

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK İSTASYONLU VE ÇOKLU TREN SETLİ BİR METRO HATTININ
MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE İŞLETİM SENARYOLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ulaş CİHANGİR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK İSTASYONLU VE ÇOKLU TREN SETLİ BİR METRO HATTININ
MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE İŞLETİM SENARYOLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ulaş CİHANGİR
(504071030)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

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

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504071030 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ulaş CİHANGİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOK İSTASYONLU VE ÇOKLU TREN SETLİ BİR METRO HATTININ MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE İŞLETİM SENARYOLARININ KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. K. Nur DÖNMEZTÜRK BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 4 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2018





Sevgili Eşime ve Jan'a,



ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 11 yıldır kesintisiz olarak sürdürdüğüm yüksek lisans eğitimimi yeni hedeflere yürümek için tamamlamak gerekmekteydi. Bu tezi tamamlayabilmem için beni son derece olumlu yönde motive eden ve yol gösteren saygıdeğer Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a öncelikle çok teşekkür ederim.

İstanbul Teknik Üniversitesi'ne girdiğim günlerde hayatıma giren Sevgili Eşim Duygu'ya lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği tüm destek ve bu tezi yazarken gösterdiği sabır için teşekkür ederim. Hayatım boyunca hep yanımda olan Anneme, Babama ve Kardeşime sevgilerimi sunarım.

“İnsanlar doğar, büyür, yaşar ve ölürlür. Önemli olan çok yaşamak değil, yaşadığın sürece fazla bir şeyler yapabilmektir.”

Mayıs 2018

Ulaş CİHANGİR
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. RAYLI SİSTEMLERE GENEL BAKIŞ	5
2.1 Yolcu Taşımacılığında Kullanılan Raylı Sistemler	5
2.1.1 Tramvay sistemleri	5
2.1.2 Hafif raylı sistemler	6
2.1.3 Metro sistemleri	6
2.1.4 Manyetik levitasyonlu (maglev’li) sistemler	7
2.1.5 Monoray sistemler	8
2.1.6 Füniküler sistemler	8
2.1.7 Banliyö sistemler	9
2.1.8 Hızlı trenli sistemler	9
2.2 Raylı Sistemlerde Kullanılan Elektrik Gücü	10
2.3 Cer Trafo Merkezleri	11
2.3.1 Doğru akım güç sistemleri	16
2.3.2 Alternatif akım güç sistemleri	22
2.4 Akım Toplama Sistemleri	29
2.5 Raylı Sistemlerde Kullanılan Motorlar ve Sürücüler	39
2.5.1 DC motorlar	40
2.5.2 DC motor sürücüleri	41
2.5.3 AC motorlar	43
2.5.4 AC motor sürücüleri	44
2.5.5 Kalıcı mıknatıslı motorlar	47
3. DC BESLEMELİ BİR METRO SİSTEMİNİN İNCELENMESİ	49
3.1 Amaç	49
3.2 Bir Metro Hattı Modelinin Elektrik Altyapısı	49
3.2.1 Bir metro hattının orta gerilim dağıtım sistemi	49
3.2.2 Bir metro hattının cer gücü dağıtım sistemi	50
3.2.3 Metro hattında kullanılan diğer sistemler	50
3.3 Türkiye’de Raylı Sistemler ve Metro Araçların Genel Özellikleri	50

4. 750 V DC BİR METRO SİSTEMİNİN MATLAB/SİMULİNK MODELİ	57
4.1 Şebeke Modeli	57
4.2 İndirici Trafo Merkezi (GIS) Modeli	58
4.3 Cer Trafo Merkezi Modeli.....	58
4.4 Akım Toplama Sisteminin Modeli	61
4.5 Metro Aracının ve Bojisinin Modeli	62
4.6 IGBT Ünitesi ve Motor Modeli	63
4.7 Trenlerin Yüklenmesi.....	64
5. MATLAB/SİMULİNK MODELİ SONUÇLARININ ANALİZİ	65
5.1 Bir Trenli Bir İstasyonlu Bir Cer Trafo Merkezli Modellerin Analizi	65
5.1.1 Tren kalkış analizi	66
5.1.2 Doğrultucu darbe sayısına göre tren kalkış analizi	70
5.1.3 Farklı yüklenme durumlarında tren kalkış analizi.....	74
5.1.4 Zigzag trafo kullanılması durumunda tren kalkış analizi.....	76
5.2 İki Trenli İki İstasyonlu Bir ve İki Trafo Merkezli Modellerlerin Analizi.....	78
5.2.1 Tren kalkış analizi	79
5.2.2 Trenlerin 20 saniye aralık ile kalkışlarının analizi	84
5.3 İki Trenli Dört İstasyonlu İki Trafo Merkezli Modellerin Analizi.....	85
5.3.1 Tren kalkış analizi	87
5.3.2 Trenlerin aynı anda ve 10 ve 20 saniye aralıklar ile kalkışlarının analizi.....	89
5.3.3 Bir trafo merkezi kullanıldığı durumun analizi.....	92
5.4 Dört Trenli Dört İstasyonlu Modellerin Analizi.....	94
5.4.1 Tren kalkış analizi	96
5.4.2 Cer trafo merkezlerinin 3. ray beslemesinin kalkışta kesilmesi.....	98
5.4.2 Cer trafo merkezlerinin 3. ray beslemesinin kalkıştan sonra kesilmesi ..	101
5.5 Modellerin Harmonik Analizleri	104
5.5.1 Bir trenli bir istasyonlu modelde harmonik analizler.....	105
5.5.2 İki trenli iki istasyonlu modelde harmonik analizler.....	110
5.5.3 İki trenli dört istasyonlu modelde harmonik analizler	112
5.5.4 Dört trenli dört istasyonlu modelde harmonik analizler.....	114
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	117
6.1 Kalkış Analizleri.....	117
6.2 Harmonik Analizleri	119
6.3 Gelecek Çalışmalar.....	121
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	125

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
AIS	: Hava İzoleli Trafo Merkezi (Air Insulated Substation)
ARUS	: Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri
AT	: Oto Trafo (Auto Transformer)
BS EN	: Avrupa Uyumlu İngiliz Standardı
BT	: Yükseltici Trafo (Booster Transformer)
CVVF	: Sabit Gerilim ve Değişken Frekans
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM)
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
GaN	: Galyum Nitrit (Gallium Nitride)
GIS	: Gaz İzoleli Trafo Merkezi (Gas Insulated Substation)
GIT	: Gaz İzoleli Trafo (Gas Insulated Transformer)
GTO	: Kapı Sönümlü Tristör (Gate Turn Off)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IGBT	: İzole Kapılı Çift Kutuplu Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü
İUAŞ	: İstanbul Ulaşım A.Ş
M	: Motorlu Araç
MAGLEV	: Manyetik Levitasyon
MC	: Motorlu Kabinli Araç
OG	: Orta Gerilim
OIT	: Yağ İzoleli Trafo (Oil Insulated Transformer)
SCADA	: Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama
SEPEX	: Ayrı Tahrikli (separately excited)
SF6	: Kükürt Hekzaflorür (Sulfur hexafluoride)
SIS	: Katı İzoleli Kesici (Solid Insulated Switchgear)
SiC	: Silisyum Karbür (silicon carbide)
T	: Taşıyıcı Araç

Te	: Elektromanyetik Tork
TGV	: Yüksek Hızlı Tren (Fransızca: Train à Grande Vitesse)
THD	: Toplam Harmonik Bozunum (Total Harmonic Distortion)
THD-I	: Akım Dalgasının Toplam Harmonik Bozunumu
THD-V	: Gerilim Dalgasının Toplam Harmonik Bozunumu
TPS	: Çer Gücü Tedarik (Traction Power Supply)
UBAK	: T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı
VS	: Vakumlu Sviç
VVVF	: Değişken Gerilim ve Değişken Frekans



SEMBOLLER

L	: İndüktör
C	: Kapasitör
Ω	: Ohm
P	: Aktif Güç
Q	: Reaktif Güç





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Raylı sistemler için BS EN 50163 standardına göre izin verilen gerilim aralıkları.	14
Çizelge 2.2 : Türkiye’de bulunan hafif raylı sistemlerin projeleri.	15
Çizelge 2.3 : İstanbul’da mevcut olan bazı raylı sistemlerin projeleri.	15
Çizelge 2.4 : Farklı katener sistemlerin teknik verilerinin karşılaştırılması.....	32
Çizelge 3.1 : İstanbul raylı sistemlerinde 1988 - 2014 yılları arasında kullanılan araçların listesi.	51
Çizelge 3.2 : Örnek modelde kullanılan 750 V DC beslemeli motorların teknik verileri.....	56
Çizelge 5.1 : IEEE 519 standardının gerilime ait harmonik bozunum limitleri.	104
Çizelge 5.2 : 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.	107
Çizelge 5.3 : 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen alt bileşenlerin harmonik değerleri.	108
Çizelge 5.4 : 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli ve 18 ile 24 darbeli doğrultuculu modelde LC filtresi değerlerinin değiştirilmesi.....	108
Çizelge 5.5 : Trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular aynı LC filtresine sahipken elde edilen THD değerleri.	108
Çizelge 5.6 : Trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular farklı LC filtresine sahipken elde edilen THD değerleri.	109
Çizelge 5.7 : Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında ve farklı trafo kullanımında elde edilen THD değerleri.	110
Çizelge 5.8 : 2 trenli 2 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.	111
Çizelge 5.9 : 1 ve 2 trafo merkezli modelde trene ait motorların farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.	112
Çizelge 5.10 : 2 trenli 4 istasyonlu modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.....	112
Çizelge 5.11 : 2 trenli 4 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.	113
Çizelge 5.12 : 4 trenli 4 istasyonlu modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.....	114
Çizelge 5.13 : 4 trenli 4 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.	115



