors have become the preferred choice of traction motor due to their many advantages over DC traction motors. AC motors require less maintenance effort as they do not have any commutators and brush gear, and they are 30% less heavier and bulky than DC motors for similar power ratings. Modern power electronics technology also allows AC motors to be controlled effectively to improve both adhesion and traction. Today the trend is using 3-phase squirrel cage AC traction motors for both DC and AC traction supplies. In terms of current collection system, rigid catenary is now widely used in tunnel sections whereas still standart catenary is used for open sections and for high speeds. Third rail current collection system is not that much used today as it is used in the past, but still there are applications especially where diameters of railway tunnels have to be small.

A 750 V DC traction power supply system, which is in use in Yenikapi-Taksim-Haciosman line of Istanbul Metro, is modelled using Matlab ® Simulink environment. 750 V DC line volatge and third rail current collection systems is used in this metro line. The model is very comprehensive since it consists of all three main systems of traction power supply system. In the developed model, first of all, necessary electrical traction power is received from national high voltage 154kV network and then converted to 34,5kV medium voltage via power transformers. A medium voltage ring system is provided between all substations for the relaibility of the supply power. This follows by further reducing the voltage by means of rectifier transformers and the reduced AC voltage is finally converted to 750 V DC by means of uncontrolled diode rectifer units. In the developed MATLAB model that is shown by step by step. The third rail current collection system is modelled as equivalent of resistance together with equivalent resistance between the third rail and trainborne collector shoe. The metro train used in Yenikapi-Taksim-Haciosman metro line consists of 4-car set. 3 of those 4-car is motorized cars and each of motorized car consists of 4 traction motor. Thus, the metro train is modelled as total of 12 three-phase squirrel cage induction motor. Traction motor is fed by 3-phase IGBT units which is controlled by PWM signal.

Only two 4-car set trains are used in the simulation to study train starting current. It is assumed that two 4-car train set start running at the same time and in the same zone. However, it is also possible to run the simulation with more trains and thanks to the Simulink environment, the parameters of all blocks can be changed easily. This enable to simulate different scenarios easily. For example, in case of using 8-car train sets on the track, the two 4-set car can be coupled easily and connected to any location between the substaions. In the developed model third rail current collection system is modelled as equivalent resistance of 1km sections. This can be easily changed. A train set can be placed between two adjacent third rail blocks and in that

way it will be possible to simulate complete track with desired numbers of trains on the desired location between the stations.

The developed DC metro model can be used in many different applications, however it is the primary objective of this project to use the model in order to study train starting current. It is very important to understand the distinction between train starting currents and the short circuit currents in railway systems since they have similar current magnitude and its rising rate. The phenomena of mis-operation and mal-operation cannot be avoided with the traditional protection. Because problems involved in providing protection to traction systems are very different from those faced in protecting other transmission and distribution lines. This is due to the continuous movement of train load, which is in the range of a few MW, change in the length of the line during operation and high levels of harmonic currents.

Simulation results are given for both only one train set is running and two train set running at the same time. Third rail voltage, line current, 154kV busbar voltage and currents, 154kV busbar energy measurements, IGBT phase-to-phase voltage, traction motor rotor and stator currents, traction motor voltage, traction motor speed-time graph and electromagnetic torque waveforms are all given in the results. Simulation results pointed out the difficulty of discrimination remote short circuit current against train starting current. That is because the train starting current even for only one 4-car train set is more than 4000 A. Train reach that current level in milliseconds. Results also shows that even using only two 4-car train set 154kV busbar voltage and current waveforms is not pure sinusoidal because of the excess harmonic currents driven by trains. In the simulation compensation system does not modelled in order to analyze harmonics at 154kV busbar.

1. GİRİŞ

İlk elektrikli DC lokomotifin Berlin Ticaret fuarında Werner von Siemens tarafından tanıtıldığı 1879 yılından itibaren elektrikli raylı sistemler büyük değişimler geçirdi [1]. Toplam 2.2 kW gücündeki bu elektrikli lokomotif üç adet vagon dan oluşmaktaydı ve seri uyartımlı DC motor tarafından besleniyordu. 150 V DC işletme geriliminin kullanıldığı sistemde lokomotif iki taşıyıcı rayın ortasında bulunan izoleli üçüncü bir raydan enerji ihtiyacını sağlıyordu. Cer motoru lokomotifi 13 km/h hıza kadar çıkarabilmekteydi. 300 metrelik dairesel bir ray hattında 4 ayda yaklaşık 90.000 yolcu taşıyan bu ilk elektrikli raylı system aracı yeni bir dönemin başlangıcı olmuştu [1]. 1879 yılında 150 V DC hat gerilimi ve sadece 2.2 kW cer gücüne sahip sistemler ile başlayan yolculuk 1888 yılı sonrasında 600 V DC hat gerilimi ve yaklaşık 40 kW seviyelerine kadar yükseldi [1]. Günümüzde ise 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC ve 25 kV AC gibi çok daha büyük hat gerilim seviyeleri ve MW seviyelerinde güçler tramvay, hafif metro, metro, banliyö, anahat ve yüksek hızlı tren hatları gibi çok farklı çeşitde raylı sistem örneklerine uygulamaktadır.

Günümüzde metro hatları için 1500 V DC hat geriliminin rijit havai katener hatları ve pantograf üzerinden trene verildiği sistemler yüksek güvenilirliği ve düşük işletme giderlerine sahip olması sebebiyle kentiçi metro taşımacılığında neredeyse standart bir uygulama olmuştur [2]. 25 kV AC 50/60 Hz hat geriliminin standart havai katener hattı ve pantograf üzerinden trene verildiği sistemler ise ana hat ve yüksek hızlı trenler için yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu tip AC sistem dünyadaki elektrikli raylı sistem hatlarının yaklaşık %60 ını oluşturmaktadır [2].

Şehirlerin gün geçtikçe büyümesi ve kalabalıklaşması ile beraber metro gibi kentiçi raylı sistemlerine olan rağbet giderek artmaktadır. Günümüzde birçok şehirde halihazırda inşaa halinde veya proje aşamasında olan kilometrelerce uzunlukta metro hattı vardır. Dolayısıyla kentiçi raylı sistemler üzerinde birçok araştırma da yapılmaktadır. Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan raylı sistemler ayrıca birçok alt sistemden de oluşmaktadır; sinyalizasyon ve haberleşme sistemleri, cer gücü tedarik sistemleri, trenler ve diğer daha birçok elektro-mekanik alt sistemler. Tüm bu

sistemlerin birbiri ile de ilişkili ve etkileşim halinde olması sebebiyle de bu sistemlerin modellenmesinin yapılması oldukça önemlidir [1].

Cer gücü tedarik sistemleri temel olarak trafo merkezleri, akım toplama sistemleri ve cer motorları ve sürücü devreleri gibi 3 temel alt sistemden oluşmaktadır. Trafo merkezlerinde üretilen hat gerilimleri katener veya üçüncü ray gibi akım taşıyan iletkenler kullanılarak trenüstü ekipman olan pantograf veya kolektör pabucu vasıtasıyla cer motorlarına iletilir. AC veya DC sistemler olmak üzere iki farklı tipte cer gücü tedarik sistemi vardır. DC sistemler daha çok metro ve tramvay gibi hat uzunluğunun 20-40 km arasında değiştiği, istasyonlar arası mesafenin birkaç km seviyesinde olduğu kentiçi raylı sistem taşımacılığında kullanılır. AC sistemler ise hat uzunluğun çok daha fazla olduğu ve iki istasyon arası mesafenin çok fazla olduğu banliyö, anahat ve yüksek hızlı tren uygulamalarında tercih edilir. Cer gücü tedarik sistemi trene hareketi için gerekli olan elektrik enerjisini sağlaması dolayısıyla kesintisiz ve güvenilir bir raylı sistem taşımacılığı için hayati derecede önemli bir sistemdir. Ayrıca cer gücü tedarik sisteminin kendi içinde birçok alt sistem ve ekipmandan oluşması sebebiyle bir modelinin oluşturulması ve bu model üzerinde gerekli simülasyon ve analiz çalışmalarının yapılması sistemde yapılacak olan iyileştirmelerin hangi alt sistem veya hangi ekipman üzerine yoğunlaşması gerektiği üzerinde bir karar vermesi açısından oldukça yararlıdır [1]. Yapılan bu modelleme ile sistemi hem bir bütün olarak ele almak hem de istasyon ve bölge bazlı analiz etmek mümkün olacaktır. Hatta trenlerin kalkış anındaki karakteristikleri gibi geçici durumların sisteme olan etkileri incelemekte mümkün olacaktır. Dolayısıyla oluşturulan bu modellemeler ile enerji verimliliği çalışmalarından, elektrik enerjisi kalitesi sorunlarına, her türlü arıza ve kısa devrelerin analizi, tren kalkış anındaki geçici durumların analizi ve arızalara uygun koruma yöntemlerinin geliştirilmesi gibi birçok farklı konuda fayda sağlayacaktır. Ayrıca yapılan bu modellemeler raylı sistem cer gücü tedarik sistem projelerinin detaylandırılmasında da oldukça yararlıdır. Böylece ihtiyaç duyulan cer trafo merkezlerinin adetleri ve yerleri, ihtiyaç duyulan kompanzasyon sisteminin gücünün belirlenmesi ve tren kalkış akımlarında dikkate alacak şekilde koruma ekipmanlarının temini ve regüle edilmesi mümkün olacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Yapılan bu tezin ana amacı birçok alt bileşene sahip kentiçi raylı sistemlerde oldukça yaygın olarak kullanılan 750 V DC cer gücü tedarik sisteminin çok farklı araştırmalar ve arızalar dahil farklı işletme koşullarında da kullanılabilcek detaylı bir modelini oluşturmaktır. Yapılan bu model enerji kalitesi çalışmalarından, kısa devre hata akımı analizlerine, trenlerin kalkış anındaki geçici durum analizlerden her türlü yük akışı çalışmalarında kullanılabilir. Ayrıca oluşturulan model cer gücü tedarik sistemine ait tüm alt sistemleride içerdiği için cer motoru ve sürme devreleri ile trene ihtiyaç duyduğu cer akımını ileten akım toplama sistemleri üzerinde de çalışma yapmak mümkün olacaktır. Bilgisayar destekli modelleme ve benzetim çalışması için MATLAB  Simulink ortamı tercih edildiği içinde modellemede kullanılan parametreler rahatlıkla değiştirilerek çok farklı tarzda durumlar rahatlıkla analiz edilebilir olacaktır. Bunun yanında oluşturulan model cer gücü tedarik sistemlerinin projelendirilmesinde ekipman etiket bilgileri ile saha yerleşim bilgilerine karar vermesi açısından da referans olarak kullanılabilir.

1.2 Araştırmanın Motivasyonu

Her ne kadar daha önce birçok araştırma için cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellemesi ve benzetimi yapılırsa da bu modellerin birçoğu sadece analizini yapacağı konu üzerine yoğunlaşmasından dolayı oldukça sınırlı kalmıştır. Çeşitli bilgisayar programları hariç cer gücü tedarik sistemini tüm alt sistemleriyle birlikte ele alan, birçok farklı çalışmaya referans olabilecek kapsamlı bir modelleme hiç yapılmamıştır. Yapılan bu bitirme tezi araştırması sonucunda oluşturulan model de ise cer gücü tedarik sistemi Enerji İletim Şirketinin 154kV Şebekesinden tren seti üzerinde bulunan cer motoruna kadar tüm alt sistemleri içermektedir. Bu araştırmada toplam 4 araçtan oluşan bir tren setinin modellemesinde aynen gerçek durumda olduğu gibi araçlara dağılmış durumda toplam 12 adet AC cer motoru kullanılmıştır. Yapılan diğer araştırmalarda trenler genellikle sadece yük olarak modellenmiştir. Trenin modellemesinin bu Şekilde yalnızca belirli bir gücü faktörüne değerine sahip yük olarak değil de 4 araç ve bu 4 araca dağıtılmış toplam 12 cer motoru olarak ayrı ayrı yapılması hem tren kalkış akımlarının analizini hem de herhangi bir i kısa devre hatasının benzetimini daha doğru yapılmasını yardımcı

olmaktadır. Dolayısıyla yapılan bu çalışma kullanılan parametreler de dahil olmak üzere gerçeğe oldukça yakın olması sebebiyle önemlidir.

1.3 Litaratür Araştırması

AC veya DC sistem olsun cer gücü tedarik sistemlerinin modellenmesi üzerine birçok değişik tarzda modelleme ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları cer gücü tedarik sisteminin daha çok elektrik kısımlarının modellenmesi olurken bazıları ise katener ve pantograf arasında temas kuvveti dikkate alınarak yapılan daha çok mekanik sistemlerin modellemesidir [1]. Elektriki kısımların modellenmesinde genellikle trafo merkezinde kullanılan redresör trafoları, doğrultucu üniteleri ve kesiciler gibi ekipmanlar vasıtasıyla elde edilen AC veya DC hat geriliminin akım toplama iletkenleri vasıtasıyla asenkron cer motoru veya seri uyarımlı DC cer motorunu beslemesinden oluşan modellemelerdir. Günümüzde 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motorları raylı sistem uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu AC motorlar PWM modülasyon kontrollü IGBT üniteleri tarafından beslenerek daha verimli, sessiz ve yolcu konforunun en üst düzeyde olduğu sürüş sistemleri elde edilir [2]. Daha eski sistemlerde ise DC seri uyarımlı motorun yüksek kalkış momenti sebebiyle tercih edilmesinden dolayı tristör kontrollü DC motor beslemesi tercih edilmiştir.

DC veya AC cer gücü tedarik sistemleri üzerine yapılan çalışmalar genellikle kısa devre hata akımlarının analizi ve yük analizi üzerine yapılmıştır. Raylı sistemlerde hat koruması iletim hatlarında veya diğer dağıtım hatlarında yapılan korumalardan oldukça farklıdır [6]. Bunun sebebi ise gücü birkaç MW seviyesinde olan büyük lokomotif yüklerinin devamlı olarak hareket halinde olması, hat uzunluğunun işletme sırasında devamlı olarak değişmesi, yük karakteristiğinin gün boyu çok hızlı değişmesi, gerilim düşümleri ve oluşan yüksek seviyedeki harmonik akımlardır [6]. Raylı sistem uygulamalarında bu gibi sebeplerden ötürü özel bir koruma yöntemi uygulanmalıdır. Bu koruma yöntemi trenin kalkış anında çektiği yüksek akımlar ile oluşan kısa devre akımlarını ayırt edebilmelidir. Özellikle aynı bölgede birden fazla trenin aynı anda kalkış yaptığı durumlarda oluşan yüksek kalkış akımları sebebiyle, sistemde kullanılan hat koruma rölesi tarafından görülen empedans değeri kısa devre hata akımlarına kıyasla çok daha küçük olabilir. Bu sebeple raylı sistemlerde

kullanılan hat koruma röleleri kısa devre akımları ve tren kalkış akımları arasındaki farkı anlayabilecek şekilde olmalıdır [6].

Fang Du ve diğerleri [4] yapmış oldukları modellemede 750 V DC hat gerilimin kullanıldığı DC sistemde 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru ve seri uyartımlı DC cer motorunun kalkış anındaki karakteristikleri bakımından karşılaştırmasını yapmıştır. Bu iki farklı cer motorun kullanıldığı sistemde kısa devre hata akımları ve trenin kalkış anında çektiği akımlar birbiriyle kıyaslanmıştır. Kısa devre akımları ve kalkış anındaki akımların birbirine oldukça benzer olması sebebiyle klasik koruma ekipmanlarının raylı sistemlerde yeterince sağlıklı çalışmayacağı sonucuna ulaşılmıştır [4]. Modelleme sonucu yapılan simülasyonda AC motor tarafından sürülen sisteminin kalkış anında çektiği toplam hat akımı kısa devre sonucu oluşan akımdan daha fazla, akım artma oranının (di/dt) çok daha yüksek ve akımın tepe değerine ulaşma süresinin (Δt) çok daha kısa olduğu görülmüştür. DC motor tarafından sürülen sistemin ise kısa devre hata akımına oldukça yakın bir akım-zaman grafiği çizdiği gözlemlenmiştir fakat Δt değerinin DC motorlu sistemde kısa devre hata akımının akım-zaman grafiğine nazaran daha az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla AC motor tarafından sürülen, DC motor tarafından sürülen ve kısa devre hata akımının her üçünün de birbirinden farklı di/dt ve Δt değerleri sahip olması sebebiyle bu değerler kullanılarak raylı sistem uygulamaları için daha sağlıklı bir koruma yöntemi geliştirilebileceği sonucu çıkarılmıştır [4].

C.S. Chang ve diğerleri [5] tarafından yapılan araştırmada ise gerilim beslemeli evirici ile beslenen asenkron cer motorlu DC sistem modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Bu çalışma da sistemde meydana gelen kısa devre hata akımları iki farklı şekilde incelenmiştir. Birincisi hata akımlarının üçüncü ray ve taşıyıcı ray arasında olduğu dış sistem kısa devre hata akımları, diğeri ise kısa devrenin DC kapasitör linki gibi sistemin içinde olan kısa devre hata akımlarıdır. Tüm bu kısa devre hata akımları analizi çalışması ayrıca trenin konumu dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuç olarak trenin konumu veya kısa devrenin olduğu konumun kısa devre hata akımında çok büyük etkisi olduğu anlaşılmıştır [5].

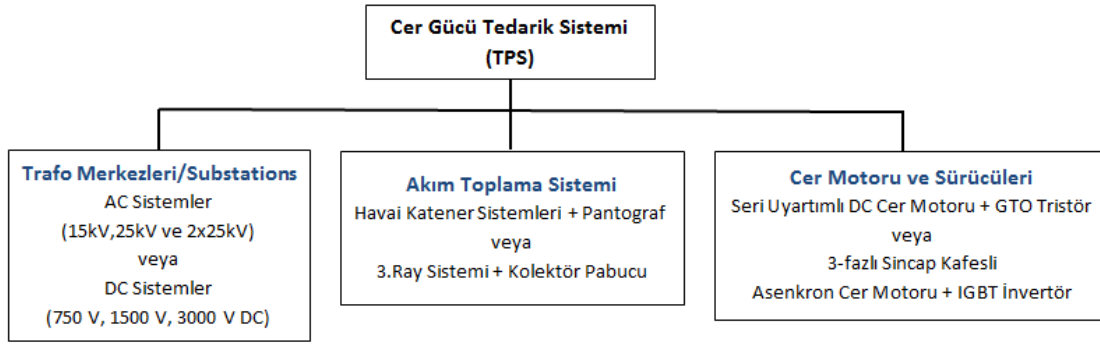
U. J. Shenoy ve diğerleri [6] tarafından yapılan araştırmada 25 kV 50 Hz hat gerilimin DC lokomotifleri beslediği sistemin modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Her biri 2.5 MW güçte olan DC lokomotifler 2 adet yarım dalga tristör-diyot kontrollü köprü doğrultucu ile modellenmiştir. Toplam 40 km uzunluğunda

olan katener hattı ise her biri 4 km uzunluğunda olan 10 adet pi devresi olarak modellenmiştir. Bu modelleme sonucu yapılan simülasyon ile sistemde oluşan kısa devre akımları ve tren kalkış akımlarını ayırt edebilecek iki dörtgen karakteristiğe sahip bir koruma rölesi önerilmiştir.

2. RAYLI SİSTEMLER ELEKTRİKLİ CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİ

2.1 Elektrikli Cer Gücü Tedarik Sistemine Genel Bir Bakış

Elektrikli Cer Gücü Tedarik Sistemlerinin (Traction Power Supply, ‘TPS’) birincil fonksiyonu kesintisiz ve kaliteli bir tren işletmeciliğini sağlamak için cer motorlarının ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin sürekli olarak temin etmektir. Tipik bir TPS, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi genel olarak üç farklı alt sistemden oluşmaktadır. Bu alt sistemlerden birincisi elektrik enerjisinin temin edildiği trafo merkezleridir. Raylı sistem projesinin karakteristiğine göre AC veya DC sistemler, GIS veya AIS trafo merkezleri veyahut farklı katener işletme gerilim ve frekans değerlerinde trafo merkezleri tercih edilmektedir. Tren hareketi için gerekli olan elektrik enerjisi hat üzerinde uygun aralıklarla kurulmuş olan bu trafo merkezleri (substations) üzerinden sağlanır. TPS ikinci alt sistemi ise akım toplama sistemidir (current collection system). AC veya DC temin edilen elektrik gücü trafo merkezleri üzerinden hareket halindeki trenlere sürekli bir enerji sağlamak için hat boyunca kesintisiz devam eden iletkenler üzerinden verilir. Genel olarak iki tip akım toplayıcı sistem vardır. Birincisi tren çatısında bulunan pantograf yardımıyla gerekli elektrik enerjisinin alındığı havai katener hattı, diğer sistem ise 3.ray sistemidir. 3.ray sistemi tren bojisi üzerinde bulunan kolektör pabucu ve taşıyıcı raylar ile yaklaşık aynı seviyede paralel olarak kurulan üçüncü ray iletkeninden oluşan sistemdir (bazı sistemlerde üçüncü ray yanında dördüncü rayda olabilmektedir, örneğin Londra Metrosu). Pabucun üçüncü raya yukarıdan, yandan veya aşağıdan sürekli baskı uygulamasıyla gerekli olan cer akımı toplanmış olur. TPS son alt sisteminde ise cer elektrik motoru ve sürücü sistemleri yer almaktadır. Kontrolü daha kolay ve karakteristiği raylı sistem uygulamalarına elverişli olduğu için ilk zamanlarda seri DC motorlar tercih edilse de günümüzde katener geriliminin AC veya DC olmasına bakılmaksızın modern güç elektroniği teknolojileri gelişmiş olduğundan değişken gerilim değişken frekans (variable voltage variable frequency, VVVF) kontrollü sincap kafesli asenkron motorlar kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 : TPS alt sistemleri.

2.2 Cer Trafo Merkezleri

Hat üzerinde belirli aralıklarla kurulmuş olan cer trafo merkezleri elektrik enerjisini ya ulusal yüksek gerilim elektrik ağından ya da ayrı bir yüksek gerilim ağından almaktadır (cer elektrik enerjisi frekansının ülkede kullanılan elektrik frekansından farklı tercih edildiği ülkelerde uygulanmıştır, örneğin 16.7 Hz). Cer trafo merkezlerinin birincil fonksiyonu elektrik enerjisinin karakteristiğini değiştirerek raylı sistem uygulamasına uygun hale getirmek ve tren üzerindeki cer motorları beslemektir. AC veya DC sistem olmak üzere iki farklı sistem mevcuttur. Bu sistemlerde kendi içerisinde farklı gerilim ve frekans (AC için) seviyelerinde olabilmektedir. Çizelge 2.1’de dünyada raylı sistemlerde kullanılan değişik tipte TPS ler gösterilmiştir. Çizelge 2.2’de ise kullanılan bu sistemler için izin verilen maksimum ve minimum gerilim değerleri EN 50163 standardı baz alınarak gösterilmiştir [3]. Dünyada AC sistemlerde 15kV AC ve 25kV AC yaygın olarak kullanılmaktadır. 2x25kV AC sistemler ise ilk olarak Japonya yüksek hızlı tren işletmeciliğinde kullanılmış olup, şu anda yüksek hızlı trenler ve ağır yük taşımacılığı olan hatlarda uygulanmaktadır. DC sistemlerde ise 750 V DC, 1500 V DC yaygın olarak kullanılmakta olup, 3000 V DC yaygın olmasa da İtalya’da yüksek hızlı tren işletmeciliği yapılan bir hatta uygulanmıştır. Raylı sistemlerde genel trend ise metro uygulamalarında 1500 V DC ile birlikte rijit katener kullanılması, hattın nispeten daha uzun olduğu (50km ve üzeri) sistemlerde ise 25kV AC gerilim ve havai katener hattı kullanılmasıdır. Ülkemizde hem AC hem de DC sistemler kullanılmakta olup 25kV AC yüksek hızlı tren ve banliyölerde tercih edilmiş olup (Marmaray ve İZBAN), 750 V DC ve 1500 V DC ise kent içi raylı sistem araçları ve

metrolarda kullanılmıştır. Çizelge 2.3’de İstanbul’da bulunan raylı sistem araçlarının kullandığı gerilim değerleri hat hat gösterilmiştir [8].

Çizelge 2.1 : Farklı raylı sistem uygulamalarında hat gerilimleri [1].

Kaynak Gerilimi	Akım Toplama Sistemi	Demiryolu Uygulamaları
750 V DC	Havai Hat veya Ray Seviyesi	Metro, Tramvay, Hafif Raylı Sistem
1500 V DC	Havai hat veya Ray Seviyesi	Metro ve Anahat Trenleri
3000 V DC	Havai Hat	Metro, Anahat ve Yüksek Hızlı Tren
15kV AC 16.7Hz	Havai Hat	Ana Hat Trenleri
25kV AC 50/60Hz	Havai Hat	Yüksek Hızlı Tren, Banliyö ve Ana Hat Trenleri
2x25 AC 50/60Hz	Havai Hat	Yüksek Hızlı Tren ve Ağır Yük Hatları

DC gerilimin kullanıldığı tren setlerinde ya üçüncü ray ya da havai katener hattı (genellikle rijit katener) kullanılmaktadır. AC gerilimin tercih edildiği sistemlerde ise yalnızca havai katener hattı kullanılmaktadır. AC ve DC sistemlerin yanı sıra bunların her ikisinin de aynı tren setinde kullanılabilirdiği uygulamalar mevcuttur. Bu sistemler özellikle Avrupa gibi ülkeler arası tren trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde mevcuttur. Tren setleri ‘multi-system units’ olarak adlandırılır ve farklı gerilim ve akım değerlerinin olduğu hatlarda tren hareketi kesintiye uğramaksızın işletmeye izin verir. Multi-system units trenlere örnek olarak Fransa ve İngiltere arasında Manş Tünelini kullanan Eurostar trenleri örnek verilebilir. Bu trenler hattın Londra bölümünde 750 V DC gerilim ve üçüncü ray akım toplama sistemi kullanırken, Belçika’da 3000 V DC ve hattın geri kalanında ise 25kV AC 50Hz havai katener hattını kullanmaktadır.

Çizelge 2.2 : İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri [3].

Elektrifikasyon Sistemi	En Düşük Gerilim (Geçici)	En Düşük Gerilim (Sürekli)	Nominal Gerilim	En Yüksek Gerilim (Kalıcı)	En Yüksek Gerilim (Geçici)
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1000 V
1500V DC	1000 V	1000 V	1500V	1800 V	1950 V
3000V DC	2000 V	2000 V	3000V	3600 V	3900 V
15kV AC, 16.7Hz	11 kV	12 kV	15kV	17.25 kV	18 kV
25kV AC, 50Hz	17.5 kV	19 kV	25kV	27.5 kV	29 kV

Çizelge 2.3 : İstanbul’da bazı hatlara ait cer gücü sistemleri [7].

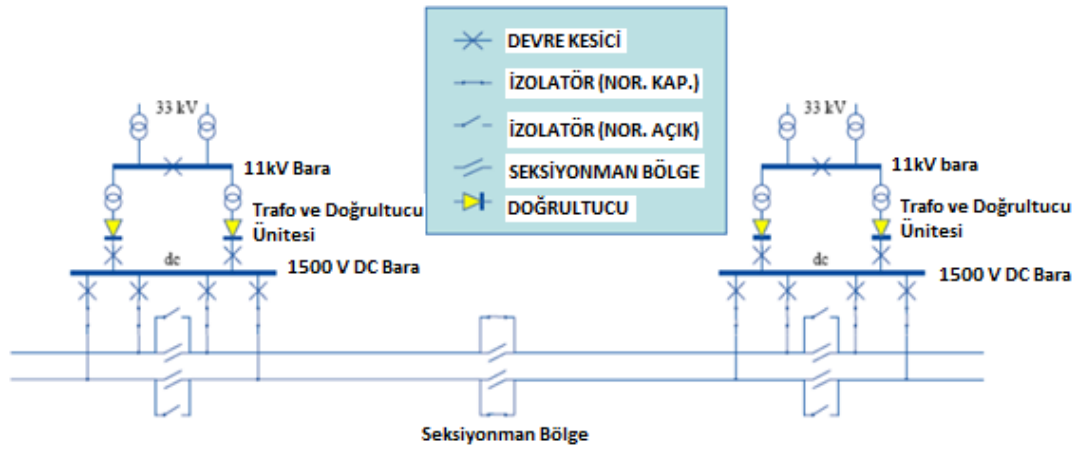
Hatlar	Kaynak Gerilimi	Akım Toplama Sistemi	Cer Trafo Merkezleri Arası Uzunluk
Marmaray	25 kV AC, 50Hz	Tüp/Tünel: Rijit Katener Açık Hat: Klasik Havai Katener	12 - 15 km
M1 Aksaray-Havalimanı	750 V DC	Klasik Havai Katener	1.5 – 2 km
M2 Yenikapı-Hacıosman	750 V DC	3. Ray Sistemi	1.5 – 2 km
M3 Başakşehir-Olimpiyatköy	1500 V DC	Rijit Katener	2 - <u>2.5</u> km
M4 Kadıköy-Kartal	1500 V DC	Rijit Katener	2 - <u>2.5</u> km

2.2.1 DC cer gücü sistemleri

20yy başlarından yaklaşık olarak 1960 yılına kadar seri uyarmalı DC motorların yüksek kalkış torkuna sahip olması ve kolay gerilim kontrolü yapılabilmesi sebebiyle raylı sistem araçlarında uzun yıllar cer tahrik motoru olarak kullanılmıştır. Seri uyarmalı DC motorun sunduğu avantajların yanında bakımının zor olması ve aynı güçteki asenkron motora göre daha ağır ve büyük olması ise en büyük dezavantajdır.

Güç elektroniğin o yıllarda yeteri kadar gelişmemiş olması ise asenkron motorun raylı sistem uygulamalarında kullanılmasını imkânsız kılmıştır ve ayrıca DC motorun gerilim kontrolünün yüksek güçlü dirençler üzerinden yapıldığından oldukça verimsiz olmasına sebep olmuştur [1]. DC sistemlerde kullanılan ana voltaj değerleri 750V DC, 1500V DC (en yaygın olanı) ve 3000V DC ise çok nadir kullanılır. Raylı sistemlerde kullanılan DC iletkenlerin kesitleri yaklaşık 400 ile 900mm² arasında olup AC sistemde kullanılan yaklaşık 150mm² lik iletkenlerden yüksek akım gereksiniminden dolayı oldukça büyüktür. DC sistemlerde cer trafo merkezleri gerilim değerinin küçük olması sebebiyle çok daha sık aralıklarla yerleştirilmiştir. Yerleştirme aralığı kullanılan geriliminin değerine ve hat üzerindeki trafığe bağlıdır. Yoğun trafiğin olduğu hatlarda iki cer trafo merkezi arası 750V DC sistemde 1-3 km arası olup, 1500V DC sistemde ise maksimum 5 km olabilmektedir. Bu sebepten dolayı DC sistemler istasyonlar arası mesafelerin sık olduğu kent içi raylı sistem uygulamalarında (tramvay, hafif metro, metro vb.) ve çoğunlukla maksimum 30-40 km arası olan hatlarda tercih edilir. İki istasyon arası mesafenin uzun olduğu hatlarda veya hat uzunluğunun 40km daha fazla olduğu yerlerde gerilim düşümü ciddi

boyutlara çıkması ve çok sayıda trafo merkezine gerilim duyulacağı için DC sistem tercih edilmez [1]. DC sistemde gerilim değerlerinin AC sisteme nazaran oldukça düşük olması sebebiyle katener hattında kullanılan izolatör boyutları daha küçüktür. İzolatör boyutlarının daha küçük olması tünel kesitlerini de küçültmesi sebebiyle ayrıca bir avantaj sunmaktadır. Şekil 2.2’de 1500 V DC gerilim kullanılan bir DC cer gücü sisteminin yapılandırması gösterilmiştir ve ayrıca Çizelge 2.4’de bu sisteme ait bazı özellikler sıralanmıştır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi DC cer trafo merkezinde bulunan ana ekipmanlar OG trafo, OG kesici, redresör trafosu, kontrollü/kontrolsüz doğrultucu ünitesi, DC kesici, hat ayırıcı ve kontrol ve koruma ekipmanlarıdır.



Şekil 2.2 : 1500 V DC TPS konfigürasyonu [1].

Cer trafosu diğer adıyla redresör trafosunun görevi orta gerilimi düşük gerilim seviyesine düşürerek direk olarak doğrultucu ünitesini beslemektir.

Çizelge 2.4 : Örnek 1500 V DC TPS sistemi karakteristikleri [1].

Nominal Gerilim	1500 V DC
Maksimum Gerilim (Boşta, Yüksüz)	1580 V DC
Maksimum Gerilim	1800 V DC
Trafo Merkezleri Arası Uzaklık	2-3 km
Doğrultucu Etiket Bilgileri (24 darbeleri)	2 x 4-6,5 MW (her bir trafo merkezi için)
Tren Kalkış Anında Çekilen Maksimum Akım	3600 – 4500 A

Cer trafosu diğer adıyla redresör trafosunun görevi yüksek gerilimi doğrultucu ünitesini besleyecek düşük gerilimlere dönüştürmektir. 750 V DC gerilimin tercih

edildiği uygulamalarda redresör trafosunu çıkışında 2 adet 590 V AC gerilim üretir ve 12 darbeli doğrultucunun girişini besler. Doğrultucular DC cer gücü sisteminin önemli bir elemanıdır. AC gerilim doğrultucularda düzeltilir ve DC kesiciler üzerinden hatta verilir. Şekil 2.3 bir diyot köprüsü ile birlikte ısı emici ve RC devresi ile beraber tam bir doğrultucu resmini göstermektedir. Çizelge 2.5 ise Siemens firmasının değişik gerilim seviyeleri için ürettiği doğrultucu ünitelerinin teknik bilgileri yer almaktadır.



Şekil 2.3 : Doğrultucu ünitesi ve diyot.

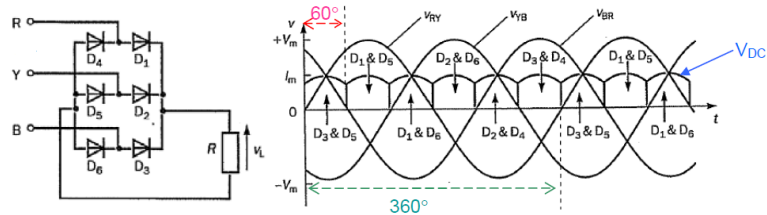
Doğrultucular aynı zamanda AC gerilimi DC gerilime dönüştürmek için kullandıkları anahtar elemanının tipine göre de sınıflandırılırlar. Diyot gibi yarı iletken malzeme kullanan doğrultucular kontrolsüz doğrultucu olarak adlandırılırken, tristör kullanan doğrultucular ise kontrollü doğrultucu olarak adlandırılır. Doğal soğutmalı silikon diyot doğrultucular daha basit bir tasarıma sahiptir, daha az bakım gerektirir, daha fazla aşırı yük kapasitesine sahiptir ve daha uzun ömürlüdür ve bu sebeple DC cer gücü sistem uygulamalarında sıklıkla tercih edilir [1]. Bununla birlikte doğrultucular ürettikleri darbe sayıları bakımından da sınıflara ayrılır. 6 darbeli, 12 darbeli ve 24 darbeli doğrultucular vardır. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi tam dalga 6 darbeli doğrultucunun çıkış geriliminde her bir periyot için 6 tane geçiş vardır ve her bir geçiş $360/60=60^\circ$ dir. Bu da 6 darbeli olarak adlandırılmasının sebebidir. 24 darbeli

doğrultucular daha az harmonik içermesi sebebiyle günümüzde daha yaygın olarak tercih edilmektedir [1].

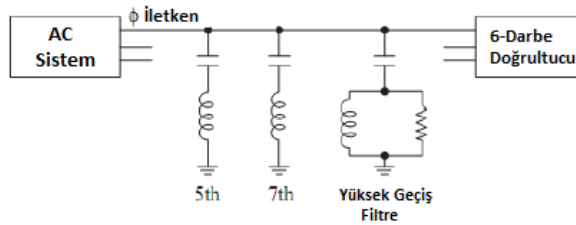
Çizelge 2.5 : Siemens sitras doğrultucuları etiket bilgileri [9].

Teknik Bilgiler			
Nominal Gerilim Un	[V]	600 / 750	1,500 3,000
Maksimum Ters Diyot Gerilimi	[V]	2,200	4,000 4,000 (4,600) (4,600)
Maksimum Nominal Diyot Akımı (paralel diyot sayısına bağlı olarak)	[A]	5,220	3,780 3,230
Maksimum Ağırlık	[kg]	850	850 2x 850
Genişlik	[mm]	800	800 2x 900
Yükseklik	[mm]	2,200	2,200 2,200
Derinlik (opsiyonlu)	[mm]	1,400 (1,200)	1,400 (1,200) 1,400 (1,200)
Maksimum Dış Ortam Sıcaklığı	[°C]	+40	+40 +40
Deniz Seviyesinden Maksimum Kurulum Yüksekliği	[m]	1,000	1,000 1,000
IEC 60529 göre Koruma Sınıfı (opsiyonlu)		IP20 (IP40)	IP20 (IP40) IP20 (IP40) (IP40)

6 darbeli doğrultucular DC uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılmaz. Genellikle 12 darbeli doğrultucular tercih edilir. Bunun sebebi 12 darbeli doğrultucunun daha düzgün bir DC gerilim üretmesi ve daha az harmonik akım üretmesidir. Harmonik akımların mümkün olduğunca az olması istediğinden doğrultucular ile AC sistem arasında paralel bağlı filtreler kullanılır (Şekil 2.5).

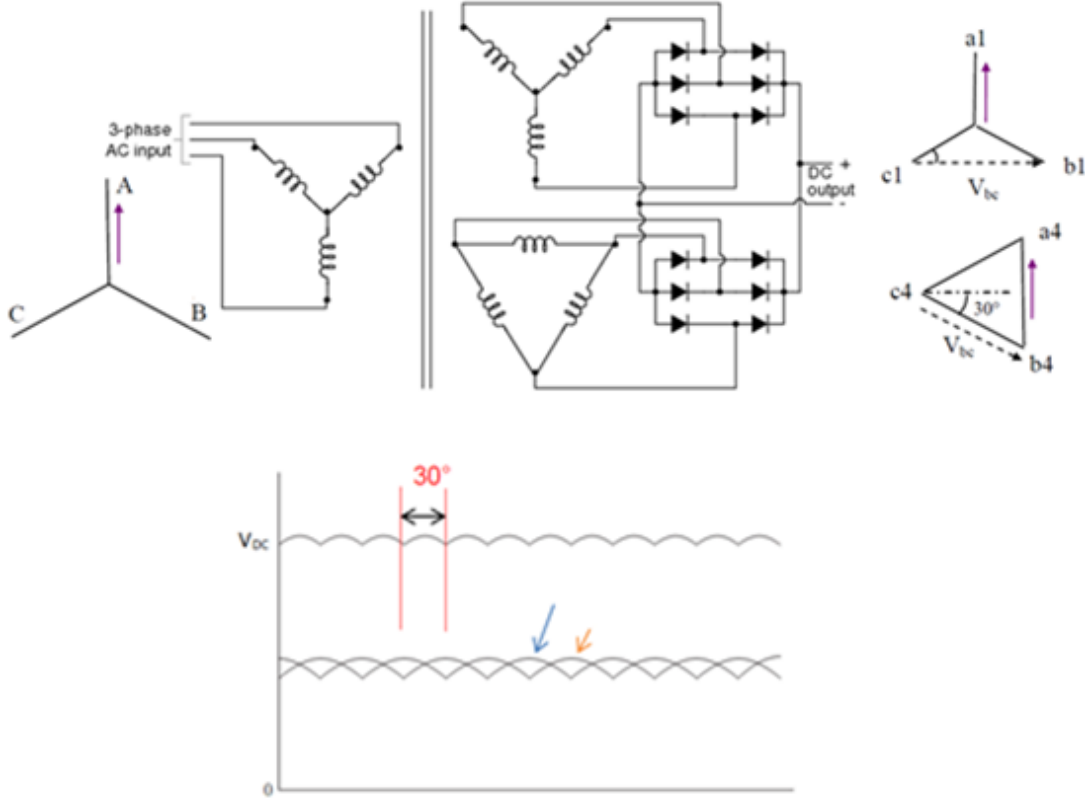


Şekil 2.4 : 6-darbeli tam dalga doğrultucu.



Şekil 2.5 : Hat harmonikleri için AC filtreler.

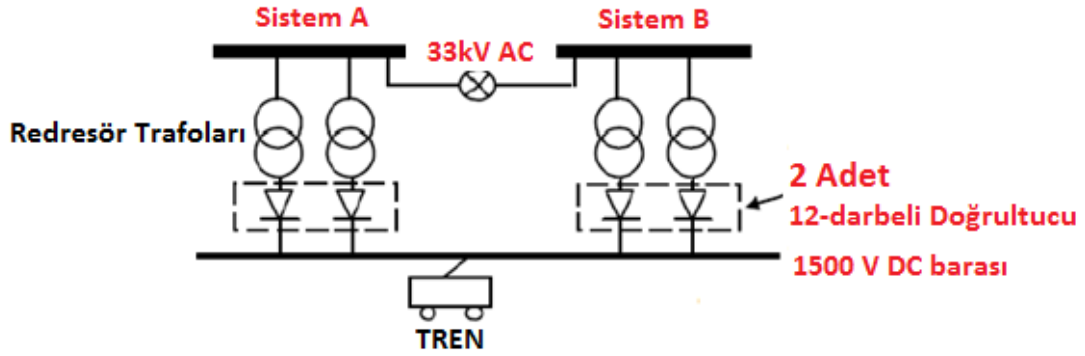
12 darbeleri doğrultucuların girişinde bulunan redresör trafolarının biri üçgen biri yıldız bağlı iki çıkışı bulunmaktadır (Şekil 2.6). Bu bağlantı şeklinde ikincil gerilimler arası faz farkı 30° olmuş olur. Eğer doğrultucu trafonun bu iki tane çıkışı üzerinden beslenirse $360/30=12$ adet darbe üretilmiş olur ve harmonik ve dalgalanmalar 6 darbeliye nazaran daha az olmuş olur.



Şekil 2.6 : 12-darbeleri tam dalga doğrultucu ve çıkış gerilimleri.

24 darbeleri doğrultucu çıkış DC gerilimi çok daha az dalgalı ve düzgün olduğundan harmonik akımları daha da azaltılmış olacaktır. Bu sebeple günümüzde yeni inşaa edilen DC sistemin kullandığı metro hatlarında özellikle 24 darbeleri doğrultucular tercih edilmektedir. Çıkış geriliminin daha da düzgün olması için kontrolsüz diyot doğrultucular yerine tristör kontrollü doğrultucular tercih edilir. Yalnız 24 darbeleri bir doğrultucu oluşturmak için 2 tane redresör trafosu paralel şekilde çalıştırılmak zorundadır (Şekil 2.7). Temel olarak bir baraya paralel bağlı olan 2 adet redresör trafosundan birinin giriş sargıları -7.5° ve diğerinin giriş sargısı $+7.5^\circ$ olacak şekilde ayarlanmalıdır. Her iki trafonun da çıkış sargıları 12 darbeleri doğrultucu da olduğu gibi üçgen ve yıldız olarak bağlandığında $360/15=24$ darbeleri doğrultucu elde edilmiş olur. Şekil 2.7'de 24 darbeleri doğrultucunun yapısı gösterilmiştir. Ülkemizde 1500 V

DC hat geriliminin kullanıldığı cer gücü tedarik sistemlerinden Kadıköy-Kartal (M4) ve Kirazlı-Başakşehir (M3) metrolarında 24 darbeli doğrultucular kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 : 24-darbeli doğrultucu kullanılan 1500 V DC TPS sistemi.