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İstanbul’da bir tramvay.	5
Şekil 2.2 : Eskişehir’de bir hafif raylı sistem.	6
Şekil 2.3 : Londra metrosundan bir resim.	7
Şekil 2.4 : Manyetik levitasyonlu bir sistem	7
Şekil 2.5 : Moskova’da bir monoray sistemi.	8
Şekil 2.6 : İstanbul’da Beyoğlu Karaköy arasındaki föniküler sistem.	9
Şekil 2.7 : İstanbul Haydarpaşa Gebze arası banliyö sistemi.	9
Şekil 2.8 : Fransız TGV yüksek hızlı treni.	10
Şekil 2.9 : Katener sistemi ile beslenen bir trenin güç besleme sistemi.	11
Şekil 2.10 : Hava izoleli bir trafo merkezi.	12
Şekil 2.11 : Gaz izoleli bir trafo merkezi.	12
Şekil 2.12 : Gaz izoleli trafo.	12
Şekil 2.13 : GIS ve AIS kullanan sistemlerin alanlarının karşılaştırılması.	13
Şekil 2.14 : Tipik cer gücü besleme sistemi konfigürasyonu, 1500 V DC.	17
Şekil 2.15 : Şebekeden motora kadar hattın işleyişi	17
Şekil 2.16 : Altı darbeli diyot doğrultucunun güç devresi şeması.	18
Şekil 2.17 : 12 diyottan oluşan 3 fazlı 12 darbeli doğrultucu.	18
Şekil 2.18 : 12 darbeli doğrultucu için sargı durumları ve fazör diyagramı.	19
Şekil 2.19 : Üçgen bir primer sargıya ve yıldız ve üçgen olmak üzere iki sekonder sargıya sahip iki trafo ile 24 darbeli doğrultucu	19
Şekil 2.20 : Dört zigzag trafo ile 24 darbeli doğrultucu.	20
Şekil 2.21 : 24 darbeli doğrultucu için trafo çıkışındaki 12 fazlı gerilim sistemini temsil eden faz diyagramı.	20
Şekil 2.22 : Arabalı ve çekmeceli tip bir DC devre kesici.	21
Şekil 2.23 : DC akım güç sistemlerinin genel yapısı.	21
Şekil 2.24 : Roof-delta bağlı trafo.	23
Şekil 2.25 : (a) Scott bağlı trafo. (b) Modifiye wood-bridge bağlı trafo.	24
Şekil 2.26 : Wood-bridge bağlı trafonun 3 fazı 2 faza dönüştürmesi.	24
Şekil 2.27 : Scoot trafonun demiryolu sistemine bağlantısı.	24
Şekil 2.28 : Scoot bağlı bir trafo örneği.	25
Şekil 2.29 : Basit bir AC besleme sisteminin yapısı.	25
Şekil 2.30 : Yükseltici transformatör besleme sisteminin devresi.	26
Şekil 2.31 : Oto transformatör besleme sisteminin devresi.	27
Şekil 2.32 : Bir oto trafo resmi.	27
Şekil 2.33 : Koaksiyel kablo besleme sistemi.	28
Şekil 2.34 : Katı izolasyonlu bir kesici.	28
Şekil 2.35 : AC güç sisteminin genel yapısı	29
Şekil 2.36 : Standart havai katener hattı.	30
Şekil 2.37 : (a) Tek kollu pantograf. (b) Havai hat ile temas halinde bir pantograf..	31
Şekil 2.38 : Farklı ülkelerdeki yüksek hızlı trenler için katener sisteminin karşılaştırılması.	31

Şekil 2.39 : Alüminyum profil ve özellikleri.....	32
Şekil 2.40 : Rijit katener sisteminin parçaları.....	33
Şekil 2.41 : (a) ve (b) Rayların yanına kurulan bir üçüncü ray sistemi.	33
Şekil 2.42 : (a) ve (b) Rayların ortasına kurulan bir üçüncü ray sistemi.	33
Şekil 2.43 : (a) Üstten temaslı pabuçlar. (b) Alttan temaslı pabuçlar.	34
Şekil 2.44 : Kapatılmış bir üçüncü ray.	34
Şekil 2.45 : Üçüncü ray sisteminin güç besleme sistemi gösterilmiştir.....	34
Şekil 2.46 : Londra metrosunda 3. ve 4. rayların konumlandırılması.	35
Şekil 2.47 : Pozitif gerilim durumunda akımın toprağa raylardan dışarı kaçak akışı.	36
Şekil 2.48 : Kaçak akım sisteminin temel modeli ve kaçak akım kaçağı.	36
Şekil 2.49 : Gerilimin toprağa göre devamlı olarak pozitif olduğu topraklanmış ray sistemi durumu.	37
Şekil 2.50 : Raylarda ve metal iletkenlerde korozyon ve demir kayıpları.....	37
Şekil 2.51 : Metro sistemlerinde kaçak akım profili.....	38
Şekil 2.52 : Rayları terk eden kaçak akımın etkisi.	39
Şekil 2.53 : Raylara giren kaçak akım.	39
Şekil 2.54 : Seri DC Cer motorunun yapısı.	40
Şekil 2.55 : Seri DC motor devresi	41
Şekil 2.56 : DC cer motoru güç devresi.....	42
Şekil 2.57 : Tren üzerinde bulunan bir trafo yardımıyla DC motor kontrolünün yapılması.	42
Şekil 2.58 : Tristörlü DC motor kontrolü.	43
Şekil 2.59 : AC beslemesi durumunda, pantograf ve yüksek hızlı kesici üzerinden bir trafonun beslenmesi.....	45
Şekil 2.60 : AC bir lokomotifin parçaları.	45
Şekil 2.61 : VVVF ve CVVF bölgeleri.....	47
Şekil 2.62 : Dört farklı tren işletme bölgesi.	47
Şekil 3.1 : Alstom firmasına ait metro araçlarının standart konfigürasyonları.....	53
Şekil 3.2 : Siemens firmasına ait metro araçlarının standart konfigürasyonları.....	53
Şekil 3.3 : Bojilerin süspansiyon sistemleri.....	54
Şekil 3.4 : Üç parçalı boji tipi araçlar.	54
Şekil 3.5 : Yönlendirilebilir bojiler.....	55
Şekil 3.6 : Trene ait bir aracın genel parçaları.	56
Şekil 4.1 : Şebeke ve paralel RL devresi..	57
Şekil 4.2 : (a) GIS trafo merkezinin ve orta gerilim ring sisteminin pi eşdeğer devresinin modeli. (b) Ölçüm barasının ve trafonun modeli.	58
Şekil 4.3 : 6 darbeli (a) Doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.	59
Şekil 4.4 : 12 darbeli (a) Doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.	60
Şekil 4.5 : 18 darbeli (a) 3 zigzag doğrultucu trafosu. (b) Doğrultucu modeli.....	60
Şekil 4.6 : Cer trafo merkezi bloğu içinde bulunan doğrultucu trafosu, 24 darbeli doğrultucu ve LC filtre.....	60
Şekil 4.7 : 24 darbeli (a) 4 zigzag doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.	61
Şekil 4.8 : Dönüş ray, üçüncü ray, geçiş eşdeğer ve pabuç dirençlerinin modeli.....	62
Şekil 4.9 : 3. ray eşdeğer ve 3. ray geçiş eşdeğer dirençlerinin modeli.....	62
Şekil 4.10 : 4'lü tren setini oluşturan araçların modeli.....	62
Şekil 4.11 : Her tren aracı içinde bulunan boji modeli.	63
Şekil 4.12 : 2 adet motorun kontrolünü sağlayan IGBT ünitesi.	63
Şekil 4.13 : Modelde kullanılan motorlara ait parametreler.	64
Şekil 4.14 : Asenkron motor modeline sabit değer parametresinin girilmesi.....	64