DC sistemin diğer önemli bir ekipmanı ise DC kesicilerdir. Cer gücü sisteminin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için oldukça gerekli bir ekipmandır. Her DC cer trafo merkezinde doğrultucu çıkışları ortak bir DC barayı DC kesiciler üzerinden besler. DC kesiciler kontrol, koruma veya elektrik ekipmanı izole etmek gibi birden fazla amaç için kullanılırlar. Hat enerjiliyken trafo ve doğrultucular üzerinde tek tek bakım yapmaya olanak tanır ayrıca arıza ve kısa devre durumlarından ekipmanları korur. Raylı sistem uygulamalarında kullanılan DC kesiciler Şekil 2.8 de gösterildiği gibi genellikle kompakt bir tasarıma sahip olup taşıma ve bakım kolaylığı için çekmeceli tip kesicilidir. Çizelge 2.6'da ise 750 V DC ve 1500 V DC kesicilere ait teknik bilgiler görülebilmektedir.

Çizelge 2.6 : 750 V DC ve 1500 V DC kesicilerin teknik bilgileri [8].

Nominal Gerilim	DC 750V	DC 1,500V
Anma Gerilimi	DC 900V	DC 1,800V
İzolasyon Gerilimi	DC 1,800V	DC 3,000V
Nominal Aşırı Gerilim Kesme	1.5 - 2 x rated voltage	
Anma Akımı	2,000A / 3,000A / 4,000A	
Nominal Akım Kesme Kapasitesi	133kAp/91.2kA	110kAp/76.8kA
İşletme Görevi	O-15sec-CO-15sec-CO-60sec-CO (max fault, max energy, distant fault)	
di/dt (akım yükselme vs zaman)	30.7 x 10 ⁶ A/S	24.2 x 10 ⁶ A/S
Açma/Kapama Sayısı	40,000 times	
1dk lık Dayanma Gerilimi	5.5kV	11kV
Nominal İşletme ve Kontrol Gerilimi	DC 110V / 220V	
Aşırı Akım Açma	5 ~ 15kA	
Maks. Ortam Sıcaklığı	40°C / 35°C	
Rakım	≤ 2,000m	
Boyutlar	Rectifier, Feeder (600 x 1,800 x 2,200 / 600 x 1,500 x 2,200) Negative (1,500 x 1,800 x 2,200 / 1,200 x 1,200 x 2,200)	
Ağırlık	650	700
IP Koruma Sınıfı	> IP31	
Başvurulan Standartlar	IEC 61992, JEC 7152 etc	



Şekil 2.8 : Çekmecili tip Arabalı DC kesici

2.2.2 AC cer gücü sistemleri

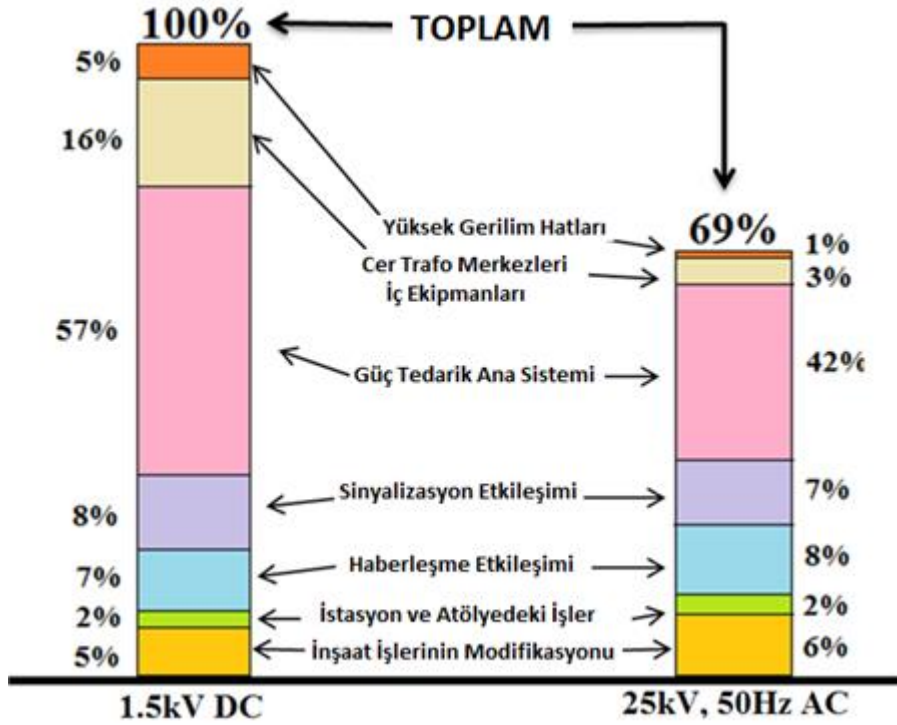
DC motorun hız kontrolünün basit olması sebebiyle geçmişte kullanılan cer gücü besleme sistemlerinin hepsi tren hattını düşük DC gerilim ile beslemiştir [1]. Takip eden yıllarda elektrik mühendisliği teknolojilerindeki gelişmeler düşük frekanslı yüksek AC gerilimli cer gücü besleme sistemlerinin kullanılmasına imkân verdi. Avrupa'da 15kV AC 16,7 Hz, ABD de ise 12kV AC 25Hz yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Bu her iki frekans değeride o zamanlar Avrupa'da (50Hz) ve ABD'de (60Hz) kullanılan ülke elektrik şebekesinden daha düşüktü. Başlangıçta bu şekilde düşük frekans değerinin tercih edilmesinin sebebi AC cer motorların kolektörlere sahip olması ve 50Hz (veya 60Hz) frekansında karşılaşılan problemlerden dolayıydı. Bu sebeple çözüm daha düşük frekans kullanmaktı. Daha sonraki yıllarda güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler yüksek akım ve büyük güç değerlerinde çalışabilecek anahtarlama elemanları ve doğrultucu yapılabilmesine olanak tanıdı. Demiryolu sanayisinin gelişimi için bu teknoloji gerçek bir buluştu ve bu teknoloji sayesinde demiryolu cer gücü sistemleri büyük bir değişime uğradı. Raylı sistem taşımacılığı için 25 kV yüksek AC gerilimin 50Hz şehir şebekesi frekansı ile aynı frekansta ilk defa 1950 yılında Fransa'nın Valenciennes Thionville

hattında kullanıldı. Bu tarihten sonra 25kV AC 50 Hz (veya 60hz) hızlı tren, anahat (ekspres) tren, bölgesel veya banliyö trenleri gibi uzun hatlarda çalışan trenler için standart oldu ve sektör tarafından sıklıkla tercih edildi. 25kV AC 50Hz tercih edilmesinin sebebi sunduğu büyük avantajlardan dolayıydı. Gerilimin yüksek olması iki trafo merkezi arası uzaklığın DC sisteme göre oldukça fazla olmasını sağlıyor ve akımın daha düşük olmasının bir sonucu olarak da katener ekipmanları ve iletkenler çok daha hafif olmaktadır. Fakat DC cer gücü sistemlerinin işletme masraflarının daha düşük olması sebebiyle (daha hafif araçlar) günümüzde metro gibi çok kısa ve sık duruşlu ve 30-40 km geçmeyen hatlarda 1500V DC ve rijit katener kullanan sistemler demiryolu sektör trendi olmuştur. Çizelge 2.7’de AC ve DC cer gücü sistemleri arasındaki farklılıkları detaylı olarak anlatmaktadır, Şekil 2.9’da ise AC ve DC sistemler kurulum maliyetleri açısından karşılaştırılmıştır [2]. Bu karşılaştırma da sadece inşaa ve kurulum masrafları dikkate alınmış olup işletme maliyetlerini içermemektedir. Şekil 2.9’da görülebildiği gibi AC sistemin kurulum maliyetleri yaklaşık %30 oranında daha azdır ve iki sistem arasındaki maliyet farkları özellikle trafo merkezleri, akım toplama sistemi ve yüksek gerilim hatları için oldukça belirgindir [2]. Bunun sebebi AC sistemde kullanılan iletken kesitlerinin DC sisteme göre 3-5 kat daha küçük olması, trafo merkezlerinde çok daha az sayıda ekipman içermesi ve iki ardışık trafo merkezi arası uzaklığın çok daha az olmasındandır. V.A. Profillidis (2006) ‘e göre dünyada işletmede olan elektrikli demiryolu hatlarının yaklaşık %18 i düşük frekanslı AC hat gerilimi (16,7Hz veya 25Hz), %33 ü 25kV AC (50/60Hz) ve yaklaşık %49 ise değişik gerilimlerde DC hat gerilimi kullanmaktadır [2].

Çizelge 2.7 : AC ve DC sistemler karşılaştırması [1].

	AC Sistem	DC Sistem
<i>Ardışık İki Cer Trafo Merkezi Arası Uzaklık</i>	15-50 km arası	2-5 km arası
<i>Akım Toplama Sistemi İletkenleri</i>	Hafif	Çok Daha Ağır
<i>Kullanılan İzolatörler</i>	Çok Daha Büyük İzolatörler	Küçük İzolatörler
<i>Kaçak Akım</i>	Metal Aksamalara Etkisi Yoktur	Korozyon vb. ciddi etkileri vardır
<i>Elektromanyetik Girişim (EMI)</i>	Haberleşme ve Sinyalizasyon ekipmanlarına ciddi etkisi vardır	Genellikle Problem Oluşturmaz

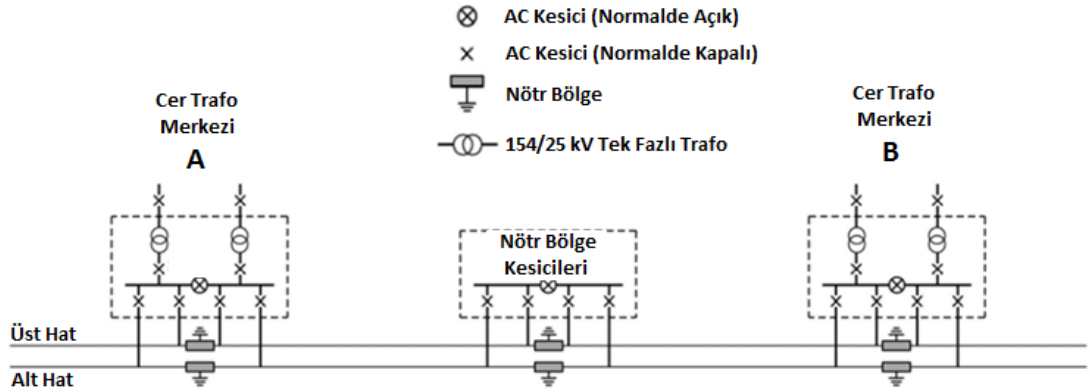
Genel olarak basit 25kV AC besleme sistemi, 1:1 dönüştürme oranına sahip trafoların kullanıldığı BT (booster transformer) tipli 25kV AC sistem ve 2x25kV AC oto transformatörlü sistem olmak üzere üç tip AC besleme sistemi vardır. Bu üç değişik AC besleme sisteminden otomatik transformatör beslemeli (auto transformer, AT feeding) sistem yüksek hızlı tren uygulamaları gibi yüksek yoğunluklu hatlar için en ideal olanıdır. Bu sistemin yüksek hızlı tren hatları için ideal olmasının birkaç nedeni vardır. İki ardışık cer trafo merkezi arası mesafa çok daha uzun olabilir, aynı hat çok daha fazla güç taşıyabilir, haberleşme ve sinyalizasyon hattıyla olan elektromanyetik etkileşim minimuma indirilmiş olur ve raylarda toprağa akan kaçak akımlar daha iyi kontrol edilir.



Şekil 2.9 : DC and AC sistemler maliyet karşılaştırması [2].

25kV AC 50Hz sistemin basit bir şeması Şekil 2.10 da gösterilmiştir. Genellikle her bir cer trafo merkezinde iki adet yağlı tipte 154/25kV dönüştürme oranına sahip tek fazlı alçaltıcı tip trafo vardır ve genellikle her bir cer trafosu AC kesiciler üzerinden gidiş ve geliş havai katener hattının yalnızca birini beslemektedir. Her bir cer trafosu 154kV TEİAŞ yüksek gerilim iletim hattının 3 fazından 2 si ile beslenmektedir. Genellikle cer trafo merkezindeki iki trafodan birincisi R ve S fazlarıyla diğer tarfo ise S ve T fazlarıyla beslenmektedir. Bazı istisnai durumlarda 34.5/25kV dönüştürme oranına sahip trafolar kullanarak demiryolu hattı OG şebekesinden de

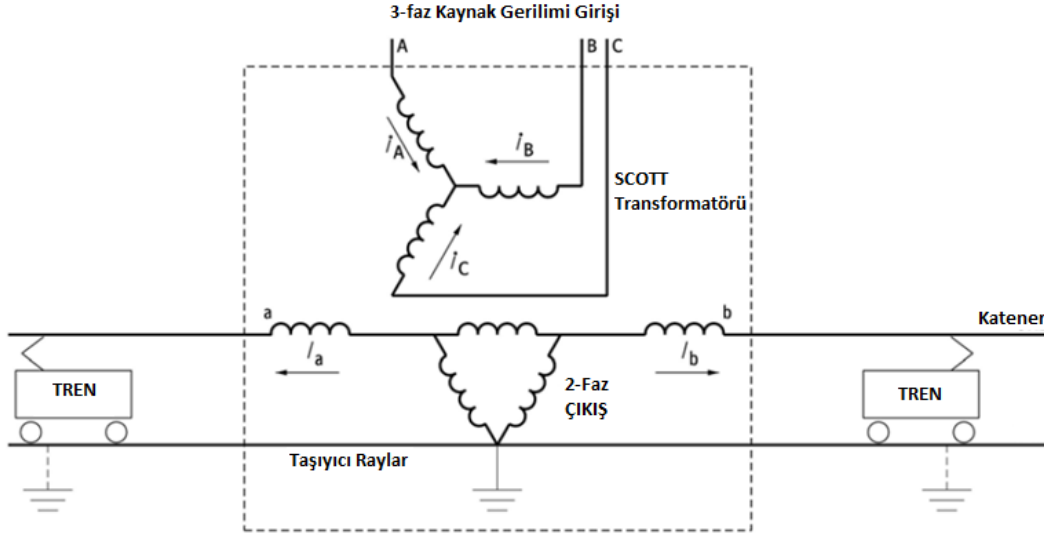
beslenebilmektedir. Fakat faz dengesizliğinden dolayı bu genellikle tercih edilmez. Her iki cer trafo merkezi birbirine normalde açık durumda bekleyen kesicilerin olduğu seksiyonman bölge ile bağlıdır. (track section cabinet, TSC) Cer trafo merkezlerinin herhangi birinde oluşabilecek arıza veya enerji kesintisi durumda kesiciler kapatılarak katener hattı enerjisiz bırakılmamış olur. AC cer gücü trafo merkezleri planlanırken trafo büyüklüğü bu tarz durumları da düşünerek diğer başka bir trafoyu yedekleyebilecek güçte tercih edilir. Hat gerilimi yüksek olması sebebiyle de gerilim düşümü belli aralıklar içinde tolere edilebilir. AC sistemlerde her bir tarfonun giriş ve çıkışına kesiciler konulmak zorundadır. Bu kesiciler arasında kilitleme bulunup, herhangi bir faz-faz çakışmasına izin vermez. Seksiyonman bölgenin kesicilerin kapatılması için arızalı trafonun katener hattını besleyen tüm kesicileri açılarak izole edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.10 : 25kV AC katener besleme sistemi [1].

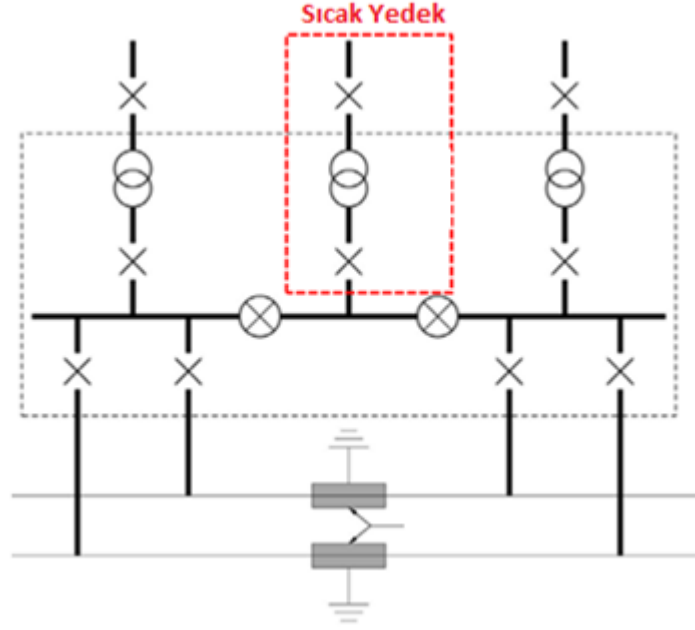
Seksiyonman bölge ayrıca havai katener hattının gidiş ve geliş hatlarını paralellemek ve hat sonundaki gerilim düşümleri azaltmak içinde kullanılır. Normal işletme durumunda iki cer trafo merkezinin katener beslemesi farklı fazlardan beslendiği için hiçbir zaman birbiriyle çakıştırılmamalıdır. Bu yüzden birbirine bitişik olan yerlerde faz çakışmasını önlemek için enerjisiz nötr bölgeler oluşturulur. Aksi takdirde trenin pantografı iki farklı trafo merkezinin gerilimlerini kısa devre edebilir. Nötr bölgeler genellikle en az 7 metre açıklıkta olup, 2 adet Section Insulator, SI ve kesiciler kullanarak oluşturulur. Kesiciler arasında yine elektriksel ve mekanik kitlemeler mevcut olup normal işletme sırasında herhangi bir zamanda 3 kesiciden daima 2si kapalı pozisyonda bulundurulur. Bu sistemler genellikle SCADA kontrollü olup, elektriksel ve mekanik kitlemelerin yanı sıra yazılımsal olarakta kitlemeler mevcuttur.

AC sistemlerde faz dengesizliği Şekil 2.11’de gösterilen Scott trafo yardımıyla 120 derece faz farkı bulunan 3 faz girişini aralarında 90 derece faz farkı bulunan 2 faz çıkışına dönüştürmek suretiyle azaltılabilir. Scott trafo temel olarak 2 fazlı dengeli yükü 3 fazlı dengeli bir yükü dönüŐtürür ya da bunun tam tersi de mümkündür. Bu bağlantı Őekli sadece dengeli bir yükü fazlar arasına eşit olarak dağıtılabilir. Eğer iki fazlı yük dengeli değilse, Scott trafo bunu düzeltemez [1].



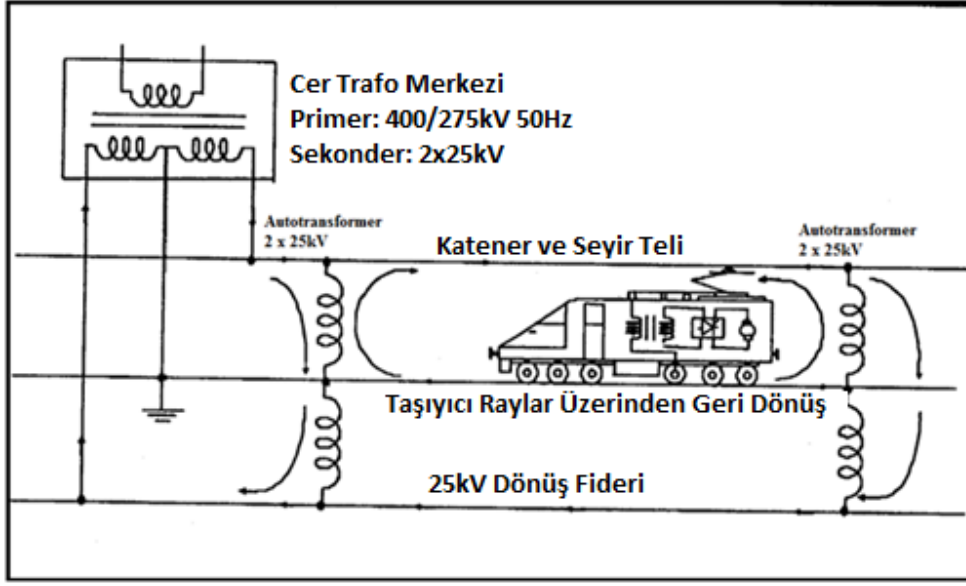
Şekil 2.11 : Faz dengesizliği azaltmak için scott trafo kullanımı [1].

Bazı AC sistemlerde tren trafik yoğunluğunun ağır olduğu kritik bölgelerde Şekil 2.12’de gösterildiği gibi üçüncü bir cer transformatörü sağlanabilir. Bu trafo sıcak yedek olarak tabir edilip, gerektiği durumlarda yükü anında üzerine alacak Şekilde hazır beklemektedir. Daha fazla sayıda ekipman ve sonuç olarak artı bir maliyet getirmesi açısından sadece kritik bölgelere konulur [1].

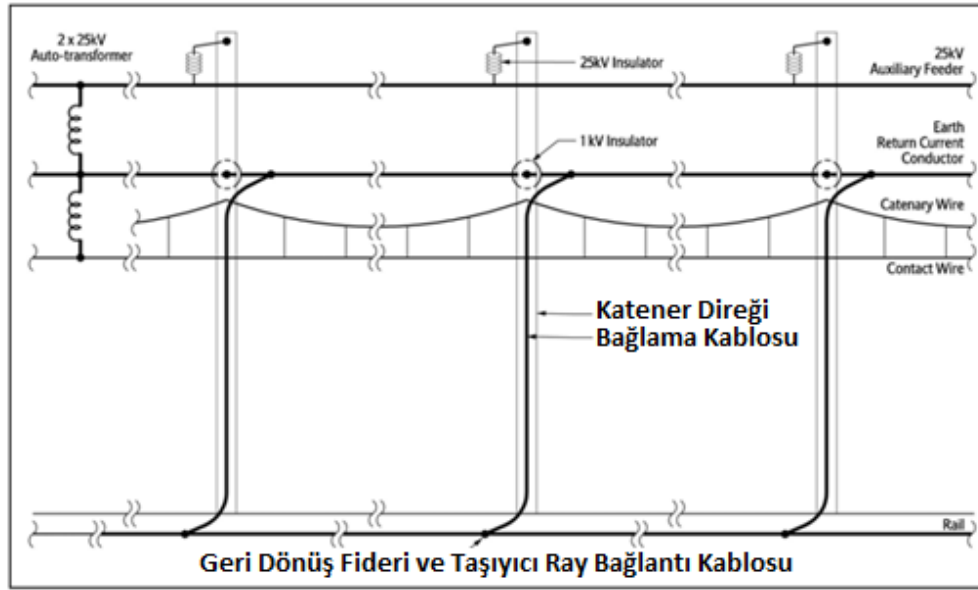


Şekil 2.12 : Üç transformatörlü AC sistem diyagramı.

Şekil 2.13 ve 2.14’de 2x25kV Oto Transformatör (Auto-Transformator, AT) Beslemeli AC sisteme ait besleme ve katener sistemleri sırasıyla gösterilmiştir. AT sargıları Şekil 2.14 de gösterildiği gibi katener ve yardımcı besleme fideri arasında bağlanmıştır. AT beslemede raylar normal sistemden farklı olarak trafonun alçak gerilim sargılarının orta noktasına bağlanmıştır. Standard bir AT besleme sisteminde 50kV gerilim katener ve geri dönüş fiderine uygulanır. Oto transformatörün 1:1 dönüştürme oranı ray ve katener arasında 25kV AC gerilim elde edilmesini sağlar. AT beslemeli AC sistemin en büyük avantajı trenin ihtiyaç duyduğu akımı bitişik iki ayrı cer trafo merkezinden alması, ayrıca daha yüksek gerilim seviyesinde akımlarında daha düşük olmasından dolayı enerji iletim verimliliği yüksektir. Hat uzunluğunun 1000km ye ulaştığı yüksek hızlı tren projelerinde AT sistemlerin kullanılması bu yüzden kaçınılmazdır. 1:1 dönüştürme oranına sahip AT sistemde iki bitişik cer trafo merkezinden her birinin katener hattına verdiği akım trenin çektiği toplam akımın yarısı kadar olacaktır. AT sistemin diğer avantajları ise daha az cer trafo merkezine ihtiyaç duyulması ve elektromanyetik girişimin (EMI) bastırılması. İki bitişik cer trafo merkezi arasındaki uzaklık gerilim değerinin veya AT dönüştürme oranının yükseltilmesi ile birlikte aslında daha da artılabilir. Dünya’da 2:1 dönüştürme oranına sahip AT beslemeli AC sistemler Japanyo’da Shinkansen yüksek hızlı treninde kullanılmaktadır. 3:1 dönüştürme oranına sahip AT beslemeli AC sistem ise SEPTA Philadelphia, ABD kullanılmaktadır.



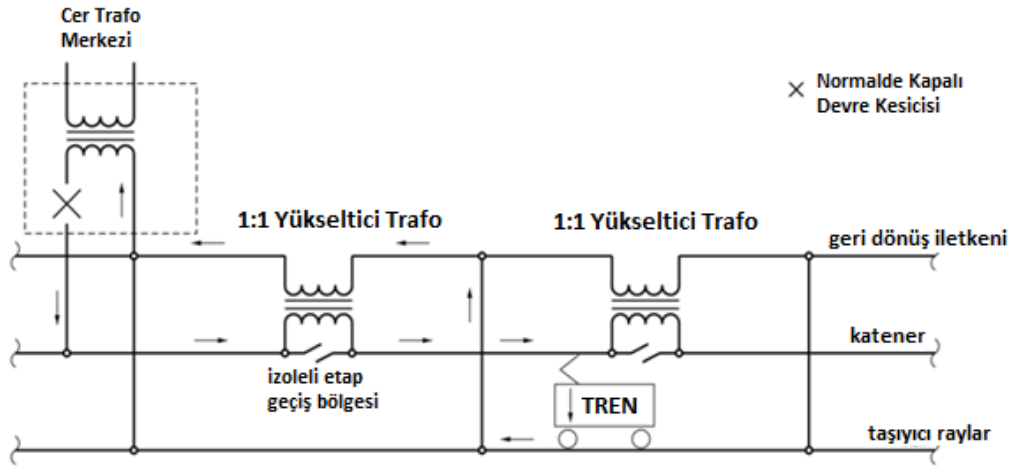
Şekil 2.13 : 2 x 25kV AC oto transformatörlü besleme sistemi.



Şekil 2.14 : 2 x 25kV AC AT besleme sistemi katener-ray bağlantısı.

AC sistemlerde kullanılan başka bir besleme sistemi ise yükseltici transformatör (booster transformer, BT) beslemeli sistemdir. BT beslemeli AC sistem esasen basit AC besleme sistemine benzerdir. Yükseltici trafonun kullanılma sebebi ise hat boyunda bulunan haberleşme ve sinyalizasyon ekipmanları ile olan elektromanyetik etkileşimin (EMI) azaltılmasıdır. AC sistemlerde kullanılan 25kV AC yüksek gerilim dolayısıyla EMI büyük bir sorundur. Yüksek geri dönüş akımının raylar tarafından taşındığı basit AC beslemeli sistemde eğer haberleşme kablosu raylara yakın olacak şekilde montajlanırsa haberleşme kablosu üzerinde istenmeyen gerilimlerin

endüklenmesi mümkündür. Uzun mesafelerde bu demiryolu güvenliği ilgilendiren kritik bir sorun olmaktadır ve bu sebeple yükseltici trafolar katener hattı üzerinde uygun noktalara (genellikle katener direği üzerine) Şekil 2.16 da gösterildiği gibi yerleştirilir. Bu trafolar tek fazlı tipte olup genellikle 1:1 dönüştürme oranına sahiptir ve raylardan geri dönüş akımını toplayıp katener sistemindeki dönüş iletkenine basar. BT trafonun primer sargısı Şekil 2.15’de gösterildiği gibi seyir teline, sekonder sargısı ise dönüş iletkenine bağlıdır, dönüş iletkeni ise belirli aralıklarla raylara bağlanmıştır.



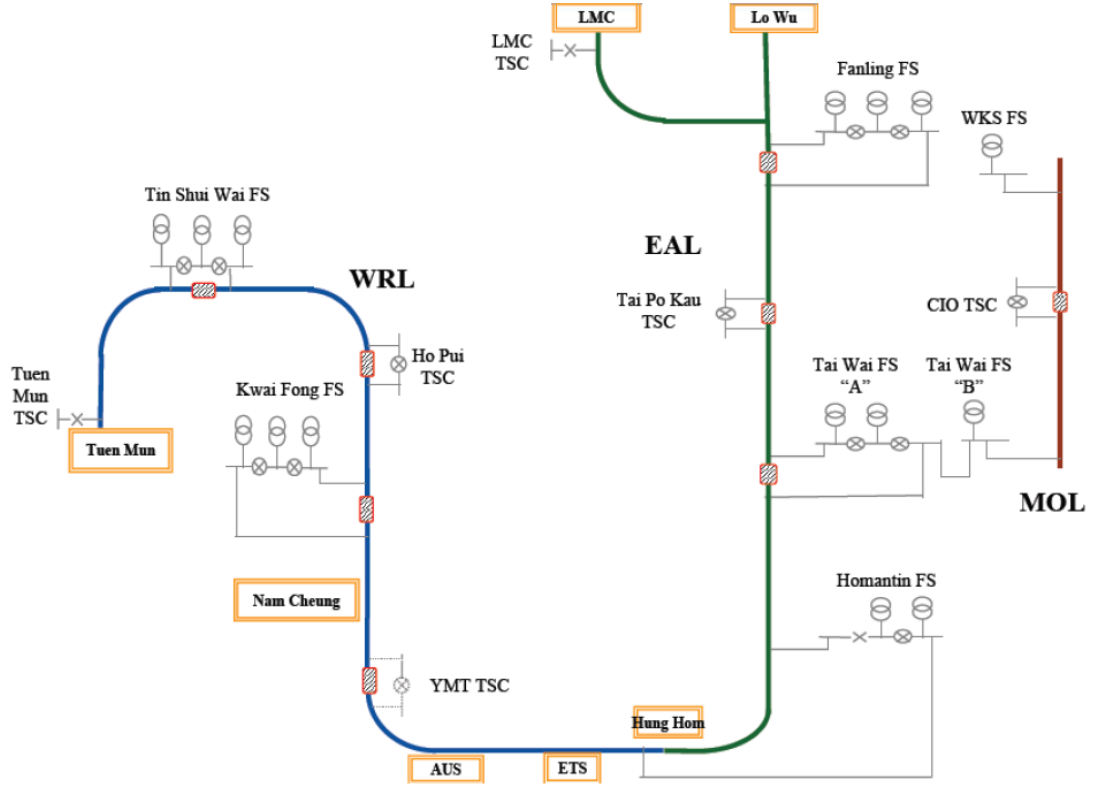
Şekil 2.15 : 25kV AC BT tipli sistem.

İstanbul’da tüm raylı sistemler arasında Marmaray hattı hariç diğer tüm hatlar farklı gerilim değerlerinde DC kullanmaktadır. Yeni metro hatlarında 1500 V DC tercih edilirken nispeten daha eski olan hatlarda 750 V DC kullanılmıştır. Marmaray hattının toplam uzunluğunun 76 km olması sebebiyle 25kV AC 50Hz gerilim seviyesi tercih edilmiştir. Çok uzun hatlarda DC sistem tercih edildiği takdirde hat gerilim seviyesi düşük olduğundan gerilim düşümünü kontrol etmek için çok fazla sayıda trafo merkezi gerekecektir. Marmaray’da toplam 6 adet cer trafo merkezi ve her bir cer trafo merkezinde 2 tane olmak üzere toplam 12 adet cer trafosu ile Marmaray hattı beslenmektedir. Şekil 2.18 de Marmaray Trafo Merkezleri besleme planı gösterilmiştir. Dikkat edilecek olursa trafik yoğunluğunun fazla olacağını düşünülen batırma tüp tünel bölümünde tercih edilen trafoların her biri 30 MVA gücünde olup diğer kısımlardaki trafolar trafik yoğunluğunun daha az olması sebebiyle nispeten daha küçük güçte olup 23 MVA ve 16 MVA dır.



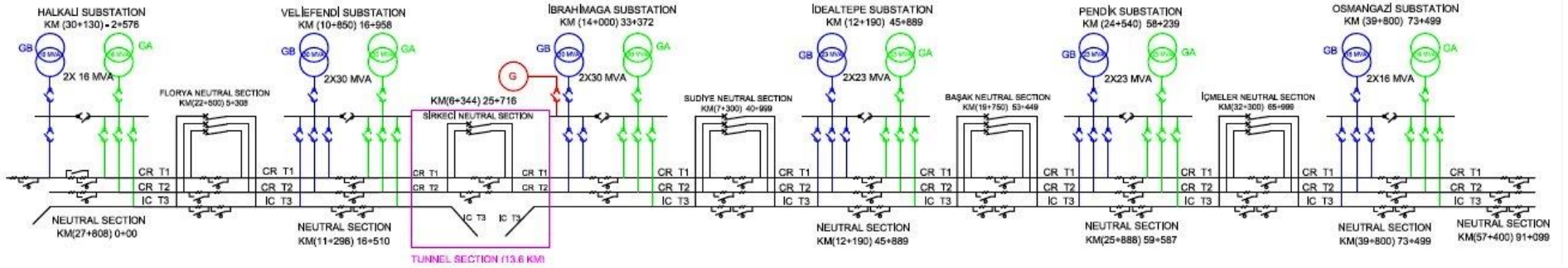
Şekil 2.16 : Katener direği üzerine asılmış 1:1 yükseltici transformatör.

Dünya’da ise 25kV AC, 50Hz (veya 60Hz) gerilim seviyesi daha önce sıralanan avantajlarından dolayı hattın uzun olduğu ekspres tren hatları, banliyö hatları ve yüksek hızlı tren hatlarında tercih edilmektedir [1]. Şekil 2.17’de Hong Kong raylı sistem operatörünün işlettiği toplam 11 hatdan AC sistem kullanılan 3 hat da ait –East Rail Line (EAL), Ma On Shan Line (MOL) ve West Rail Line (WRL)- besleme planı gösterilmiştir [1].



Şekil 2.17 : Hong Kong’da 3 farklı hattın ortak 25kv AC beslemesi.

MARMARAY TRAF0 MERKEZLERİ BESLEME PLANI



Şekil 2.18 : Marmaray projesi cer gücü tedarik sistemi - cer trafo merkezleri.

Tipik bir 25kV AC ger gücü besleme sisteminde kullanılan ekipmanlar transformatörler, AC kesiciler ve kesici hücreleri ve kumanda ve kontrol ekipmanlarıdır. Dengesiz tek fazlı yükler sistemde çokca olduğundan dolayı ayrıca kompanzasyon sisteminde şebekeden aşırı reaktif enerji çekilmesini azaltmak için bu listeye eklenebilir. 25kV AC kesiciler genellikle bakım kolaylığı, yüksek güvenilirliği ve düşük ark seviyelerinden dolayı vakumlu tip olarak tercih edilir fakat SF6 gazlı tipte olanları da kullanılmaktadır. Ayrıca hava izoleli (AIS, Şekil 2.20) ve gaz izoleli (GIS, Şekil 2.19) olmak üzere iki değişik tipte de şalt tesis raylı sistem uygulamaları için kurulmaktadır. Günümüzde özellikle şehir içinde kalan raylı sistem hatlarında ve nispeten daha yüksek gerilim seviyesine sahip olan hatlarda GIS tipli trafo merkezleri kurulsada bazı yüksek hızlı tren hatlarında AIS tipli trafo merkezleri görmekte mümkündür. Çizelge 2.8’de raylı sistem uygulamaları için üretilmiş AC kesicilere ait teknik bilgiler görülebilmektedir.



Şekil 2.19 : Gaz izoleli AC kesiciler.



Şekil 2.20 : Hava izoleli AC kesiciler.

AIS şalt merkezleri İstanbul'da Haydarpaşa-Pendik ve Sirkeci Halkalı eski banliyo hatlarında kullanılmaktaydı. Marmarat projesi kapsamında yenileme sonrasında projede kurulan tüm cer trafo merkezleri GIS şalt merkezi olarak revize edilmiştir.

Çizelge 2.8 : Vakum tipli AC kesici etiket bilgileri [8].

Frekans (Hz)	16.7	16.7	50 (60)
Nominal Gerilim (kV)	24	36	40.5
İşletme Gerilimi (kV)	17.5	17.5	27.5
Nominal Güç Frekansında Dayanma Gerilimi (kV)	50	70	95
Darbe Gerilimi Dayanma Seviyesi	125	170	200
Nominal Akım (A)	2500	2500	2500
Kısa Devre Akımı (kA)	31.5	31.5	25
Kısa Zamanlı Maks. Kısa Devre (kA)	80	80	63
Kutup Sayısı	1	1	1

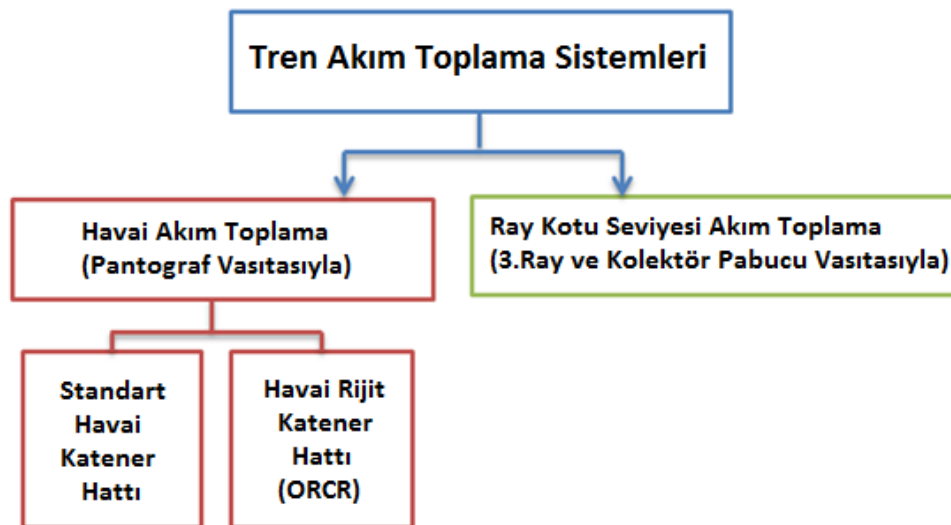
2.3 Akım Toplama Sistemleri

Trenlerin hareket etmesi için gerekli olan elektrik enerjisi cer trafo merkezi üzerinden tren hattına paralel olarak aralıksız tesis edilmiş olan kontak iletkeni vasıtasıyla iletilir. Şekil 2.21'de gösterildiği gibi genel olarak 2 ana tipte akım toplama sistemi vardır. Bunlar, akımın havai hat üzerinden tren çatısına yerleşik

pantograf vasıtasıyla temin edildiği havai kataner hattı sistemleri ve akımın taşıyıcı raylar seviyesinde, taşıyıcı raylara paralel olarak tesis edilmiş 3.ray üzerinden motor pabucu vasıtasıyla temin edildiği 3.ray sistemidir.

Standart (veya esnek kataner de denilmekte) kataner hattı ve rijit kataner (Overhead Rigid Conductor System, ORCR) hattı olmak üzere iki tipte havai kataner hattı mevcuttur. Her iki sistemde akımın trene taşınması Şekil 2.22 ve Şekil 2.23’de gösterildiği gibi pantograf denilen, kompresörlü hava basıncı ile çalışan, tren çatısına monte edilmiş aletin kataner teline (seyir teli) alttan baskı uygulamasıyla olur. Genellikle 1600mm veya 1950mm genişlikte olan pantograflar dünyada yaygın olarak kullanılır. Tek ve çift kollu olarak imal edilebilen pantograf başlıklarına pantograf kömürleri tutturulmuştur. Karbon şeritlerini içeren bu pantograf kömürleri düşük sürtünme katsayısı, düşük kataner teli aşınması ve hafiflik gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca karbon kömürünün elektriksel ve termal iletkenliği iyidir, erimez ve en önemlisi arka karşı çok iyi direnmektedir.

DC sistemlerde havai hat veya 3.ray sisteminden her ikisi de kullanılabilmesine rağmen 3.ray sistemine göre daha kırılğan olmasına rağmen daha yüksek gerilim seviyelerine ve çok yüksek hızlara (400km/h) imkân verdiğinden dolayı AC sistemlerde yalnızca havai hat ve pantograf kullanılır. Pantograf ve sunduğu avantajlar sebebiyle rijit havai kataner hattının kullanıldığı 1500 V DC sistemler günümüzde metro projeleri için standart bir uygulama olmuştur ve dominat hale gelmiştir.

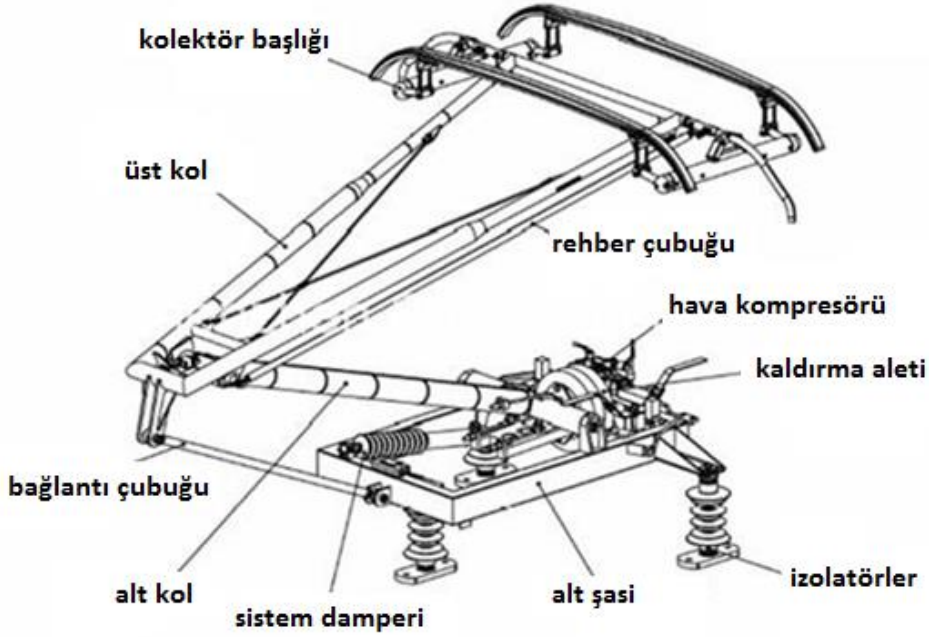


Şekil 2.21 : Tren akım toplama sistemleri tipleri.

2.3.1 Standart katener sistemi

Tipik bir standart katener sistemi aşağıdaki kısımlardan oluşur:

- Seyit teli (pantograf ile kontak halinde olan iletken), pandül ve taşıyıcı tel.
- İletken destek yapıları: katener direği, konsolaban takımı, izolatorler gibi.
- Gergi sistemleri (sabit gergili, karşı ağırlıklı veya otomatik gergili).



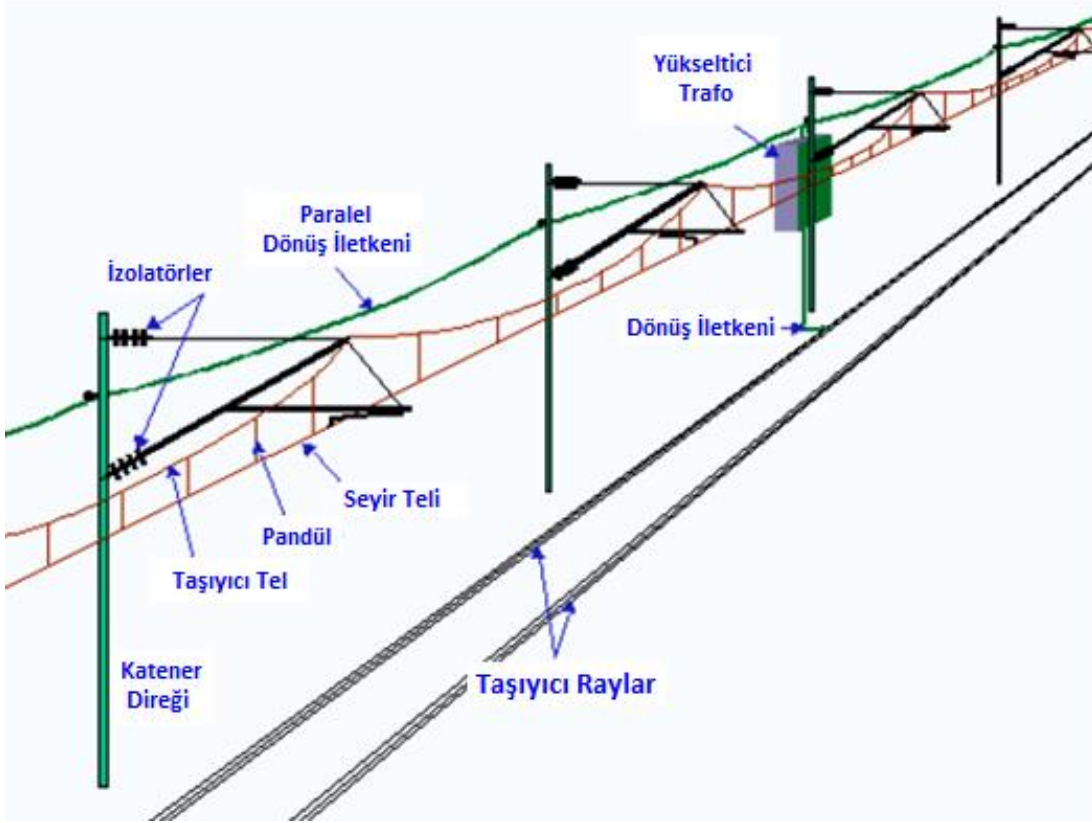
Şekil 2.22 : Tipik bir pantografin parçaları.



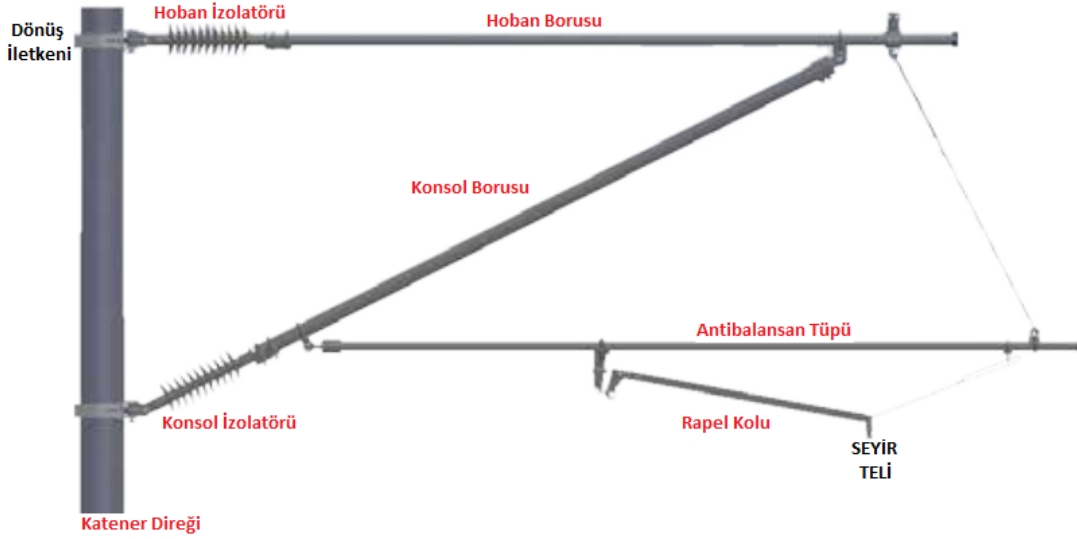
Şekil 2.23 : Trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf.

Pantograf ile havai katener hattı arasında iyi ve daimi bir temas sağlamak çok önemlidir. Aşırı bir temas pantograf kömürünün ve bakır seyir telinin çok erken aşınmasına veya daha da kötüsü havai katener sisteminin kopmasına (de-wirement) sebebiyet verebilir. Temasın yeteri kadar iyi olmaması ise seyir teli ile pantograf arasında arka neden olacağından yine aşınmalara ve elektromanyetik girişime (EMI) neden olabilir. Ayrıca yetersiz temas yüksek resistif bir yol oluşturacağından hatda fazladan enerji kayıpları oluşacak ve hattın güç iletme kapasitesi düşecektir. Bu yüzden seyir teli ile pantograf arasındaki temasın şiddeti özellikle yüksek hızlı tren işletmelerinde oldukça önemlidir. Günümüzde yüksek hızlı trenlerin işletme hızının 400km/h üzerine çıkamamasının en önemli nedenlerinden biride daha da yüksek hızlarda pantograf ile seyir teli arasındaki temasın zorlaşmasıdır. Yüksek hızlı trenlerde pantograf tasarımı aerodinamik kanunlar dikkate alınarak yapılır ve pantograf başlığı oluşan rüzgârında etkisiyle yukarı doğru kalkarak temas kuvvetinin artmasına ve dengenin korunmasına yardımcı olur [1].

Pantograf ile seyir teli arasında iyi bir temas sağlamak için seyir teli hat boyunca olabildiğince düz olmalıdır. Bunu sağlamak için seyir teli pandüller aracılığıyla taşıyıcı tel denilen başka bir iletkene asılmıştır. Farklı uzaklıktaki pandül telleriyle taşıyıcı tele asılan seyir telinde oluşabilecek sehimler böylece minimum seviyeye getirilmiş olur. Bu üç iletken ise belirli aralıklarla katener direkleri üzerine izolatör ve bazı destek ekipmanları vasıtasıyla asılır. İki katener direği arasındaki uzaklık, kurb bölgelerinde (karayollarında viraj denilir) daha sık, düz yollarda daha uzun olmak üzere yaklaşık 22 m ile 60 m arasında değişmektedir [1]. Şekil 2.24'de standart bir havai katener sistemi bütün olarak gösterilmiştir. Şekil 2.25'de ise katener direği donatı takımına ait parçalar gösterilmiştir.

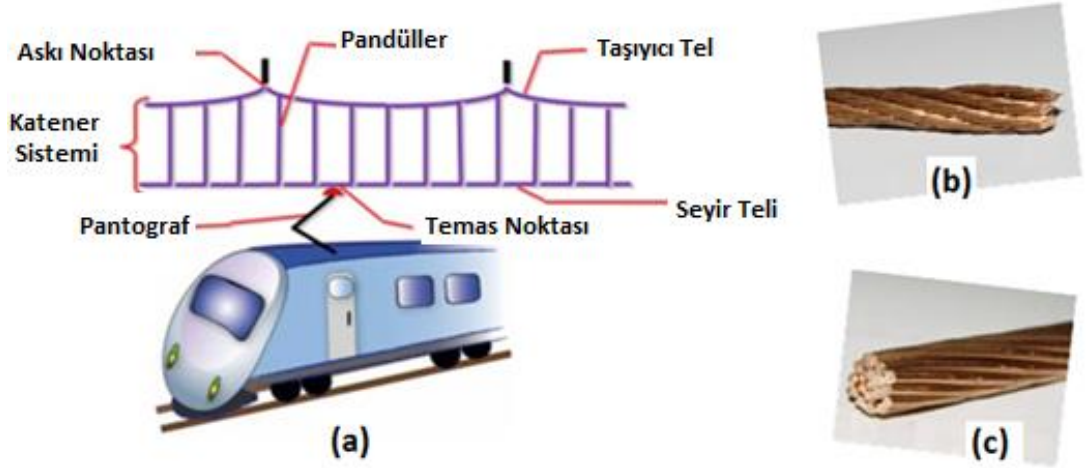


Şekil 2.24 : Standart havai katener sistemi.



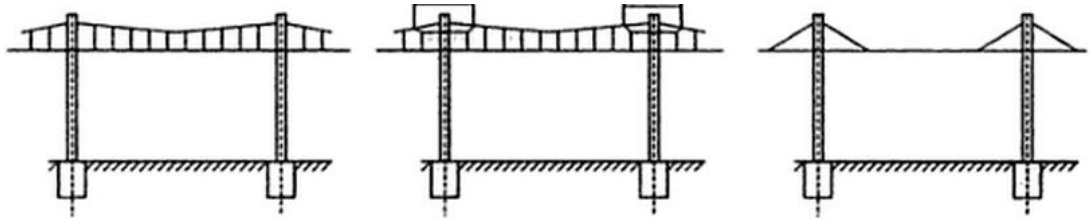
Şekil 2.25 : Basit katener direği montaj şeması [10].

Şekil 2.26 (c)'de gösterilen taşıyıcı tel temel olarak ikinci iletken ve seyir teline destek olması açısından Şekil 2.26 (a)'daki gibi iki direk arasında asılmıştır. Telin kendi ağırlığı sebebiyle seyimlidir. Seyir telinin raylara paralel olacak şekilde dümdüz olması için farklı uzunluktaki pandüller yardımıyla belirli noktalardan taşıyıcı tele asılmıştır.

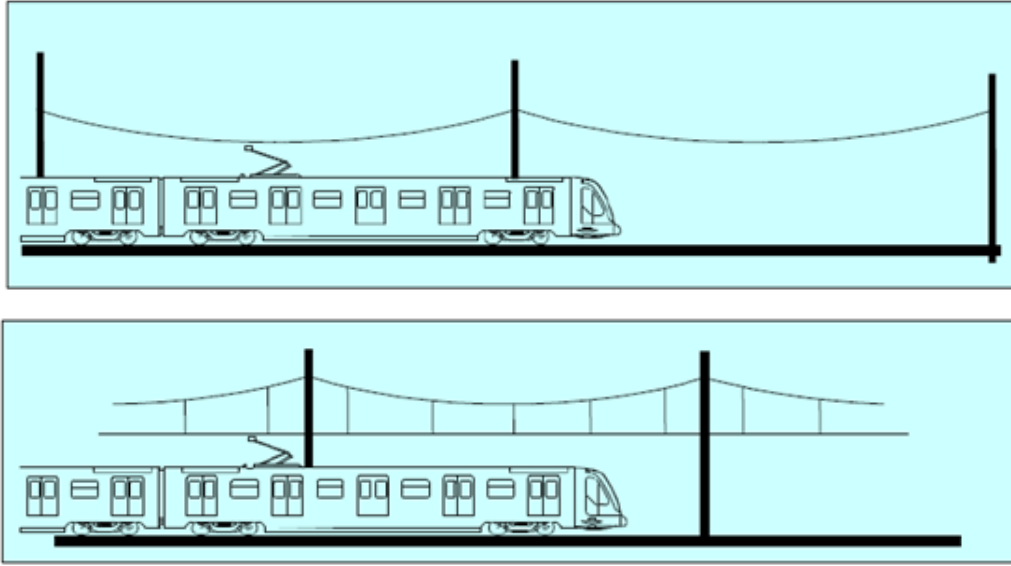


Şekil 2.26 : (a) Basit katener sistemi, (b) Pandül (c) Taşıyıcı tel.

Hat üzerindeki trenin hızı, katener direkleri arasındaki açıklık ve iklim koşullarına bağlı olarak birkaç değişik tipte katener askı sistemi vardır. Basit askı (trolley tipi askı da denir) denilen sistemde taşıyıcı tel ve pandüller kullanılmaz. Yalnızca seyir teli vardır. Bu tip sistem işletme hızının düşük olduğu hatlarda, park sahalarında, atölye ve depo bölgelerinde basit ve ucuz olması sebebiyle tercih edilir. Orta ve yüksek hızlı sistemlerde katener tipi (pandül ve taşıyıcı telin olduğu) askı sistemi zorunludur. Çok yüksek hızlı trenlerde ise standart katener de yeterli olmayıp (>250 km/h) Y tipli katener gibi özel modifikasyonlar yapmak gereklidir (daha kısa direk açıklığı, daha sık pandül yerleştirilmesi ve Y tipi direk askısı). Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de değişik tipte katener askı sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.27 : Farklı tipte havai katener hatları [2].



Şekil 2.28 : Basit askı katener (üst) ve standart havai katener (alt) [2].

Şekil 2.29 da seyir teli ve kesiti gösterilmiştir. Seyir teline ait karakteristik bilgiler ise Çizelge 2.9’da gösterilmiştir. AC sistemin tercih edildiği raylı sistem uygulamalarında kullanılan bakır seyir telinin kesiti genellikle 150mm^2 dir. Raylı sistem uygulamalarında seyir teli kesit hesabında Sonlu Elemanlar Methodu ile yapılan analizler kullanılır (Finite Element Analysis, FEA). Tercih edilecek olan seyir teli kesiti trafo merkezi ile tren pantografı arasındaki gerilim düşümünü maksimum %10 da tutacak şekilde tercih edilmelidir ve seyir telindeki ısınma izin verilen sınırlar arasında kalmalıdır. FEA yardımıyla tren işletmesi boyunca seyir telinin dinamik davranışı rahatlıkla analiz edilebilir [2]. FEA seyir teli karakteristik bilgilerini, malzeme çeşidini, pantografin dinamik ağırlığını ve seyir teline uyguladığı temas kuvvetini, pantografin oluşturduğu osilasyonu, hattın durumunu ve hatta aerodinamik etkileri bile hesaba katar [2]. Bu analizler EN 50119 Havai Katener Sistemi, EN 50149 Bakır Seyir Telleri ve EN 50163 Demiryolu Cer Trafo Merkezleri Gerilim Sistemleri standartlarına uygun olarak yapılmalıdır [2].

Çizelge 2.9 : 350 km/h hıza uygun seyir telinin karakteristikleri [1].

Tel Kesiti	150mm ²
Minimum Mekanik Stres	43 kg/mm ²
Maksimum Lineer Direnç	0.148 Ω /km (20°C de)
İletkenlik	%80

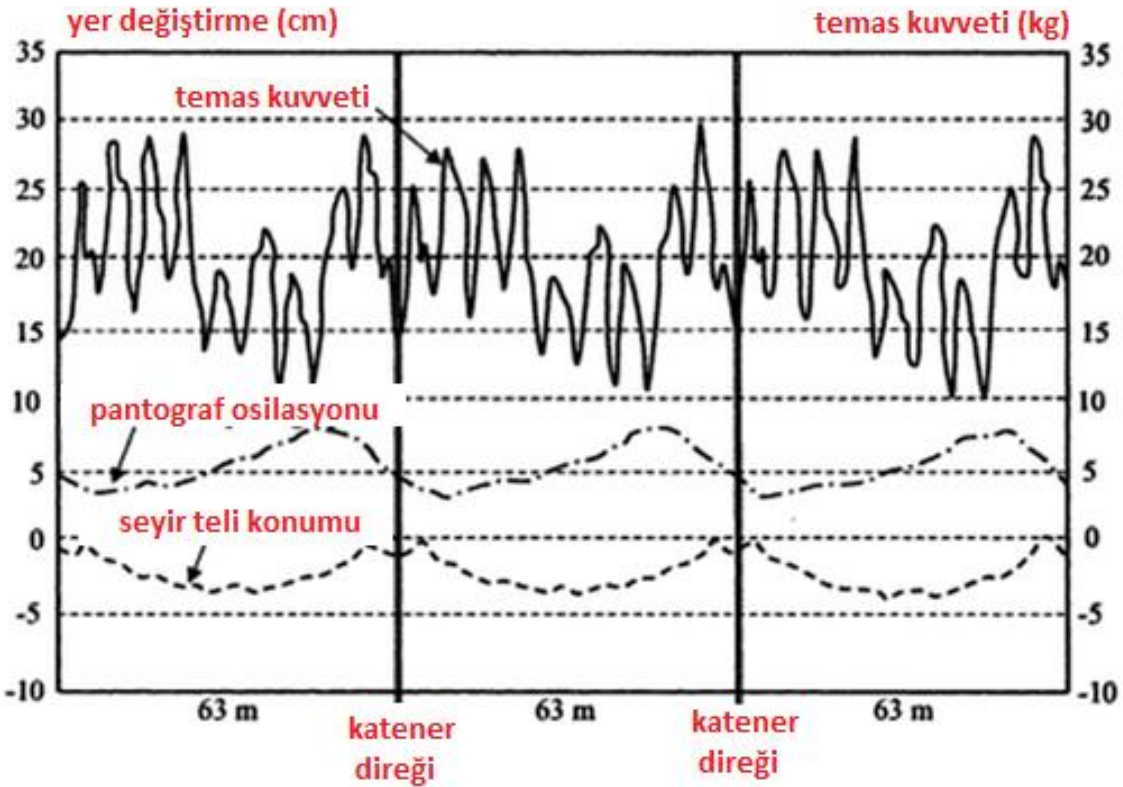


Şekil 2.29 : Seyir teli ve kesiti.

Pantograf ile seyir teli arasında iyi bir temas sağlanması; ne aşırı bir temas ne de kötü veya hiç temasın olmaması durumu yaşanmaması, katener mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Pantograf üzerine yerleştirilen karbon şerit (pantograf kömürü) bu açıdan oldukça önemlidir, düzenli olarak kontrol edilmeli ve bakımı yapılmalıdır. Aşınmanın belli değerlerin üzerine çıkması durumunda yenisi ile değiştirilmesi gerekir. Aksi takdirde pantografin katenera ciddi zararlar vermesi söz konusu olabilir. Karbon şerit malzeme bakır seyir telinden daha yumuşak bir malzeme de olduğu için daha hızlı aşınır. Bu aşınma belirli sınırlara yaklaştığında karbon şeridin değiştirilmesi gerekir. Pantograf ile katener iletkeninin devamlı aynı noktadan temas sağlamaması karbon şeridin eşit olarak aşınması ve şerit üzerinde katenera veya pantografa zarar verebilecek çentiklerin oluşmaması için önemlidir. Şeridin eşit olarak aşınması için seyir teline ardışık iki katener direği arasında devamlı olarak sola ve sağa doğru Şekil 2.30'da gösterildiği gibi zikzak (zigzagging veya staggering olarak da adlandırılır) yaptırılır. Bu olaya **katener dezeksman ayarı** denir ve pantografin boşa çıkmaması için belirli sınırlar dahilinde yapılmalıdır (yaklaşık ± 20 cm). Şekil 2.31'de ise sonlu elemanlar methodu analiziyle elde edilmiş olan 350km/h yüksek hızlı trene ait pantografin seyir teline uyguladığı temas kuvvetinin [kg] etkisi ve seyir telinin uygulanan bu kevvete bağlı olarak yaptığı salınım santimetre cinsinden gösterilmiştir [V.A. Profillidis, 2006, sf.398] [2].



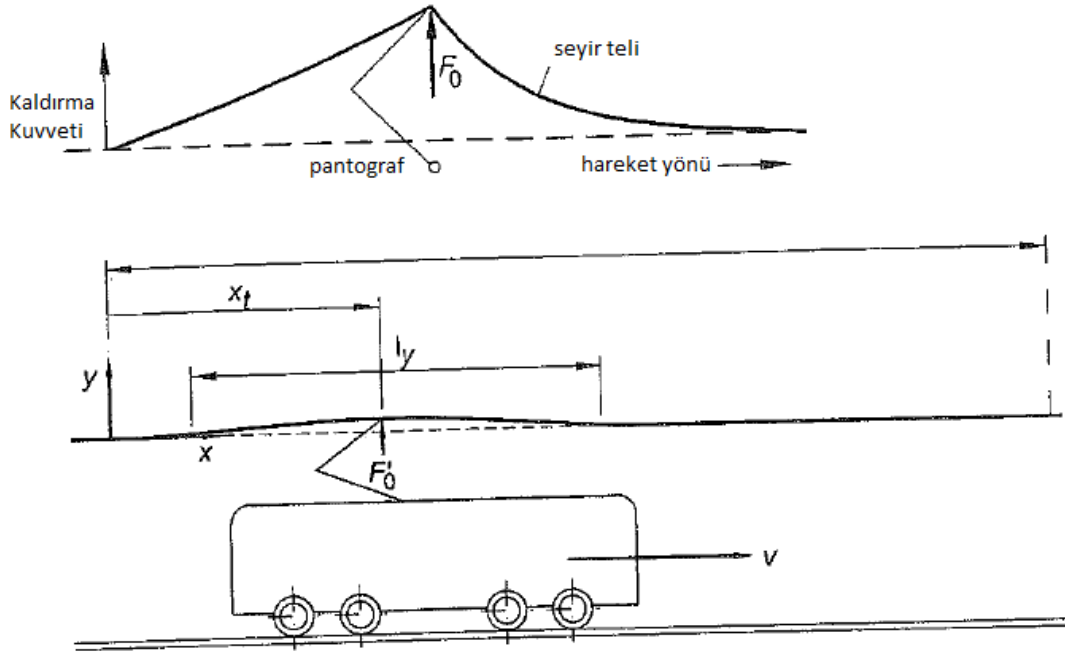
Şekil 2.30 : Seyir teli dezeksmanı.



Şekil 2.31 : Tipik havai katener sistemine ait FEA analizi sonucu [2].

Katener mühendisliğinde bir başka önemli konu ise gergi sistemleridir. Katener iletkenlerinin aşırı şekilde sarkması pantograf ve seyir teli arasında kötü bir temas

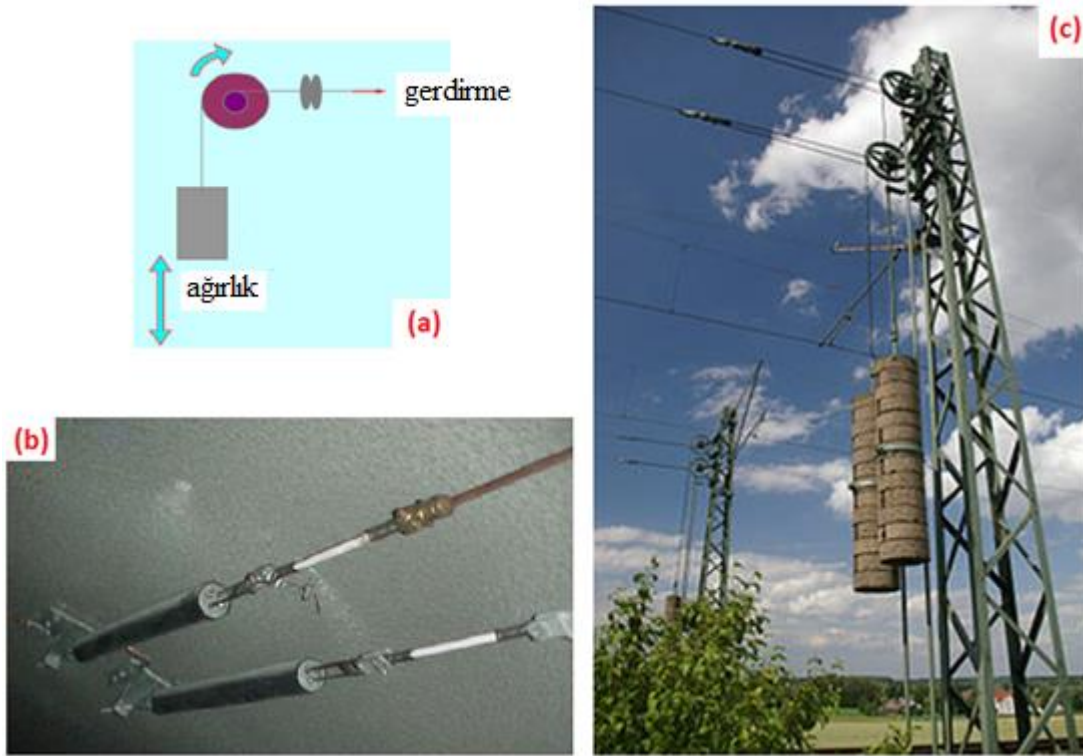
oluşturacağı için tüm katener sistemi mekanik bir gergi sistemi tarafından gergirilir. Gerek iletkenlerin kendi ağırlıkları dolayısıyla gerekse yıl boyunca oluşan sıcaklık değişimleri iletkenlerin sehim yapmasının başlıca nedenleridir. Bazı bölgelerde sıcaklık değişimleri dolayısıyla iletken boylarında yaşanan değişim 1450mm kadar olabilir. Ayrıca pantografin katener iletkenine temas etmesiyle iletken üzerinde Şekil 2.32'de görüldüğü gibi bir osilasyon oluşturduğu için katener belli bir şiddette mekanik kuvvet ile daima gerdirilmesi gerekir [1]. Çünkü oluşan osilasyon dalgasının hızı daima trenin hızından büyük olmalıdır. Aksi takdirde özellikle yüksek hızlı tren hatlarında oluşan osilasyon dalgası katenera veya pantografa zarar verebilecek kadar büyüktür [1].



Şekil 2.32 : Tren pantografinin seyir telinde oluşturduğu osilasyon [1].

Genel olarak sabit gergili veya otomatik gergili olmak iki tipte gergi sistemi vardır (Şekil 2.33). Tünel içlerinde sıcaklık değişimlerinin çok fazla olmaması sebebiyle ve düşük hız gerektiren yerlerde sabit gergili sistemler kullanılabilir. Sabit gergili sistemde yaklaşık olarak 800m lik etaplara ayrılan katener hattı, etapların bittiği her iki uçtan da tünel duvarı vb. gibi sabit yapılara sabitlenir. Bu tip sistemde yaklaşık 10kN (1000kg=1ton) luk bir gergi uygulanır. Otomatik gergili sistemler (Şekil 2.34) ise daha çok tren trafiğinin yoğun olduğu hatlarda ve yüksek hızlı tren hatlarında tercih edilir. Gergi için gerekli kuvvet ağırlıklar vasıtasıyla elde edilir. Uygulan gergi yaklaşık 10 ile 20kN arasındadır (yaklaşık 1 ile 2 ton arasında). Ağırlıklar etap

bölgenin başlangıç ve bitiş uçlarına katener direklerine asılır ve rüzgarlı havalarda sallanmaması için katener direğine asılı bir tüp içinden geçirilerek yalnızca yukarı ve aşağı yönlü hareketine izin verilir. Her iki tarafından ağırlık uygulanan otomatik gergili sistemde bir diğer önemli konu ise etabın tam orta noktasından sabitlenmesi gerekliliğidir. Aksi takdirde sıcaklık değişimlerinden dolayı uzayan katener hattı hat boyunca serbestçe hareket edebilir. Ayrıca katener hattının yalnızca tek bir tarafa uzamasını önlemek için taşıyıcı tel hoban takımına, seyir teli ise taşıyıcı tel üzerine sabitlenmelidir.



Şekil 2.33 : (a) Ağırlık sistemi, (b) Sabit gergili, (c) Otomatik gergili sistem.



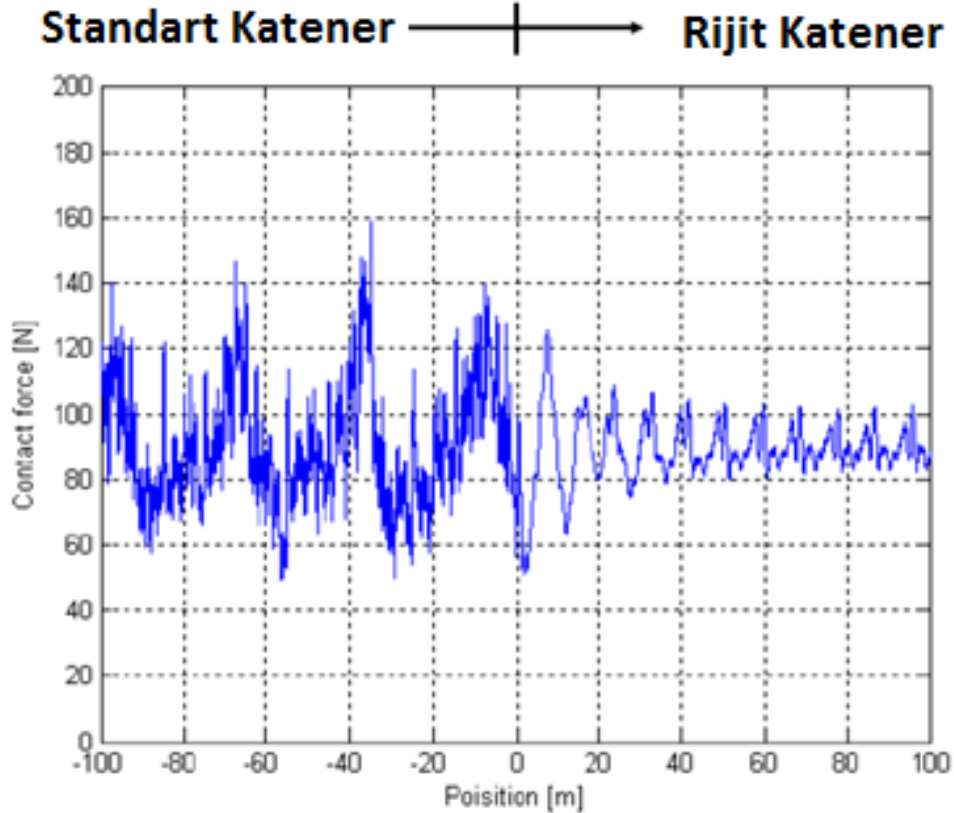
TEKNİK VERİLER	
Maksimum gerilme kuvveti	40 kN
Kuvvet kazancı redüksiyon oranı	1:3
Katener ve gergin kontak teli için hareket mesafesi	1.5m
Ağırlık	28 kg
Ortam sıcaklığı	-40..... +55 C

Şekil 2.34 : Otomatik gergi sistemi [9].

2.3.2 Rijit katener

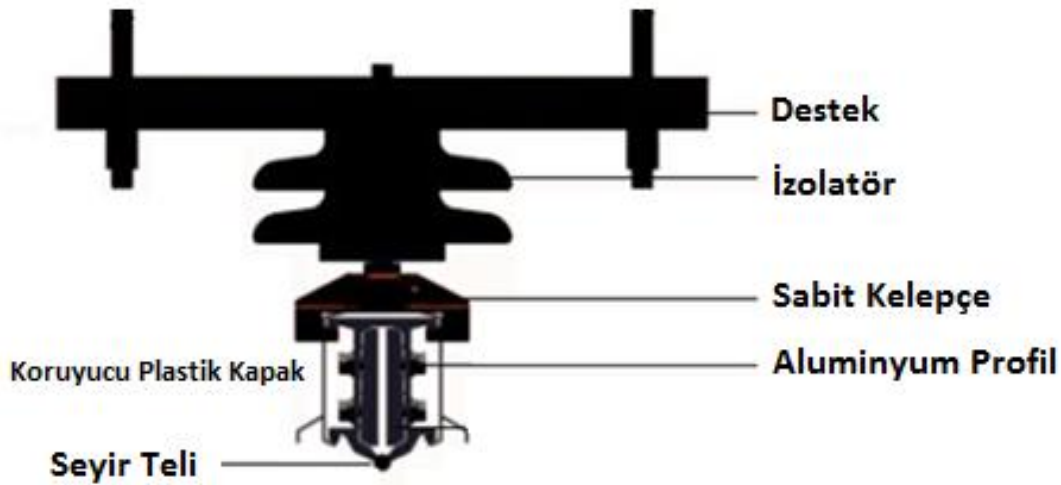
Rijit katener (Şekil 2.37), standart havai katener hattına ve 3.ray sistemine güzel bir alternatiftir Alüminyum bir profil ve seyir telinden oluşan sade ve basit bir tasarımıdır. Şekil 2.36'da tüm parçaları gösterilen rijit katener sisteminde seyir teli alüminyum profilin en alt ucunda sabitlenmiştir ve standart katener hattında olduğu gibi pantograf alttan seyir teline baskı uygular. Ayrıca Şekil 2.38 de farklı bağlantı tipleri gösterilmiştir. Sunduğu birçok avantajlardan dolayı rijit katener hattı günümüzde metro gibi tünelde ve hızın nispeten düşük olduğu uygulamalarda yoğun olarak kullanılır. Rijit katener hattının kullanıldığı 1500 V DC sistemler metro uygulamaları için sektör trendi haline gelmiştir. Rijit katener hattının 3.ray sistemi ve standart katener sistemine kıyasla sunduğu avantajlar şunlardır [1]:

- Şekil 2.35'de gösterildiği gibi çok daha iyi bir dinamik performansa sahiptir. Temas kuvveti standart katenera kıyasla daha küçük ve daha düzenlidir.
- Daha sağlam, daha güvenilirdir ve daha az bakım gerektirir. Bakım iş yükü neredeyse %50 oranında azalır.
- Montajı çok daha hızlı ve kolaydır.
- Standart katener hattına göre %15 daha ucuzdur.



Şekil 2.35 : Temas kuvveti bakımından rijit ve standart katener karşılaştırması.

- e) Tasarımının getirdiği avantajdan dolayı rijit katenerde aşınan ve eskiyen seyir teli yenisi ile değiştirilmeden önce %50 ye kadar aşınmasına izin verilebilir. Bu değer standart havai katener hattında yalnızca %20 dir.
- f) Daha az sayıda parça içerir.
- g) Standart katenerde olduğu gibi seyir teli kopması olasılığı yoktur
- h) Çok büyük kesitli alüminyum profil sebebiyle akım taşıma kapasitesi önemli ölçüde daha büyüktür
- i) Rijit katenerin yüksekliğinin çok daha kısa olması sebebiyle tünel kesitleri standart havai katener hattı kullanıldığı duruma göre önemli ölçüde azalır. Dolayısıyla çok ciddi oranda maliyet avantajı sunar.
- j) Gergi sistemlerine ihtiyaç yoktur
- k) Hiçbir şekilde bükme işlemine gerek kalmadan 120m ve daha büyük yarıçaplardaki kurlara montaj yapılabilir



Şekil 2.36 : Rijit katener parçaları.

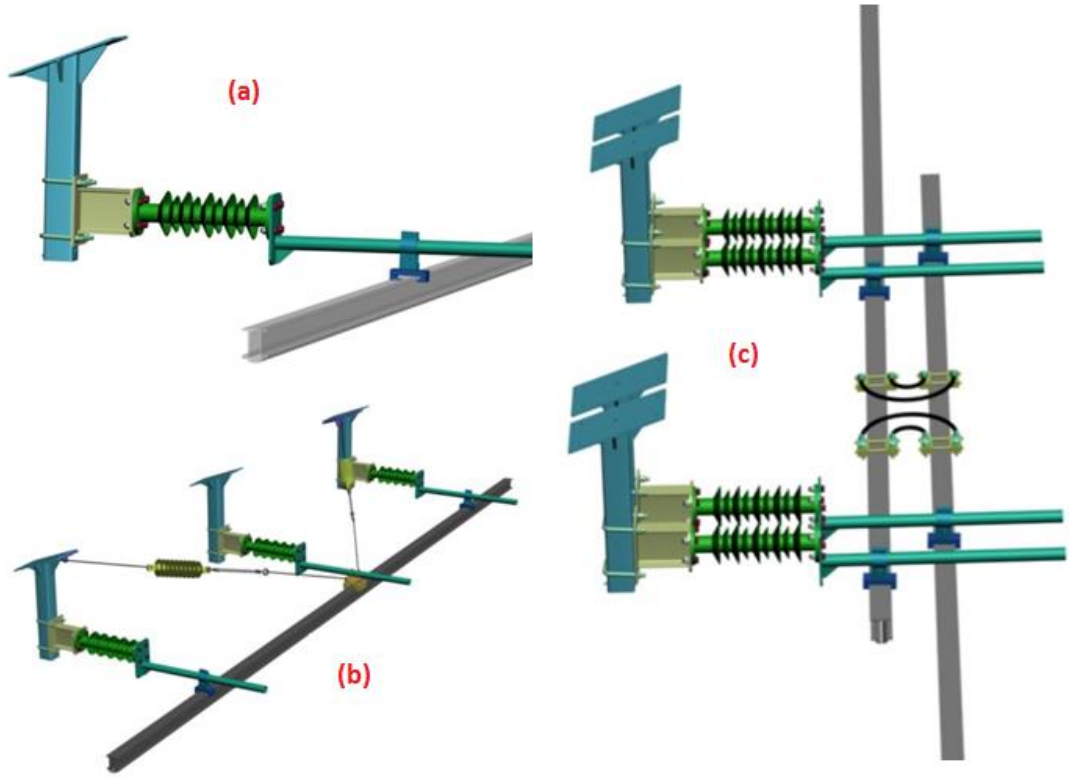
Rijit katener hattının standart katenere göre birçok avantajı olmasına rağmen yüksek hız gerektiren hatlarda (>120km/h) ve açık hatlarda pratik olarak uygulaması mümkün olmaması dezavantajları olarak sayılabilir. Buna rağmen sunduğu birçok avantajdan dolayı rijit katener hafif metro (LRT) ve metro uygulamaları için, hem 25kV AC hemde 750 V ve 1500 V DC gerilim değerleri için, sıklıkla tercih edilmektedir. Banliyo ve yüksek hızlı tren hatları içinse standart katener ve 25kV AC gerilim eskiden olduğu gibi kullanılmaya devam etmektedir.



Technical Specifications:

Profil Kesiti	2.220 mm ²
Profil Yüksekliği	110 mm
Profil Uzunluğu	12m
Profil Ağırlığı	6,1 Kg/m
Atalet Momenti I _{xx}	338 x 10 ⁴ mm ⁴
Alalet Momenti I _{yy}	113,7 x 10 ⁴ mm ⁴
Bakır Kesit Eşdeğeri	1.400 mm ²
Lineer Uzama Katsayısı	24 x 10 ⁻⁶
Elastiklik	69.000 N/mm ²

Şekil 2.37 : Alüminyum profil ve bakır seyir teli karakteristikleri.

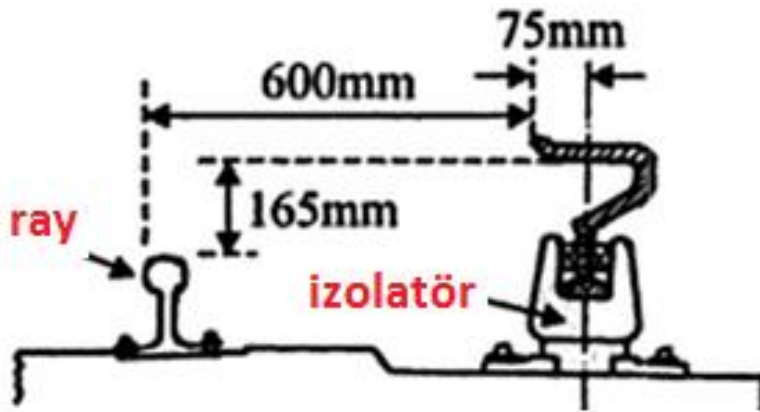


Şekil 2.38 : (a) Normal askı (b) Etap ortası bağlantı (c) Etap sonları.

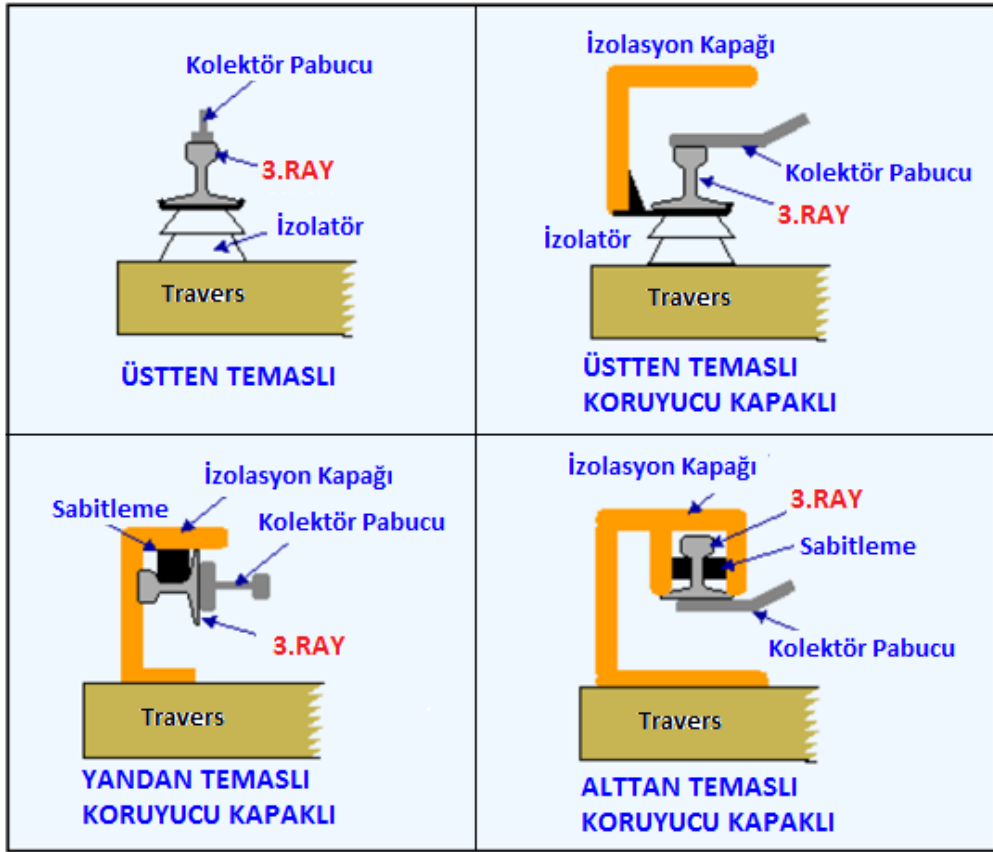
2.3.3 Üçüncü ray sistemi

Üçüncü ray sistemi sadece metro ve banliyö hatları gibi düşük ve orta hızlı (maks 160km/h) hatlarda, tünel kesitinin küçük olmak zorunda olduğu yerlerde ve kullanılmadığı takdirde çok büyük kesitli iletkenlerin gerekebileceği ağır trafiğin olduğu hatlarda tercih edilir. Şekil 2.39'da gösterildiği gibi akımın taşındığı üçüncü

ray, taşıyıcı raylara paralel olacak şekilde yaklaşık 20cm daha yukarıda konumlandırılır. Hemzemin geçiş ve makas bölge geçişleri gibi bölgelerde kesintiye uğradığı için yarı-sürekli iletken sistemidir. Bu tarz kesintili bölgelerde geçişler izolasyonlu kablo (jumper) veya bazı durumlarda enerjisiz olarak yapılır. Şekil 2.40'da gösterildiği gibi plastik koruyucu kapaksız ve üstten temaslı, koruyucu plastik kapaklı üstten temaslı, yandan temaslı ve alttan temaslı olmak üzere üçüncü ray sisteminin dünyada kullanılan 4 farklı tipi vardır. Bu 4 sistem arasında elektrik çarpması riskinin en az olduğu tip plastik kapak koruyuculu ve alttan temaslı üçüncü ray sistemidir. Üçüncü ray taşıyıcı raylar ile aynı seviyede olduğundan dolayı herhangi bir platform kazasında raylara düşen yolcuya elektrik çarpması riski bulunduğu için genellikle üçüncü ray bir koruyucu plastik kapak ile kapatılmıştır. Ayrıca üçüncü ray sistemi genellikle platform altına gizlenir veya platforma uzak olan taşıyıcı rayın yanına yerleştirilir. Dünya da bazı ülkelerde açık hatlarda da üçüncü ray sistemi kullanılmıştır. Bunlar genellikle oldukça eski sistemlerdir. Bu tarz hatlarda hemzemin geçitlerde üçüncü raya özel önem vermek gerekir ve ekstra güvenlik önlemleri alınmalıdır. Aksi halde istenmeyen elektrik kazaların oluşma riski oldukça yüksektir [1].



Şekil 2.39 : Taşıyıcı ray kotu seviyesine yerleştirilen 3. ray.