Şekil 5.1 : 1 trenli 1 istasyonlu 1 cer trafo merkezli sistemin tam modeli.	66
Şekil 5.2 : Motor devir sayısı.....	67
Şekil 5.3 : 3. ray akımı.....	67
Şekil 5.4 : 3. ray gerilimi.	67
Şekil 5.5 : Rotor akımının ve stator akımının zamana göre grafiği.....	68
Şekil 5.6 : Motorlara ait stator gerilimi.	68
Şekil 5.7 : Motorlara ait elektromanyetik tork-zaman grafiği.	69
Şekil 5.8 : Gerilim ve akım grafikleri.....	69
Şekil 5.9 : Yakınlaştırılmış gerilim ve akım grafikleri.	70
Şekil 5.10 : Aktif güç ve reaktif güç grafikleri.....	70
Şekil 5.11 : 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerde trenlerin motor devir sayısı grafiği.....	71
Şekil 5.12 : 12 darbeli doğrultuculu ve zigzag trafolu sistemlerde trenlerin motor devir sayısı grafiği.	71
Şekil 5.13 : 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerin 3. ray akımları.....	72
Şekil 5.14 : 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerde GIS trafo merkezinden ölçülen aktif ve reaktif güçler.	72
Şekil 5.15 : 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerin 3. ray gerilimleri.....	73
Şekil 5.16 : LC filtresi değiştirilmiş, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerin 3. ray gerilimleri.	73
Şekil 5.17 : Zigzag trafo kullanılmış 12 darbeli doğrultuculu sistemin 3. ray gerilimleri.....	73
Şekil 5.18 : Motor devir sayısı zaman grafiği.....	74
Şekil 5.19 : Yakınlaştırılmış motor devir sayısı zaman grafiği.	75
Şekil 5.20 : Farklı yüklenme durumlarına göre 3. ray gerilimleri.	75
Şekil 5.21 : Farklı yüklenme durumlarına göre motor rotor akımları.	76
Şekil 5.22 : Farklı yüklenme durumlarına göre şebekeden çekilen toplam aktif güç.....	76
Şekil 5.23 : (a) Birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları üçgen ve yıldız olan trafolar. (b) Zigzag trafolar.	77
Şekil 5.24 : Zigzag trafo kullanıldığında devir sayısı zaman grafiği.....	77
Şekil 5.25 : Zigzag trafo kullanıldığında 3. ray akımı.	77
Şekil 5.26 : Zigzag trafo kullanıldığında 3. ray gerilimi.	78
Şekil 5.27 : Aynı anda kalkış yapacak olan 2 trenli 2 istasyonlu sistemin tam modeli: (a) 1 cer trafo merkezli sistem. (b) 2 cer trafo merkezli sistem.	79
Şekil 5.28 : 2 trenli 2 istasyonlu 1 trafo merkezli trenlerin devir sayısı grafiği.	80
Şekil 5.29 : 2 trenli 2 istasyonlu 2 trafo merkezli trenlerin devir sayısı grafiği.	80
Şekil 5.30 : 1 ve 2 trafo merkezli sistemlerde bulunan trenlerin devir sayısı zaman grafiklerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.31 : 3. ray akımı: (a) 1 trafolu merkezli model. (b) 2 trafo merkezli model.	81
Şekil 5.32 : 1 trafo merkezli modelde 3. ray gerilimi.....	81
Şekil 5.33 : 2 trafo merkezli modelde 3. ray gerilimleri.....	82
Şekil 5.34 : Elektromanyetik tork zaman grafikleri: (a) 1 cer trafo merkezli model. (b) 2 cer trafo merkezli model.	82
Şekil 5.35 : 1 ve 2 cer trafo merkezli modellerde trenlerin motor rotor akımları.....	83
Şekil 5.36 : 1 ve 2 cer trafo merkezli modellerde aktif ve reaktif güç.	84
Şekil 5.37 : Trenlere ait motorların devir sayısı zaman grafiği: (a) 20 sn. ara ile kalkış yapan 2 tren. (b) Aynı anda ve 20 sn. ara ile kalkış yapan trenler.	85

Şekil 5.38 : Ray akımları: (a) Aynı anda kalkış yapan 2 tren. (b) 20 saniye ara ile kalkış yapan 2 tren.	85
Şekil 5.39 : Kalkış rotor akımları ve elektromanyetik tork grafikleri: (a) Aynı andaki rotor akımı (b) 20 sn. ara ile rotor akımı. (c) Aynı andaki T_e . (d) 20 sn. ara ile T_e	85
Şekil 5.40 : 2 trenli 4 istasyonlu modelin baştan ve ortadan beslenmesi.....	86
Şekil 5.41 : 2 trenli 4 istasyonlu modelin baştan ve sondan beslenmesi.	86
Şekil 5.42 : 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin devir sayısı grafikleri. (a) Baştan ve ortadan besleme. (b) Baştan ve sondan besleme.	87
Şekil 5.43 : 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin 3. ray akım grafikleri: (a) Baştan ve ortadan beslemeli. (b) Baştan ve sondan beslemeli.	88
Şekil 5.44 : 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin 3. ray gerilim grafikleri: (a) Baştan ve ortadan beslemeli. (b) Baştan ve sondan beslemeli.	88
Şekil 5.45 : Baştan-ortadan ve baştan-sondan beslenen sistemlere ait grafikler: (a) Rotor akımları. (b) Şebekeden çektiği akımlar. (c) P ve Q. (d) T_e	89
Şekil 5.46 : Aynı anda, 10 saniye aralık ile ve 20 saniye aralık ile kalkış yapan trenlerin motorlarının devir sayısı zaman grafiği.....	90
Şekil 5.47 : Trenlerin motorlarına ait ray akımları: (a) Aynı anda kalkış. (b) 10 saniye aralık ile kalkış. (c) 20 saniye aralık ile kalkış.	91
Şekil 5.48 : Trenlerin motorlarına ait ray gerilimleri: (a) Aynı anda kalkış. (b) 10 saniye aralık ile kalkış. (c) 20 saniye aralık ile kalkış.	91
Şekil 5.49 : 2 istasyonlu ve 4 istasyonlu sistemlerde ve farklı motor yüklerinde trenlerin zamana göre devir sayısı grafikleri.....	92
Şekil 5.50 : 1 Trafo merkezli 4 istasyonlu modeldeki motorlar tam yüklükten 1. ve 4. istasyondaki trenlere ait grafikler: (a) Rotor akımları. (b) Stator akımları. (c) T_e	94
Şekil 5.51 : 2 cer trafo merkezi 4 trenli 4 istasyonlu sistemi baştan ve sondan beslerken.	95
Şekil 5.52 : 4 cer trafo merkezi 4 trenli 4 istasyonlu sistemi her bir istasyondan beslerken.	95
Şekil 5.53 : 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 2 ve 4 cer trafo merkezli modelin grafikleri: (a) Devir sayısı. (b) Ray akım. (c) Ray gerilim. (d) T_e	97
Şekil 5.54 : 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 2 cer trafo merkezli modelin rotor akımları.	97
Şekil 5.55 : 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 4 cer trafo merkezli modelin rotor akımları.	98
Şekil 5.56 : Cer trafo merkezlerinin ikisinin 3. rayı besleyen hatlarının kalkışta kesildiği senaryo modeli.	99
Şekil 5.57 : 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trenlerin devir sayısı zaman grafikleri.	100
Şekil 5.58 : 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trafo merkezlerine ait 3. ray akımları.	100
Şekil 5.59 : 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trenlerin motor rotor akımları.	101
Şekil 5.60 : 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda ray gerilimleri. .	101
Şekil 5.61 : 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin devir sayısı zaman grafikleri.	102
Şekil 5.62 : 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin ray akımları.	103

Şekil 5.63 : 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin rotor akımları.	103
Şekil 5.64 : 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin ray gerilimleri.....	104
Şekil 5.65 : 6 darbeli doğrultucu için gerilimin toplam harmonik bozunumu.....	105
Şekil 5.66 : 6 darbeli doğrultucu için akımın toplam harmonik bozunumu.	105
Şekil 5.67 : 12 darbeli doğrultucu için gerilimin toplam harmonik bozunumu.....	106
Şekil 5.68 : 12 darbeli doğrultucu için akımın toplam harmonik bozunumu	106
Şekil 5.69 : Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında gerilim dalgasına ait THD.	109
Şekil 5.70 : Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında akım dalgasına ait THD.	109





ÇOK İSTASYONLU VE ÇOKLU TREN SETLİ BİR METRO HATTININ MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE İŞLETİM SENARYOLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Yolcu taşımacılığında kullanılan raylı sistemler kullanıldığı semtin, şehrin, ülkenin veya kıtanın fiziki ve coğrafi özelliklerine göre, ulusal şebekede kullanılan gerilim, akım ve frekans tercihlerine göre, sahip olunan teknoloji altyapısına göre, insan popülasyonuna göre ve bunlar gibi birçok farklı parametreye ve farklı ihtiyaçlara göre değişiklik gösterebilir. Kimi yerlerde tramvay ve hafif raylı sistemler gibi şehir ile iç içe geçmiş sistemler yolcu taşımacılığında tercih edilirken, kimi yerlerde ise metro ve monoray sistemler gibi şehir trafiğinden yeraltı tünelleri ve yer üstü asma yapılar ile ayrılmış sistemler yolcu taşımacılığında tercih edilmektedir. İstanbul'da Karaköy ile Beyoğlu semtlerinin sahip olduğu coğrafi özellik nedeni ile bu iki semt arasında funiküler bir sistem kullanılırken; yine İstanbul Taksim semtinin sahip olduğu tarihi özellik, insan popülasyonu ve fizik şartlar gibi nedenler ile tramvay sisteminin kullanılması tercih edilmiştir. Her bir raylı sistem kendi içinde farklı karakteristiklere sahiptir. Her yapılan yeni raylı sistem projesinde veya eski bir sistemin revizyonunda mühendislik hesaplarının dikkatlice yapılması oldukça önemlidir. Örneğin, yüksek hızlı trenler hayatımıza girmeden önce inşa edilen demiryolları üzerinde yüksek hızlı trenleri veya tramvay hattı için inşa edilen raylar üzerinde metro veya başka sistemler için üretilmiş trenleri kullanmak gerektiğinde tüm hesaplamaların özenle yapılması oldukça önemlidir. Yeni yapılacak veya revize edilecek bir raylı sistem için hem sosyal hem de teknik yönden birçok analiz yapılmalıdır.

Elektrik ile çalışan raylı sistem trenleri, hareket etmeleri ve yardımcı ünitelerini beslemeleri için gereken gücü cer gücü tedarik sistemlerinden alır. Cer gücü tedarik sistemi ise trafo merkezinin sağladığı güç sistemine göre, trenlerin akım toplama sistemine göre ve trenlerde kullanılan motorlara ve sürücülere göre olmak üzere üç farklı tipte sınıflandırılabilir. Trafo merkezleri raylı sistemler için doğru akım veya alternatif akım sağlamaktadır. Trenler ise bu akımı ya havai katener sistemi ile ya da üçüncü ray sistemi ile hareket etmek için toplamaktadır. Trenler, bu hareketi tren bojileri üzerinde bulunan alternatif akım motorları veya doğru akım motorları ve bunları kontrol eden doğru akım sürücü üniteleri veya alternatif akım sürücü üniteleri ile sağlamaktadır.

Raylı sistemlerin işletme senaryolarının tasarım aşamasında irdelenebilmesi için matematiksel olarak başarımının elde edilmesi gereklidir. Bunun için sistemin elektriksel güç girişinden itibaren mekanik hareket için çıkış gücüne ulaşana kadar tüm sistem bileşenlerinin matematiksel modellerinin ayrı ayrı oluşturulması ve bütünleşik matematiksel modele ulaşılması gereklidir. Başta transformatör modeli olmak üzere metro besleme hattı, eviriciler, motorlar modellenerek ve mekanik modellerle birleştirilerek nihai modele ulaşmak mümkündür. Belirli kabuller dahilinde modeli basitleştirmek olasıdır. Metro hattının topolojik ve fiziksel özellikleri de

modellenebilir. Bu sayede tasarım aşamasında sayısal hesaplamalar ile tasarım bileşenlerinin uygunlukları öngörülebilir hale getirilebilir. Kurulan model kullanılarak farklı frenleme, yol verme, arıza ve benzeri işletme senaryoları incelenebilir. Enerji iletim sisteminden başlayarak harmonik, kayıp vb. olumsuz etkiler hesaplanabilir. Birden fazla seçeneğin olduğu tasarım bileşenleri için en uygun olanının da bu model ile seçilmesi sağlanabilir.

Bu tezde, çok istasyonlu ve doğrusal hatta sahip bir metro sisteminin cer gücü tedarik sistemi MATLAB® Simulink programı ile modellenmiştir ve birçok farklı durum için analizler yapılmıştır. Model oluşturulurken şebeke için faz-faz arası gerilimi 154 kV, 3-faz ve 50Hz olarak, indirici trafo merkezleri için ise trafolar 25MVA, 154kV/34.5kV, 50Hz olarak modellenmiştir. Cer trafo merkezlerinde bulunan trafoların giriş gerilimi 34.5 kV çıkış gerilimi 580V olarak, doğrultucular 6, 12, 18 veya 24 darbeli olarak LC filtre üzerinden akımı 3. raya iletecek şekilde modellenmiştir. Üçüncü ray 750V DC gerilim ile beslenecek şekilde oluşturulmuş ve her 1 km için eşdeğer 3. ray, geçiş ve dönüş dirençleri, her bir tren için ise eşdeğer pabuç dirençleri eklenmiştir. Tren setleri 4 araçtan oluşacak şekilde modellenmiştir ancak araçlardan biri sadece taşıyıcı araçtır ve üzerinde motor bulunmamaktadır. Her bir tren seti için toplam 12 adet sincap kafesli asenkron motor, her araçta 4 tane olmak üzere 3 araçta kullanılmıştır. Bu motorların her 2 tanesi 1 IGBT modülü tarafından sürülmektedir. Motorlar, rotor hızına göre değişen yük ile ve %25, %50, %75 ve %100 sabit nominal yük ile yüklenmiştir. Modele eklenen sabit değer fonksiyonu, trenlerde bulunan her bir motora bağlanmıştır ve sabit değer değiştirilerek yüklenme miktarının değişimine olanak sağlanmıştır. Bunun yanında model, eşdeğer 3. ray, geçiş ve dönüş dirençlerinin değerleri değiştirilerek istasyonlar arası mesafelerin değiştirilmesine, tren sayısının ve araç sayısının kolaylıkla değiştirilmesine, basamak fonksiyonu ve DGM sinyali için gecikme fonksiyonu değerleri değiştirilerek trenlerin kalkış zamanlarının değiştirilmesine, cer trafo merkezlerinin 3. ray hattını beslediği noktaların belirlenmesine, cer trafo merkezlerinin çıkış hattına eklenen kesici ile istenilen zamanda cer trafo merkezlerinden birinin devreden çıkarılmasına, benzeri hataların oluşturulmasına ve bunlar gibi birçok işletme koşullarının değiştirilmesine ve analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bir trenli, bir istasyonlu model, iki trenli iki istasyonlu model, iki trenli dört istasyonlu model ve dört trenli dört istasyonlu model oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak farklı nominal yüklerde, farklı darbe sayısına sahip doğrultucular ve farklı yapıdaki doğrultucu trafoları kullanıldığında, farklı LC filtreler kullanıldığında, farklı kalkış zamanlarında, cer trafo merkezi sayısının farklı olduğu ve sistemi farklı noktalardan beslediği durumlarda, cer trafo merkezlerinden birinin veya ikisinin belli bir süre sonra devre dışı kaldığı durumlarda senaryolar çalıştırılmış, trenlerin kalkış karakteristikleri ve şebekeye harmonik etkileri analiz edilmiştir.

Analizler sonucunda birçok farklı veri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Trenlerin kalkış anında sistemden çektikleri yüksek ray akımlarının kısa devre hata akımları ile karıştırılmaması gerektiği anlaşılmıştır. Cer trafo merkezlerinin rayı besledikleri noktaları arasındaki mesafeler arttıkça bazı trenlerin gerekli akımları raydan alamadığından dolayı 750 V DC sistemlerde cer trafo merkezleri arası mesafeler 1-3 km arasında tasarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Doğrultucuların darbe sayıları arttıkça şebekeyi etkileyen THD değerlerinin azaldığı görülmüştür.

MATHEMATICAL MODELLING OF A METRO LINE WITH MULTISTATION AND MULTIPLE TRAIN SET AND COMPARISON OF OPERATIONAL SCENARIOS

SUMMARY

According to the physical, geographical characteristics of the city, the country, or the continent, the rail systems used for passenger transportation vary according to the voltage, current and frequency preferences used in the national network's technology infrastructure, and the human population. While in certain locations in a city, inward systems, such as trams and light rails, are preferred for passenger transport, in other places transport systems separated from the city traffic by overpass and underground structures, such as metro and monorail systems, are preferred. Due to the geographical feature of Karaköy and Beyoğlu districts in Istanbul, a funicular system is used that connects these two districts. In Istanbul, Taksim district a tram system is used due to the historical characteristics, human population and physical conditions of Taksim. Each rail is a system with different characteristics. It is essential to perform engineering calculations carefully in new construction projects and old system revisions. For example, it is important to perform all calculations carefully, when high-speed trains are expected to run on railways built for older trains, or trains constructed for subways are expected to run on railways built for tramways. Social and technical aspects of new and revised systems should be analysed.

Electrically operated rail system trains obtain their power from traction power supply systems, to be able to move and feed their auxiliary units. The traction power supply can be grouped into three types according to the power system provided by the transformer centre, the current collection system of the trains and the motors and drives used in the trains. Transformer centres provide direct current or alternating current for rail systems, while trains collect this current to move with either the overhead centenary system or the third rail system. Trains provide this movement with alternating current motors or direct current motors located on the train tracks bogies and direct current drive units or alternating current drive units which controls them.

Computational success must be achieved to examine the operating scenarios of the rail systems in the design phase. A separate and integrated mathematical model of all system components should be formed which causes the mechanical motion starting from the electrical power input until it reaches the output power. It is possible to reach the final model by modelling the substation supply line, inverters, motors, especially the transformer model and combining it with the mechanical model. It is possible to simplify the model within certain assumptions. The topological and physical characteristics of the subway line can also be modelled. In this way, design calculations and design components can be made foreseeable in the design phase. Using the model installed, different braking, starting, failure and similar operating scenarios can be examined. Beginning from the energy transmission system, adverse

effects, such as harmonics and losses, can be calculated. It is also possible to select the most suitable one when there is more than one option for a design component.