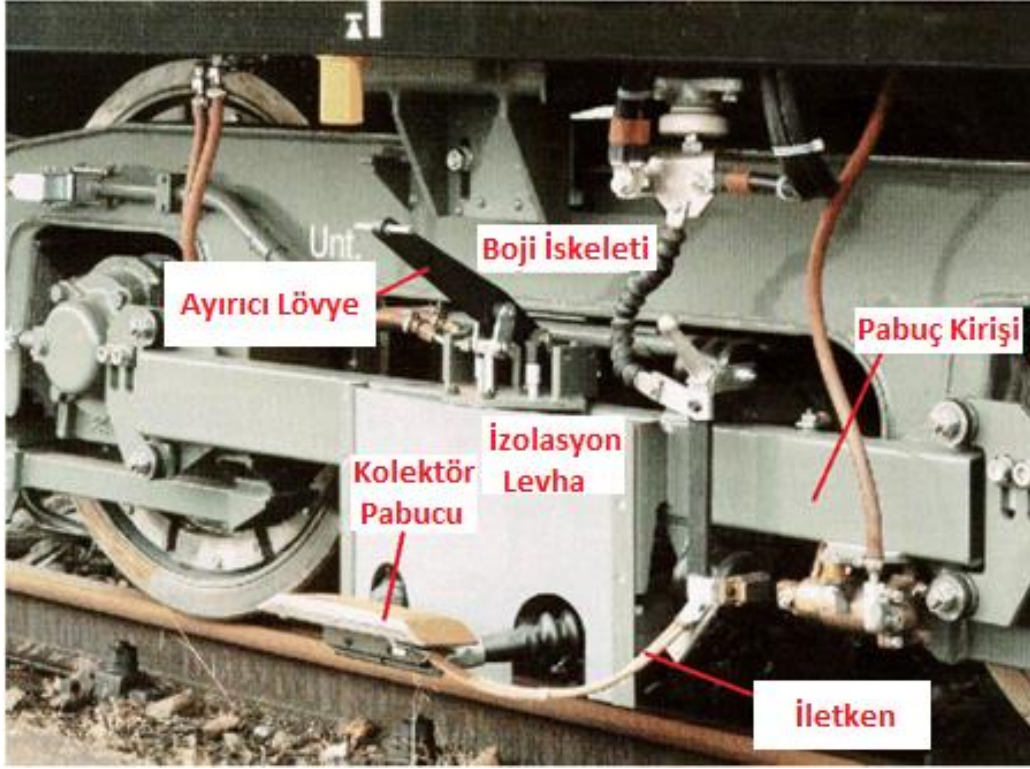


Şekil 2.40 : Üçüncü ray sisteminin tipleri.

Tren ihtiyaç duyduğu elektrik gücünü üçüncü raylardan tren bojisine yerleştirilmiş olan kolektör pabucu vasıtasıyla alır. Eskiden kullanılan sistemler genellikle üstten temaslıdır fakat günümüzde yandan ve alttan temaslı sistemler güvenlik açısından daha iyi bir performans sergilediği için daha fazla olduğu tercih edilir. Şekil 2.41 (a)'da üstten temaslı üçüncü ray sistemi Şekil 2.41 (b)'de ise üçüncü ray alttan temas eden kolektör pabucu gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.42'de üçüncü ray sisteminin tren üstü ekipmanları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.41 : (a) Üstten temaslı. (b) Alttan temaslı.



Şekil 2.42 : Altan temaslı sisteme ait trenüstü ekipmanlar.

Düşük karbonlu çelik üçüncü ray sistemler yaklaşık 1950 yılına yaygın olarak kullanıldı. Bunu daha sonralarda demir üçüncü ray iletkenler takip etti. Günümüzde ise alüminyum-çelik karışımı kompozit üçüncü ray sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.10'da düşük karbonlu çelik ve alüminyum-çelik karışımı kompozit üçüncü ray sistemlerine ait teknik bilgiler gösterilmiştir [1].

Çizelge 2.10 : Üçüncü ray iletkeninin karakteristikleri.

Malzeme	Kesit [mm ²]	Ağırlık [kg/m]	Direnç [Ohm/km]
Az Karbonlu Çelik	5100	40	0.0225
	7600	60	0.0154
	9200	75	0.0128
Alüminyum Kompozit	2100	6.4	0.0148
	5100	15.7	0.0069

Üçüncü ray sisteminin geçmişte yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebepleri arasında ucuz olması, daha sağlam ve dayanıklı olması, daha az arıza vermesi, kurulumunun çok daha basit olması gibi nedenler sayılabilir. Ayrıca DC sistemlerde taşınan akımların çok yüksek olması (yaklaşık 2500A/tren) sebebiyle standart

katener sistemlerinde DC gerilim tercih edildiği takdirde iletken kesitleri çok yüksek olacağından kurulumunu neredeyse imkânsız olacaktır. Londra, Paris ve Moskova gibi şehirlerde eskiden yapılan metro hatlarında üçüncü ray sisteminin tercih edilmesinin bir başka nedeni ise 3.rayın standart katenerlere göre oldukça az yer kaplaması ve bunun sonucu olarak tünel kesitinin ciddi oranda küçülmesidir. Örnek olarak 3.ray sistemi kullanılan eski metro hatlarında tünel kesiti çapı yaklaşık 3.50-4 metre arasında olurken, rijit katener hattının kullanıldığı pantografli sistemlerde bu uzunluk yaklaşık 5.70-6 metre arasında olmaktadır. Dolayısıyla tünel açma teknolojisinin daha az gelişmiş olduğu yıllarda yapılan tüm yeraltı metro sistemlerinde üçüncü ray sistemleri tercih edilmiştir. Üçüncü ray sisteminin sayılan avantajlarına rağmen elektrik çarpması riski ciddi bir problem oluşturmaktadır. Bu riski minimuma indirmek için platform güvenlik kapıları (platform screen door, PSD) kurulumu yapılabilir. Genellikle raylı sistem operatörleri PSD kapılarını daha çok istasyon iklimlendirmesini kolaylaştırdığı ve ısıtma/soğutma enerji giderlerini oldukça azalttığı için tercih etmektedir. Bu yüzden daha çok tropikal veya çöl iklimin görüldüğü ülkelerde PSD kapıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.43'de kullanılan iki farklı tipteki PSD kapıları gösterilmiştir [10].



Şekil 2.43 : PSD kapıları (a)Tam (b)Yarım [11].

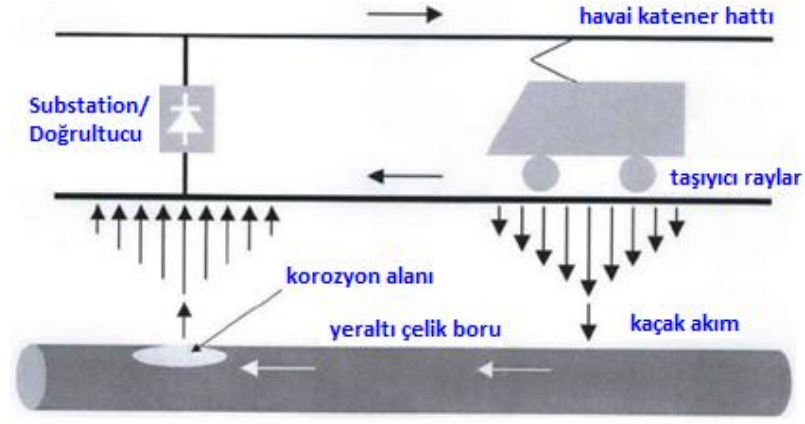
Üçüncü ray sisteminin diğer bir dezavantajı ise kurbalarda (karayollarında viraj de denilir), makas geçişlerinde ve hemzemin geçişlerde kurulumdaki zorluklardır. Trenin tamamen enerjisiz kalmaması için bu tarz geçiş yerlerinde kolektör pabuçlarından en az birinin daima üçüncü ray ile temas halinde kalması gerekir. Üçüncü ray sistemi tasarım aşamasında bu konuya özel önem verilmelidir. Üçüncü ray sistemleri ayrıca AC gerilim ile kullanılmaz ve maksimum 1500 V DC ile sınırlıdır. Ayrıca yalnızca düşük ve orta hızlı (maksimum 160km/h) uygulamalarda kullanılabilir.

2.3.4 Geri dönüş akımları

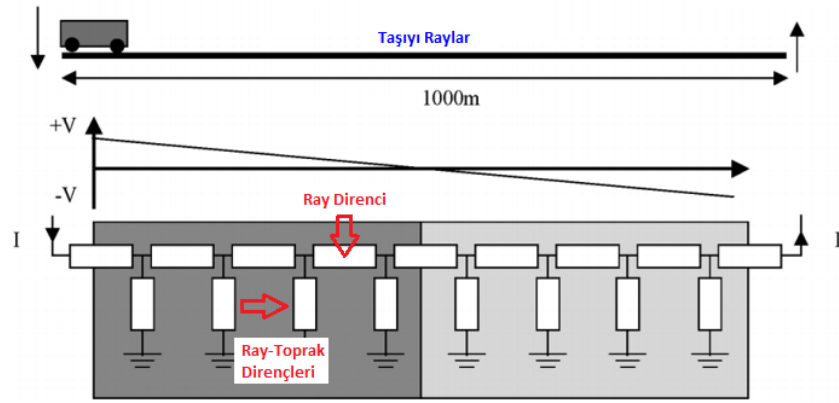
Geri dönüş akımları demiryolu elektrikli cer gücü sistemlerinde ayrı bir öneme sahiptir. Özellikle DC sistemlerde negatif geri dönüş akım sistemi tasarımı ve mühendisliği iyi olarak yapılmamış ise kaçak akımlar gibi ciddi problemlere sebep olacaktır. Kaçak akımlar yer altında bulunan metalik su tesisat boruları, doğalgaz boruları ve bina temelleri gibi farklı sistemler üzerinde korozyon gibi ciddi etkilere sahip olduğundan önemlidir ve gerekli tedbirlerin alınması zorunludur. Bunun haricinde kaçak akımlar taşıyıcı raylar üzerinde potansiyel gerilime neden olur. Bu gerilim seviyesi DC sistemlerde belirli değerleri aştığı takdirde kaçak akım rölesi DC kesiciye açma komutu verir. Aksi takdirde kaçak akımlardan kaynaklanan ray toprak arası potansiyel gerilim yükselmesi insan hayatını riske atacak değerlere ulaşması mümkündür. Geri dönüş akımları ayrıca sinyalizasyon ve haberleşme sistemlerine ait kablolarda gürültüyü neden olarak bu sistemlerin doğru ve güvenli çalışmasını da engelleyebilir [7].

DC cer gücü sistemlerini tasarlarken doğru ve güvenli bir sistem için dikkat edilmesi gereken en önemli nokta cer akımları için olabildiğince düşük dirençli bir geri dönüş yolunun sağlanmasıdır. Trenlerin üzerinde hareket ettiği çelik taşıyıcı raylar bu amaç için kullanılır. Taşıyıcı rayların geri dönüş akımlarına yol olarak kullanılması esasen çok iyi bir mühendislik tasarımıdır ve gerekli tedbirler alındığı takdirde de gayet başarılı şekilde çalışır. Yalnız bu sistemin güvenli bir şekilde çalışması için taşıyıcı raylar topraktan tamamiyle izole edilmelidir. (DC sistem için geçerlidir) Taşıyıcı rayları topraktan tamamiyle izole etmek ise mümkün değildir. Genel olarak taşıyıcı raylar $40-80\text{m}\Omega/\text{km}$ ya da $40-80\mu\Omega/\text{m}$ dirence sahiptir ve ray-toprak arası geçiş direnci $2-100\ \Omega/\text{km}$ arasında olup izolasyon kaybıdır [7]. Bunun sonucu olarak cer akımlarının bir kısmı raylardan toprağa akacaktır ve ray-toprak arası gerilim yükselecektir. Şekil 2.44 ve 2.45'de gösterildiği gibi bu kaçak akımlar yer altında bulunan metalik aksamlar üzerinden yoluna devam edip, DC cer trafo merkezinde bulunan doğrultucu negatif barası yakınlarında, metalik aksamlardan ayrılarak sırasıyla toprak ve raylar üzerinden tekrar doğrultucu negatif barasına dönüş yapacaktır. Metalik aksamlar üzerinden ayrıldığı noktalarda ise korozyon ve demir kaybına neden olacaktır. Genelde korozyonun yaşandığı bölgeler cer trafo merkezi yakınlarındaki metalik aksam olan yerlerdir [7]. Korozyon akımları metalin anot ve katot arasındaki elektriksel potansiyel farkın sonucu olarak meydana gelir. Toprak,

beton ve su gibi elektrolit malzemeler metaller ile temas içinde olduğu zaman, anodik akımlar sebebiyle zamanla korozyon ve demir kaybı muhtemeldir. Korozyona uğramış bir ray üzerinden meydana gelen demir kaybı Şekil 2.46’da gösterilmiştir.



Şekil 2.44 : Kaçık akımların izlediği yol.



Şekil 2.45 : Ray-toprak dirençleri şematik gösterimi [2].



Şekil 2.46 : Korozyona uğramış raydaki demir kaybı.

Kaçak akımların ve korozyon etkilerinin azaltılması üzerine yapılan çalışmalar oldukça eski olup neredeyse DC cer gücü sistemlerinin kullanılmaya başlandığı ilk günden beri devam etmektedir. DC sistemlerde genel olarak şu önleyici tedbirlerin alınması önerilmiştir [7]:

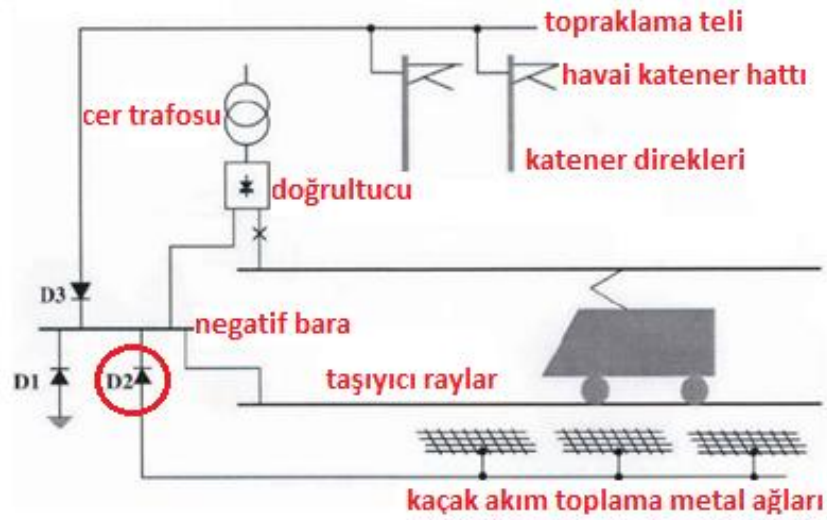
- 1) Taşıyıcı raylar arasında yeterli paralelleme yapılması gerekmektedir.
- 2) Hat üzerinde bulunan cer trafo merkezleri (substaion) arası mümkün olduğunca kısa tutulmalı.
- 3) Taşıyıcı raylar ve toprak arası izolasyon mümkün olduğunca iyi olmalıdır.
- 4) Taşıyıcı rayların nötr olduğu, üçüncü rayın pozitif dördüncü rayın ise negatif olarak kullanıldığı sistemler tercih edilmeli.

Yukarıda sıralanan önleyici tedbirler arasında ilk üçü geniş ölçüde uygulansa da sonuncu önlem ekstra rayın oluşturduğu masraf nedeniyle çok tercih edilmemiştir. Ray toprak arası izolasyonu artırmanın bir diğer yoluysa izolasyon ray bağlantı elemanları kullanmaktır. Şekil 2.47’de gösterildiği gibi ray altı elastik pad kullanılmış bağlantı elemanlarının kullanıldığı sistemlerde izolasyon daha iyi sağlanmış olur ve ayrıca bu elastik padler tekerlek titreşimlerini de azaltarak yolculuk konforunu da artırır [11].

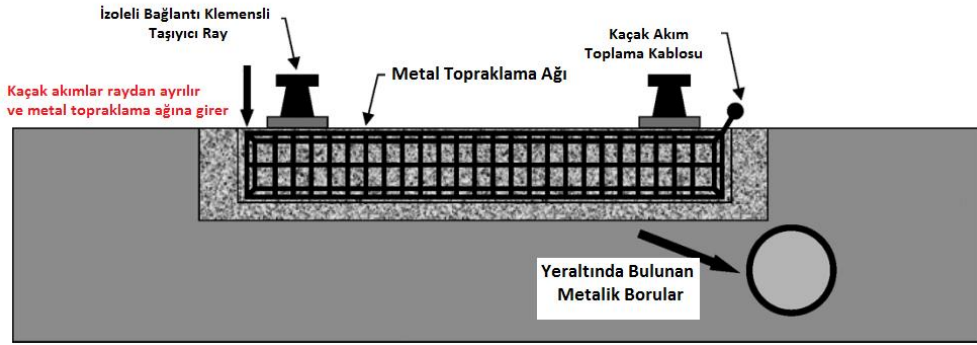


Şekil 2.47 : İzolasyonlu (elastik ray pedi) ray bağlantı klemensleri [12].

Kaçak akımların ciddi sorun teşkil ettiği hatlarda tasarımı daha da iyileştirmek için diyot-topraklı DC sistem tercih edilebilir. Bu sistemdeki amaç mümkün olduğunca çok kaçan akımı taşıyıcı ray altına yerleştirilen metal topraklama ağlarıyla toplayıp geri dönüş iletkeni ve buna bağlı bir diyot üzerinden doğrultucu negatif barasına bağlamaktır. Bu sistem Şekil 2.48 ve Şekil 2.49’da gösterilmiştir.

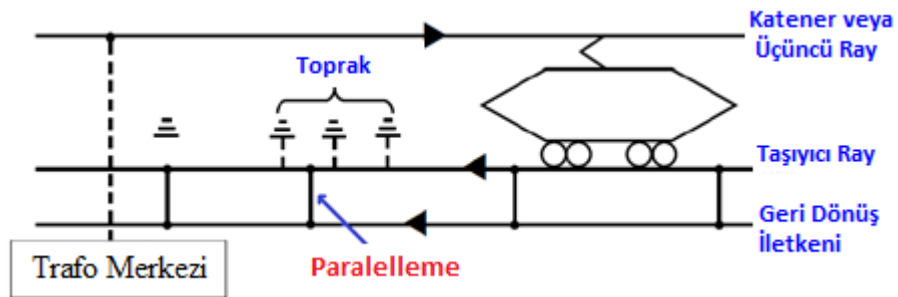


Şekil 2.48 : Diyot üzerinden topraklı sistem [7].

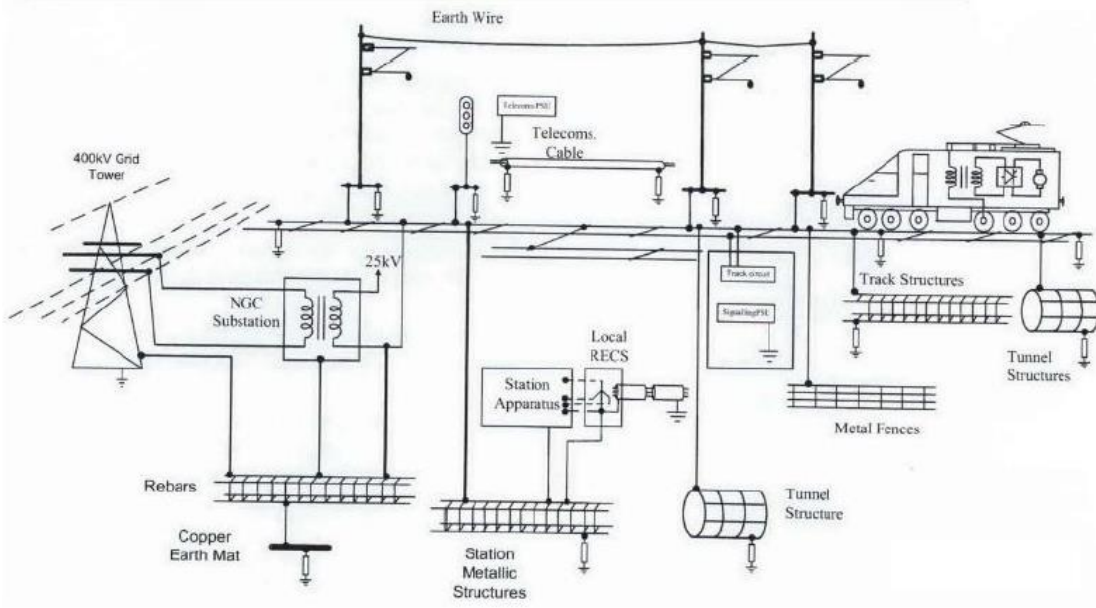


Şekil 2.49 : Metal topraklama ağının uygulaması [7].

AC sistemlerde kaçak akımlar ciddi problemler teşkil etmesede, geri dönüş akımını daha iyi toplamak için taşıyıcı raylar arasında belirli aralıklarda sık sık paralelleme yapılabilir (Şekil 2.50), taşıyıcı raylar arası bağlantılar iyi yapılmalı (uzun kaynaklı raylar tercih edilmeli) veya daha öncede bahsedilen 1:1 dönüştürme oranına sahip trafoların kullanıldığı BT tipli AC sistem tercih edilebilir. Topraklama bağlantıları (Şekil 2.51 iyi yapılmalıdır.



Şekil 2.50 : Dönüş iletkeni ve taşıyıcı ray arası bağlantı [7].



Şekil 2.51 : AC sistemde topraklama bağlantıları [7].

J.Barlo, 1995 [7] 'e göre kaçak akımları azaltma yöntemleri genel olarak 2 yöntem üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlar “ray-toprak arası direnci artıracak yöntemler” ve “negatif geri dönüş yolunun direncini azaltacak yöntemler” olarak ayrılabilir [7].

Ray geri dönüş yolunun direncini düşürmek için:

- a. Taşıyıcı rayların ebatı büyütülebilir.
- b. Cer trafo merkezleri arası mesafeler kısa tutulabilir.
- c. Uzun kaynaklı raylar tercih edilebilir ve raylar arası paralellemler yapılabilir.

Ray-toprak arası geçişin direncini artırmak için ise:

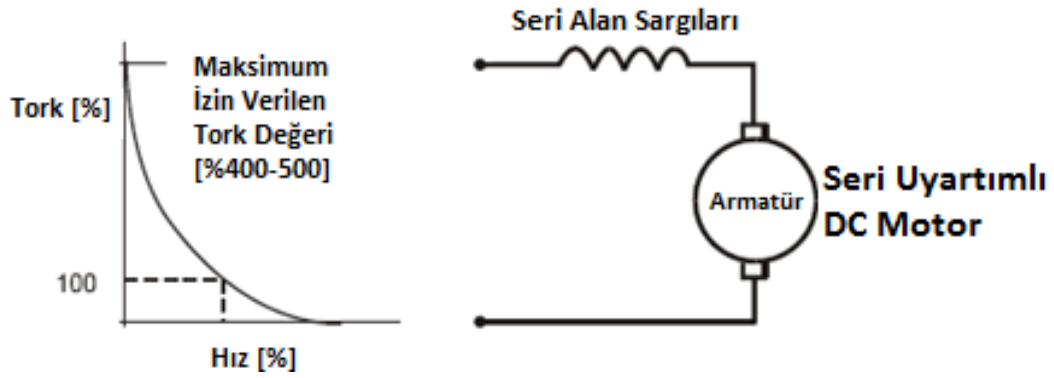
- a. Ray-toprak arası mesafe mümkün olduğunca artırılabilir (balast serimi vb).
- b. Diyot-topraklı sistem tercih edilebilir.
- c. Bakım atölye bölgesinde ray direk topraklı olduğu için normal hattan izole edilmeli.

2.4 Cer Motorları ve Sürücü Devreleri

Seri uyarımlı DC motorların yüksek kalkış momentine sahip olması, tork-hız karakteristiklerinin raylı sistem uygulamaları için uygun olması ve gerilim veya uyarma akımının değiştirilmesiyle hız kontrolünün kolayca yapılabilmesi sebebiyle

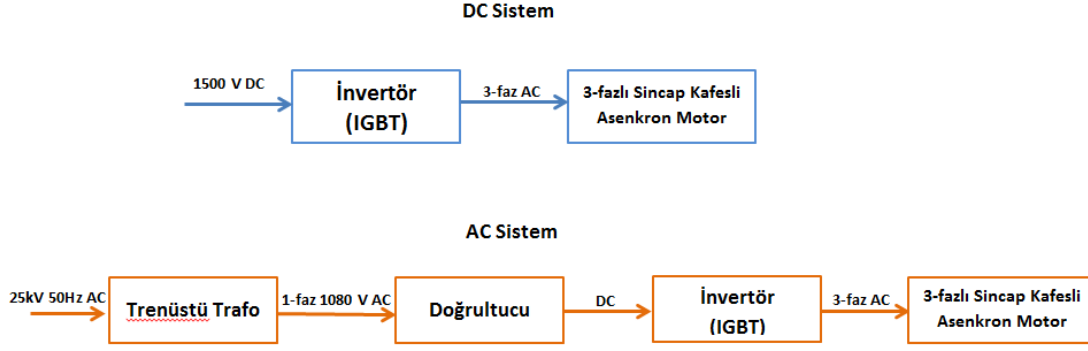
günümüzden yaklaşık 20 yıl öncesine kadar raylı sistemlerde standart cer motoru olarak uzun yıllar kullanıldı [2].

Seri DC motorlar düşük dirençli bir endüvi devresine sahip olduğundan gerilim uygulandığında akımlar çok yüksek olur. Yüksek akımlar motorda çok güçlü bir manyetik alan oluşturur ve bu manyetik alan yüksek armatür akımı ile birlikte yüksek bir kalkış momentini oluşturur. Şekil 2.52’de DC seri motora ait bir tork-hız grafiği gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi motorun kalkış anındaki torku nominal değerinin yaklaşık 4-5 katı kadardır.



Şekil 2.52 : Seri DC motorun tork-hız grafiği.

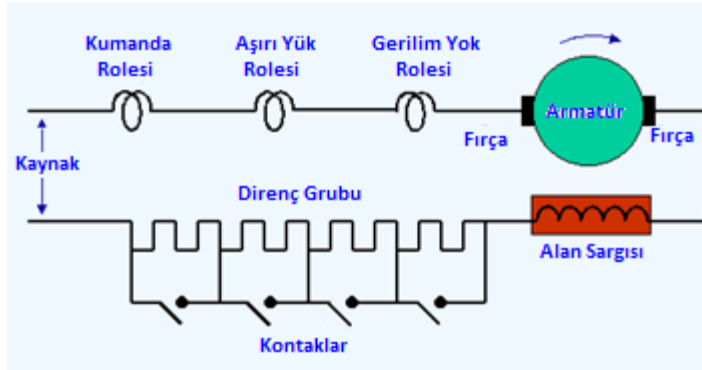
Bu avantajlarından dolayı seri uyartımlı DC motorlar uzun yıllar kullanılsa da fırça ve kolektörlere sahip olmasından dolayı bakımının zor olması ve aynı güçteki asenkron cer motoruna oranla yaklaşık %30 daha ağır ve büyük olması gibi dezavantajlarından dolayı günümüzde yerini 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoruna bırakmıştır. DC motorların fırçalara sahip olması sebebiyle önleyici bakım ve kontrolleri çok daha sık yapılır [2]. DC motorlara yaklaşık olarak her 10.000 km de bir kontrol, temizlik, yağlama ve izolasyon direnci kontrolü yapılırken her 120.000 km de bir ise DC motor tren bojsi üzerinden sökülerek ağır bakım yapılır. Bunun yanında sincap kafesli asenkron cer motoruna 6 ayda bir yapılan görsel kontrol haricinde yalnızca her 400.000 km (yaklaşık 3 yıl) de bir ağır bakım yapılır [2]. AC motorların hız kontrolü günümüzden gelişmiş güç elektroniği teknolojisi sayesinde oldukça kolaylaşmıştır. Bugünkü modern cer sürücülerinde trend ister 25kV AC 50/60Hz gerilim, ister 750 veya 1500V DC gerilim olsun her ikisi içinde 3-fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru kullanılmaktadır [1]. Şekil 2.53’de hem AC hemde DC sistemler için motor beslemesinin nasıl yapıldığı gösterilmiştir.



Şekil 2.53 : DC ve AC sistemler şematik diyagramı.

2.4.1 DC motor sürücü devreleri

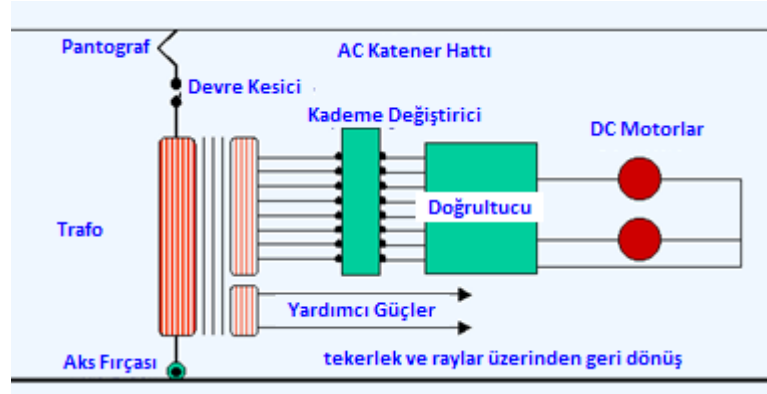
Şekil 2.54’de gösterilen direnç kontrollü DC cer motoru sürme devresi en eski ve en basit kontrol yöntemidir. Günümüzde halen kullanılmakta olan nostaljik tramvaylarda bu sistemi görmek mümkündür. Bu sistemin ana mantığı trenin hızlanması sırasında dirençleri sırasıyla devreden çıkartarak motorun gerilimini kademeli olarak yükseltmek ve hız kontrolünü sağlamaktır. Tüm dirençler devreden çıkarıldığında full hat gerilimi trene uygulanmış olur ve motor nominal hızında döner. Bu eski yöntemde dirençlerin hepsi devreden çıkarılana dek enerji kayıpları yaşandığı için verimsiz bir yöntemdir.



Şekil 2.54 : Geleneksel direnç kontrollü DC motor kontrolü.

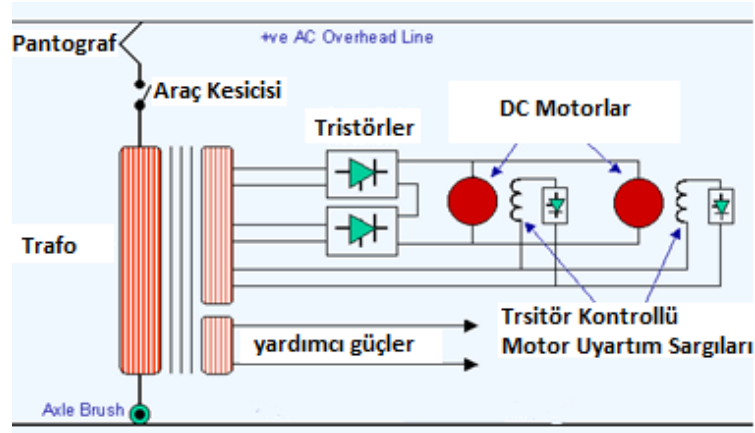
25kV AC gerilimin DC motor taşıyan trenleri beslediği hatlarda kullanılan iki değişik tip sistem vardır. Şekil 2.55’de gösterilen birinci sistem; yük altında kademe değişimi yapabilen trafo (on-load tap changer type transformer) yardımıyla trafonun sekonderinde gerilim regülasyonu yapılarak ve bu değişken AC gerilimin bir diyot doğrultucu ünitesinden geçirmesiyle DC gerilim elde edilmesi ve DC motorda gerilim kontrolünün sağlandığı sistemdir. Bu sistem uzun yıllar 25kV AC hatlarda DC motor taşıyan trenleri beslemek için kullanılmıştır. Oldukça ağır ve fazla yer

kaplayan trafoların kullanılmasını gerektirir ve trafo kademe değişmelerinde DC gerilim çok değiştiğinden yolcu konforunu etkileyecek kadar sarsıntılar meydana gelir [1].



Şekil 2.55 : Kademe ayarlı trafo kontrollü DC motor beslemesi.

25kV AC hatlarda kullanılan diğer bir tip DC motor beslemesi ise tristör kontrollü DC motor sürücü devreleridir. Bu sistem DC motor kullanımı raylı sistemlerde bırakılmadan önce kullanılan son sistemdir. Tristör tetikleme açılarının değiştirilmesiyle yapılan bir DC voltaj kontrolüdür. Daha yüksek gerilim seviyelerinde çalışmak ve güç faktörünü artırmak için genellikle birbirine seri bağlı iki tane tristör ünitesi kullanılır Şekil 2.56'da gösterildiği gibi. Bu sistemin en büyük avantajı daha basit olması ve anahtarlama hızının çok daha yüksek olması ve dolayısıyla daha yüksek bir konfor sunmasıdır. Şekil 2.57'de diyot ve tristörün kullanıldığı tam dalga doğrultucunun karşılaştırması gösterilmiştir. Diyotun aksine tristörün tetikleme açısının değiştirilmesiyle çok daha hassas DC gerilim kontrolü yapılabilir [1].



Şekil 2.56 : Tristör kontrollü DC motor sürücüsü.



Şekil 2.57 : Diyot veya tristör kontrollü tam köprü doğrultucu ve DC çıkış.

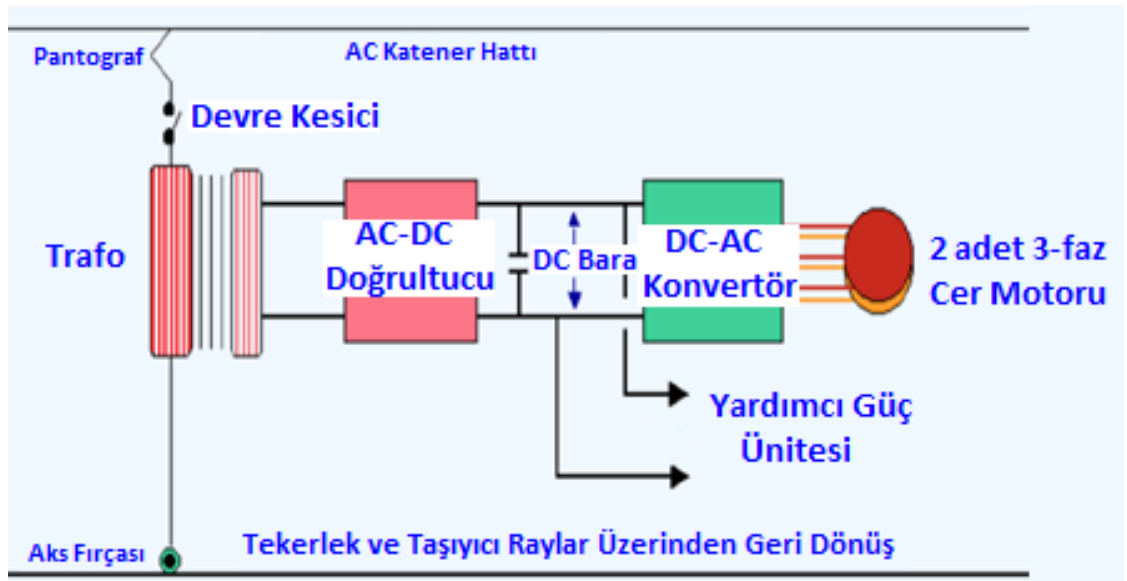
2.4.2 AC motor sürücü devreleri

AC motor ve IGBT kontrollü motor sürücü devreleri daha önceden de bahsedildiği gibi ister DC sistem ister AC sistem olsun raylı sistemlerde trend olmuş ve neredeyse tüm sistemlerde 3 fazlı sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır [1]. Sadece bazı saatteki hızı 380km/h ulaşabilen çok yüksek hızlı trenler (Fransız Alstom AGV treni) gibi çok özel uygulamalarda sincap kafesli asenkron motor yerine sunduğu ekstra avantajlar sebebiyle rotoru sabit mıknatıslı senkron motor (permanent magnet motor) cer motoru olarak kullanılmıştır [1]. Bu tarz istisnai durumlar haricinde 3 fazlı sincap kafesli asenkron motor günümüzde standart cer motorudur [1]. Modern güç elektroniği elemanları sayesinde güç faktörünün 1 e oldukça yakın olması ise verimliliği artırması açısından ayrıca önemlidir. Ayrıca aynı seyir teli kesiti kullanılmasına rağmen hattın güç taşıma kapasitesi de ciddi oranda artırılmış olur.

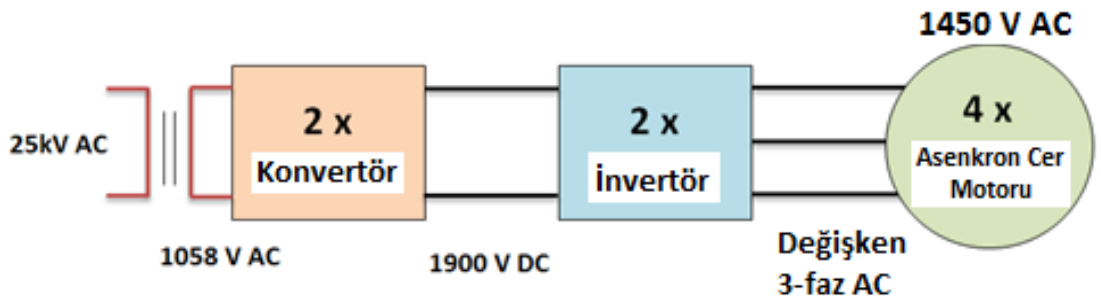
Doğrultucu çıkış gerilimindeki dalgalanmalardan kaynaklı harmonikler yüksek verimli IGBT invertörler yardımıyla minimize edilir ve dolayısıyla trenin enerji tüketimi daha da azaltılmış olur. AC sürücü sistemlerinin avantajları yalnızca raylı sistem işletmecisi firmalar için değil ayrıca yolcular içinde vardır. Çünkü AC sürücü sistemleri ciddi oranda yolculuk konforunu artırır. Sürücü devrelerinden kaynaklı çok daha az gürültü ve çok daha az titreşim vardır [1].

Modern AC motor sürücü sistemlerinde motor beslemesi birkaç farklı basamaktan oluşur. İlk olarak 25kV AC katener gerilimi tren çatısında bulunan pantograf ve yüksek hızlı kesici (High Speed Circuit Breaker, HSCB) üzerinden alınır. Bu gerilim değeri motor beslemesi için çok yüksek olması sebebiyle ilk olarak 25kV AC araçüstü trafo yardımıyla daha küçük bir değere düşürülür (genellikle 1000 V AC seviyelerine). Elde edilen bu düşük AC gerilim daha sonra doğrultulur (Şekil 2.60)

ve daha düzgün bir DC gerilim elde etmek için filtre edilir. Bu filtreden geçirilmiş DC gerilim ise daha sonra IGBT invertör ünitesinden geçirilerek sonunda sinüsoide oldukça yakın 3 fazlı AC gerilim elde edilir (Şekil 2.61) ve motorlar bu gerilim ile direk olarak beslenir. Bu durum Şekil 2.58 ve 2.59’da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.62 de modern bir AC lokomotif gösterilmiş ve Şekil 2.63 de ise buna ait detaylı besleme planı verilmiştir. Genel olarak raylı sistem araçlarında 1 adet IGBT invertör modülü toplamda 2 adet asenkron motoru besler. Metro araçlarında tren altına yerleştirilen IGBT kutuları, tramvay gibi alçak tabanlı araçlarda tren çatısına da yerleştirilebilmektedir [2].



Şekil 2.58 : AC cer sürücü sistemi şematik diyagramı.



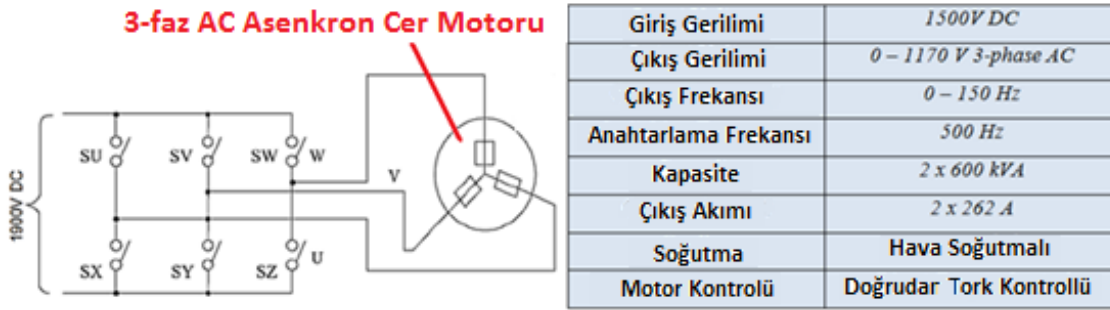
Şekil 2.59 : Konvertör-invertör devresi ile AC motor beslemesi.

Tüm bu AC motor sürücü devreleri aynı zamanda frenleme enerjisinin geri kazanımı için ters modda da çalışabilecek şekildedir.