In this thesis, the traction power supply system of a metro system with multiple stations and lines are modelled with MATLAB[®] Simulink program and analysed for many different situations. While the model is being constructed, the phase-to-phase voltage for the network is modelled as 154 kV, 3-phase and 50 Hz and for the traction transformer centres, the transformers are modelled as 25 MVA, 154 kV / 34.5 kV, 50 Hz. The output voltage of the transformers located in the traction transformer centres are modelled as 580V, rectifier 6, 12, 18 or 24 pulses through the LC filter to convey the 3rd current. The third rail is constructed to feed with 750V DC voltage and has equivalent 3rd rail, transit and turn resistances for each 1 km and equivalent lug resistors for each train. Train sets are modelled as consisting of four vehicles, but one of the vehicles is only a carrier vehicle, and there are no engines on it. A total of 12 squirrel cage asynchronous motors for each train set were used in three vehicles including four in each vehicle. Every two of these motors are driven by a single IGBT module. The motors are loaded with varying rotor speed and with 25%, 50%, 75% and 100% constant nominal load. The constant value function added to the model is connected to each motor in the trains and the amount of load can be changed by changing the fixed value. By changing the values of the model, equivalent rail, transition and rotation resistances, changing the inter-station distances, changing the train number and number of vehicles easily, changing the delay function values for the step function and PWM signal, changing the departure times of the trains, enabling the removal of one of the traction transformer centres at the desired time, the creation of similar faults and the alteration and analysis of many operating conditions such as these, by means of the cutter added to the output line of the transformer substations.

One train-one station model, two trains-two stations model, two trains-four stations model and four trains-four stations model were created. Scenarios were run and traction characteristics of the trains and harmonic effects on the network were analysed. When different LC filters, rectifier transformers with different number of pulses in different loads, starting times, the number of the traction transformer centres and feeding points are used and one or more traction transformer centres are disconnected after a certain period.

The data from the simulations show that the peak values of the rail currents are above 5000 A, even in the one train-one station model. This instantaneous high current should not be confused with short-circuit fault currents. As the distance between the feeding points of the traction transformer centres increases, some trains do not receive required currents. Therefore, in 750 V DC systems, the distance between traction transformer centres should be between one and three kilometres. This solves problems arising from voltage drop, and it allows transformer centres to be used as backups of each other, thus trains can continue to run uninterrupted. It should also be noted that as the number of pulses of the rectifiers increases, the total harmonic distortion affecting the network decreases. In models using 6 pulse rectifiers, the total harmonic distortion values have never fallen below 2.5%. The total harmonic distortion caused by current values are over 19% in each model used. For this reason, the use of 6 pulse rectifiers does not seem to be suitable for use in rail systems since it does not provide much energy quality for energy transmission systems. In the one train-one station model, voltage-caused THD created by 12-pulse rectifier systems, is beyond acceptable levels. Therefore, additional equipment such as active filters and passive filters, are recommended when 12-pulse rectifier are used. For models with 18 pulsed

and 24 pulsed rectifiers, the total harmonic distortions values are in the acceptable range. Also, an increase in load increases the total harmonic distortion caused by the current and reduces the total harmonic distortion caused by the voltage.





1. GİRİŞ

Dünyada sanayi devriminin başlamasından sonra üretim artmış ve dolayısıyla fabrikalaşma da artmıştır. Bunun sonucu olarak insanlar fabrikaların olduğu yerlere göç etmeye başlamış ve köyler ile kentler arasında ulaşım ihtiyacı artmıştır. Üretimin artmasıyla ham maddenin ve üretilen mamullerin taşınması ihtiyacı da artmıştır. Raylı sistemler, taşımacılıkta ilk defa 1830 yılında İngiltere’de kullanılmaya başlanmış ve kolay, güvenilir, ucuz, çevre dostu ve kapasitesinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı yük ve yolcu taşımacılığında her zaman tercih edilir olmuştur [1].

Türkiye topraklarında ise ilk olarak 130 km uzunluğunda İzmir-Aydın demiryolu hattı 1856 yılında bir İngiliz şirketi tarafından inşa edilmiştir. İkinci dünya savaşı yıllarına kadar demiryolu yapım çalışmaları hızla sürmüştür [1]. Savaş yıllarında demiryolu çalışmaları durma noktasına gelmiş ve savaş sonrasında da 2000’li yıllara kadar çok fazla gelişme olmamıştır. Günümüzde ise tamamlanan ve yapımı devam eden birçok raylı sistem projesi bulunmaktadır [1].

Raylı sistemlerde ilk elektrikli yolcu treni sistemi ise 1879 yılında Almanya’da tanıtılmıştır. Bu tanıtılan sistem 150 V DC gerilim ile çalışmaktaydı ve 2.2 kW gücünde bir lokomotifle sahipti. Yaklaşık 10 yıl içinde 600 V DC hat gerilimine sahip ve 40 kW gücünde sistemler geliştirilmiştir [2,3]. Günümüzde ise 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 15 kV AC, 25 kV AC ve 2x25 kV AC hat gerilimlerine ve MW mertebelerinde güce sahip birçok çeşit raylı sistem bulunmaktadır [2].

Günümüzde kullanılan raylı sistemler birçok alt bileşene sahiptir ve her bir bileşen için proje aşamasında yapılacak mühendislik hesabı oldukça önemlidir. Tüm bu hesapların, oluşturulacak komple bir bilgisayar destekli matematiksel model ile yapılması tüm alt bileşenlerin birbirleri ile ilişkili olmasından dolayı oldukça önemlidir [2]. Bu matematiksel modeller, cer gücü tedarik sisteminin alt bileşenlerinin ayrı ayrı veya bir bütün olarak incelenebilmesine; trenlerin kalkış karakteristikleri, şebekeye, enerji verimliliğine ve kalitesine etkileri, arıza ve kısa devre durumları gibi birçok analizin yapılabilmesine olanak sağlar [2]. Raylı sistem projelerinin mevcut şartlarla

oluşturulmasına olanak sağlamasının yanı sıra daha önce hiç uygulanmamış imkânların raylı sistemlere uygulandığında ne gibi sonuçlar alınacağını da analiz etmeye yardımcı olur.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, MATLAB ® Simulink ortamında raylı sistemler için oluşturulan bir matematiksel modelin geliştirilmesi ile üçüncü ray gerilimi 750 V DC olan bir sistemin tren sayısında, istasyon sayısında, trenlerin kalkış zamanında, tren motorlarının yüklenmesinde, cer trafo merkezi sayısında, cer trafo merkezinin hattı besleme yerinde, kullanılan doğrultucuların ve doğrultucu trafolarının tipinde yapılacak değişikliklerin trenlerin kalkış karakteristiklerine ve şebekeye ne gibi etkileri olduğunun analiz edilmesidir. Ayrıca geliştirilen matematiksel model yardımı ile enerji kalitesi analizinin, kısa devre hata akımı analizinin ve trenlerin kalkış karakteristikleri analizinin yanı sıra trenlerin yükleri ve trenlerin kalkışları arasındaki süreler değiştiğinde tüm sisteme ve tren kalkış karakteristiklerine etkilerinin analizi rahatlıkla yapılabilecektir. Bu analizler, cer tedarik sistemi projelerinde kullanılacak alt bileşenlerin seçimi, nasıl kullanılacağı, nerede kullanılacağı konusunda yardımcı olabilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Raylı sistemler ile ilgili birçok akademik çalışma, araştırma, makale, konferans metni, tez ve benzeri çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca, bunların yanında devlet kurumlarına, raylı sistem işletmelerine ve üretici firmalara ait birçok resmi internet sitesi raylı sistemler hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu tezde, akademik çalışmaların yanında İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü (İETT), Elektrik Mühendisleri Odası (EMO), T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı (UBAK), Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC), İstanbul Ulaşım A.ř. (İUAş), Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri (ARUS) Kümelenmesi gibi özel ve kamu kuruluşlarının yayınlarından; Eaton, Mersen, Toshiba, EM Elektrik, Alstom, Siemens gibi üretici firmaların bilgi kaynaklarından, ulusal ve uluslararası standartlardan faydalanılmıştır.

Özmen, İ. tarafından yazılan yüksek lisans tezinde “750 VDC Cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellemesi, benzetimi ve analizi konusu” detaylıca ele alınmıştır. [2]. Arlı, V. tarafından yayınlanan “Kent içi raylı sistemler” ile ilgili yazıda kent içinde kullanılan farklı raylı sistemlerin enerji özellikleri ve kullanılan araçların teknik özellikleri karşılaştırılmıştır [4]. Aydın, T. tarafından yazılan “Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi” isimli yüksek lisans tezinde raylı sistem çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir [5]. İmrak Erdem, C. ve Salman, Ö. tarafından yazılan “Füniküler sistemler ve Türkiye’de kullanımı” isimli çalışmadan faydalanılmıştır [6].

Açıkbaş, S. ve Turan Söylemez, M. [7] tarafından yapılan çalışmada 750 V DC ve 1500 V DC kullanan sistemler hakkında genel bilgiler verilmiştir ve bu sistemler birbirleri ile karşılaştırılmıştır [7]. Gamit, K. J. ve Chaudhari, K. [8] tarafından yapılan çalışmada 6, 12, 18, 24 darbeli doğrultucular modellenmiş ve sisteme harmonik etkileri incelenmiştir [8]. Alvaro O. M. ve diğerleri [9] tarafından yapılan çalışmada 12 darbeli ve 24 darbeli doğrultucular modellenmiş ve çeşitli yüklenme durumlarında harmonik etkileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır [9]. Oura, Y. ve diğerleri [10] tarafından yapılan çalışmada Japonya, Fransa, Almanya ve İtalya’da bulunan yüksek hızlı trenlerin havai katener hatları karşılaştırılmış, raylı sistemlerin AC besleme sistemleri, DC besleme sistemleri, oto trafolar, yükseltici trafolar ve üçüncü ray iletkenleri incelenmiştir [10]. Cotton, I. ve diğerleri [11] tarafından yapılan çalışmada raylı sistemlerde güç sisteminin ve çalışma raylarının tasarımının dönüş akımlarına etkisi analiz edilmiş, kaçak akım toplama sistemleri incelenmiştir [11].