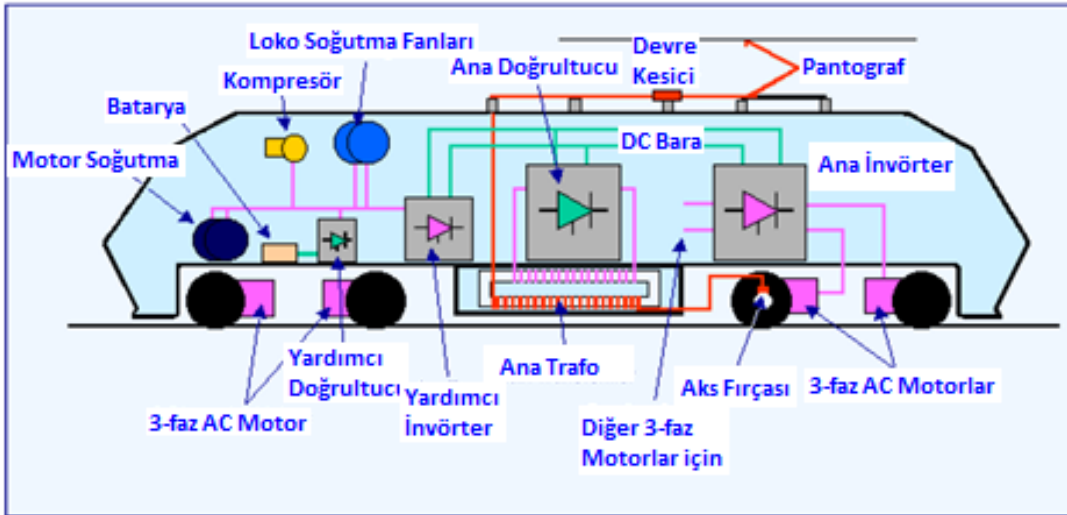


Tipi	CM-C 1500 W
DC Bara Gerilimi	1900 V DC'ye kadar
Anahtarlama Frekansı	450 Hz
Stator Frekansı	0-300 Hz
Sürekli Çıkış Gücü	1500 -1700 kVA
Çıkış Gerilimi ve Gücü	650 V AC, 250 kVA
Soğutma	Su
Ağırlık	118 kg

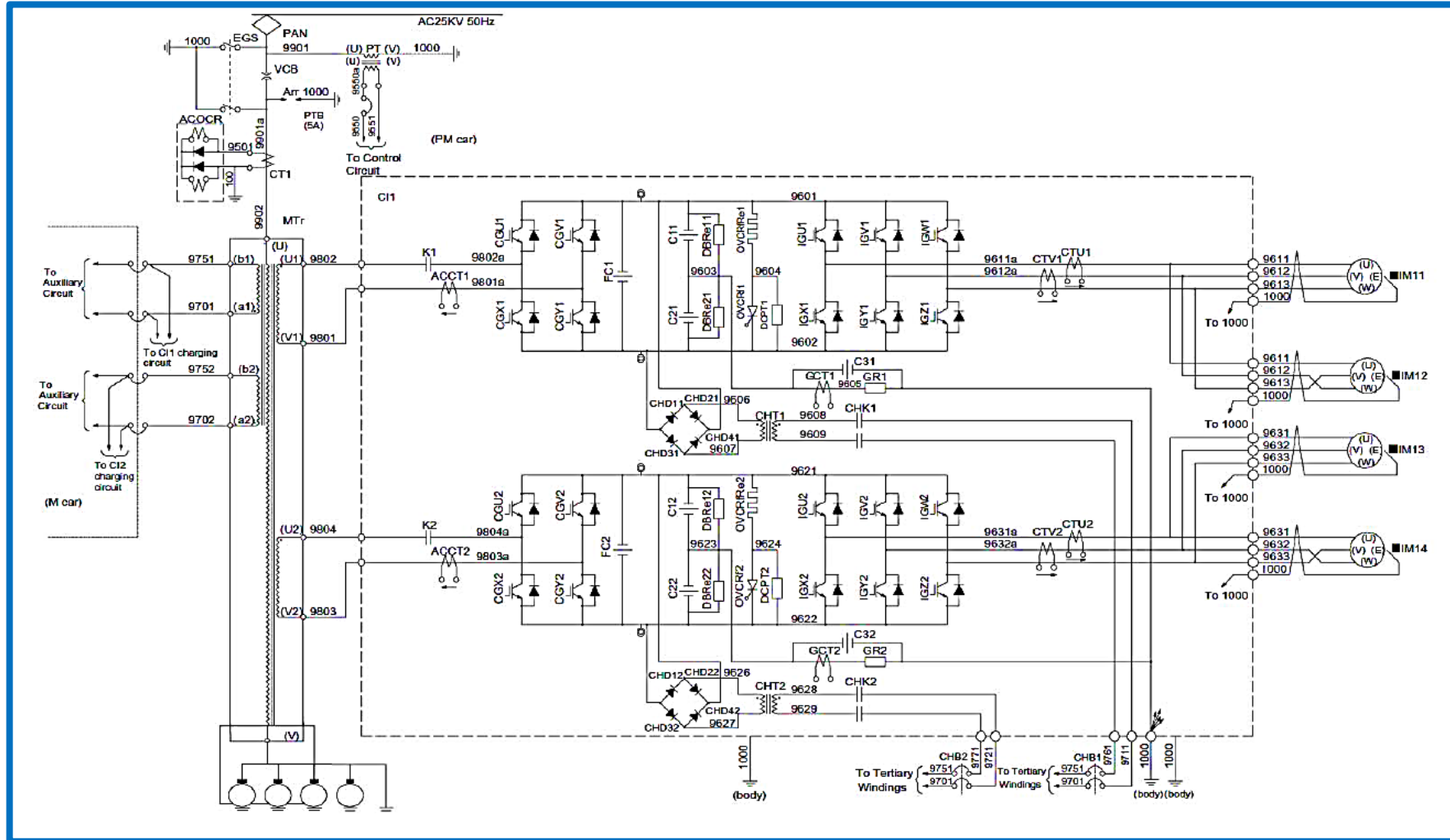
Şekil 2.60 : 1500V DC konvertöre ait karakteristik değerleri.



Şekil 2.61 : 1500V DC invertöre ait karakteristik değerler.



Şekil 2.62 : Modern bir AC lokomotif.



Şekil 2.63 : 25 kV 50Hz AC sistem (Marmaray Örneği) [1].

Bugünkü AC sürücü sistemlerinin kalbinde IGBT anahtarlama teknolojisi yer almaktadır. Raylı sistem uygulamaları için yüksek güçte IGBT üniteleri üretebilen dünyada yalnızca birkaç firma vardır. Raylı sistemlerde kullanılan IGBT'ler oldukça yüksek verimli ve hızlı anahtarlama sürelerine sahiptir. Açma ve kapama anahtarlama zamanları yaklaşık 1µs dir ve şu anda pazarda yaklaşık 4000 V gerilim 1500 A seviyelerinde çalışabilecek IGBT'ler bulunmaktadır.

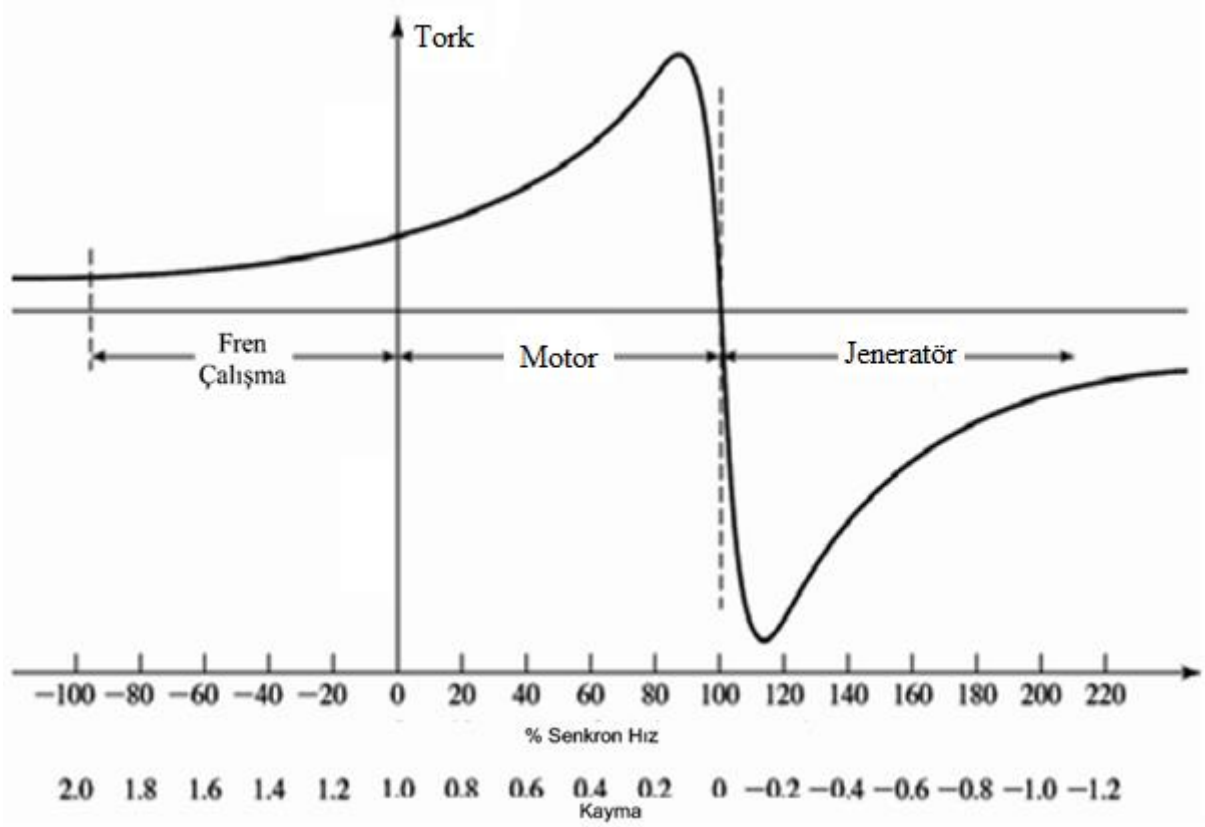
Sincap kafesli asenkron motorunun Değişken Gerilim Değişken Frekans (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF) ve Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) kontrol edilmesi sonucu en verimli ve en konforlu motor kontrolü elde edilmiş olur. IGBT ünitesinin kapı sinyali PWM ile kontrol edilerek invertör çıkış gerilimi rahatlıkla ayarlanabilir ve motor/jeneratör modlar ayarlanabilir. Şekil 2.64'de 3.3kV ve 1.2kA değerleri sahip tipik bir IGBT modülüne ait karakteristik bilgiler gösterilmiştir [13].



Kolektör-Emiter Gerilimi	3300 V
kapı Emiter Gerilimi	±20
Kolektör Akımı	1200 A
Kolektör Tepe Akımı (1ms)	2400 A
Toplam Güç Kaybı	11750 W per IGBT at $T_c=25^{\circ}\text{C}$
Bağlantı Sıcaklığı	-40°C to +150°C

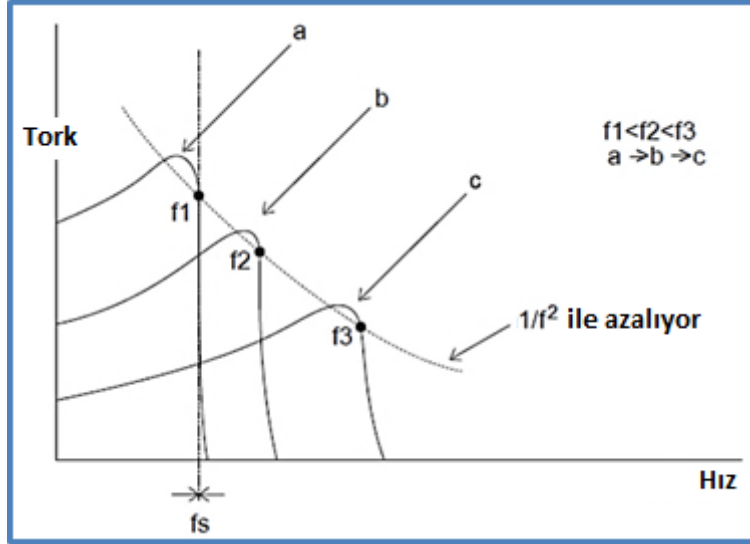
Şekil 2.64 : IGBT etiket değerleri [13].

Asenkron motora ait tork-hız karakteristiği kayma ('s') değerine bağlı olarak Şekil 2.65'de gösterilmiştir. Pozitif veya negatif kayma değerleri elde edilerek fren çalışma veya motor çalışma seçimi rahatlıkla yapılabilir.



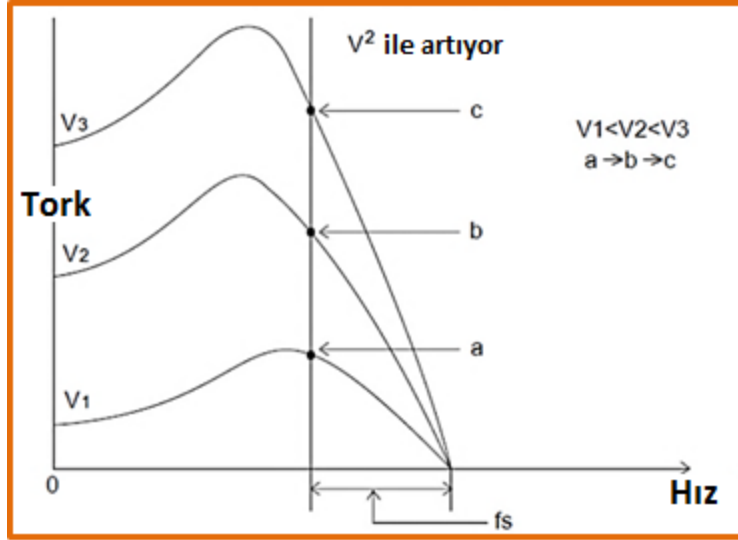
Şekil 2.65 : Asenkron motorun kaymaya bağlı olarak tork-hız eğrisi.

Asenkron motora ait senkron hız doğrudan kaynak frekansına bağlıdır. Kaynak frekansı değiştirilerek, motor hızı nominal değerinin üstünde veya altında rahatlıkla kontrol edilebilir. Asenkron motor terminal gerilimi kaynak frekansı ile hava aralığı akısına bağlıdır. Bu yüzden kaynak geriliminde değişiklik olmaksızın, frekansdaki en ufak bir azalma hava aralığı akısının artmasına neden olacaktır. Bu da mıknatıslanma akımının artmasına ve motorda doymaya sebebiyet vereceğinden hat gerilim ve akımlarında bozulmalar yaşanır. Aynı şekilde herhangi bir gerilim değişikliği yapılmadan kaynak frekans değerinin artırılması hava aralığı akısını düşüreceğinden tork azalacaktır. Bu sebeple raylı sistem uygulamalarındaki asenkron motor kontrolünde yalnızca Değişken Frekans (Variable Frequency, VF) kullanılamaz. Aksi takdirde Şekil 2.66'da gösterildiği gibi $1/f^2$ değerine bağlı olarak tork azalırken motor hızı artacaktır [1].



Şekil 2.66 : Asenkron motorun değişken frekans kontrolü.

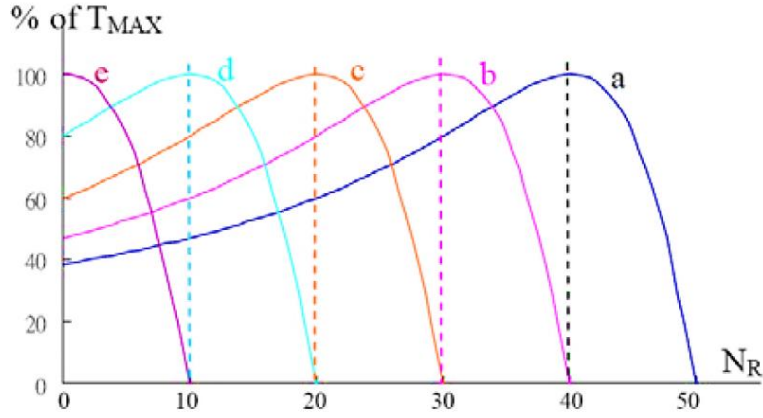
Sadece Değişken Gerilim (Variable Voltage, VV) kontrolü de raylı sistem uygulamaları için uygun değildir. Çünkü Şekil 2.67’de gösterildiği gibi terminal geriliminin karesine bağlı olarak (V^2) tork artarken motor hızı kaynak gerilimine bağlı olduğu için senkron hızın daha üstüne çıkamaz. Dolayısıyla VV kontrolü de tek başına raylı sistem uygulamaları için kullanılamaz [1].



Şekil 2.67 : Asenkron motorun değişken gerilim kontrolü.

Asenkron cer motorunun kontrolü için en doğru ve verimli çözüm ise hem hızın hemde torkun kontrol edilebildiği kaynak geriliminin ve frekansının değiştirildiği VVVF kontrolüdür [1]. VVVF kontrolü sayesinde asenkron cer motoru geniş bir hız aralığına sahip olur ve ihtiyaç duyulan tork rahatlıkla kontrol edilebilir. Şekil 2.68’de gösterildiği gibi VVVF kontrolü

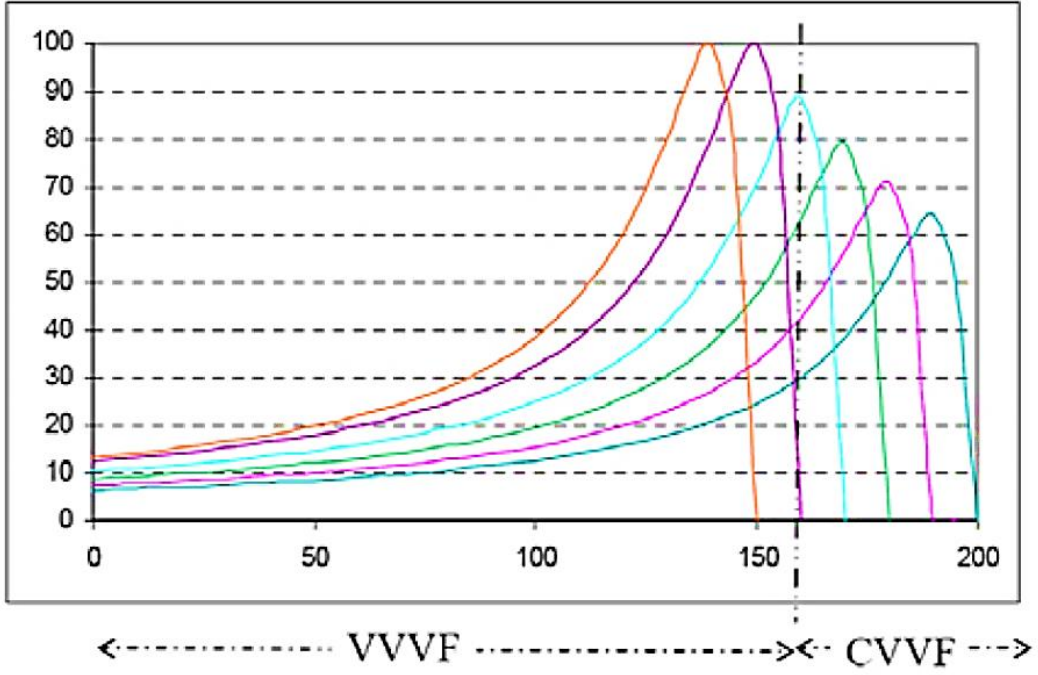
klasik asenkron motor tork-hız grafiğini aynen korur fakat sadece bu grafiği frekansa bağlı olarak hız eksenini boyunca sağa veya sola kaydırır. VVVF kontrolü ile hızın %10 ile %150 arasında kontrolü mümkündür.



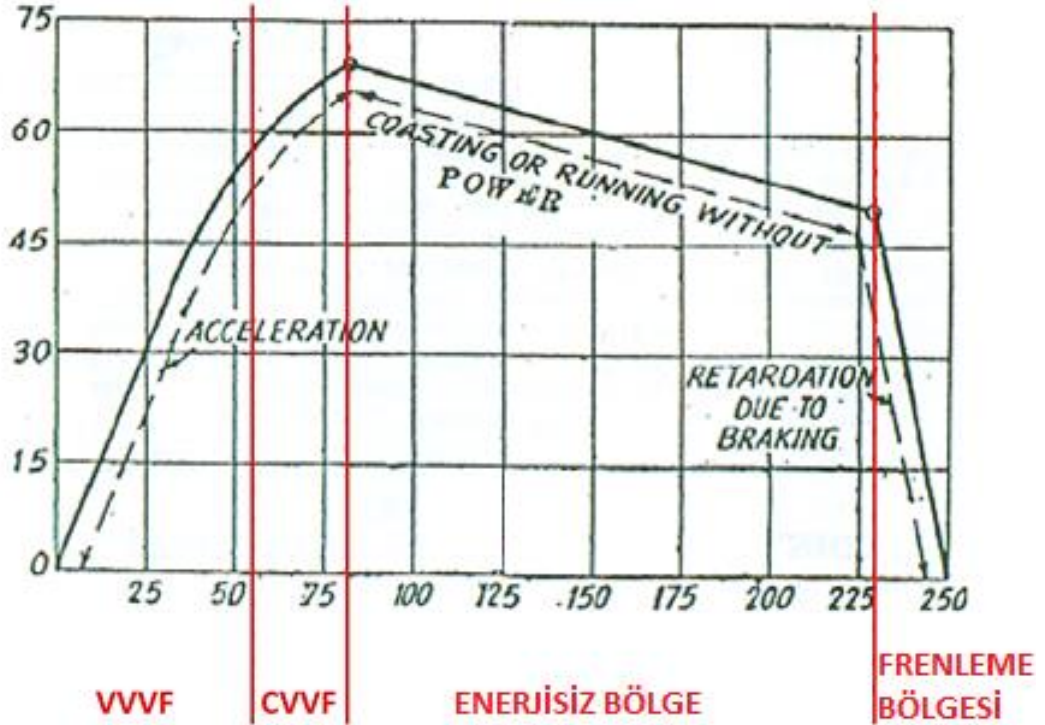
Şekil 2.68 : Farklı gerilim ve frekans değerleri için tork-hız eğrisi.

Tren hızının maksimum hıza gelinceye kadar devamlı olarak artırılması için frekansın devamlı artırılması gerekir. Fakat sabit bir akı elde edebilmek için V/F oranı da sabit olmalıdır. Bunun için kaynak frekansı ile birlikte kaynak geriliminin de daima frekans ile birlikte artırılması gerekir. Bu ise motorun belli bir maksimum gerilim seviyesi olduğu için mümkün değildir. Belirlenmiş gerilim seviyelerinin üzerine çıktığı takdirde izolasyon problemleri yaşanacaktır. Dolayısıyla motorun maksimum gerilim seviyesine geldiği zaman daha fazla gerilim yükseltilmez ve sadece frekans artırılmaya devam eder. Belirli bir motor hızından sonra sadece frekansın artırıldığı bu bölgeye Sabit Gerilim Değişken Frekans (Constant Voltage variable Frequency, CVVF) bölgesi denir ve bu bölge sabit güç bölgesini temsil eder. Bir tren Şekil 2.69 ve 2.70'da gösterildiği gibi genel olarak 4 işletme modu vardır ve genel olarak tren hızıyla birlikte çıkış torkuda artar [1]. İlk başta motora VVVF kontrolü uygulanır. Motor geriliminin izolasyondan dolayı daha fazla artılamadığı anda gerilim artık sabit tutulur ve frekans artırılır. Bu bölge CVVF olarak bilinir ve yaklaşık olarak maksimum hıza yakın olan hız aralığını kapsar. Tren maksimum hızına ulaştığından enerji verimliliği açısından frenleme yapacağı noktaya kadar genellikle enerjisiz devam eder. Bu aralık genel olarak kızaklama (coasting) bölgesi olarak bilinir. En son bölge ise frenleme bölgesidir. Bu aralık içinde cer motoru jeneratör olarak çalıştırılır ve frenleme enerjisi geri kazanılabilir. Raylı sistemlerde elektrik motorları kullanılmasının en büyük avantajlarından biri de frenleme enerjisinin geri kazanımının mümkün olmasıdır. Ayrıca tren genelde 8 km/h hıza kadar yalnızca

elektrik motoru frenini kullanır. 8km/h hızın altında fren pabuçlarının kullanıldığı kinetik frenleme yapar. Bu ise bakım masraflarının oldukça azalması manasına gelmektedir [1].



Şekil 2.69 : VVVF ve CVVF bölgeleri.



Şekil 2.70 : Dört farklı tren işletme bölgesi.

3. 750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİ: YENİKAPI-TAKSİM-HACIOSMAN METROSU İNCELEMESİ

3.1 Amaç

Metro araçlarının cer motorları ve sürücü devreleri de dahil olmak üzere tüm elektrikli cer gücü sisteminin modelini oluşturmak ve gerçeğe oldukça yakın yapılan bu modelleme üzerinde çeşitli durumlara ait benzetim ve analizler yapmak bu tez çalışmasının amacı ve ana araştırma konusudur.

Bu amaçla İstanbul'un ilk yeraltı metrosu olan ve 2000 yılında ilk fazı hizmete giren Yenikapı-Taksim-Hacıosman (M2 Hattı) metrosuna benzer bir metro sistemi modellemesi **MATLAB® Simulink** ortamında oluşturulmuştur. Bu metro sistemi 750 V DC hat gerilimi ve 3.ray akım toplama sisteminin kullanıldığı bir sistemdir ve aşağıda örnek alınan işletme verilerine ait bazı bilgiler gösterilmiştir [7]. Bu bölümde yer alan ve M2 hattına ait tüm teknik bilgiler İBB Ulaşım AŞ şirketinden temin edilmiş gerçek verilerdir [7]. M2 hattına ait genel özellikler:

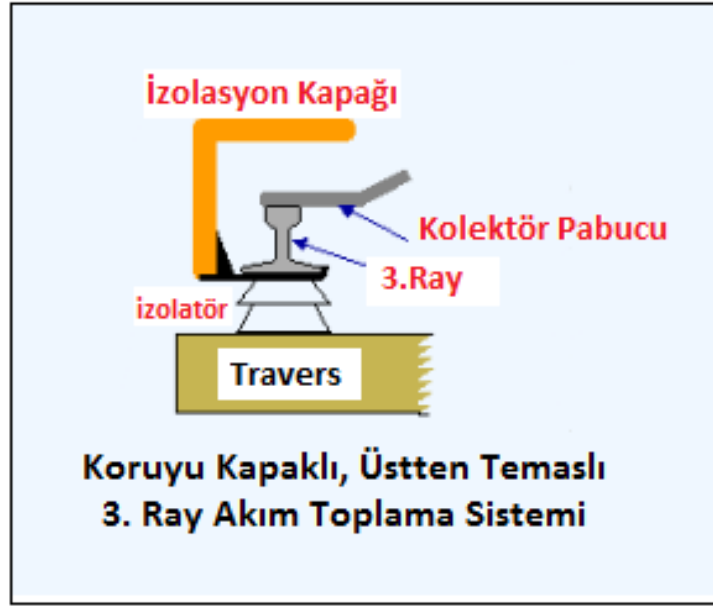
- a) Toplam Hat Uzunluğu: 23,5 km.
- b) İstasyon Sayısı: 18 (Şekil 3.1'de M2 hat haritası gösterilmiştir).
- c) Vagon Sayısı: 128 (32 adet Alstom, 96 adet Hyundai-Rotem).
- d) Sefer Süresi: 27 dk.
- e) Günlük Sefer Sayısı: 225 sefer/tek yön.
- f) Günlük Yolcu Sayısı: 330.000 yolcu/gün.
- g) Sefer Aralığı (headway): yaklaşık 4 dk (peak saatlerde).
- h) Maksimum İşletme Hızı: 80 km/h.
- i) Ortalama Ticari Hız: yaklaşık 38 km/h.
- j) Peron Boyu: 180 m (8'li setlere uygun).
- k) Hat Gerilimi: 750 V DC.



Şekil 3.1 : Yenikapı-Haciosman metrosu hat haritası [7].

3.2 M2 Hattı Elektrik Sistemi Altyapısı

M2 hattının 97.7 MVA cer gücü ve 61.68 MVA da yardımcı sistemler (istasyonlar, teknik odalar, ticari alanlar ve işletme ofisleri) için olmak üzere toplam kurulu gücü 159.380 MVA kurulu gücü bulunmaktadır. Bu elektrik kurulu güç değerine besleme hattı olarak çalışan Kabataş-Taksim Fünikiler sistemi ve Sanayi Mahallesi ile Seyrantepe TT Arena arası shuttle hattı da dâhildir. TEİAŞ'a ait olan Taksim, Levent ve Maslak 154kV GIS trafo merkezlerinden çift fider üzerinden temin edilen güç 154/34.5 kV dönüştürme oranına sahip trafolar yardımıyla orta gerilime düşürülür ve tüm hatta kesintisiz ve güvenilir bir işletme sağlamak için Orta Gerilim Ring Sistemi oluşturulur. Daha sonrasında iç ihtiyaçlar ve tüm yardımcı güçler her bir istasyonda bulunan 34.5/0.4kV trafolar üzerinden, trenleri beslemek için gerekli olan cer gücü ise 34.5/0.59 redresör trafosu ve doğrultucu üniteleri üzerinden sağlanır. Tren ihtiyaç duyduğu cer gücünü 3.ray üzerinden boji şasisi üzerine yerleştirilmiş kolektör pabucunun 3.raya üstten baskı uygulamasıyla alır. Üçüncü ray Şekil 3.2' de gösterildiği gibi üstten plastik koruyu kapak ile kapatılmıştır.



Şekil 3.2 : İzolasyon kapaklı, üstten temaslı 3.ray sistemi.

M2 hattının tüm elektrik sistemleri 7 ana başlık altında kategorize edilebilir. Bunlar:

- 34.5 kV AC orta gerilim dağıtım sistemi.
- 750 V DC cer gücü dağıtım sistemi.
- 400/230 V AC alçak gerilim dağıtım sistemi.
- 110 V DC ve 400/230 V AC acil durum güç dağıtım sistemi.
- Transfer link sistemi.
- Topraklama sistemi.
- SCADA sistemi.

3.2.1 34.5 kV OG dağıtım sistemi

M2 hattı TEİAŞ'ın 154/34.5 kV Altın-tepe, Levent ve Maslak GIS trafo merkezlerinden her biri çift fider olmak üzere toplam 6 fider üzerinden enerji ihtiyacını temin etmektedir. Her bir GIS trafo merkezi 25 MVA değerindedir ve bu merkezlerden birisinde enerjinin kesilmesi durumunda diğerinden beslenebilecek şekilde yedekli tasarlanmıştır.

Enerji satın alınan yerel elektrik dağıtım şirketine ait tüm besleme noktaları ile M2 hattına ait trafo merkezlerinin kendi aralarında 34,5kV orta gerilim kabloları ile oluşturulan ring şebekesi bulunmaktadır. OG sisteminin temel özelliği nedeniyle, hat üzerindeki satış noktalarından sadece birinden enerji temin edilebilmesi halinde bile, yolcu işletmesi yoğun işletme saatlerinde dahi bütün sistemin enerji ihtiyacını karşılayacak ve işletme sürekliliğini sağlayacak şekildedir. Sistemin bu özelliği sayesinde, yerel elektrik dağıtım şirketine ait enerji

satın alınan noktalardan birinde enerji kesintisi olduğunda; sistemde kurulu ring hattı üzerinden yapılan manevralarla OG enerji sürekliliği sağlanabilmektedir.

Çizelge 3.1 : Acil durum dizel jeneratörü etiket değerleri.

Trafo Gücü (P)	Güç Faktörü ($\cos \Phi$)	Gerilim Değeri (U)	Nominal Akım (I_n)	Ağırlık
4 MW	0,8	6.3 kV, 50Hz	458 A	33820 kg

Her 3 şalt merkezinde de enerjinin tümünden kesilmesi durumunda (en kötü senaryo) sistem ve yolcu güvenliği düşünülerek Taksim , Levent ve AOS'a birer tane acil servis jeneratörü (5 MVA, 6,3 kV) konulmuştur. Jeneratörlerin (Şekil 3.3) etiket değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Acil durum dizel jeneratörü ve jeneratör trafosu.

Jeneratör çıkış gerilimini yükseltmek ve OG ring sistemini besleyecek gerilim seviyesini elde etmek için 6.3/34.5 kV çevirme oranlarına sahip 5 MVA gücünde 3 adet jeneratör trafosu bulunmaktadır. Bu trafolar hermetik olup bakım gerektirmezler. Jeneratör Trafolarının etiket değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Dizel jeneratör trafosu etiket bilgileri.

Trafo Gücü (S)	İzolasyon Seviyeleri (U1 / U2)	Gerilim Değeri (U1 / U2)	Yüklü ve Yüksüz Kayıplar (75°C)
5000 kVA	20 kV / 70 kV	6.3 / 34.5 kV	47 kW / 5.6 kW

Bu jeneratörler herhangi bir enerji kesintisi durumunda otomatik olarak devreye girmek üzere hazır (stand-by) konumunda beklemektedirler. Jeneratör trafoları çıkışında bulunan OG kesici röleleri ile OG ring sistemini besleyen kesici röleleri arasında kilitleme sistemi vardır. Komple bir enerji kesintisi durumu karşısında ring kesicileri barasında bulunan gerilim ve akım trafoları röleye barada enerji olmadığı sinyali gönderir. Jeneratör kesicileri üzerinde bulunan röleye ring sisteminde enerji olmadığı teyidi gelmesiyle birlikte dizel jeneratörler 25 saniye içerisinde yüke biner ve sistemi beslemeye başlar. Jeneratörler acil durum için tasarlanmış olup, bu jeneratörler ile kalıcı işletmeye devam etmek mümkün değildir. Jeneratörler ile sadece karşılıklı iki tren hareketi mümkündür. Trenler sırayla 25km/h hızla en yakın istasyonlara çekilir ve yolcular tahliye edilir. Böylece enerji kesintisi durumunda tünelde kalan yolcular güvenli bir şekilde tahliye edilmiş olur.

Çizelge 3.3 : Kesici hücreleri etiket değerleri.

Ana Bara Akımı (I_n)	Gerilim (U)	Darbe Gerilimi (U_w)	Kısa Devre Akımı
2500 A	36 kV, 50Hz	6.3 / 34.5 kV	25 kA (3 saniye)

OG ring sisteminde hat boyunca istasyonların doğu ve batı kısımlarında bulunan OG elektrik odalarında konumlandırılmış 39 adet OG pano grubu (Şekil 3.4) vardır. Gruplar içinde toplamda 221 adet AC kesici hücresi vardır. Bu kesici hücrelerinden 185 adeti SF₆ veya vakum tipli AC kesici olup kalan 36 hücre sadece bara hücresidir (ölçü barası). Kesici hücrelerinin etiket değerleri Çizelge 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : OG pano grubu.

Kesiciler SF₆ gazlı ve vakumlu tip olup her türlü durumda; normal yük, aşırı yük, ve arıza (kısa devre) durumlarında devreyi açar ve kapatır. SF₆ gazlı kesicilerin etiket değerleri Çizelge 3.4 gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : SF₆ gazlı kesiciler etiket bilgileri.

Nominal Akım (I _n)	Gerilim Değeri (U)	Darbe Gerilimi (U _w)	Kısa Devre Akımı (I _{th})
1250 A	36 kV, 50Hz	170 kV	25 kA (2 saniye)
SF ₆ Gaz Basıncı 20 °C de	Akım Kesme Kapasitesi	Maks Darbe Akımı	Ağırlık
3,5 Bar	25 kA	62,5 kA	320 kg

3.2.2 750 V DC cer gücü dağıtım sistemi

M2 hattı araçları 750 V DC gerilim ile tahrik edilmektedir. Tren enerji ihtiyacını hat boyunca taşıyıcı rayların yanına monte edilmiş olan 3. raydan almaktadır. Alstom araçlardaki cer motorları, 4 exf 2522 a tipi 152 kW gücünde ve 375 VDC armatür geriliminde ikişerli gruplar halinde seri ve paralel bağlanmış DC motorlardır. Hyundai-Rotem araçlarında ise 150 kW 400-550 V AC Sincap kafesli asenkron motorlar kullanılmaktadır. Motorların tahrik sistemi güç devresi ve kontrol lojiğinden oluşmaktadır. Motorlu araçlar bojilerinin ortasına yerleştirilmiş olan kolektör pabucunun 3. raya üstten sıkı basmasıyla gerekli cer gücünü temin ederler. I. Aşama 3.rayı BSC-75 tipi az karbonlu masif çelikten imal edilmiş olup yerden 30 cm yukarıya monte edilmiştir. II. ve III. Aşama rayları ise Alüminyum Kompozit özelliklidir. 3.Ray'ın akım taşıma kapasitesi ve gerilim düşümü, çalıştırılacak 8 araçlık trenler göz önüne alınarak hesaplanmıştır I. Aşama 3. rayının belirgin özellikleri Çizelge 3.5 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Az karbonlu çelik 3.rayın karakteristik bilgileri.

Kesit Alanı	9489,5 mm ²
Hesaplanan Kitle	74.49 kg/m
Maksimum Direnç	11.64 mΩ/km

3.raylar üzerine elektriksel bakımdan yalıtkan olan koruma kapakları takılmıştır. Bu şekilde insanların yanlışlıkla raylara dokunup elektrik çarpmasına maruz kalmaları önlenmiştir. Üçüncü rayın tasarım maksimum yükü aşırı ısınma olmadan taşımaya ve gerilim düşümünün araç tahrik sistemi toleransları dâhilinde kalmasını sağlamaya müsaittir.

750 V DC hat gerilimi, cer gücü trafo merkezlerinde Redresör Trafoları (34.5/2x0.58 kV) ve 12 Darbeli Kontrolsüz Doğrultucu (2x0.58 kV girişli 750 VDC çıkışlı) ünitelerinden elde edilmektedir.



Şekil 3.5 : (a) Redresör trafosu. (b) Doğrultucu ünitesi.

Redresör Trafoları (Şekil 3.5); 15 istasyonda (2 şer adet), hat cer merkezinde ve bakım atölyesinde olmak üzere toplam 35 adettir. Primeri tek sekonderi çift sargılı, dökme reçine vakumlu kuru tip özelliktedirler. Nem almayan kapalı alanlar için bakım gerektirmeyen yapıdadırlar. Alstom Redresör Trafolarının etiket değerleri Çizelge 3.6 da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : Redresör trafosu etiket bilgileri.

Nominal Güç (S_n)	Gerilim Değeri (U_1/U_2)	Vektör Grubu	Nominal Akımı (I_1/I_2)
3300 kVA	34.5 / 2x0.58 kV 50Hz	Ddoy11	53.4 / 2x1560 A
Üretim Yılı	Tipi	Soğutma ve Koruma Sınıfı	Ağırlık
1998 (1.Faz)	TTG 3330-75	AN – IP00	14950 kg

Redresör grupları da Redresör Trafoları gibi toplam 35 adettir. Trenin ihtiyaç duyduğu 750 V DC gerilim, 34.5 / 2x0.58 kV trafoları ve 2x580V AC / 750V DC redresör grubu üzerinden elde edilmektedir. 12 darbeli kontrolsüz tip doğrultucu ünitesi 12 diyot grubuna sahiptir. Doğrultucu ünitesine ait etiket değerleri Çizelge 3.7 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : Doğrultucu ünitesine ait teknik bilgiler.

Nominal Güç (S_n)	Gerilim Değeri (U_1/U_2)	Nominal Akımı (I_1/I_2)	Ağırlık
3300 kVA	580 V AC / 750 V DC	1633 / 4000 A	4300 kg

Redresörden elde edilen 750V DC gerilim DC kesiciler üzerinden hattı beslemektedir. Toplam 120 adet 750V DC kesicileri ve hücreleri mevcuttur. Tüm DC kesiciler bakım kolaylığı açısından Şekil 3.6 da gösterildiği gibi çekmeceli tipte arabalı kesicidir. Bunun dışında Atölye Bakım Alanı diye adlandırılan Seyrantepe Atölyede trenlerin bakımı için bir bakım alanı oluşturulmuştur. Bu bölgede araçlar stinger adı verilen sistem tarafından 750 V DC ile beslenirler. Atölye çalışanlarının güvenliği için 3.ray sistemi atölyede tahsis edilmemiştir. Stinger adı verilen hareketli sistem ile tren enerjilendirilir. Kesiciler ve diğer DC sistem ekipmanları şu şekilde gruplandırılmıştır:

- 12 adet cer gücü besleme istasyonunda ve hat cer merkezi ve depo bölgesinde (TPS) 14 adet 3.ray cer gücü dağıtım panosu (TDB) vardır. Her TPS'de 2 adet redresör trafosu, 2 adet redresör grubu ve DC kesiciler bulunmaktadır. DC kesiciler yardımıyla Hat-1 ve Hat-2 ayrı ayrı enerjilendirilmektedir.

- b) Ray devre kesicileri (TCB) ve Koruma kuponu devre kesicileri (PCCB), Cer gücü bölümlendirme panosu (TSB) hattına yerleştirilmişlerdir.
- c) 10 adet grup devre kesicisi (GCB) vardır. Bu kesici redresörün pozitif 750 VDC polaritesinin raylara dağılımından izolasyonunu sağlar.
- d) 26 adet ray devre kesicisi (TCB) vardır. Bu kesici bir ray zonuna 750 VDC dağıtımını sağlar.
- e) 4 adet koruma kupon devre kesicisi (PCCB) vardır. Her bir ray hattı bölgelere ayrılır ve her bir bölge komşu bölgeden bir Koruma Kuponu Devre Kesicisi (PCCB) vasıtası ile izole edilir.
- f) 1 adet bakım alanı ray hattı devre kesici (TCBMA) vardır.
- g) 12 adet 750V DC Sistemi kontrol ve kumada panosu (TCC) vardır.
- h) 5 adet kaçak akım drenaj hücresi (TCD) vardır. Bu fonksiyon madeni yüzeyler (tünel, binalar vb.) üzerinde olası korozyon etkilerini önlemek amacı ile tercihli bir yol vasıtası ile cer akım dönüşünün boşaltılması ile ilgilidir.
- i) 13 adet DC negatif koruma panosu (TNP) vardır. Bu fonksiyon seyir rayı (750 VDC negatif polaritesi) ve toprak arasındaki gerilim kontrolünü sağlar. Bu gerilimin 1sn'den az bir süre için 90 VDC'nin üzerinde olması halinde, negatif kontaklama kontaktörü kapanır. Bu gerilimin 1 sn'den fazla bir süre için 90 VDC'nin üzerinde olması halinde ilgili zona beslemede bulunan tüm TCB'ler direkt olarak TPS bölgesinde ve bölümlendirme panolarının TCB'lerine ilişkin bağımlı hat plakaları aracılığı ile tetiklenir ve açık konumda kilitletir. Ray negatif topraklama gerilimi kontaktörü kesici tipindedir.
- j) 18 adet negatif ayırıcı hücresi (TNS) vardır. Bu ayırıcılar negatif cer şebekesinin redresör ünitesinin negatif terminalinden manuel olarak yalıtımını sağlar.
- k) 20 adet acil durdurma butonları kumanda panosu (CTB) vardır. Herhangi bir tehlikeye karşı 750 VDC ray geriliminin kesilmesini sağlayan panolardır. CTB panoları PTES (Acil açtırma butonu) butonlarının kumanda panosu olduğu için ve PTES butonları trenleri acil durumda 750 VDC beslemesini keserek durdurur.
- l) 42 adet şönt ayırıcı vardır. Güçsüz olarak bir devreyi açan veya kapatan güvenlik cihazıdır. 3.Ray ile Toprak arasına monte edilmiş olan bu ayırıcılar tren seferleri bittikten ve enerji kesildikten sonra ayırıcılar kapatılır. Bu suretle 3.Ray'a enerji

verilmesi engellenmiş ve bakım çalışması yapan personelin hayati tehlike riski ortadan kaldırılmış olur.

- m) Taşıyıcı raydan redresöre dönen negatif akımlar bir negatif akım şalteri ve koruma ünitesi üzerinden redresörün negatifine bağlanmıştır.



Şekil 3.6 : (a) DC kesici arabası. (b) Negatif geri dönüş koruma panosu. (c) Kesici.

3.2.3 400/230 V AC alçak gerilim dağıtım sistemi

İstasyonların enerjilendirilmesi Taksim, Levent ve Maslak'daki ana trafo merkezlerinden dağıtımı yapılan çift fider OG ring şebekesiyle sağlanmaktadır. Her istasyonun kuzey ve güney kısımlarındaki OG şalt odalarından da gerek istasyon AG yardımcı tesislerine gerekse DC şalt donanımına enerji sağlamaktadır.

Her istasyonda kuzey ve güneyinde 2 adet olmak üzere finükiler, depo ve atölye bölgesinde 2MVA gücünde, 34.5/0.4kV çevirme oranına sahip toplam 40 adet yardımcı güç besleme trafosu bulunmaktadır. Dökme reçine vakumlu kuru tip özelliktedirler. Nem almayan kapalı alanlar için bakım gerektirmeyen yapıdadırlar. Bu 40 adet aydınlatma ve güç trafosu alçak gerilim tevzi panoları (LVS) vasıtası ile istasyonlardaki ve tünellerdeki tüm yardımcı birimlere ve sabit ekipmanlara beslemede bulunmak üzere 34.5 kV gerilimi 400/230 V AC

alçak gerilime dönüştürürler. Bu trafolardan; istasyonlarda bulunan asansörler, yürüyen merdivenler, yürüyen bantlar, yangın sistemi, havalandırma ve klima sistemi, tünel havalandırma fanları ve jet fanlar, drenaj sistemi (su pompaları), istasyon priz ve aydınlatma sistemi, tünel priz ve aydınlatma sistemi, kesintisiz güç kaynakları (UPS), istasyonlardaki ticari alanlar vb. tüm sistemler beslenirler. Yardımcı güç trafoları etiket değerleri Çizelge 3.8 de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.8 de yardımcı güç trafo ile birlikte alçak gerilim panoları görülebilmektedir.

Çizelge 3.8 : AG iç ihtiyaç trafosu etiket bilgileri.

Nominal Güç (S_n)	Gerilim Değeri (U_1/U_2)	Vektör Grubu	Nominal Akımı (I_1/I_2)
2000 kVA	34.5 / 0.4 kV 50Hz	Dyn11	33.5 / 2750 A
Üretim Yılı	Tipi	Soğutma ve Koruma Sınıfı	Ağırlık
1998 (1.Faz)	HD 464-SI	AN – IP315	6190 kg

Bununla birlikte sistemde Jeneratör binalarının iç beslemelerinde kullanılmak üzere B1 (Taksim Jeneratör Binası), B2 (Levent Jeneratör Binası) ve B3 Maslak Jeneratör Binasında 1'er adet 34.5 / 0.4 kV çevirme oranına sahip yağlı tip trafo kullanılmıştır. Yağlı tipteki bu trafoların özellikleri Çizelge 3.9 da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 : Jeneratör binası iç ihtiyaç trafosu etiket bilgileri.