Kiessling, F. ve diğerleri [3] tarafından yazılan “Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance” isimli kitapta elektrikli raylı sistemlerde kullanılan hatların planlanması, tasarımı, uygulaması ve bakımı konusu yapısal ve elektromekanik gereklilikler de dâhil olmak üzere detaylı bir şekilde anlatılmıştır [3].

Mergen, F. ve Zorlu S. tarafından yazılan “Elektrik Makineleri II, Asenkron Makineler” isimli kitaptan asenkron makineler, asenkron makinenin eşdeğer devresi ve asenkron makinede moment konusundan faydalanılmıştır [12].



2. RAYLI SİSTEMLERE GENEL BAKIŞ

2.1 Yolcu Taşımacılığında Kullanılan Raylı Sistemler

2.1.1 Tramvay sistemleri

Tramvaylar şehir içi taşımacılığın en önemli unsurlarındandır. Tramvaylar 1852 yılında Brodway’de ve 1855 yılında Paris’te kullanılmaya başlandı. 31 Temmuz 1871 tarihinde Azapkapı-Beşiktaş hattının açılması ile İstanbul’da kullanılmaya başlandı. Bu hattaki atlı tramvaylar 1914 yılına kadar kullanıldı. Türkiye’de ilk elektrikli tramvay işletmesine ise 11 Şubat 1914 tarihinde geçildi [13].

Elektrikle çalışan tramvaylar 1-3 araçtan oluşur ve 100-500 yolcu arasında kapasiteye sahiptir. Tramvaylar bir sürücü tarafından kumanda edilir, genellikle caddelerde kara ulaşım araçları ile aynı sahayı kullanır, üzerinde hareket ettiği raylar karayoluyla aynı seviyede döşenmiştir, bu sebeple karayolu trafik düzenine uymak durumundadır. Elektrik enerjisini katenerden alır, işletme hızı ise hattın şartlarına bağlıdır. Dar ve trafiğin yoğun olduğu caddelerde düşük performansa, geniş ve trafiğin yoğun olmadığı caddelerde ise yüksek performansa sahiptir. Genellikle 14-21 metre uzunluğunda olur ve 100-180 yolcu kapasitesine sahiptir [4]. Şekil 2.1’de İstanbul’da bir tramvay görülmektedir.



Şekil 2.1: İstanbul’da bir tramvay [13].

Raylı taşıtlara enerji sağlaması için kullanılan hatlara katener denir. Tramvayların enerji beslemesi katener üzerinden olur. Hat kapasitesi saatte 4-15 bin yolcudur.

Maksimum 60-70 km/saat hıza ulaşabilir, normal işletme hızı ise saatte 12-20 km'dir. İstasyon aralıkları 300-500 metredir. Tramvayların kapasitede işletme hızı saatte 8-13 km'dir [4].

2.1.2 Hafif raylı sistemler

Hafif raylı sistemlerde araç sayısı 1 ila 4 arasında değişiklik gösterir. Tramvay sistemlerinin zamanla iyileştirilmesi ile hafif raylı sistemler gelişmiştir. Performans olarak bakıldığında tramvay sistemlerinden daha performanslıdır, metro sistemlerinden ise performansı daha düşüktür. Genellikle 18-42 metre uzunluğundadır ve yolcu kapasitesi 100-750 kişidir. Hız kapasiteleri 100-125 km/saat olsa da işletmede maksimum 70-80 km/saat hıza ulaşabilir. Normal işletme hızı saatte 20-45 km, kapasitede işletme hızı ise saatte 15-40 km'dir. İstasyon aralıkları şehir içinde 400-800 metre, genel olarak 500-1000 metredir [4]. Hafif raylı sistemler enerjisini katener veya 3. ray üzerinden alır. 750 V DC veya 1500 V DC beslemeye sahiptir [5]. Şekil 2.2'de Eskişehir hafif raylı sisteminden kesit görünmektedir.



Şekil 2.2: Eskişehir'de bir hafif raylı sistem [5].

2.1.3 Metro sistemleri

Metro sistemleri yüksek hızlıdır, yüksek kapasiteye sahiptir ve inme binme süreleri oldukça hızlıdır. Araç sayısı 10'lu setlere kadar çıkabilir. Araç boyu 15-23 metre olup, yolcu kapasitesi yaklaşık 140-2400 kişidir. Maksimum hız 80-100 km/saat, normal işletme hız 25-60 km/saat ve kapasitede işletme hızı ise saatte 24-55 km'dir. 500 metreden 2000 metreye kadar istasyon aralıkları görülebilir. Enerjilerini katener veya 3. raydan alır [4]. Şekil 2.3'te dünyanın ilk metrosu olan Londra metrosundan bir resim gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Londra metrosundan bir resim

2.1.4 Manyetik levitasyonlu (maglev’li) sistemler

Maglev (manyetik levitasyon) iki set mıknatıs kullanan bir tren taşımacılığı sistemidir. Bir set treni manyetik olarak yükseltir ve havada tutar, diğer bir set ise sürtünmesiz ortamın avantajını kullanarak trenin yüksek hızlarda ileriye taşınmasını sağlar. Orta menzilli taşımacılık için (genellikle 300-600 km) hızlı trenlerle ve uçaklarla rekabet edebilir. Maglev teknolojisinde hareketli parça yoktur. Trenin stabilizesini ve hızını kontrol eden mıknatısların yolu boyunca ilerler. Bu nedenle maglev trenleri geleneksel trenlere göre daha sessiz ve daha yumuşak hareket eder. Maglev araçları trenlerin hız rekoruna sahiptir. Geleneksel trenlerden daha hızlı hızlanıp yavaşlayabilmektedir. Yolcuların güvenliği ve konforu tek sınırlamadır. Maglev sistemleri konvansiyonel tren sistemlerine göre çok daha pahalı olmasına rağmen maglev araçlarının daha basit yapısı vardır. Bu basit yapısı nedeniyle üretimi ve bakımı çok daha ucuzdur [14]. Şekil 2.4’te manyetik levitasyonlu bir trenin resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Manyetik levitasyonlu bir sistem [14].

Maglev treni için enerjinin bir kısmı treni hızlandırmak için kullanılır. Tren rejeneratif frenleme ile yavaşladığında enerji yeniden kazanılabilir. Treni havalandırmak ve

dengede tutmak için de enerji harcanır. Enerjinin çoğu hava sürtünmesinin üstesinden gelmek için kullanılır. Enerjinin bir kısmı da klima, ısıtma, aydınlatma ve diğer ortak alanlarda kullanılır. Düşük hızlarda kaldırma için kullanılan güç hafif raylı sistemlerden ve metro sisteminden %15 daha fazla olabilir [14].

2.1.5 Monoray sistemler

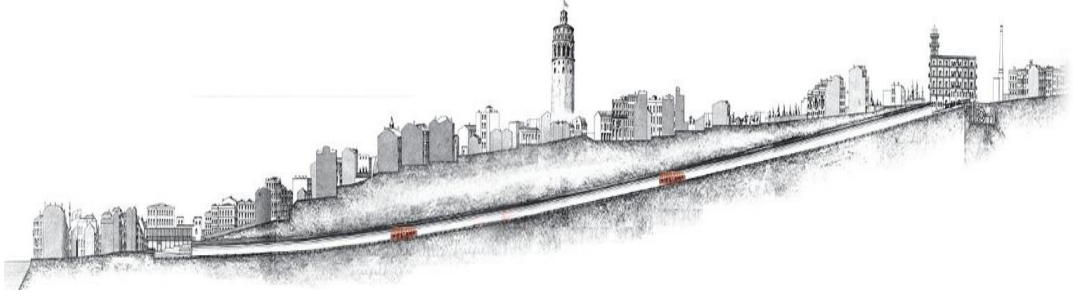
Monoray sistemlerde kullanılan araçlar kendilerine özel tek bir ray üzerinde ilerler. Araçlar dar bir hat üzerine asılır veya bindirilir. Tramvaylarda olduğu gibi yaya ve araç trafiği ile aynı alanı kullanamazlar. Monoray sistemleri genellikle lastik tekerlek kullanır ve genellikle beton hat üzerinde çalışır. Lastik tekerlek kullandıklarından enerji tüketimleri daha yüksektir. İşletme hızları, istasyon aralıkları, enerji beslemeleri ve sinyalizasyonu metro ve hafif raylı sistemler ile benzemektedir. Enerjisini 3. ray sisteminden almaktadır ve 750 V DC veya 1500 V DC geriliminde çalışır. Genellikle rejeneratif frenleme sistemi kullanılmaktadır. Hızları saatte 60-90 km'ye ulaşır [15]. Şekil 2.5'te Moskova'da bulunan bir monoray sistemin resmi verilmiştir.



Şekil 2.5: Moskova'da bir monoray sistemi [5].