Nominal Güç (S_n)	Gerilim Değeri (U_1/U_2)	Vektör Grubu	Nominal Akımı (I_1/I_2)
400 kVA	34.5 / 0.4 kV 50Hz	Dyn11	6.7 / 550 A



Şekil 3.7 : (a) Yardımcı güç trafosu. (b) AG dağıtım panosu. (c) AG sigortalar.

Sistemde 43 adet Alçak Gerilim Ana Dağıtım Panosu (LVS) vardır. 34.5 / 0.4 kV yardımcı güç trafosu çıkışı 400/230 V AC alçak gerilimini sisteme dağıtır. Bu panolar aracılığı ile istasyon yardımcı sistemlerinin enerjilendirilmesi üçe ayrılmıştır:

- a) Acil yüklerin UPS'den beslenmesi.
- b) Zorunlu yüklerin beslenmesi.
- c) Zorunlu olmayan yüklerin beslenmesi.

Herhangi bir enerji kesintisi durumunda kritik yüklerin hiçbir şekilde enerjisiz kalmaması için kesintisiz güç kaynakları tarafından beslenmektedir. Sinyalizasyon sisteminin güvenliği açısından bu sistem ana UPS üniteleri haricinde ayrı UPS'lerden beslenmektedir. Herhangi bir enerji kesintisi durumunda zorunlu olmayan yükler sistemden çıkartılarak kalan zorunlu yüklerin beslemesine devam edilir. Sistemde bulunan zorunlu yükler şunlardır:

- a) Kesintisiz güç kaynağı (UPS).
- b) İç ihtiyaç.
- c) Acil durum dağıtım panoları (EDB).
- d) Acil uyarı levha panoları (ESP).
- e) Batarya şarj cihazı dağıtım tablosu (İstasyon) (BCB).
- f) Tünel havalandırma kabinleri (TVC).
- g) Egzoz havalandırma kabinleri (EXC).
- h) Havalandırma dağıtım tablosu, güç besleme kabinleri (VDB).
- i) Havalandırma dağıtım tablosu, konkors yolcu alanı (EXC).
- j) Havalandırma dağıtım tablosu, asansörler motor odası (VDB).
- k) Havalandırma dağıtım tablosu, elektrik teknik oda (VDB).
- l) Asansör panoları (LFP).
- m) Yürüyen merdiven panoları (ESC).
- n) Tünel aydınlatma panoları (STP).
- o) Batarya şarj cihazı dağıtım tablosu (BCB) (Tünel).
- p) Yangın kontrol panoları (FCP).
- q) Sinyalizasyon sistemi UPS SER+CCR cer (UPS).
- r) Cer kumanda hücresi (TCC).
- s) Haberleşme sistemi dağıtım panosu (CDB).
- t) Yangın algılama dağıtım panosu (FDB).
- u) Drenaj panoları (DGP).

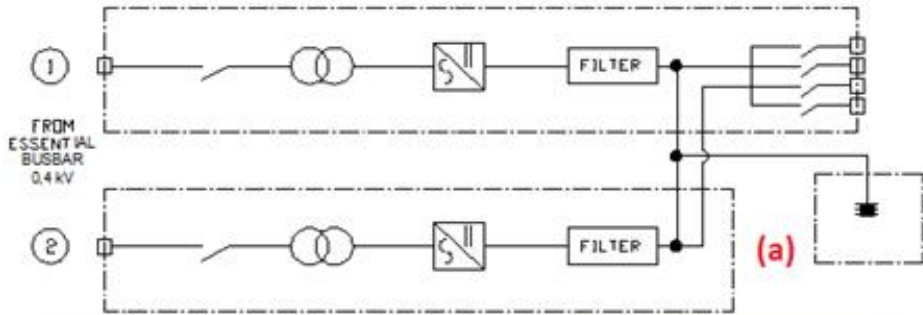
Sistemde bulunan ve enerji kesintisi durumunda beslemesi zorunlu olmayan yükler ise şunlardır:

- a) Havalandırma dağıtım tablosu, mağaza alanları (VDB).
- b) Havalandırma dağıtım tablosu, INF odası (VDB).
- c) Havalandırma dağıtım tablosu, klima sistemi (VDB).

- d) Emme havalandırma kabinleri (INC).
- e) Tünel priz panoları (GTP).
- f) İstasyon priz panoları (GSP).
- g) OG Şalt donanım ısıtma (MVS).

3.2.4 110 V DC ve 400-230 V AC acil durum güç dağıtım sistemi

M2 hattı acil durum güç ihtiyacını batarya şarj üniteleri (BCB) ve kesintisiz güç kaynağı üniteleri (UPS) ile sağlamaktadır. Elektrik sistemlerinde 38 adet Batarya Şarj Ünitesi (BCB) mevcuttur. Kumanda ve kontrol sistemlerinin beslemesi için 110V DC gerilim kaynağı oluştururlar. Tüm elektrik sistemlerinin (OG şalt donanımı, Ana AG dağıtım tablosu, 750 V DC şalt donanımı ve Batarya koruma panosu) yakın ve uzak kontrol ve kumandası ve ayrıca kesicilerin yay kurma mekanizması 110V DC redresör gurupları ile sağlanmaktadır. Bataryalar Ni-Cd tiptedirler. Elektrolit seviyeleri kontrol edilir ve azalmış olması durumunda damıtılmış veya iyonu giderilmiş su ile takviye edilir. Sistem uzak/yakın kontrolünün kesilmemesi için Battery Charger vasıtası ile 110 VDC kontrol gerilimi Şekil 3.8 de gösterildiği şekilde üretilmektedir.



Şekil 3.8 : (a) Batarya şarj devresi. (b) BCB panosu. (c) Ni-Cd bataryalar.

Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS), 400-230 V AC kaynakların arızalanması, performans kaybına uğraması, şebekeden kaynaklanabilecek enerji kesilmeleri, frekans dalgalanmaları, gerilim dalgalanmaları ve darbe gerilimine karşı tanımlanmış süre ve akım limitleri dâhilinde elektrik güç beslemesinin sürekli olarak sağlanması amacıyla tesis edilmişlerdir. 5 kVA ile 2000 kVA arası güçte 64 adet UPS bulunmaktadır. Akü gruplarında 6 V ve 12 V yaklaşık 5000 adet akü bulunmaktadır. Şekil 3.9 da UPS ve bağlı bulunan akü grupları gösterilmiştir. Aküler kuru tip olup bakım gerektirmezler ve ortalama akü ömürleri 5-10 yıldır.



Şekil 3.9 : (a) UPS. (b) Kuru tip aküler.

Kesintisiz güç kaynakları Sinyalizasyon ve Haberleşme ekipmanları başta olmak üzere şu ekipmanlara enerji sağlamaktadır:

- a) SOR (İstasyon İşletme Odası) (VIMS+SIMS), SOR yardımcı bilgisayar.
- b) İstasyon acil aydınlatma paneli (SCE) 1 saat, İstasyon emniyet aydınlatma paneli (SCT) 3 saat.
- c) SCADA RTU, Lokal kontrol panoları (LCP), Tünel aydınlatma panoları (STP).
- d) PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör) ve TPS (Çer Gücü Besleme).
- e) HVC (Transfer Link Kuplaj ve Koruma) hücreleri.
- f) Yangın kontrol panoları (FCP).
- g) Atık su paneli (SWP).

3.2.5 Transfer link sistemi.

M2 hattı istasyonları Kuzey ve Güney olarak ikiye ayrılmıştır. Her bir taraftaki yardımcı güç besleme trafosu 34.5 kV'u 400/230 V gerilime dönüştürerek LVS (Ana alçak gerilim dağıtım panosu) ile sisteme dağıtır. LVS panosu bir giriş kesicisi, bir zorunlu bara, bir zorunlu olmayan bara (kuplaj kesicisi ile irtibatlandırılmış) ve bir de Transfer Link sistemi (2 zorunlu bara arasında) ile donatılmıştır. Transfer Link sistemi, Kuzey veya Güneyde yardımcı

beslemelerden biri herhangi bir sebepten dolayı kesintiye uğrarsa enerjisi kesilmiş olan tarafa enerji sağlayabilmek amacıyla tesis edilmiştir.

Çizelge 3.10 : Transfer link trafosu etiket bilgileri.

Nominal Güç (S_n)	Gerilim Değeri (U_1/U_2)	Vektör Grubu	Nominal Akımı (I_1/I_2)
1000 kVA	0.42 / 6.3 kV 50Hz	Dyn11	96.2 / 1374.6 A
Üretim Yılı	İzolasyon Seviyesi (U1/U2)	Soğutma ve Koruma Sınıfı	Ağırlık
1998 (1.Faz)	60 – 20 / 10	AN – IP315	3040 kg

Her istasyonda 2 adet (Güney için 1, Kuzey için 1) olmak üzere, 1000kVA gücünde 0.4/6.4kV dönüştürme oranına sahip 50 Hz kuru tip toplam 30 adet transfer link trafosu (TRL) ve her iki yarı istasyonlardaki TRL trafolarını birbirine akuple eden 15 adet transfer link koruma hücresi mevcuttur. Yardımcı güç trafoları etiket değerleri Çizelge 3.10'da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.10 da TRL trafosu ve panosu görülebilmektedir.



Şekil 3.10 : (a) Transfer link trafosu. (b) Transfer link panosu.

3.2.6 Topraklama sistemi

Cansız bütün sistem iletkenlerinin (kablo tavaları, panolar, yükseltilmiş zeminler, çelik yapı, boru tesisatları, teknik oda kapıları vb.) topraklanmasından ibarettir. Oluşabilecek kısa devre akımlarından insanları ve ekipmanları koruması amacı ile tesis edilmişlerdir. Bütün tali toprak

baraları birbirlerine 300 mm²'lik bakır iletkenlerle bağlanır ve ana topraklama barası aracılığı ile 2x(50x6mm²) ile toprak hattına bağlanır.

3.2.7 SCADA sistemi

SCADA ile Metro hattını besleyen transformatör merkezleri ve bu hatlara ait güzergâhlar üzerinde kurulu bulunan şalt cihazlarının bilgisayar ortamında uzaktan kontrolü, kumandası ve izlenmesi amacıyla kurulmuş kontrol üniteleridir. M2 hattında sistemindeki tüm ekipmanlar SCADA vasıtasıyla İşletme Kumanda Merkezi (Operation Control Centre,OCC) veya İstasyon İşletme Odasından (Station Operation Room, SOR) kontrol edilebilmekte ve izlenebilmektedir. SCADA ile transformatör merkezlerindeki tüm kesici ve ayırıcıların açılıp kapatılması ve akım-gerilim değerlerinin okunması mümkündür. Yapılan her kumanda ve gelen her alarm, merkezdeki bilgisayar tarafından kaydedilir. Bu kayıtlardan sonra SCADA bilgisayarından rapor alınabilmekte ve akım gerilim trendleri çıkartılabilmektedir. Sistemin bu özelliği sayesinde, trafo merkezlerine ve enerji sistemlerine yönelik düzenli ve güvenilir istatistikler çıkarılabilmekte ve geriye dönük analizler yapılabilmektedir.

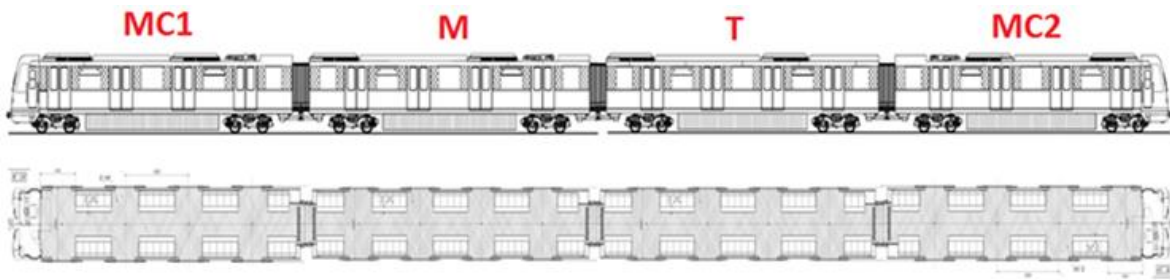
3.3 M2 Hattında Kullanılan Araçlar Ve Özellikleri

M2 hattının 2000 yılında 1. fazı devreye alındığında (Taksim-4.Levent arası işletme) toplam 32 adet Alstom (8 adet dörtlü tren seti) aracı hizmet vermekteydi. Daha sonra ki yıllarda hattın Haciosman ve Şişhane yönünde uzatılmasıyla birlikte kapasitenin artması sonucu 96 adet Hyundai-Rotem (24 adet dörtlü tren seti) aracı ilave olarak alınmıştır (Şekil 3.11). Bir dörtlü tren seti 2 adet motorlu ve sürücü kabinli araç, 1 adet motorlu araç ve 1 adet ise taşıyıcı araçtan oluşmaktadır. Her iki araç tipide istenildiği takdirde 8li tren seti olarak işletmeye uygundur. Bunun için iki adet dörtlü tren seti birbirine otomatik kuplaj vasıtasıyla bağlanmalıdır. Bu iki tip araç arasındaki en büyük farklılık araçların cer motorları ve sürücü devreleri arasındadır. Alstom araçları 375 V armatür gerilimine sahip seri uyarımlı DC motorlara sahiptir ve bu motorların sürülmesi GTO tristör anahtarlamalı devrenin DC motorun armatür gerilimini kontrol etmesiyle olmaktadır. Hyundai-Rotem araçları ise 3-fazlı, 4 kutuplu, sincap kafesli asenkron cer motoruna sahiptir. Bu motorlar IGBT invörtörünün PWM sinyali ile kontrol edilmesiyle sürülmektedir. VVVF kontrolü hem kaynak gerilimini hem de kaynak frekansını motorun tork-hız karakteristiğine bağlı olarak değiştirerek raylı sistem uygulamaları için oldukça uygun AC motor kontrolü sağlar.

3.3.1 M2 Metro araçları genel özellikler

Metro araçları genel olarak şu alt sistemlerden oluşmaktadır:

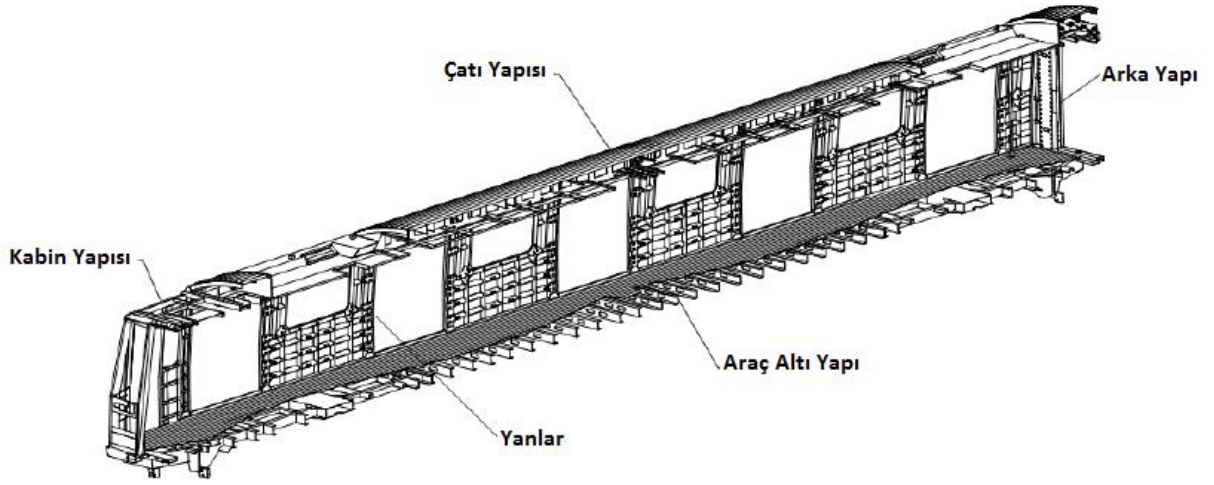
1. Araç Ana Gövde Yapısı.
2. Bojiler.
3. Süspansiyonlar (birincil ve ikincil).
4. Kuplajlar (otomatik ve sabit kuplörler).
5. Körük Geçişleri.
6. Cer Sistemi (cer motorları ve sürücüleri).
7. Araç Fren Sistemi.
8. Araç Kapıları ve Kontrol Sistemi.
9. Yardımcı Güç Sistemleri.
10. Pnömatik Sistem.
11. Klima Sistemi.
12. Tren Kontrol ve Haberleşme Sistemi.



Tren Konfigürasyonu	MC1-M-T-MC2 veya ((MC1-M-T-MC2)+(MC1-M-T-MC2))
Vagon Ağırlığı	MC1 ve MC2 : 35.5 ton M : 34.3 ton T : 26.1 ton
Yolcu Yüklü (6 yolcu/m ² ve 1 yolcu=70kg)	MC1 ve MC2 araçları 228 kişi: 15.96 ton M ve T araçları 240 kişi : 16.80 ton
Tekerlek Çapı	835mm (yarı aşınmış), 860mm (yeni)
Maksimum Yokuş Yukarı İvme	%4
Hızlanma İvmesi, Yavaşlama İvmesi (ortalama değerler)	En az 1.1m/s ² (40km/h 'a kadar)
Maksimum Sürüş Hızı	80 km/h
Hat Gerilimi	Hızlanmada 750 V DC, Frenlemede 825 V DC Hat Genlim Aralığı : 525-900V DC
Hareket Direnci [R] (V=Hız)	$R=1,867 + 0,0359xV + 0,000745xV^2$

Şekil 3.11: M2 hattında kullanılan araçların genel özellikleri [7].

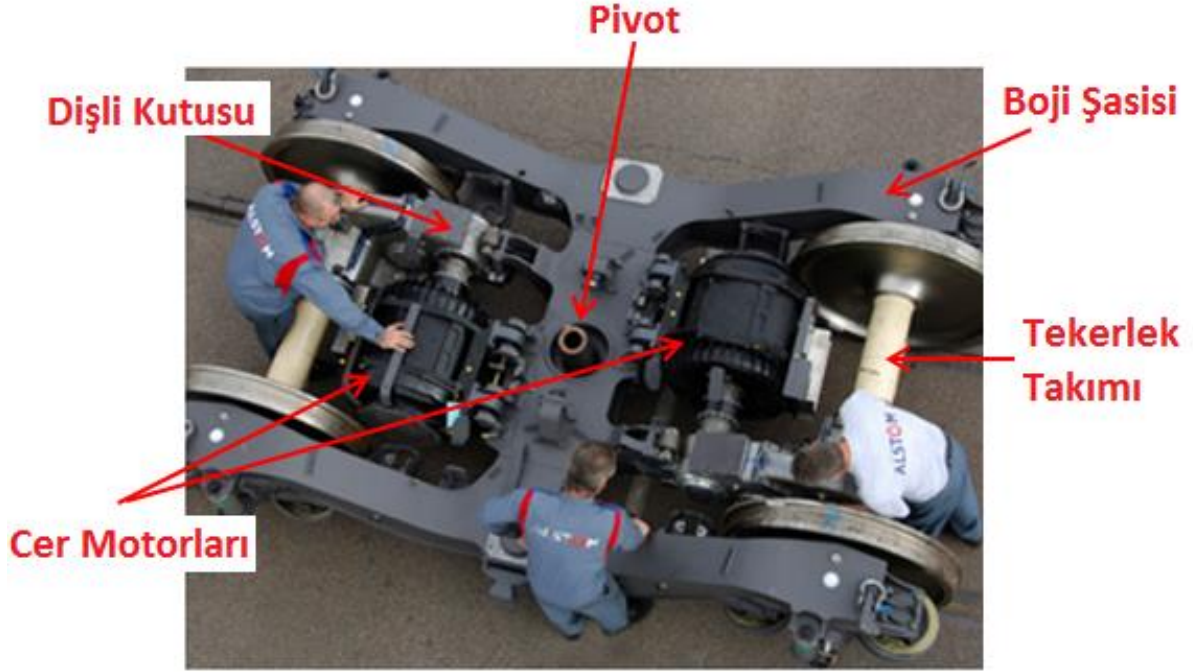
Raylı sistemlerde kullanılan araçlarda genellikle karbon çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum ve diğer kompozit malzemeler tercih edilir. Günümüzde kullanılan raylı sistem araçlarının tamamının ana gövdesi (yüksek hızlı trenler de dahil olmak üzere) gerek hafif olması gerek daha ucuz olması sebebiyle alüminyumdan imal edilir. Alüminyum araç gövde yapısının en büyük dezavantajı ise kaynak yapmanın oldukça zahmetli olmasıdır. Fakat günümüz teknolojisinde kaynak ve perçinleme teknikleri ile gayet sağlam ve dayanıklı (minimum kullanım ömrü yaklaşık 35-40 yıl) alüminyum araç gövdesi yapmak mümkündür. Şekil 3.12’de tipik bir metro aracının alüminyum gövde yapısının yandan kesiti gösterilmiştir.



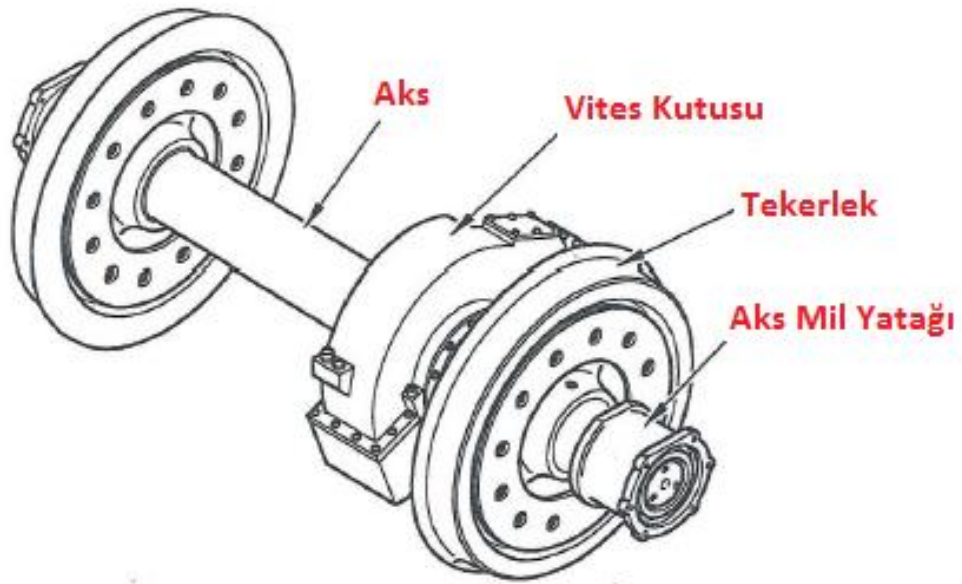
Şekil 3.12 : Aracın alüminyum gövde yapısı.

Bojinin tekerleklerin hareketini sağlamak ve araç gövdesini taşımak gibi iki temel görevi vardır. Rijit bir yapıya sahip olan trenlerin ayrıca uzun olması sebebiyle de bojiler kıvrımlı raylarda araca esneklik kazandırır. Bojiler Şekil 3.13’de gösterildiği gibi iki tekerlek takımından (toplam 4 tekerlek) oluşur. Şekil 3.14’de tekerlek takımı ve tekerlek takımı üzerinden bulunan yapılar gösterilmiştir. Bazı lokomotiflerde bulunan bojiler 3 tekerlek takımından da oluşabilir. Araç gövdesi bojinin orta noktasında bulunan pivot üzerine konulur. Bir aracın ağırlığını 2 boji tarafından eşit olarak paylaşılır. Bojiler ayrıca cer motorlarını da taşır. Bir bojide iki adet cer motoru bulunmaktadır. Bu motorlar dengelemeyi sağlamak üzere biri sağ tarafa diğeri ise sol tarafa yastır. Motorların mili dişli kutuları üzerinden direk olarak tekerlek takımının aksına bağlanır. Dişli kutuları yaklaşık 99:14 dişli oranına sahiptir. Bojiler üzerinde ayrıca yol titreşimlerini ve araç salınımları azaltmak, yolcu konforunu iyileştirmek, kurlarda araç dengesini sağlamak için tasarlanmış iki ayrı süspansiyon sistemi bulunur. (Şekil 3.15) Bu süspansiyonlardan birisi birincil süspansiyon (sabit helezon yaylı) diğeri ise ikincil süspansiyon (hava yastığı) olarak adlandırılır. Birincil süspansiyon Şekil

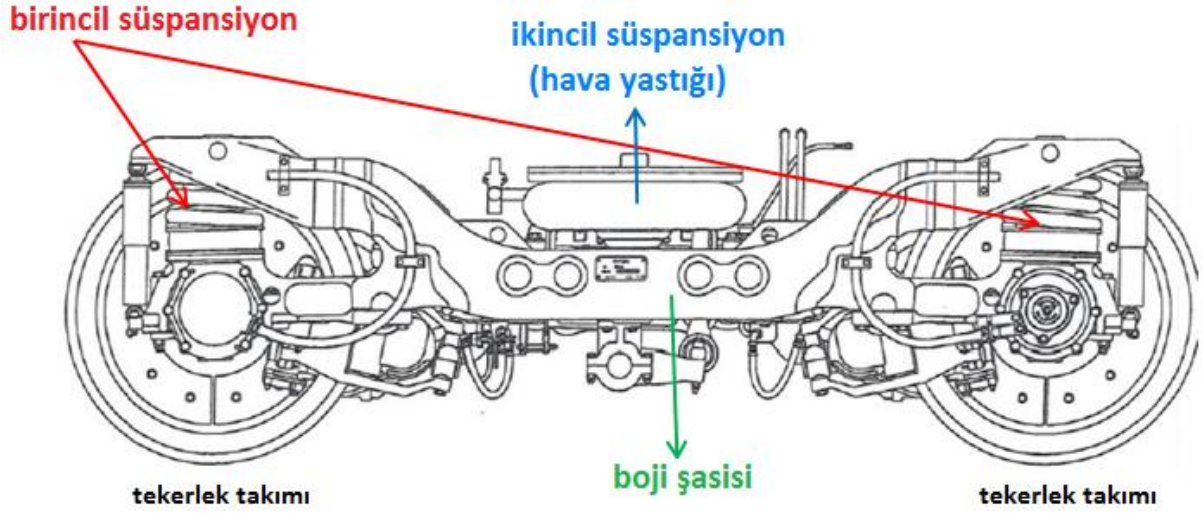
3.16(a)'da görülebildiği gibi bir bojide toplam dört adettir ve boji şasisi ile tekerlek aksı arasına konulmuştur. İkincil süspansiyon ise her bojide yalnızca bir adettir. Simit şeklindeki bu hava yastığı boji şasinin üzerine pivotun içinden geçecek şekilde konulur. Şekil 3.16(b) Hava kompresörü tarafından yastık içindeki hava basıncı tren içindeki yolcu sayısına bakılarak otomatik olarak ayarlanır.



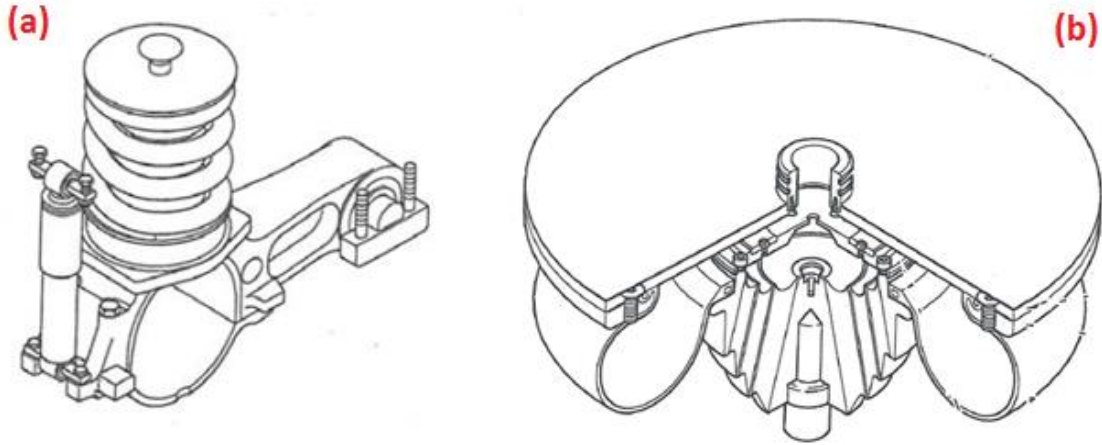
Şekil 3.13 : Tren bojisi.



Şekil 3.14 : Tekerlek takımı.



Şekil 3.15 : Tren bojisi kesit.



Şekil 3.16 : (a) Birincil süspansiyon. (b) İkincil süspansiyon.

Trenler birden fazla aracın birbirine bağlanmasıyla oluşur (Şekil 3.17). M2 hattında kullanılan setler 4 adet aracın birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Bu dörtlü setin ön ve arka uçlarında bulunan ve diğer başka bir dört set ile bağlantıyı sağlayan ekipmana otomatik kuplör denir. Bu kuplör tam otomatik olup herhangi bir manuel müdahaleye gerek kalmaksızın kuplaj veya de-kuplaj yapılabilir. Makinist kabininden kuplajın tam ve doğru olarak gerçekleştiği dijital ekranda da görülebilir. Trenin ön ve arka ucunda bulunan bu iki otomatik kuplör haricinde dörtlü set üzerinde körük altında bulunan ve yalnızca mekanik olarak birbirinden ayrılabilen (araç atölyesinde) sabit kuplörler de vardır. Dörtlü bir sette 1 tane MC1 aracında, 2 tane M aracında, 2 tane T aracında ve 1 tane de MC2 aracında olmak üzere toplam 6 adet sabit kuplör bulunmaktadır.

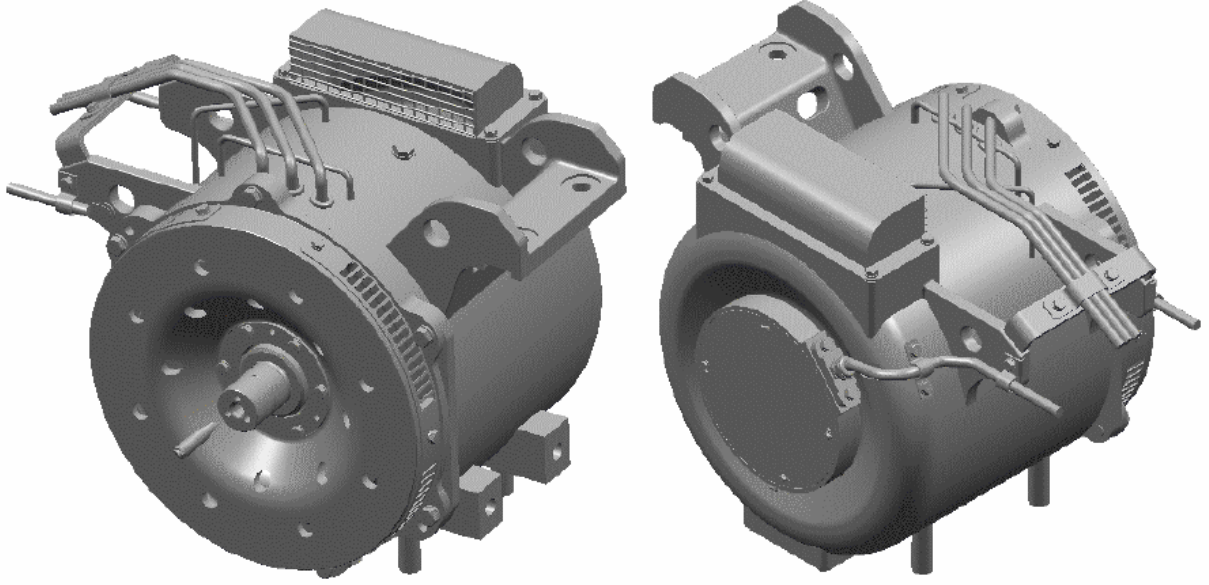


Şekil 3.17 : (a) Otomatik kuplör. (b) Sabit kuplör [7].

Trenler çok uzun olması sebebiyle araçlar birbirine körükle bağlanmıştır. Körük ayrıca trene kurbalarda (kıvrım veya viraj) esneklik kazandırır. Dörtlü set trende toplam 3 adet körük olup, yolcular bir araçtan diğerine körük üzerinden geçebilmektedir. Böyle yolcular tren içinde homojen olarak dağılması mümkündür. M2 hattı metro araçlarından yalnızca MC1, M ve MC2 araçları motorludur. T (trailer) taşıyıcı araç olup bojilerinde cer motoru bulunmaz. MC1, M ve MC2 araçlarının her birinde 2 adet boji ve 4 adet tekerlek takımı bulunmaktadır. Her bir tekerlek takımı 1 adet cer motoru ile tahrik edilmektedir. Dolayısıyla dörtlü bir tren setinden 1 araçta 4 cer motoru olmak üzere toplamda 12 adet cer motoru bulunmaktadır. Şekil 3.18 de gösterilen Hyundai-Rotem araçlarında bulunan AC cer motorlarının etiket bilgileri Çizelge 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11 : Doğrultucu ünitesine ait teknik bilgiler [7].

Tipi	3-fazlı, 4 kutuplu, Sincap Kafesli Asenkron Motor
Nominal Güç, Gerilim, Akım ve rpm	150kW, 550V, 199A, 2210rpm
İzolasyon Sınıfı	Sınıf 220
Soğutma	Kendinden Soğutmalı
Maksimum Hız	4492rpm (85 km/h 810mm tekerlekler ile)
Ağırlık	520 kg



Şekil 3.18 : 3-fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru.

Raylı sistem uygulamaları için tercih edilecek asenkron motorlar özel olarak imal edilmelidirler ve yalnızca hizmette kendini kanıtlamış sağlam malzemelerden üretilmelidirler. Böylece cer motorunun boji şasisinden tamamıyla sökülmesiyle yapılan ağır bakımların periyodu minimuma indirilmiş olur. Raylı sistem uygulamalarında kullanılan asenkron cer motorlarının;

- Çerçevesi yekpare yapıda olmalıdır.
- Stator sarımı araç işletmesi ile bağlantılı şok ve titreşimlere dayanacak yapıda olmalıdır ve sıkıca mesnetlenmelidir.
- Rotor sağlam bir yapıda olmalıdır. Yüksek titreşime ve etki eden şoklara dayanmalıdır.

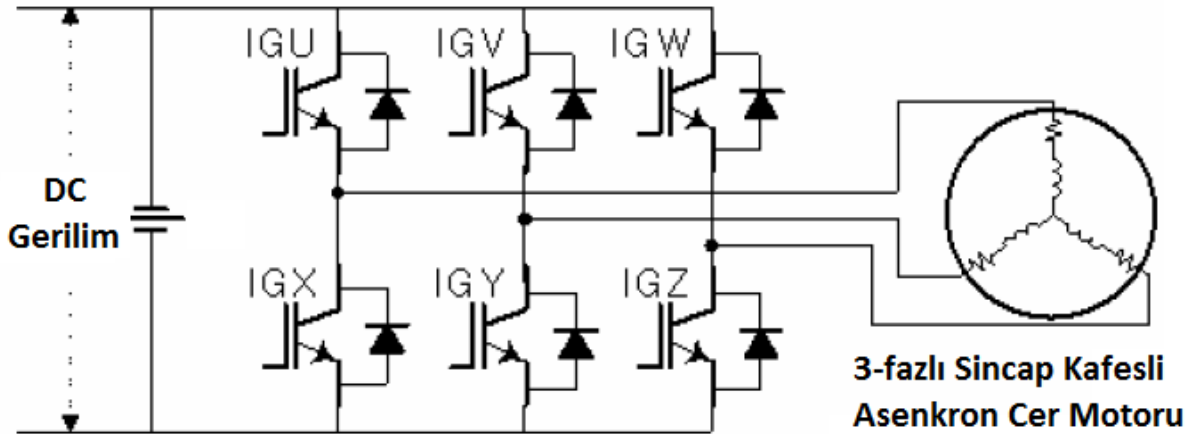
Sıralanan bu kriterlerin sağlanması raylı sistem uygulamaları için zorunludur. M2 hattında kullanılan Hyundai-Rotem araçlarının asenkron cer motorlarının yapısı ve diğer özellikleri şu şekildedir.

- Stator plaka ve çerçevesi: Stator, yüksek kaliteli, düşük elektrik kayıplı çelik levhaların baskılandırılması ile yapılmıştır. Tabaka kalınlığı 0.5mm'dir. Her tabaka inorganik bir yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Stator plakaları bükümsüz uç kısmından dışardan yerleştirilmiş ve kaynak yapılmıştır. İstiflenmiş orta kısım döküm çerçeve kullanılarak yekpare bir şekilde yerine tutturulmuştur.

- b) Stator sarımı ve yalıtımı: Yıldız noktası stator sargısı içerisinde yapılmıştır. Dikdörtgen bakırdan oluşturulmuş “elmas tipi çok sarımlı bindirme sargıdır. Yalıtım sınıfı kanıtlanmış Sınıf 200’dür. Bobinler, dışlerdeki yivlere yerleşen epoksi/cam tabakalı kamalarla yuvalarında tutturulmuştur. Soğutma yuva açıklıklarındaki oluşan hava koridorları ve kamaların arkaya doğru olan konumları ile desteklenmiştir. Sargı işleminden sonra stator toprak arası yüksek gerilimle test edilir ve fazlar arası sargılara darbe testi uygulanır. Statorun tüm plaka ve sarımı Sınıf 200 reçine içine vakum altında basınçla yerleştirilmiştir. Sargı yüksek dielektrik gücü ve termik kapasiteye haiz olup ve titreşim ve nem, kar ve kirin neden olabileceği kirlenmeye karşı korumalıdır.
- c) Rotor tertibatı: Rotorun çekirdeği de statorda kullanılan aynı malzeme kullanılarak yapılmıştır. Rotor zımbalanması mil üzerine sıcak yerleştirilir ve çekirdeğin sonunda taşmaları azaltmak için bükülmeyen uç levhalar konulmuştur. Mil yüksek dayanıma sahip çelik alaşımdan yapılmıştır. Bakır alaşımlı rotor çubuklar çekirdeğe sokulmuş ve yerlerine kilitleyecek şekilde basılmıştır. Rotor çubuklar uç noktalarına gümüş alaşımla lehimlenmiştir. Uç halkalar maksimum işletme hızına dayanacak şekilde tasarlanmıştır.
- d) Motor soğutması: Motor kendinden soğutmalıdır. Dökme alüminyum alaşımdan imal edilmiş olan havalandırma fanı mil üzerine monte edilmiş ve hareketli uç noktada bulunan rotor fan göbeğine bağlanmıştır. Havalandırma fanı, mümkün olduğunca düşük düzeyde ses yayması için tasarlanmış olan yüksek basınçlı hava veren fan tipindedir. Hava girişi statorun hareketsiz ucuna monte edilmiştir. Dışarıdaki hava motorun içine hava giriş noktasından girer ve hareketli uçta bulunan yatak konsolundaki açıklıklardan atılır.
- e) Yatak tertibatı: Yatak, hareketli uçta bulunan silindir rulman yatak ve hareketsiz uçta bulunan bir bilyeli rulmandan ibarettir. Yatakta elektrik korozyonunu engellemek için yalıtılmış yatak uyarlanmış ve dış halkanın tüm yüzeyi yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Her iki yatak da yatak gres yağı ile yağlanmıştır ve yağın periyodik olarak ilave edilmesi için gres yağı yağlayıcısı mevcuttur.
- f) Balans: Rotorda, her iki uçta da rotorun çekirdek kelepçelerinin oluklarına dengeleme kütleleri eklenerek dinamik balans sağlanmıştır.

- g) Hız algılayıcı: Hız algılayıcı temassız ve manyetik tipte olup montajı, motor üzerinde herhangi bir aralık ayarı yapılmasına gerek bırakmadan doğru hava boşluğunu sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Hız algılayıcının devir sayısı ve devir yönünü algılayan iki adet algılayıcı sistemi mevcuttur.

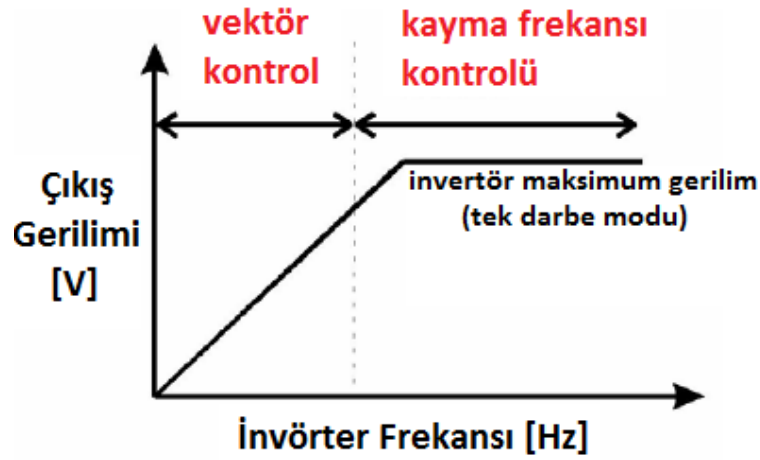
VVVF invertörün ana işlevi, DC hat gerilimini 3-fazlı asenkron motorunu çalıştırmak ve tahrik gücü yaratmak için gerekli olan 3-faz AC gerilimine dönüştürmektir. VVVF invertörü Değişken Gerilim ve Değişken Frekans (VVVF) kontrollüdür. Sistem ayrıca yalıtılmış çift kutuplu geçit transistörü (insulated gate bipolar transistors – IGBT) kullanan darbe genişliği modülasyonu (PWM) tipindedir. IGBT çıkışında 3-fazlı sinüsoidal bir gerilim almak için IGBT anahtarları farklı kombinasyonlarda sırasıyla açılır ve kapatılır (Şekil 3.19). IGBT anahtarlarının kontrolü PWM sinyal tarafından yapılır. Anahtarlama zamanı invertörün çıkışındaki taşıyıcı gerilimin temel dalga bileşeni ile senkronize olan sinüs dalgasını (modülasyona uğramış dalga) karşılaştırarak belirlenmektedir.



Şekil 3.19 : Asenkron cer motoru sürme devresi [2].

Günümüzde ulaşımın verimi açısından raylı araçların daha yüksek ivme ve hızda çalışması gerekmektedir. Bu nedenle de adhezyon kuvvetini etkili bir şekilde kullanmak her geçen gün daha önemli bir hale gelmektedir. Asenkron motorlu birçok geleneksel tahrik sisteminde kayma frekansı kontrollü sabit V/F kontrolü kullanılmıştır. Ancak bu kontrol özellikle de düşük frekanslarda çabuk tepki verememektedir ve eğimli hatlarda harekete geçme durumunda iyi bir performans göstermemektedir. Duruş halinden yüksek hız aralıklarına geçişte anlık torku kontrol edebilmesi nedeniyle vektör strateji kontrolü skalar kontrole bir alternatif oluşturabilir. Vektör kontrolü çıkış gerilimi vektörünün fazının ve genliğinin kontrolünü gerektirir. Raylı sistem aracındaki tahrik sistemleriyle ilgili olarak, irtibat

geriliminden tam yararlanabilmek amacıyla tek darbe modu kullanılmaktadır. Yüksek hızlı bölgelerde, sürüş tek darbe modunda çalışır. Tek darbe modunda, çıkış geriliminin genliği hat gerilimince belirlenmektedir. Dolayısıyla tek darbe modunda vektör kontrol stratejisini tahrik sistemine adapte etmek zordur. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, iki farklı kontrol yapısının bir tür kombinasyonu adapte edilmiştir. Düşük hızda lineer modülasyon bölgesinde, vektör kontrol stratejisi devreye sokulur ve tork kesin ve anlık bir şekilde kontrol edilebilir. Yüksek hızda tek darbe modunda, kayma frekansı kontrolü devreye sokulur ve ortalama tork ile akım kontrol edilir. Her iki kontrol stratejisinin farklı yapıları olması nedeniyle, her iki kontrol modu arasında düzgün bir geçiş sağlayabilmek için hatasız bir anahtarlama şarttır. Böylece iki kontrol modunun çıkışları aynı boyuta dönüştürülür. Geçişte kontrol değişkenleri tuhaf değişiklikleri engelleyecek şekilde ayarlanırlar. Kesin tork kontrolünün performansında vektör kontrol stratejisi kayma frekansı kontrolüne göre daha üstündür. Özellikle kayma frekansı kontrolü, başlama ve düşük frekans bölgelerinde zayıf bir performansa sahiptir. Ancak, aşırı modülasyon ve tek darbe modunda, çıkış gerilimi vektöründe özgürlük derecesinin eksikliği nedeniyle sadece kayma frekansı kontrolü olanaklıdır. Dolayısıyla iki kontrol modunun birleşimi adapte edilmiştir. Şekil 3.20 iki farklı kontrol modunun birleşimini göstermektedir. Düşük hızda lineer modülasyon bölgesinde, vektör kontrol stratejisi devreye sokulur ve tork kesin ve anlık bir şekilde kontrol edilebilir. Yüksek hızda tek darbe modunda, kayma frekansı kontrolü devreye sokulur ve ortalama tork ile akım kontrol edilir. Bir yandan harekete geçişte ve hızlanırken vektör kontrol stratejisi iyi nitelikler sağlarken, kayma frekansı kontrolü tek darbe modunda bile ortalama bir performans sergiler.

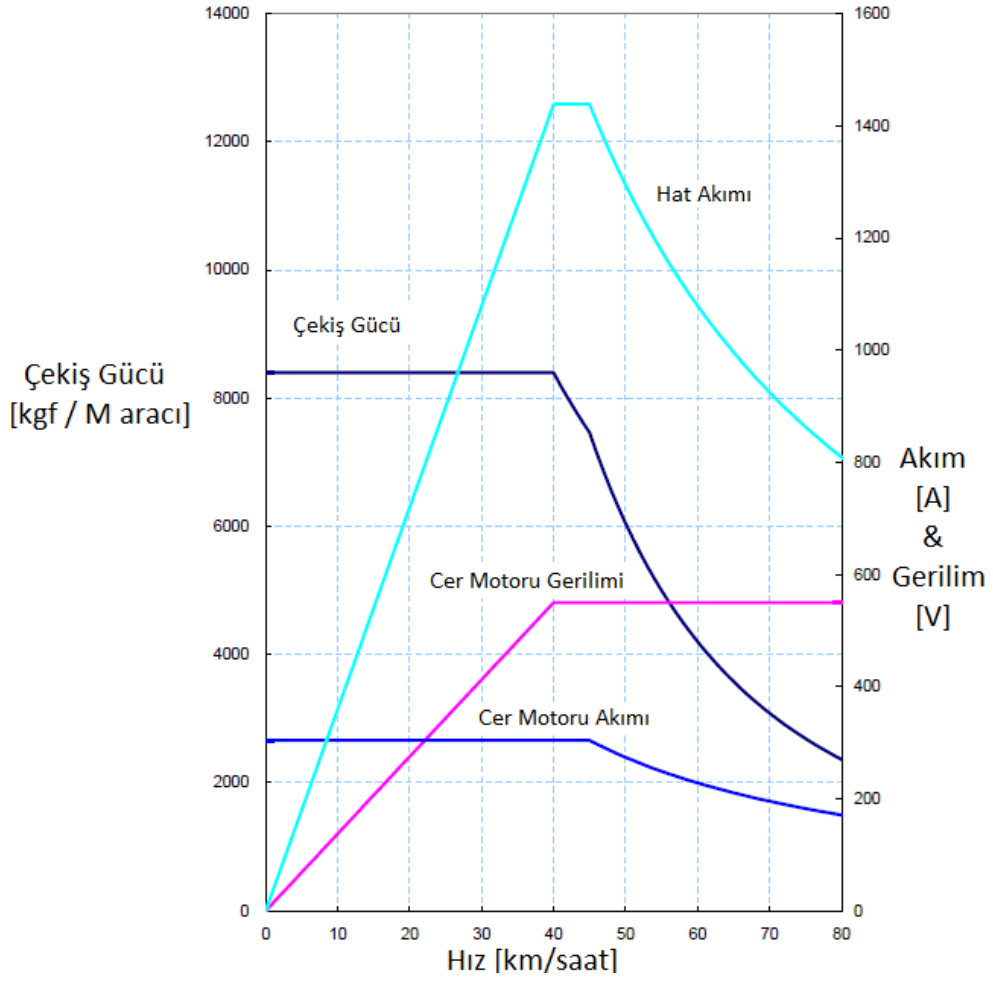


Şekil 3.20 : Vektör kontrol ve kayma frekansı kontrolü.

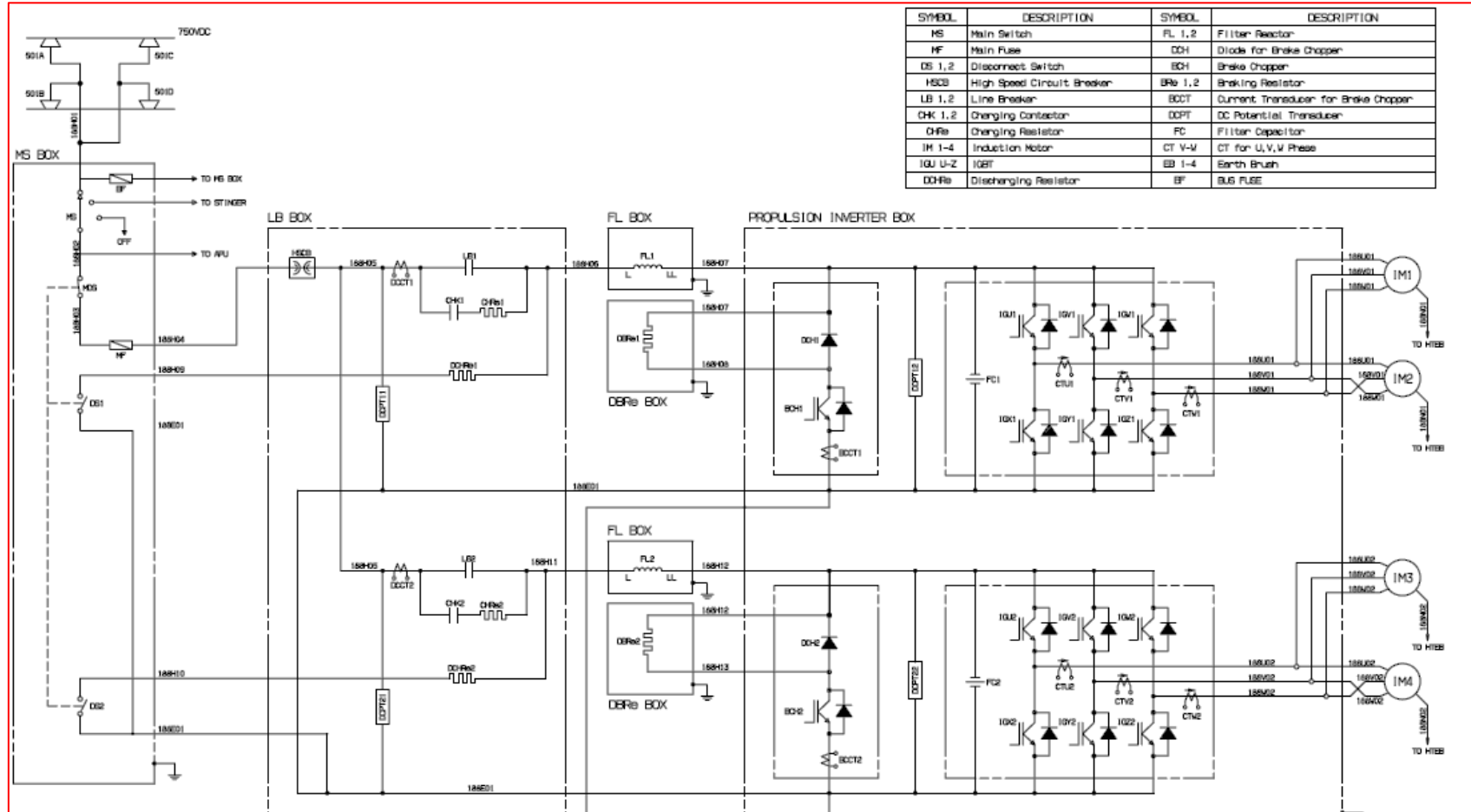
Rejeneratif frenleme treni motorları jeneratör olarak kontrol edip yavaşlatmak için kullanılmaktadır. Dönen manyetik alanın frekansı senkronize hızdan daha düşük olacak şekilde kontrol edilir. Bir başka deyimle kayma frekansı eksidir. İşletme sırasında, mekanik enerji bir jeneratörde olduğu şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Dönüş kuvveti de ters yönde etki edecek olup, bu koşullar altında motor bir jeneratör görevi görecektir ve güç hatta geri verilecektir. Eğer hatda başka bir tren yoksa rejeneratif frenlemeden elde edilen enerji fren rezistörlerinde harcanır. Asenkron cer motorunu sürme ekipmanları genel olarak Ana Şalter (MS), Ana Bağlantı Kesme Şalteri (MDS), Ana/Bara Sigortası (MF/BF), Yüksek Hızlı Devre Kesici (HSCB), Hat Kesicisi (LB/CHK), Filtre Reaktörü ve fren rezistöründen oluşmaktadır. VVVF'nin ana devresi Şekil 3.23 de gösterilmiştir. Şekil 3.21' de ise araç altına yerleştirilen IGBT kutusu gösterilmiştir. MC1, M ve MC2 araçlarının her birinde ikişer adet IGBT kutusu bulunmaktadır. Bunun yanında VVVF invertörü, ana şalter kutusu, hat kesici kutusu, filtre reaktörü, ve fren rezistörü her bir MC1, M ve MC2 aracının altına yerleştirilmiştir. 1 adet invertör 2 tane cer motorunu beslemektedir.



Şekil 3.21 : IGBT kutusu.



Şekil 3.22 : MC1, M ve MC2 araçlarına ait hızlanma performansı grafiği.



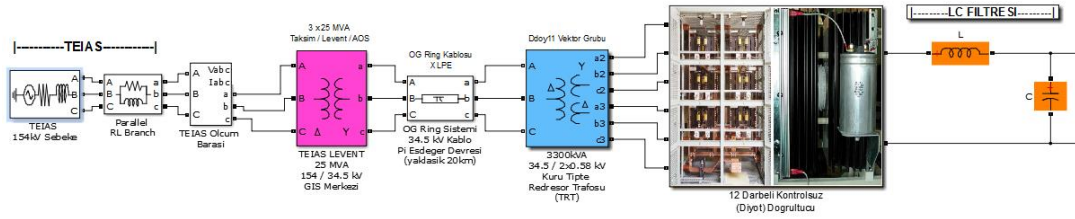
Şekil 3.23 : Cer motorları sürme devresi şematik diyagramı.

4. 750 V DC CER GÜCÜ TEDARİK SİSTEMİNİN MATLAB/PSB MODELİ

MATLAB ® Simulink bilgisayar destekli modelleme ve benzetim programı içinde bulunan Güç Sistemleri Blok Seti (PSB) kullanılarak elektrik altyapısı detaylı bir şekilde açıklanan 750 V DC cer gücü tedarik sisteminin kullanıldığı Yenikapı-Taksim-Hacıosman metrosu modellenmiş ve tren kalkış anı karakteristiklerini incelemek için çeşitli benzetimler ve analizler yapılmıştır. MATLAB ® Simulink bu tarz modelleme ve benzetim araştırmaları Kullanılan bu bilgisayar programında ilk olarak temel blok setleri kullanılarak ana alt sistemler oluşturulmuş ve daha sonra bu altsistemler birbirine bağlanarak tam bir cer gücü tedarik sistemi elde edilmiştir. Her bir alt sistem Bölüm 3' de açıklanan teknik veriler dikkate alınarak modellenmiştir.

4.1 OG Ring Sistemi ve 750 V DC Cer Gücü Temini Modeli

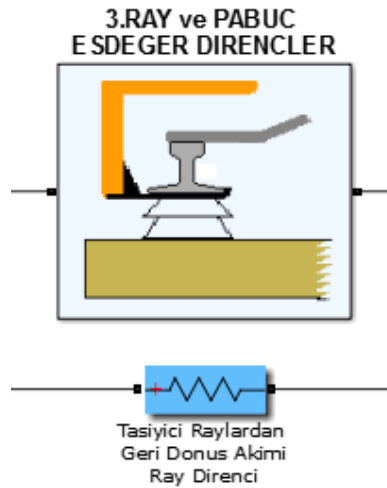
TEİAŞ'ne ait 154kV yüksek gerilim enerji iletim şebekesinden alınan enerjinin metro hattına ait orta gerilim ring sistemini beslemesi ve çeşitli adımlar sonrasında 750 V DC üçüncü ray gerilimin temin edilmesine kadar ki tüm adımlar Şekil 4.1 de gösterildiği gibi modellenmiştir. Enerji İletim Şirketinin şebekesi 154kV fazlar arası gerilime sahip 3 fazlı kaynak ve bu kaynağa seri bağlı paralel RL devresi olarak modellenmiştir. 154 kV şebekesinden alınan enerji daha sonra her biri 25 MVA gücünde olan güç trafoları üzerinden metro istasyonlarını birbirinine bağlayan 34.5 kV orta gerilim ring sistemini beslemektedir. Ring sistemine ait XLPE 34.5 kV orta gerilim kablosu pi eşdeğer devresi olarak modellenmiştir. Daha sonra her biri 3.3MVA gücünde olan redresör trafoları tarafından 34.5 kV gerilim alçaltılır ve 12 darbeli kontrolsüz doğrultucu ve LC filtereden geçirilerek düzgün bir 750 V DC gerilim elde edilir. Modelde bulunan tüm trafolar MATLAB PSB blok seti içinde bulunan hazır transformatör blokları içine gerekli veriler girerek oluşturulmuştur. 12 darbeli doğrultucu ise 2 adet birbirine paralel bağlı üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu olarak modellenmiştir.



Şekil 4.1 : 750 V DC üçüncü ray besleme gerilimi elde edilmesi modeli.

4.2 Akım Toplama Sistemi Modeli

Elde edilen 750 V DC gerilim taşıyıcı raylara paralel olarak konumlandırılmış ve hat boyunca devam eden üçüncü bir ray üzerinden trene iletilir. Üçüncü ray kesiti 9489.5 mm² olan ve 11.64 mOhm/km lik dirence sahip az karbonlu çelik bir malzemedir. Birbirine seri bağlı bir direnç ve bir endüktans ile modellenmiştir. Bir adet blok seti hattın 1 km lik kısmını simgelemektedir. Eşdeğer direnç 11.64 mΩ olarak alınmıştır. [5] Sistemde cer akımının geri dönüşü taşıyıcı raylar üzerinden olmaktadır. Taşıyıcı raylar ise 12mΩ/km eşdeğer dirence sahip olacak şekilde direnç olarak modellenmiştir. Şekil 4.2 de akım toplama sistemine ait model blokları gösterilmiştir.

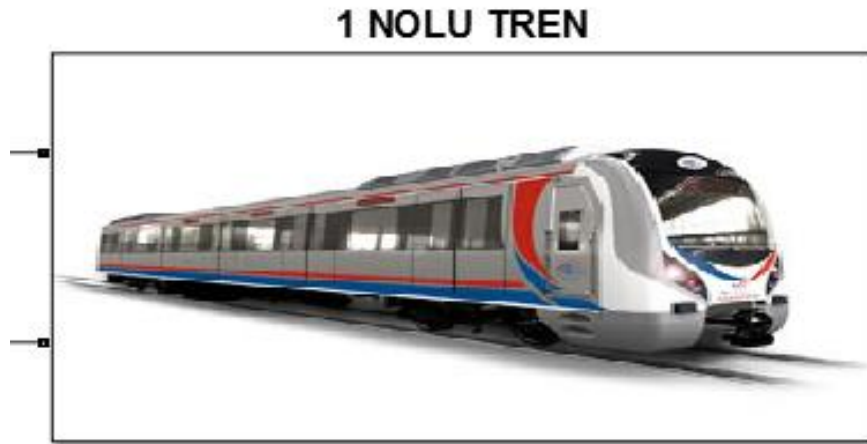


Şekil 4.2 : Üçüncü ray, kolektör pabucu ve taşıyıcı rayların modeli.

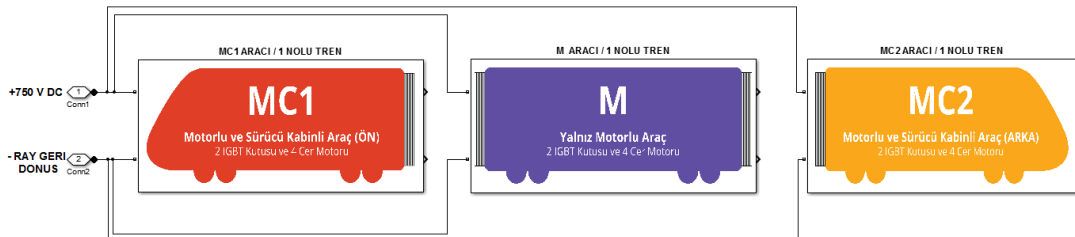
4.3 Trenin ve Sürüş Sisteminin Modeli

M2 hattında kullanılan trenler MC1+T+M+MC2 olmak üzere her biri 4 araçtan ve 8 bojidenden oluşan dördü bir set olduğu için bu şekilde modellenmiştir (Şekil 4.3). Bu 4

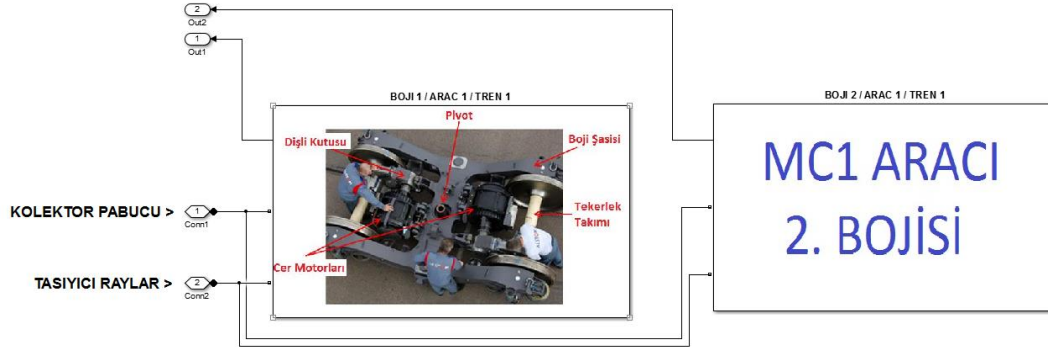
araçtan yalnızca 3 ünde cer motoru bulunmaktadır. T aracı taşıyıcı araç olup bojileri motorlu değildir. Motorlu olan 3 aracın (MC1, M ve MC2) toplam 6 bojisinden her birinde 2 adet 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru bulunmaktadır. Modellemede bu durum dikkate alınarak gerçeğe olabildiğince yakın olması için tren bloğu oluşturulmuş ve blok içinde MC1, M ve MC2 araçları modellenmiştir (Şekil 4.4). Daha sonra her bir araç bloğunun içine 2 adet boji yerleştirilmiş (Şekil 4.5) ve her bir boji bloğunun içine ise 1 adet IGBT ünitesi ve 2 adet AC cer motoru yerleştirilmiştir (Şekil 4.6). AC cer motorlarının her biri 150kW (200HP) gücündedir ve parametreleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’ da sırasıyla oluşturulan tüm bloklar gösterilmiştir. Şekil 4.8 ise tam sistem modelini göstermektedir. Araç bojisi üzerindeki kolektör pabucları vasıtasıyla alınan gerilim IGBT invertörü tarafından 3 fazlı AC gerilime dönüştürülür. Araçlar üzerindeki tüm elektrik sistemler 60 Hz temel frekansına sahiptir. IGBT invertörü modülasyon faktörü 0.83 ve taşıyıcı üçgen dalga frekansı 1440Hz olan sinüsoidal PWM sinyali tarafından kontrol edilmektedir. Motor momenti motor çıkışından alınan hız [rad/s] bilgisine bağlı olarak N.m. cinsinden belirlenir.



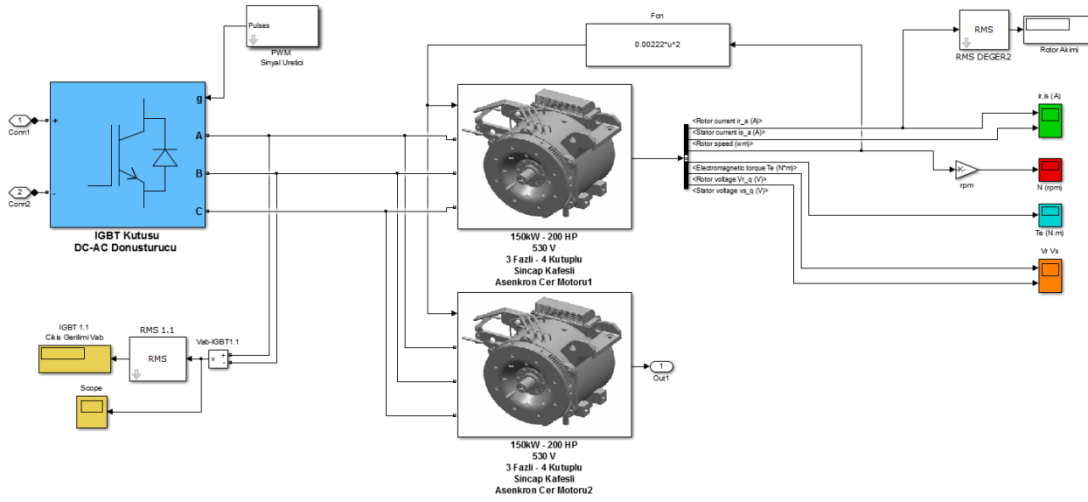
Şekil 4.3 : Tren ana bloğu.



Şekil 4.4 : MC1, M ve MC2 araçlarını gösteren alt blok.



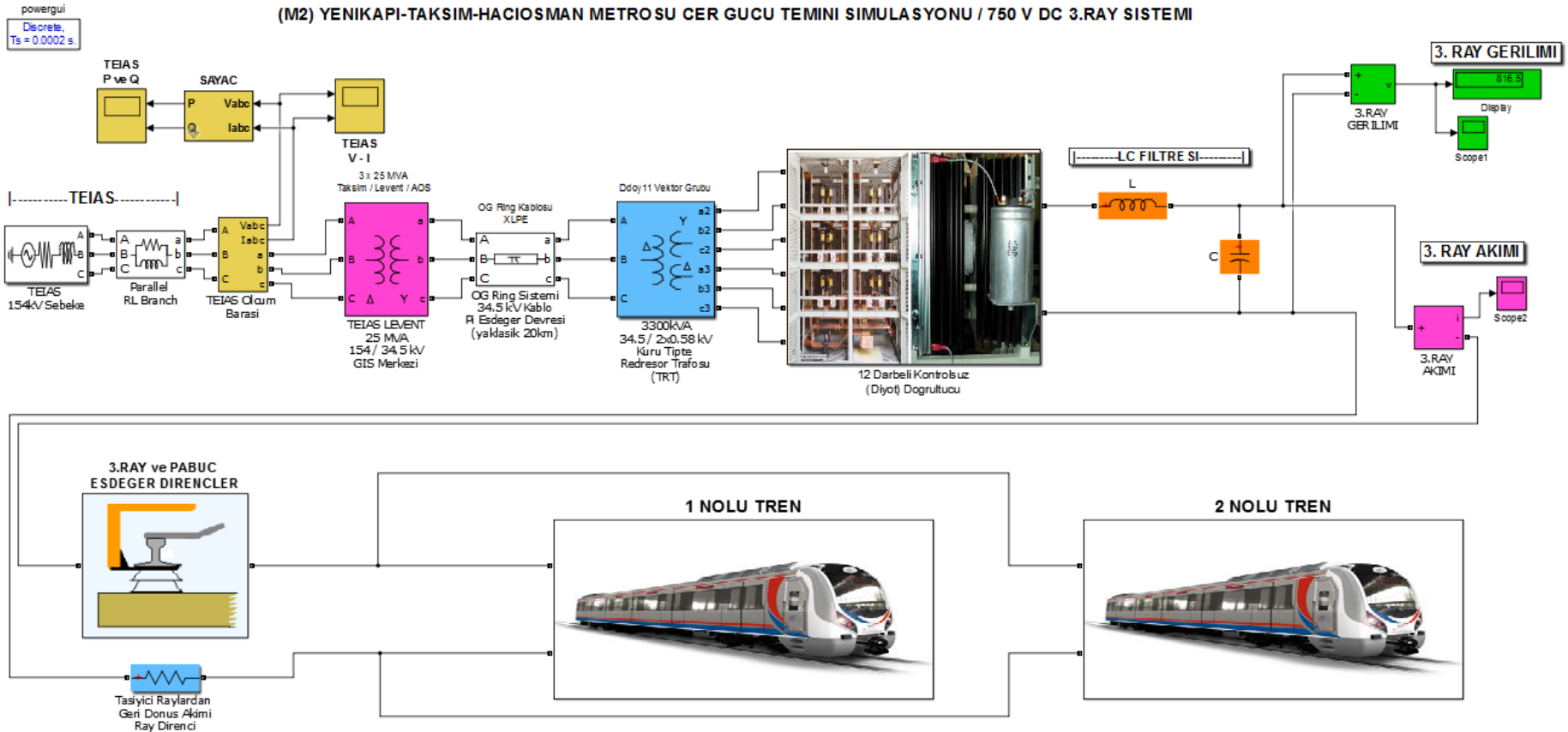
Şekil 4.5 : Herbir araçta bulunan 2 adet bojiyi simgeleyen alt blok.



Şekil 4.6 : IGBT ünitesi ve cer motorları blokları.

Configuration	Parameters	Advanced	Load Flow
Asynchronous Machine (mask) (link)			
Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.			
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:			
[200*746, 530, 60]			
Stator resistance and inductance[Rs(ohm) Lls(H)]:			
[0.087 0.8e-3]			
Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:			
[0.228 0.8e-3]			
Mutual inductance Lm (H):			
34.7e-3			
Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:			
[1.662 0.1 2]			
Initial conditions			
[1,0 0,0,0 0,0,0]			
<input type="checkbox"/> Simulate saturation			
Saturation Parameters [i1,i2,... (Arms) ; v1,v2,...(VrmsLL)]			
[1, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]			

Şekil 4.7 : 150kW 3 fazlı, sincap kafesli asenkron cer motoru veri giriş ekranı.



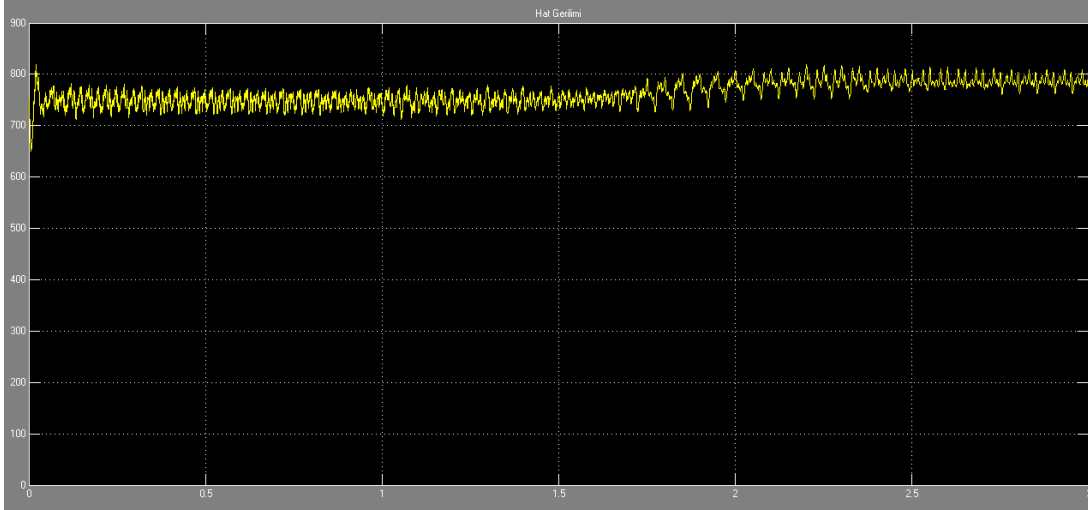
Şekil 4.8 : Tam sistem modeli.

5. BENZETİM SONUÇLARI VE ANALİZİ

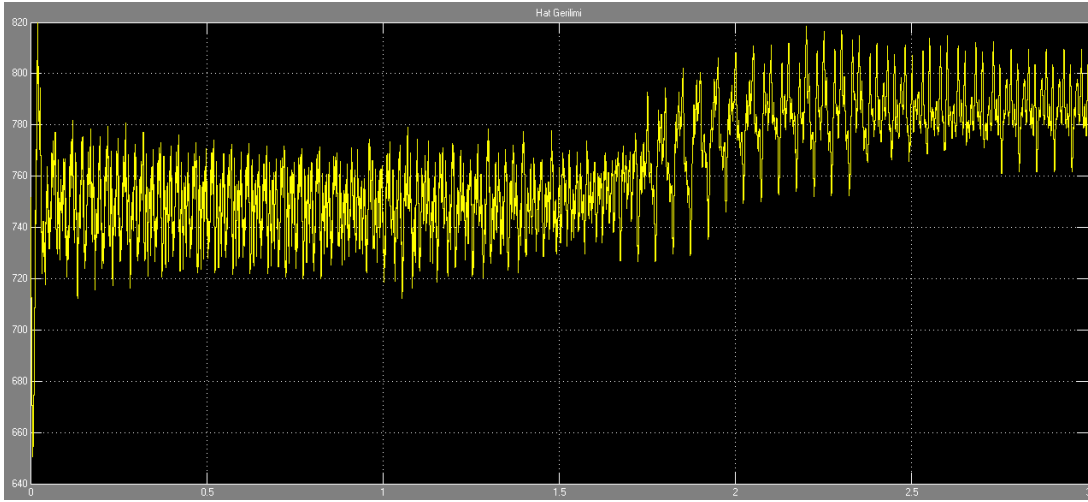
Yapılan model her ne kadar cer gücü tedarik sistemine ait tüm alt sistemleri içerse de komple bir metro hattının modelini oluşturmak ekipman sayısının aşırı derecede fazla olması sebebiyle oldukça zordur. Fakat DC sistemlerde tren hattı bölgelere ayrıldığı için komple tren hattı yerine sadece bir bölgeyi incelemek modelleme ve benzetim için daha kolay olacaktır. Bu araştırmada trenlerin kalkış anındaki karakteristikleri incelendiği için tren hattının sadece belirli bir bölgesinde bulunan ve aynı anda iki adet 4'lü tren setinin kalkış yaptığı durum analiz edilmiştir. Bu duruma örnek olarak aynı istasyondan aynı anda farklı yönlere hareket eden iki tren seti verilebilir. Fakat oluşturulan modelin pratikliği sebebiyle istenildiği an redresör trafosu, doğrultucular ve trenlerin sayısı rahatlıkla artırabilir, tüm parametreler istenildiği şekilde kolayca değiştirilebilir ve benzetim tekrarlanabilir. Arzu edildiği takdirde iki adet 4'lü tren seti birbirine eküple edilerek 8'li tren setleri oluşturulabilir ve analiz 8'li tren setleri kullanılarak da yapılabilir.

5.1 Trenin Kalkış Durumunun İncelenmesi

Yalnızca tren kalkış anı durumları incelendiği için yapılan model üzerinde benzetim ve analiz 3 saniye boyunca yapılmıştır. Cer motorları yaklaşık 2.5 saniye içinde yol almasını gerçekleştirmekte 1750 rpm hızına ulaşmaktadır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de gösterilen üçüncü ray gerilimi beklenildiği gibi başlangıçta düşük değerde olup trenlerin kalkışlarını gerçekleştirdiği zamandan itibaren yükselerek 790 Volt bandında hareket etmektedir. Görülen maksimum üçüncü ray gerilimi 820 Volt olup EN 50163 standartına göre kalıcı en yüksek gerilim değeri olan 900 Volt değerinin altındadır [3]. Üçüncü rayda görülen en düşük gerilim seviyesi ise 2 adet tren seti için 650 Voltdur. Bu değerde aynı standartta belirtilen kalıcı en düşük gerilim seviyesi değerinden büyük olması sebebiyle sınırlar içinde ve normaldir.



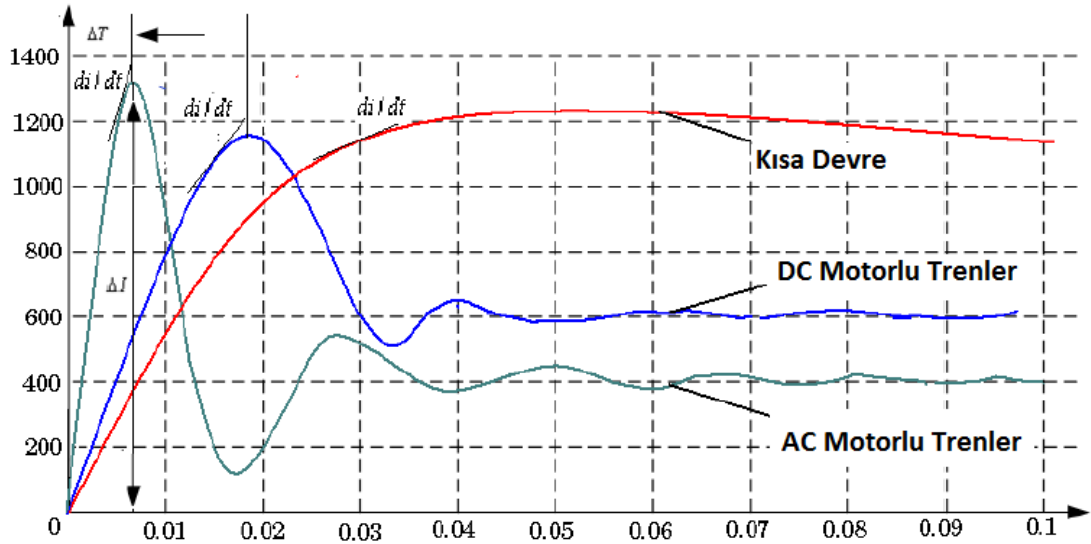
Şekil 5.1 : Üçüncü ray gerilimi.



Şekil 5.2 : Üçüncü ray gerilimi (büyütülmüş görüntü).

Şekil 5.3' de ise üçüncü ray toplam akımı gösterilmiştir. Benzetimde her iki trende aynı hatdan beslendiği için bu akım değeri her iki trenin çektiği toplam akımdır. Beklendiği gibi başlangıçta çekilen akım oldukça yüksek olup tepe değer olarak anlık 7000 A görülebilmektedir (Şekil 5.4 ve 5.5). Benzetim ve analizi yapılan iki trenin aynı anda aynı bölge içinde kalkış yaptığı durum, elektrik güç ihtiyacının oldukça büyük olması sebebiyle en kötü senaryolardan biridir. Yenikapı-Taksim-Hacıosman metrosu tasarım olarak hatda 8'li tren setleri kullanımı düşünülerek yapıldığından bu durum herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Her bir istasyonda 3300kVA gücünde 2 adet redresör trafosu bulunmaktadır. Bir bölgeyi besleyen birçok redresör trafosu da olduğu için güç yetersizliğinden ötürü herhangi bir açma yaşanmayacaktır. Yalnız bazı durumlarda tren kalkış akımlarının 7000 A gibi çok yüksek değerleri görmesi

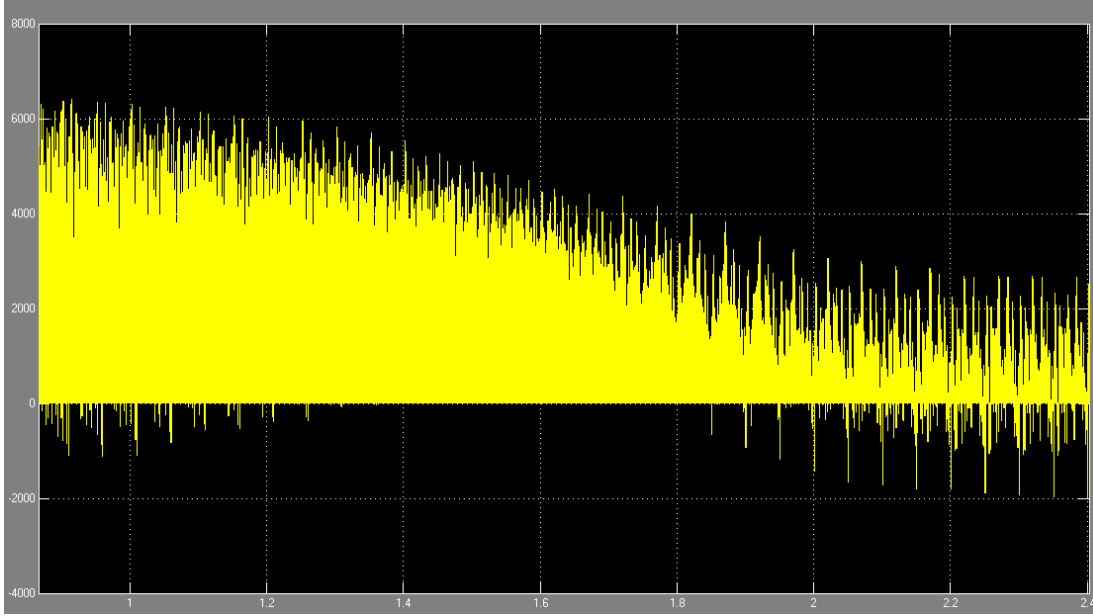
sebebiyle hat koruma röleleri bu durumu kısa devre hatası olarak görebilmekte ve kesicilere açma komutu verebilmektedir. Bu sebeple iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan klasik hat koruma röleleri metro sistemlerinde efektif çalışmaz [4]. Şekil 5.3’ de gösterilen hat akımı-zaman grafiği gibi karakteristiğe sahip olan durumlarda klasik koruma röleleri hattı açar. Raylı sistemlere adapte edilmesi gereken koruma yöntemleri trenlerin akım-zaman grafiğinde üç farklı parametreyi dikkate almak zorundadır. Bunlar di/dt akımın zamana göre yükselmesi, ΔI akımdaki değişim ve ΔT akımın tepe değerine ulaşma süresi. Raylı sistemlerde trenlerin kalkış akımları karakteristik olarak di/dt ve ΔI değerleri oldukça yüksektir. Şekil 5.5’ de görülebildiği gibi benzetimi yapılan 2 trenin aynı anda kalkış yaptığı durumda 2ms den kısa sürede hat akımı 4000 A seviyelerine ulaşmaktadır. Adapte edilecek olan koruma sistemi bu olayı dikkate almalı ve kısa devre hata akımı ile tren kalkış anı akımlarını ayırt edebilecek özellikte olmalıdır [4].



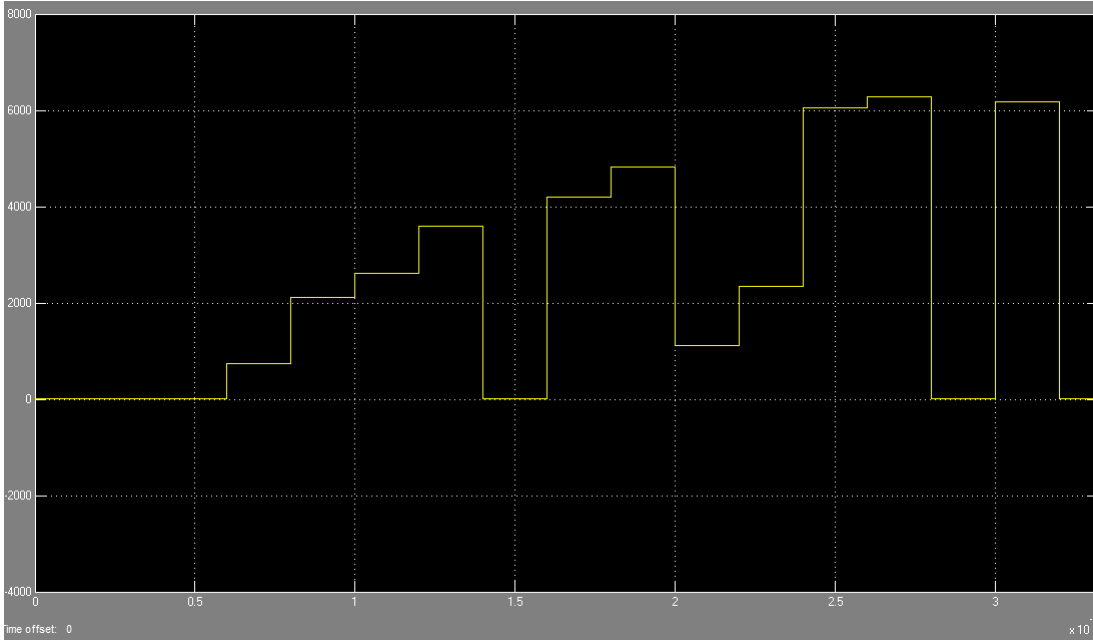
Şekil 5.3 : Kısa devre ve tren kalkış anı akım-zaman grafiği karşılaştırması [4].

Şekil 5.4’ de görülebildiği gibi tren kalkış anında 5000 A seviyelerinde olan hat akımı daha sonrasında ortalama 1500 A civarında olmaktadır. Şekil 5.6’ da yalnızca tek bir trenin kalkış durumundaki akım-zaman grafiği gösterilmiştir. 3500 A seviyesinde olan kalkış anı akımı yaklaşık 2.5 saniye sonra ortalama 750 A civarında olmaktadır. Bu iki akım-zaman grafiği incelendiğinde özellikle 750 V DC gibi düşük gerilim seviyelerinin kullanıldığı metro sistemlerinde normal durumda dahi kalkış akımlarının oldukça yüksek değerde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla oluşacak olan kayıplarda oldukça yüksektir. Bu sebeple yeni yapılmakta olan metro hatlarında

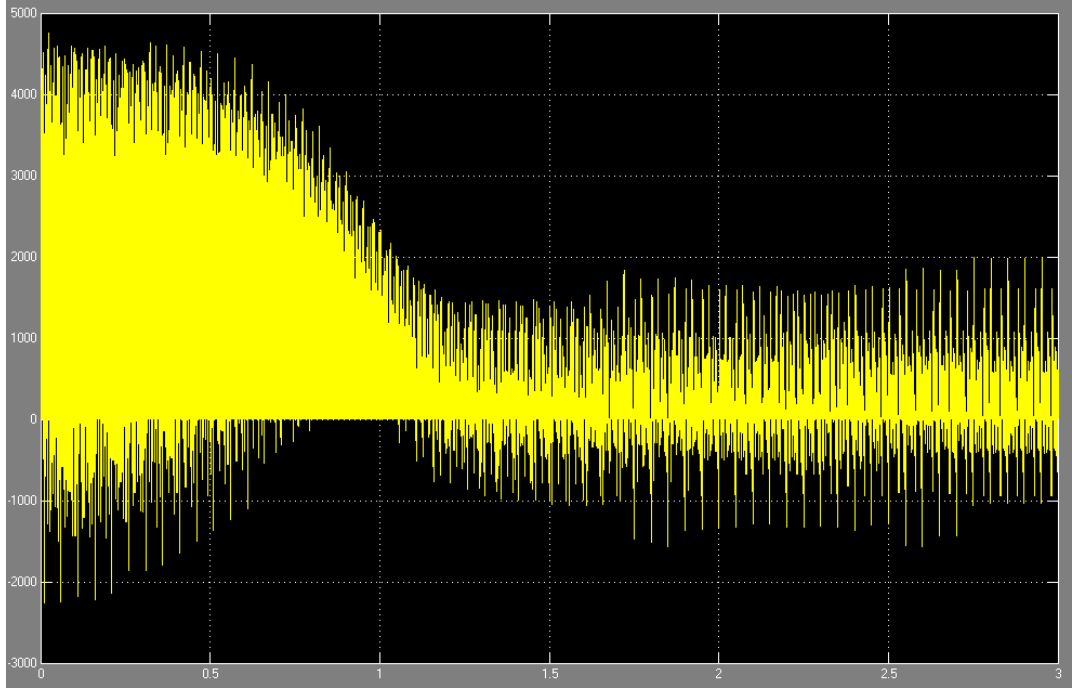
1500 V DC hat gerilimi yaygın olarak tercih edilmektedir [1]. 1500 V DC sistemde 750 V DC sisteme göre yaklaşık %15 daha az enerji kaybı oluşmaktadır [1].