2.1.6 Füniküler sistemler

Asansör ve demiryolu teknolojilerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkan bu sistem genellikle şehir merkezlerinde yükseklik farkı bulunan duraklar arasında kullanılır. Şekil 2.6'da dünyanın ikinci metrosu olarak da lanse edilen İstanbul tüneline bulunan iki füniküler aracı resmedilmiştir. Füniküler sistemlerde çekme halatı ve germe halatı ile iki araç birbirine bağlanır ve bir motor yardımıyla halatlar çekilir. İki istasyon arasındaki yükseklik farkından dolayı sistem eğimlidir ve bu eğim sayesinde aşağı doğru hareket eden tren diğer trenin yukarı çıkmasına yardımcı olurken, yukarı doğru hareket eden tren de aşağı inen trenin kontrollü şekilde hareket etmesini sağlar [15].



Şekil 2.6: İstanbul’da Beyoğlu Karaköy arasındaki funiküler sistem [13].

2.1.7 Banliyö sistemler

Şehir merkezlerinde bulunan duraklardan şehir dışına günlük olarak yolcu taşıyan ve enerjisini katenerden alan sistemlerdir. Gerilimleri genellikle 15-25 kV AC seviyesindedir [15]. Hızları saatte 50-200 km arasında değişir. Metro ve hafif raylı sistemlere göre daha büyüktür. Daha uzun mesafeler gittikleri için oturan yolcu kapasitesi ayakta yolcu kapasitesine göre daha fazladır. Belirli aralıklar ile değil belirli zamanlarda çalışır. Şekil 2.7’de gösterilen Haydarpaşa Gebze arası banliyö sistemi 2013 yılından beri hizmet vermemektedir.



Şekil 2.7: İstanbul Haydarpaşa Gebze arası banliyö sistemi.

2.1.8 Hızlı trenli sistemler

Hızlı trenler altyapı, vagon, operasyonlar gibi çeşitli teknik, ticari, operasyonel ve eğitimsel gibi konuları ile sektörler arası konuları kapsar. Yüksek hızlı ray sistemi, bu farklı konuları son derece gelişmiş teknolojiler ile bir araya getirir. Bu hızla genişleyen ulaşım metodu, çoğu zaman geleceğin ulaşım metodu olarak tanımlanmaktadır. Bu tren sisteminde yeni hatlar 250 km/saat üzerindeki hızlar için tasarlanmıştır. Mevcut hatlar ise saate 200 km veya 220 km hıza göre güncellenmiş hatlardır [16].

Uluslararası Demir Yolları Derneği (UIC)'nin internet sitesinde göstermiş olduğu veriye göre 0.75 kV, 1.5 kV, 3 kV, 15 kV, 25 kV gerilim ile çalışan trenlerin yanında dizel ve dizel+25 kV (bi-mode)  alışan tren modelleri mevcuttur [17]. şekil 2.8'de Fransa'da bulunan TGV (Fransızca: *Train   Grande Vitesse*, "yüksek hızlı tren") hızlı trenine ait bir görsel verilmiştir.



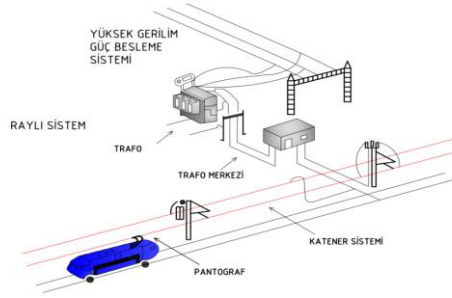
şekil 2.8: Fransız TGV yüksek hızlı treni.

2.2 Raylı Sistemlerde Kullanılan Elektrik Gücü

Raylı sistemlerde kullanılan elektrik alt yapısı trenlere hareket etmeleri ve yardımcı ünitelerini beslemeleri için elektrik gücü sağlar. Bu gücü “cer gücü” olarak adlandırılır. Bu cer gücünü ise Cer Gücü Tedarik Sistemi (Traction Power Supply, TPS) sağlar. Elektrik enerjisi ile çalışan trenler bir yakıt kaynağına ihtiyaç duymaz. Elektrikle  alışan raylı sistemler yolcuları taşımak için elektrikli lokomotifler veya kendi motoruna sahip yolcu vagonları kullanır. şebekeden veya demiryollarının kendi üretim tesislerinden elde edilen elektrik enerjisi, AIS veya GIS indirici trafo merkezlerine gelir. Bu trafo merkezlerinde gerilim ve gücü ihtiyaç olan değerlere çevrilir ve raylı sistemin elektrik ağına ve sonrasında da trenlere dağıtılır. Bu gücün dağıtılmasında genellikle iki farklı yöntem kullanılır. Katener olarak adlandırılan havai hat veya çalışan rayların seviyesine kurulmuş ve trenlerde bulunan kayan bir kolektör pabucu ile temas halinde olan 3. ray sistemi kullanılır [2]. Hem katener hattı hem de 3. ray hattı geri dönüş iletkeni olarak genellikle çalışan rayları kullanır ancak bazı sistemler ayrı bir 4. ray kullanır. şekil 2.9'da katener sistemi ile beslenen bir trenin gücü besleme sistemi örnek olarak verilmiştir.

Günümüzde elektrik gücü kullanan trenlere alternatif olarak dizel motorlu trenler bulunmaktadır. Elektrik gücü kullanan trenlerin enerji verimliliği daha fazladır ve emisyon değerleri ve işletme maliyetleri daha düşüktür. Bunun yanında bazı elektrik gücü kullanan sistemlerde mevcut olan rejeneratif frenleme sistemi enerji verimliliğini arttırmaktadır. Gücü elektroniğinin son zamanlarda hızlı gelişimlerinden önce DC

motorlar yaygın olarak kullanılırdı. Ancak güç elektroniğindeki büyük atılımlar neticesinde sincap kafesli asenkron motorların kontrolü kolaylaşmış ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [2].



Şekil 2.9: Katener sistemi ile beslenen bir trenin güç besleme sistemi.

Raylı sistemleri genel olarak üç tipe göre sınıflandırabiliriz:

- 1- Trafo merkezlerine göre sınıflandırma
 - a. Doğru akım güç sistemleri
 - b. Alternatif akım güç sistemleri
- 2- Akım toplama sistemine göre sınıflandırma
 - a. Havai katener sistemi
 - b. Üçüncü ray sistemi
 - c. Dördüncü ray ve dönüş akımları sistemi
- 3- Kullanılan motorlara ve sürücülere göre sınıflandırma
 - a. Doğru akım motorları
 - b. Doğru akım motor sürücüleri
 - c. Alternatif akım motorları
 - d. Alternatif akım motor sürücüleri
 - e. Kalıcı mıknatıslı motorlar

2.3 Cer Trafo Merkezleri

Raylı sistemlerde kullanılan cer trafo merkezleri genellikle ulusal şebekeden veya ulusal şebekenin indirici merkezinden aldığı elektrik enerjisini trenlerin motorlarında ve yardımcı ünitelerde kullanılmak üzere uygun hale getirerek istenilen seviyeye

indirir [7]. Raylı sistemlerde gaz izoleli (GIS – Gas Insulated Substation) ve hava izoleli (AIS – Air Insulated Substation) olmak üzere iki farklı tip trafo merkezi vardır. Gaz izoleli tesislerde iletkenler, akım ve gerilim trafoları, kesiciler, anahtarlar gibi tüm canlı bileşenler topraklanmış bir metal muhafaza içine alınır ve tüm sistem gaz ile doldurulur. Yalıtım gazı olarak genellikle SF6 gazı kullanılır. Hava izoleli trafo merkezlerinde ise faz-faz ve faz-toprak arası yalıtım için hava kullanılır. SF6 gazı havaya göre çok daha iyi dielektrik özelliklere sahiptir. Şekil 2.10’da hava izoleli bir trafo merkezi (154kV) , Şekil 2.11’de gaz izoleli bir trafo merkezi (168kV), Şekil 2.12’de ise gaz izoleli bir trafo (GIT – Gas Insulated Transformer) görünmektedir [18].



Şekil 2.10: Hava izoleli bir trafo merkezi [18].

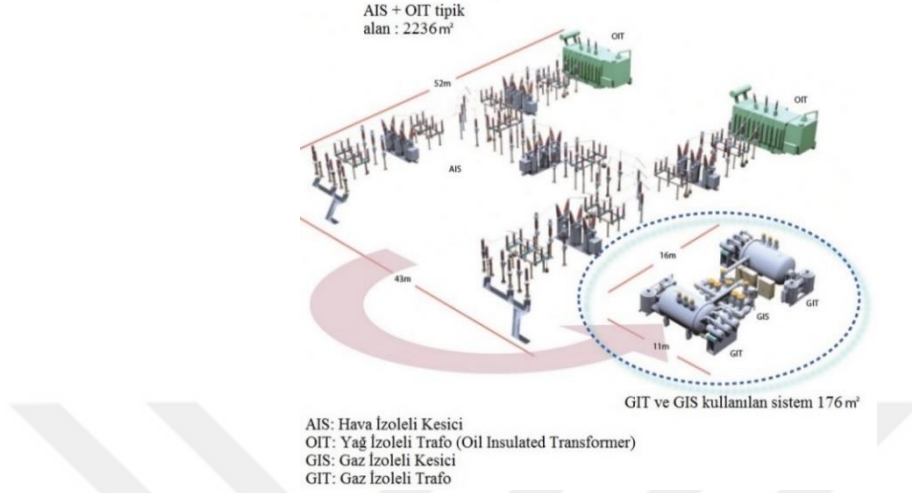


Şekil 2.11: Gaz izoleli bir trafo merkezi [18].