Şekil 5.4 : İki trenin aynı anda kalkış yaptığı durumda akım-zaman grafiği.

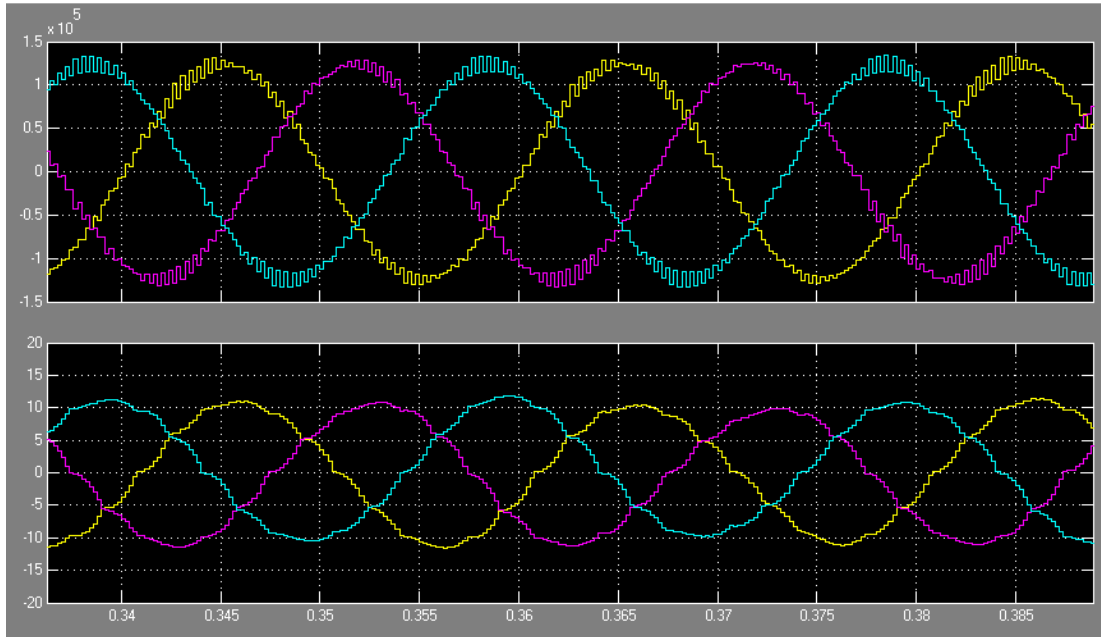


Şekil 5.5 : Hat akımı (büyütülmüş görüntü).



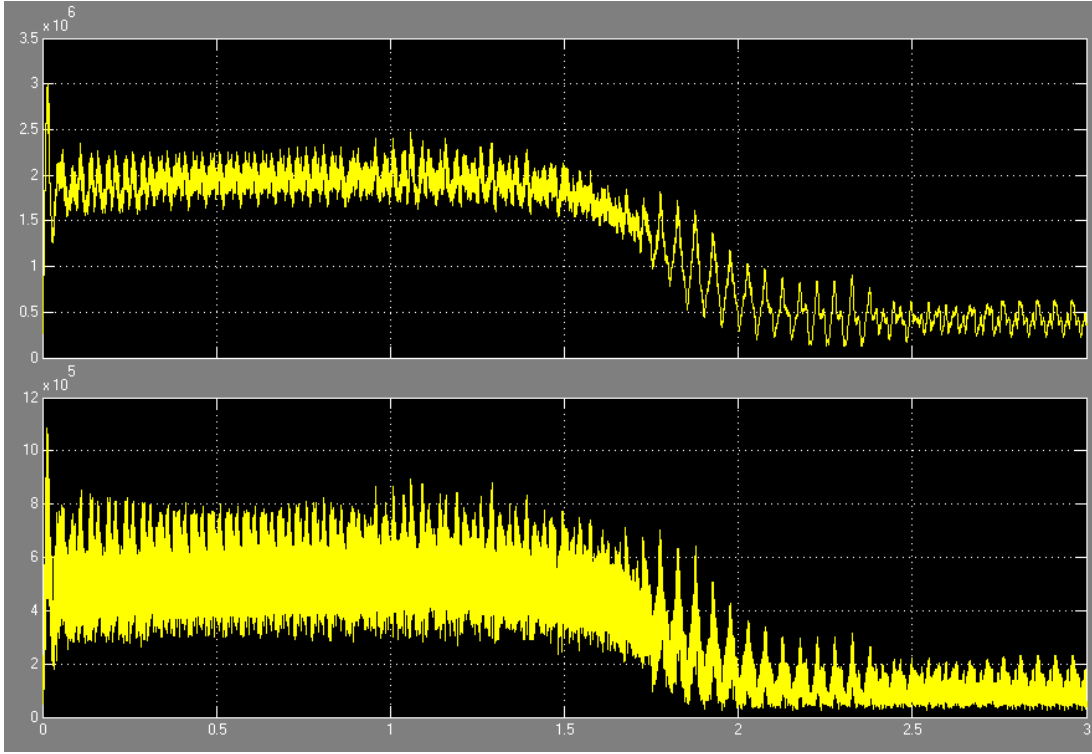
Şekil 5.6 : Yalnızca tek bir trenin kalkış yaptığı durumda akım-zaman grafiği.

Şekil 5.7’de ise TEİAŞ barasından alınan ölçümler gösterilmiştir. Başlangıç durumunda çekilen anlık akımın tepe değeri 16 A, sonrasında ise 10 A seviyelerinde olmaktadır. Trenler kalkışını gerçekleştirdikten sonra çekilen akımın tepe değeri 2.5-3 A seviyelerinde olmaktadır. Akım-zaman ve gerilim-zaman grafiklerinden de anlaşıldığı gibi dalgalar oldukça harmoniklidir. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de FFT analizi sonuçlarında akım ve gerilim harmonik değerleri gösterilmiştir.

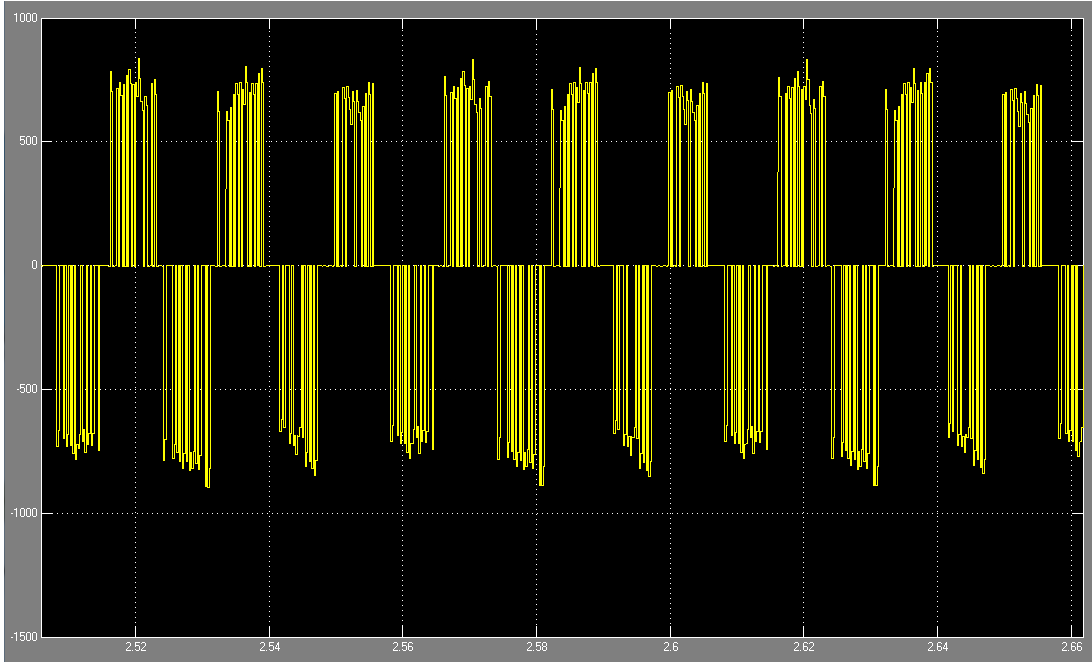


Şekil 5.7 : TEİAŞ 154kV barası gerilim-zaman ve akım-zaman grafikleri.

Şekil 5.8’de trenlerin çektiği toplam aktif ve reaktif güçler anlık olarak gösterilmiştir. Kalkış anından sonra trenlerin şebekeden çektiği güç ciddi oranda azalmıştır. Şekil 5.9’da ise IGBT invertörüne ait fazlar arası çıkış gerilimi gösterilmiştir.

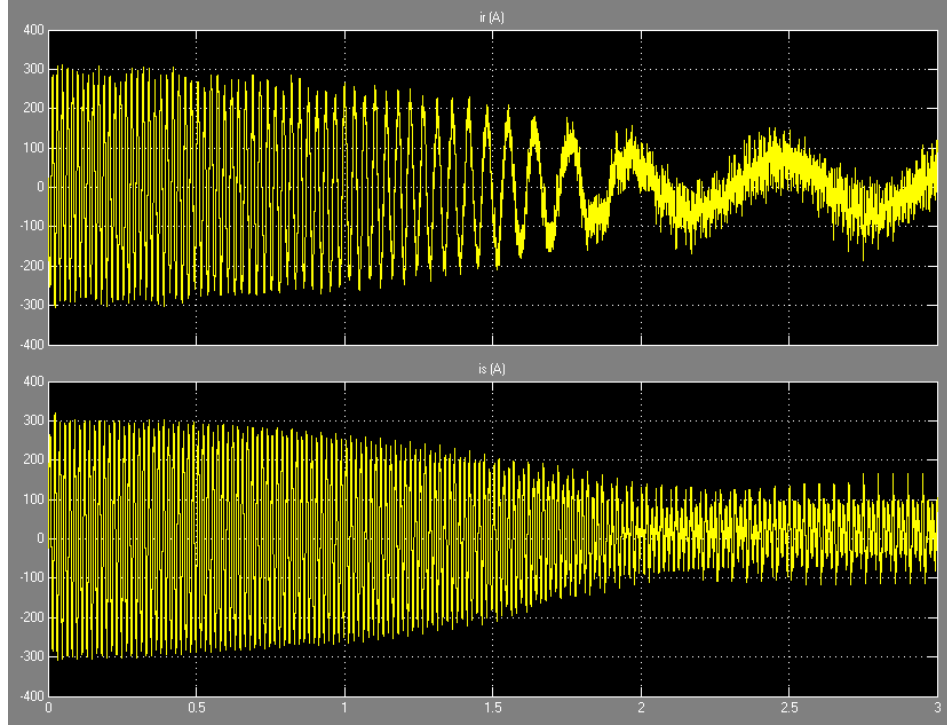


Şekil 5.8 : TEİAŞ 154kv barasından çekilen aktif ve reaktif güçler.

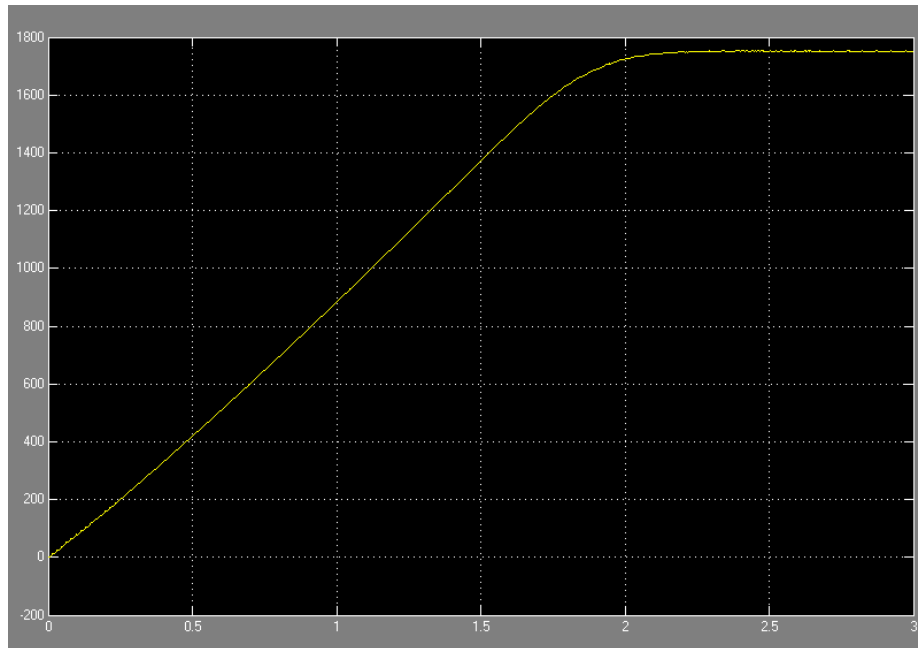


Şekil 5.9 : IGBT çıkışı fazlar arası gerilim.

Şekil 5.10'da cer motorlarından sadece birine ait rotor ve stator akımları gösterilmiştir. Başlangıçta 60 Hz frekansta tepe değeri yaklaşık 300 A olan rotor akımı kararlı hal durumunda tepe değeri yaklaşık 120 A değerine düşmektedir Şekil 5.11 ise cer motoruna ait hız-zaman grafiğini gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 2.2 saniye sonra cer motoru 1750 rpm kararlı haldeki hızına ulaşmaktadır.

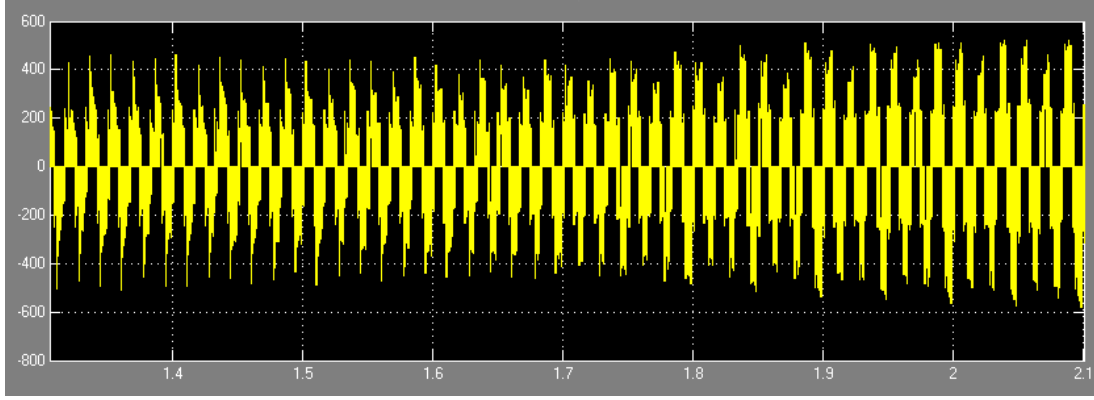


Şekil 5.10 : Cer motoru rotor ve stator akımları.

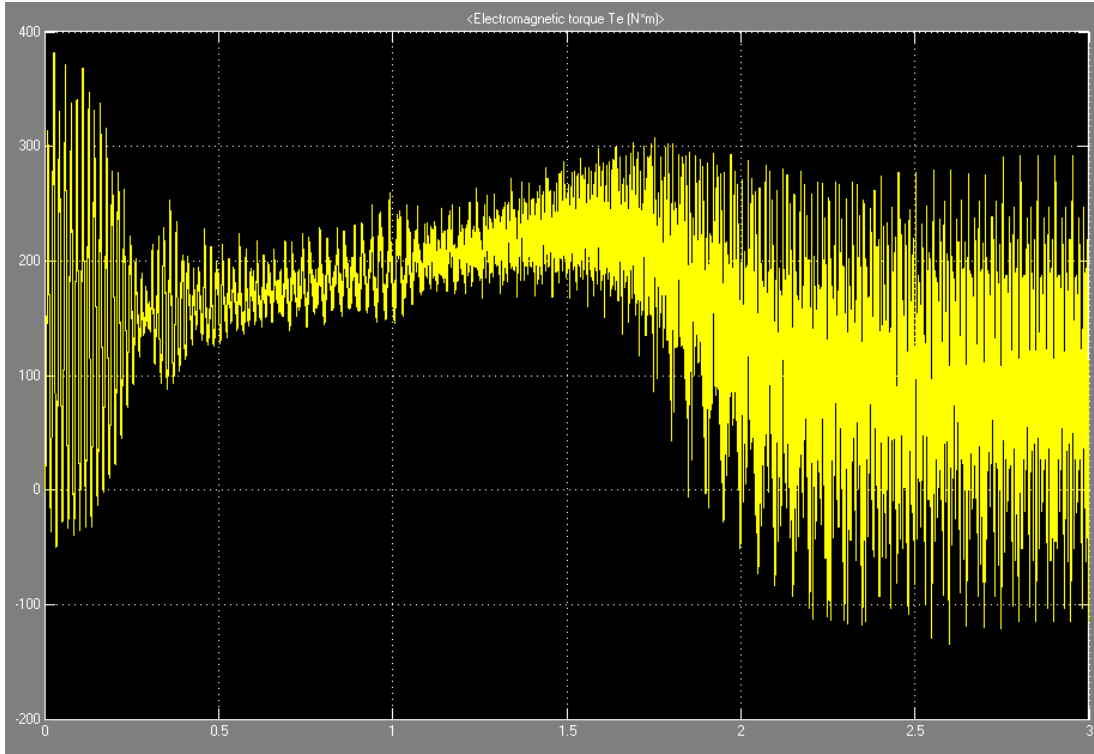


Şekil 5.11 : Cer motorunun hız-zaman grafiği.

Şekil 5.12 cer motorunun stator gerilimini, Şekil 5.13 ise elektromanyetik tork zaman grafiğini göstermektedir. Kalkış anından kararlı hale varıncaya dek elektromanyetik tork değerinin oldukça güçlü osilasyonlar içermekte olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12 : Cer motoru stator gerilimi.

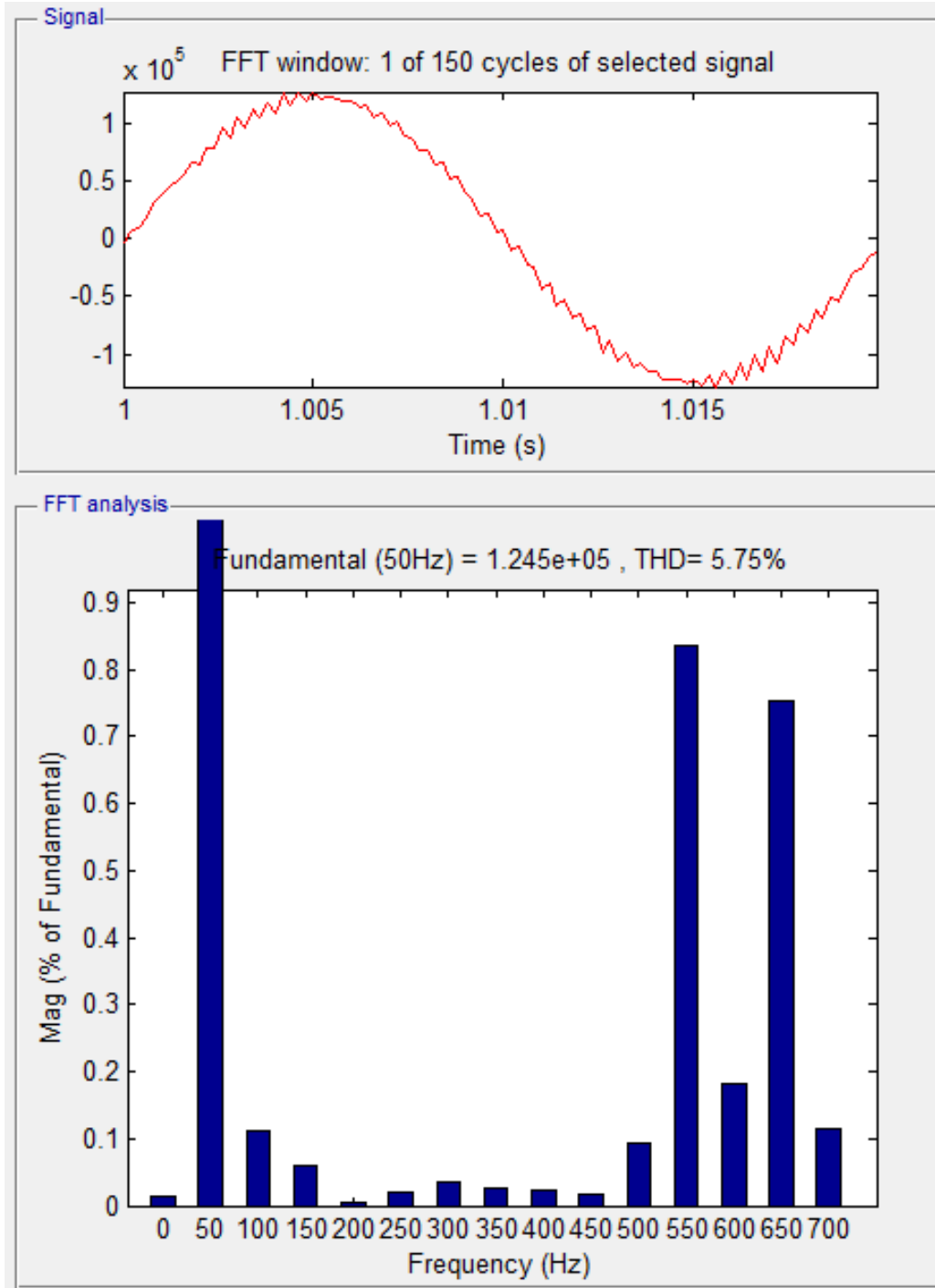


Şekil 5.13 : Elektromanyetik tork ve zaman grafiği.

5.2 Harmonik (FFT) Analizi Sonuçları

Simulink içerisinde bulunan Powergui bloğu aracı yardımıyla Enerji İletim Şirketinin 154kV barasında görülen gerilim (Şekil 5.14) ve akım (Şekil 5.15) dalgalarının

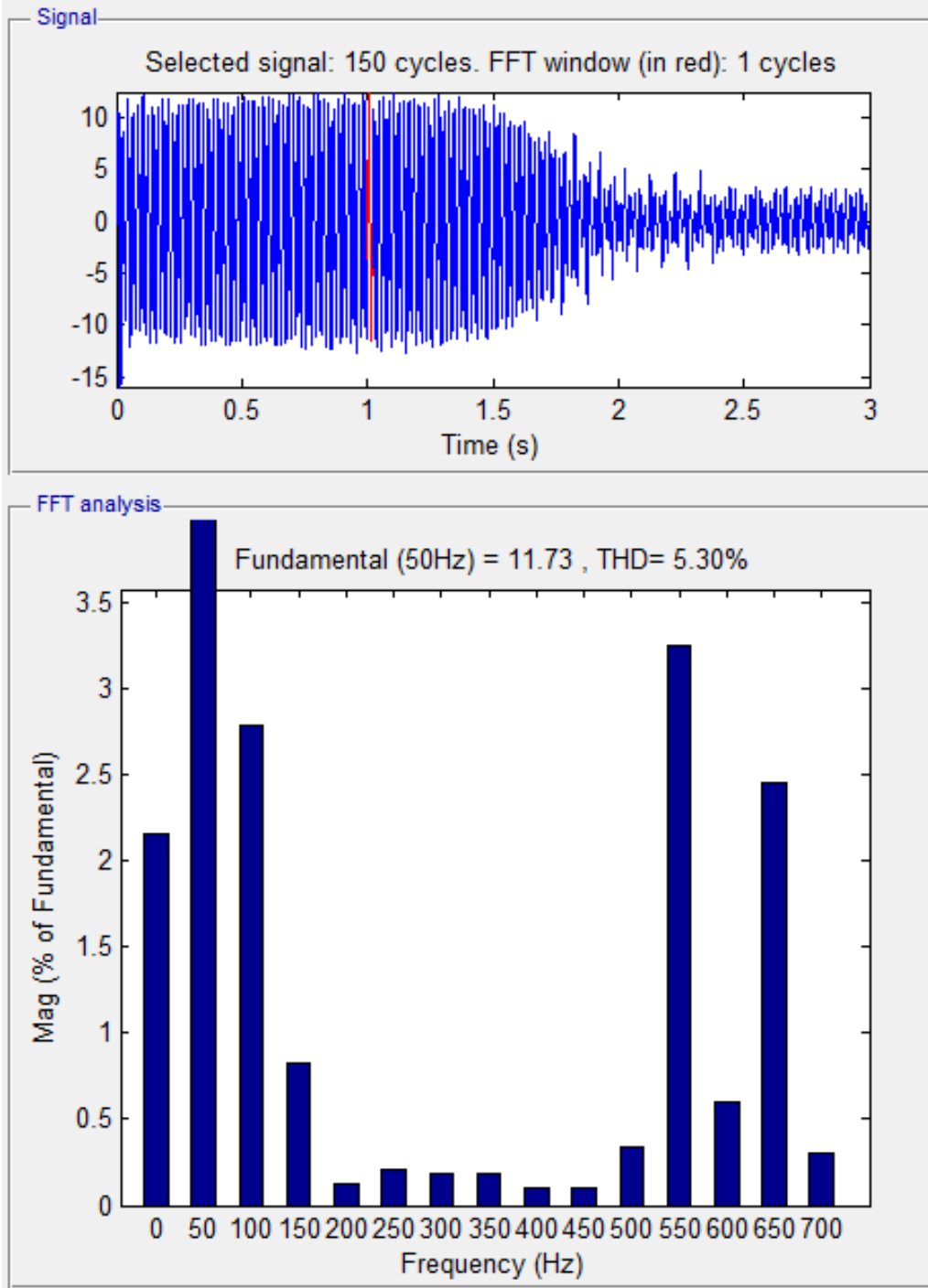
frekans spektrumu ile cer motorunun rotor (Şekil 5.16) ve statoruna (Şekil 5.17) ait akım dalgasının frekans spektrumu çıkartılmıştır.



Şekil 5.14 : 154 kV barası gerilim dalgası frekans spektrumu ekran görüntüsü.

154 kV barasında ölçülen gerilim dalgasının toplam harmonik bozunumu değeri %5.75 olarak ölçülmüştür. 750 V DC cer gücü dağıtım sisteminde 12 darbeleri kontrolsüz doğrultucu kullanıldığı için beklenildiği gibi 11. ve 13. Harmonik

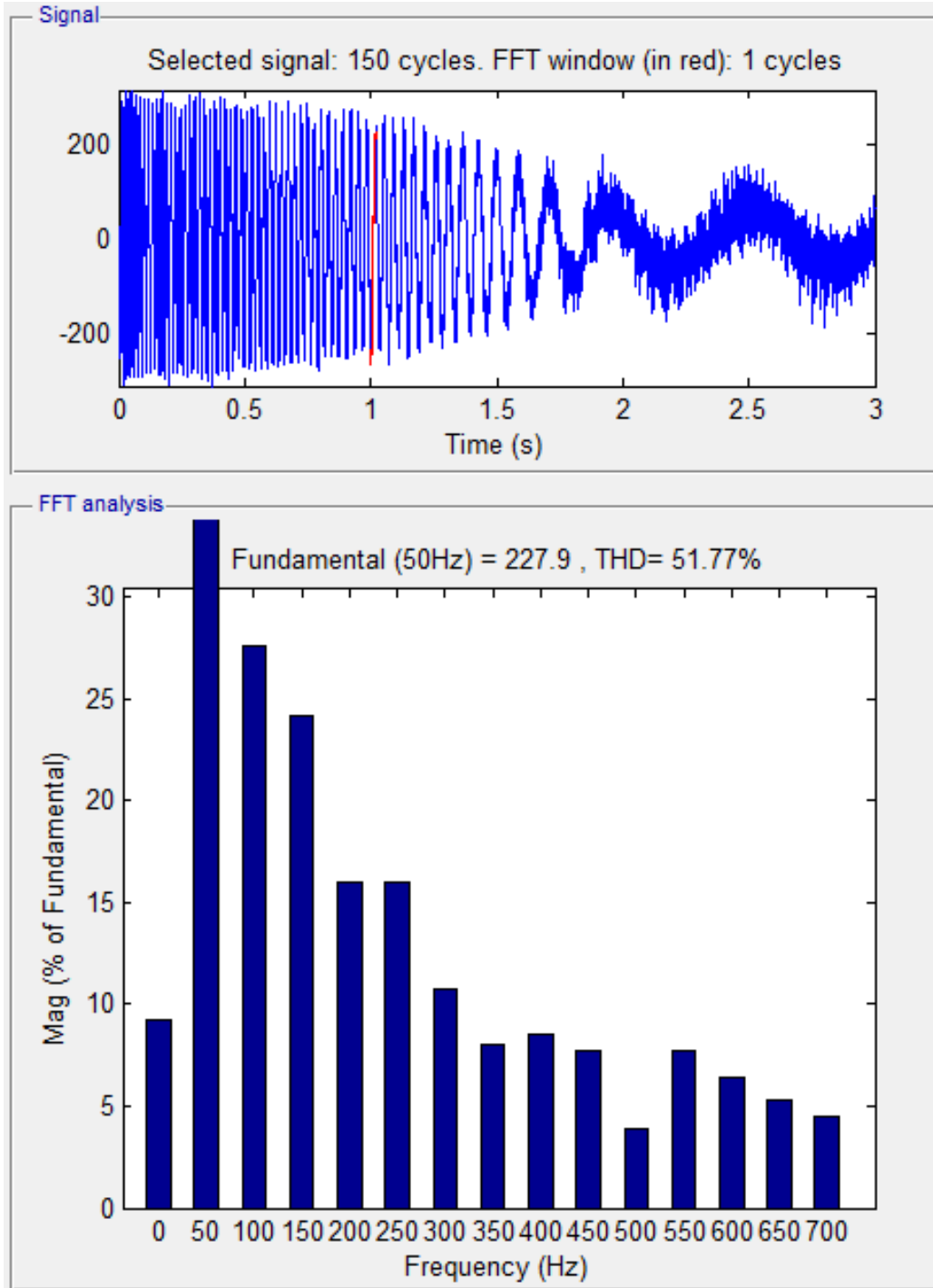
bileşenler oldukça yüksektir. 11. Harmonik bileşeninin genliği %0.84 ve 13. Harmonik bileşeninin genliği ise %0.75 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.15 : 154 kV barası akım dalgası frekans spektrumu ekran görüntüsü.

Aynı şekilde TEİAŞ 154 kV barasında ölçülen akım dalgasının toplam harmonik bozunumu değeri %5.30 olarak ölçülmüştür ve yine gerilim dalgasında olduğu gibi 11. ve 13. Harmonik bileşenler temel bileşene göre oldukça yüksektir. 11. Harmonik bileşeninin genliği %3.25 ve 13. Harmonik bileşeninin genliği ise %2.46 olarak

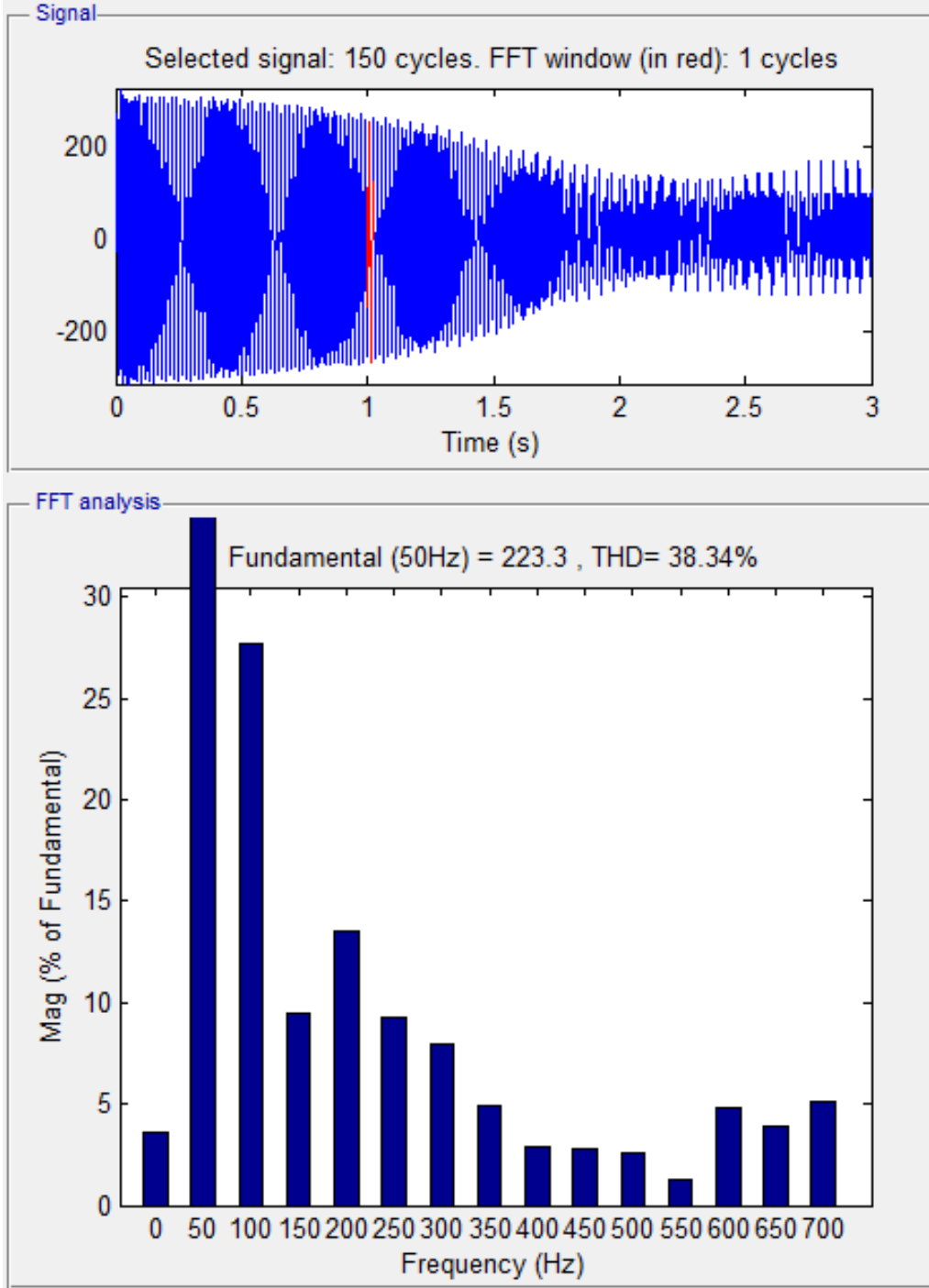
ölçülmüştür. Akım dalgasına ait frekans spektrumunda gerilim dalgasından farklı olarak %2.16 lık DC bileşen de görülmektedir.



Şekil 5.16 : Cer motoru rotor akımı frekans spektrumu ekran görüntüsü.

150 kW gücünde 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoruna ait rotor akımı toplam harmonik bozunum değeri %51.77 olarak görülmüştür. Frekans spektrumuna bakıldığında dalganın oldukça harmonikli olduğu görülmektedir. DC bileşen ve çift

harmoniklerde ayrıca görülmektedir. Ölçülen DC bileşen %9.18, 2. Harmonik bileşen %27.59, 4. Harmonik bileşen %15.94 dür.



Şekil 5.17 : Cer motoru stator akımı frekans spektrumu ekran görüntüsü.

Cer motoru stator akımına ait dalganın toplam harmonik bozunum değeri ise %38.34 olarak ölçülmüştür. Rotor akımlarında olduğu gibi yine DC bileşen ve çift harmonikler nispeten daha az da görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez araştırması sonucunda oluşturulan MATLAB Simulink modelinde 750 V DC üçüncü ray gerilimin kullanıldığı metro cer gücü tedarik sisteminin benzetimi ve analizi yapılmıştır. Modeli oluşturulan sistem cer gücü tedarik sistemine ait trafo merkezleri, akım toplama sistemi, cer motorları ve sürme devreleri gibi tüm alt sistemleri de içerdiğinden dolayı oldukça kapsamlıdır. 750 V DC üçüncü ray sistemi kullanılan Yenikapı-Taksim-Hacıosman metrosu referans alınarak yapılan bu modelde kullanılan tüm veriler sahada bulunan ekipman etiket değerleri ve projelerden alınmıştır. Enerji İletim Şirketinin 154 kV şebekesinden alınan enerji 34.5 kV orta gerilim seviyesine düşürülerek istasyonlar arasında ring sistemi oluşturulmuştur. Daha sonrasında 34.5 kV orta gerilim redresör trafoları ve doğrultucu ünitelerinden geçirilerek 750 V DC üçüncü ray gerilimi elde edilmiştir. 4 araçtan oluşan trenin modeli ise toplam 12 adet 150kW, 3 fazlı sincap kafesli asenkron cer motoru olarak modellenmiştir. Trenin modelinde bir adet eşdeğer motor koymak yerine bu şekilde 12 adet farklı araçlara dağıtılmış halde bulunan cer motorları konulması daha sonra bu model kullanılarak yapılabilecek tren içi kısa devre hata analizlerini mümkün kılacaktır. Cer motorları PWM sinyali kontrollü 3 fazlı IGBT invertörü tarafından beslenmektedir.

Oluşturulan modelde tren kalkış anı geçici durum analizi ile birlikte trenlerin oluşturduğu harmoniklerin Enerji İletim Şirketinin yüksek gerilim şebekesine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla hatda iki adet 4'lü tren seti olduğu düşünülmüştür. Bu iki adet dörtlü tren setinin aynı anda aynı istasyondan kalktığı senaryo incelenmiştir. Fakat oluşturulan model çok daha fazla sayıda trenin de hatda işlediği durumların simülasyon ve analizini rahatlıkla yapabilecek yeterliliktedir. Bu araştırma da ana amaç kapsamlı bir model oluşturmak olduğu için simülasyon kolaylığı için sadece 2 adet 4'lü tren seti incelenmiştir.

Tren kalkış anı geçici durum analizi sonucunda yalnızca bir adet dörtlü tren setinin kalkış yaptığı durumda bile hat akımı 3000 A seviyelerini 0.02 saniyeden daha kısa sürede görmektedir. İki adet dörtlü tren setinin aynı bölgeden kalkış yaptığı durumda

ise hat akımı 6000 A seviyelerin üzerine çıkmaktadır ve di/dt oranı çok daha büyük olmaktadır. Hatda olan kısa devre hata akımlarından çok daha büyük olan kalkış anı akımları 2-3 saniye boyunca devam ettiğinden dolayı raylı sistemlerde koruma yöntemi olarak iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan klasik hat koruma yöntemleri dışında kalkış anı akımları ile kısa devre akımlarını ayırt edebilecek bir yöntem adapte edilmelidir.

Simulink ortamında bulunan Powergui bloğu yardımıyla harmonik analizi ve istenilirse yük analizinde rahatlıkla yapılabilir. Yapılan FFT harmonik analizi sonucunda TEİAŞ barası gerilim dalgası için toplam harmonik bozunum %5.75 akım dalgası için ise %5.30 olarak bulunmuştur. 11. ve 13. harmonik frekanslarının temel frekansa göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise sistemde 12 darbeli kontrolsüz diyot doğrultucu ünitelerinin kullanılmasından dolayı olduğu için beklenen bir sonuçtur. Normal işletme sırasında hatda çok daha fazla sayıda tren seti olduğu düşünüldüğünde kompanzasyon sisteminin aktif olmadığı durumda raylı sistemin enerji kalitesine çok ciddi etkisi olacaktır.

Oluşturulan bu modelde küçük değişikliklerle daha birçok inceleme ve analiz yapmak mümkündür. Üçüncü rayın modeli 1 km lik bloklardan oluştuğu için bu bloklar kullanılarak hattın tamamı modellenilebilir ve tren setleri hat üzerinde istenilen noktalara yerleştirilerek benzetim tekrarlanabilir. İstasyon ve tren sayısı çoklanarak ve gerektiğinde her biri için birbirinden bağımsız değerler girilerek geliştirilebilir ve gerçek karmaşık hatların modellenmesi rahatlıkla yapılabilir. Modele yapılacak küçük eklemelerle yapay arızalar oluşturulabilir. Her türlü kısa devre arızasının benzetim ve analizi yapılabilir ve farklı arıza durumları incelenebilir. Hat sonu gerilimi, gerilim düşümü, üçüncü ray akım taşıma kapasitesi ve üçüncü ray ısınması kontrol edilebilir. Simulink programının sunduğu avantaj sebebiyle blok parametreleri rahatlıkla değiştirilerek 1500 V DC cer gücü tedarik sisteminde modeli rahatlıkla kurulabilir. 750 V DC ve 1500 V DC sistemler birbiri ile enerji kalitesi, enerji verimliliği, kalkış anı geçici durumlar ve kısa devre hata analizi bakımından rahatlıkla karşılaştırılabilir. Dolayısıyla yapılan bu model raylı sistemler elektrikli cer gücü tedarik sistemine ait yapılacak tüm inceleme ve analizler içinde referans olacak niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. ve Schneider, E.** (2009). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance*. England: Publicis Publishing.
- [2] **Profillidis, V. A.** (2000). *Railway Management and Engineering*. England: Ashgate Publishing.
- [3] **BS EN 50163.** (2007). *Railway Applications – Supply Voltages for Traction Systems*. British Standart Institution.
- [4] **Fang, Du. ve He, J. H.** (2010). Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains, *IEEE*, 978-1-4244-4813-5/10.
- [5] **Chang, C. S. ve Khambadkone, A. X** (2001). Modeling and Simulation of DC Transit System with VSI-fed Induction Motor Driven Train Using PSB/MATLAB, *IEEE*, 0-7803-7233-6/01.
- [6] **Shenoy, U. J. ve Sheshadri, K. G.** (2004). MATLAB/PSB Based Modeling and Simulation of 25kV AC Railway Traction System- A Particular Reference To Loading and Fault Conditions, *IEEE*, 0-7803-8560-8/04.
- [7] **Barlo, J. ve Alan, T.** (1995). *Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems*, Northwestern University.
- [8] **Url-1** < <http://www.istanbul-ulasim.com.tr/rayl%C4%B1-sistemler.aspx>>, alındığı tarih: 20.03.2014
- [9] **Url-2** < <http://w3.usa.siemens.com/>>, alındığı tarih: 20.03.14
- [10] **Url-3** < <http://www.ulsoyelektrik.com.tr/> >, alındığı tarih: 21.03.14
- [11] **Url-4** < <http://www.hyundaielevator.co.kr/> > alındığı tarih: 21.04.14
- [12] **Url-5** < <http://www.vossloh-fastening-systems.com/en/>> alındığı tarih: 21.04.14
- [13] **Url-6** < <http://www.abb.com.tr/>> alındığı tarih: 21.04.14

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İlyas ÖZMEN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1989

Adres: Üsküdar, İstanbul

E-Posta: ilyasozmen@outlook.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği

Yüksek Lisans: Hong Kong Polytechnic Üniversitesi, Raylı Sistemler

Yüksek Lisans Tezi: System Assurance and RAMS Techniques Applied to Railway Electrical Traction Power Supply System