Şekil 2.12: Gaz izoleli trafo [18].

Gaz izoleli trafo merkezlerinin kapladıkları alan, hava izoleli trafo merkezlerinin kapladıkları alana göre oldukça azdır. Şekil 2.13’de 154 kV GIS ve AIS kullanan sistemlerin kapladıkları alan şematik olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.13: GIS ve AIS kullanan sistemlerin alanlarının karşılaştırılması [18].

Yılda yaklaşık 8000 ton SF₆ üretilmekte olup, bunun %80’i elektrik şalt sistemlerinde kullanılmaktadır. SF₆ gazlı sistem devre kesilmesi ve yalıtımı için kullanılmaktadır. SF₆ devre kesilmesi için mükemmel ark söndürme ve ısı transfer özellikleri sunar. Normal çalışma şartlarında yanmazdır ve patlayıcı değildir. Yağlı tip şalt sistemine iyi bir alternatiftir. Yalıtım olarak havanın yaklaşık üç katı elektrik delinme dayanımı vardır. Bu sayede, SF₆ gazlı pano içinde iletkenlerin daha yakın kurulumu yapılabildiğinden panonun daha kompakt yapıda olması sağlanabilir. Gaz izoleli sistemlerde (GIS), SF₆ gazının yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni bu avantajdır, ancak, sera etkisinden dolayı, Kyoto listesinde emisyonunun en aza indirilmesi gereken 6 gazdan biri olması dezavantajdır. Şu anda küresel ısınmaya katkısı düşüktür ancak diğer sera gazlarının aksine, kimyasal ve fotolitik bozulmaya karşı bağıstır, bu yüzden etkileri kümülatiftir [19].

Orta gerilim trafo merkezlerinde 3 tip kesici hücresi kullanılabilir: Gaz izoleli, hava izoleli veya katı izoleli (SIS, Solid Insulated Switchgear) devre kesici hücreleri. Devre kesiciler ise SF₆ gazlı, katı yalıtımlı veya vakumlu olabilir. Vakumlu kesicilerde ark kesintisi vakumlu bir tüp içinde gerçekleşir. Bu kesicilerde sızıntı izleme donanımına ihtiyaç yoktur. Elektrik performansı zaman zaman SF₆ gazlı kesicilerden daha iyidir. İlk yatırım maliyeti yüksektir ancak bakım maliyeti daha düşüktür. Ayrıca tüm materyallerin kullanım ömrü sonunda geri dönüşümü sağlanabilir [19].

Raylı sistemlerde dünya genelinde farklı gerilim sınıfları kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedeni elektrik motorlarının zaman içinde gelişimidir. Çer gücü sistemlerinin ilk yıllarında elektrik motorları belirli bir frekans ve gerilim aralığında sınırlı çalışmaktaydı ve 600 V DC besleme sistemi kullanılmaktaydı. Bu sistemlerin değişmesinin maliyetinden dolayı bu motorlar hala günümüzde de kullanılmaktadır. Ancak güç elektroniği ve elektrik sistemlerindeki ürünlerin gelişimi ile diğer besleme gerilimleri yeni kurulan raylı sistemlerde kullanılmaya başlandı. Bunun en ilginç örneği Madrid'in MetroSur ring hattıdır. Metronun 176 km olan mevcut ağı 600V DC ile beslenmekte, mevcut ağa yeni eklenen kısmı ise 1500V DC ile beslenmektedir [7].

En yaygın kullanılan gerilim sınıflarının altısı Avrupa ve uluslararası standardizasyon için seçilmiştir. Dünya genelinde raylı sistemler için kullanılan birçok gerilim sistemi mevcuttur. Ancak BS EN 50163 standardına göre izin verilen gerilim aralıkları Çizelge 2.1'deki gibidir [20]. Çizelge 2.1'de 60 Hz sistemler için IEC 60850 standardı kullanılmıştır [21]. Bunlar, akım çeken trenlerin sayısını ve trafo merkezinden uzaklıklarını dikkate alır.

Çizelge 2.1: Raylı sistemler için BS EN 50163 standardına göre izin verilen gerilim aralıkları [20].

Elektrifikasyon Sistemi	Gerilim				
	Geçici En Düşük	Sürekli En Düşük	Nominal	Sürekli En Yüksek	Geçici En Yüksek
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1,000 V
1,500 V DC	1,000 V	1,000 V	1,500 V	1,800 V	1,950 V
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3.6 kV	3.9 kV
15 kV AC, 16.7 Hz	11 kV	12 kV	15 kV	17.25 kV	18 kV
25 kV AC, 50 Hz (EN50163)	17.5 kV	19 kV	25 kV	27.5 kV	29 kV
60 Hz (IEC60850)					

Almanya, İngiltere ve Fransa gibi demiryolu transit sistemlerinde öncü ülkeler 600V DC ve 750V DC besleme sistemlerini kullanmaktadır. Fakat herhangi bir eski mevcut sisteme bağlı olmayan yeni kurulan hatlarda 1500 V DC besleme tercih edilmektedir. İtalya ve İspanya'da ortak sistem 1500 V DC'dir. Asya ülkelerinin çoğu 1500 V DC sistemleri nominal güçleri olarak kullanmaktadır [7]. Ülkemizde genel olarak 750 V DC tercih edilmekte iken son projelerde 1500 V DC sistemler de tercih edilmeye başlamıştır. Çizelge 2.2'de ülkemizde bulunan hafif raylı sistemlerin projeleri

verilmiştir. İstanbul’da mevcut olan bazı raylı sistemlerin projeleri Çizelge 2.3’de verilmiştir [22].

Çizelge 2.2: Türkiye’de bulunan hafif raylı sistemlerin projeleri [1].

Hat ismi	Hattın Uzunluğu (km)	İstasyon Miktarı	Ortalama Yolcu Sayısı (Kişi/Gün)	Besleme Sistemi (V DC)
İstanbul Habipler - Topkapı HRS	15,3	22	170000	750
Ankaray HRS	8,7	11	175000	750
Bursa (Burulaş)	17,1	17	200000	1500
Konya HRS	18,9	31	110000	750
Eskişehir (Estram)	16,0	26	120000	750
Samsun HRS	15,7	21	90000	750
Gaziantep HRS	9,3	13	80000	750
Kayseri HRS	17,5	28	90000	750

Çizelge 2.3: İstanbul’da mevcut olan bazı raylı sistemlerin projeleri [22].

Hat ismi	Hat Uzunluğu (km)	İstasyon Miktarı	Ortalama Yolcu Sayısı (Kişi/Gün)	Besleme Sistemi	Akım Toplama Sistemi
M1A Aksaray - Atatürk Havalimanı M1B Aksaray - Kirazlı Hafif Metro Hattı	24,9 (+0,7)	22	300000	750 V DC	Havai Hat Kataner
M2 Yenikapı - Hacıosman Metro Hattı	21,64 (+3,1)	16	320000	750 V DC	3. Ray
M3 Başakşehir - Metrokent Olimpiyat - Kirazlı Metro Hattı	15,9	11	30000	1500 V DC	Rijit Katener Sistemi (Depo, Viyadük Bölgesi HavaiHat Katener)
M4 Kadıköy - Kartal Metro Hattı	21,7 (+4,4)	16	185000	1500 V DC	Rijit Katener Sistemi
T1 Kabataş - Bağcılar Tramvay Hattı	18,21	31	380000	750 V DC	Havai Hat Katener
T3 Kadıköy - Moda Nostaljik Tramvay Hattı	2,6	10	2000	600 V DC	Havai Hat
T4 Topkapı-Habipler Tram Line	15,3	22	110000	750 V DC	Havai Hat Katener
F1 Taksim - Kabataş Füniküler Hattı	0,594	2	30000	3 x 690 VAC - 3 x 400 VAC 3.Ray	Araçta - 3. Ray

Farklı raylı sistem uygulamalarında farklı akım toplama sistemleri ve farklı hat gerilimleri kullanılabilmektedir. Metrolarda, havai hatlar ve 3. ray sistemleri

kullanılmakta, 750 V DC, 1500 V DC ve 3000 V DC besleme gerilimleri tercih edilmektedir. Tramvay ve hafif raylı sistemlerde genellikle havai hat ve 3. ray sistemi 750 V DC besleme gerilimi ile kullanılmaktadır. Yüksek hızlı trenler havai hat kullanmakta ve besleme gerilimi olarak 3000 V DC, 25 kV AC, 2x25 kV AC sistemleri kullanılmaktadır. Ana hat trenleri de havai hatları kullanmakta ve 3000 V DC, 15 kV AC ve 25 kV AC sistemler ile beslenmektedir. 2x25 kV AC havai hat sistemlerini yüksek hızlı trenler ve ağır yük trenleri kullanmaktadır [2].

2.3.1 Doğru akım güç sistemleri

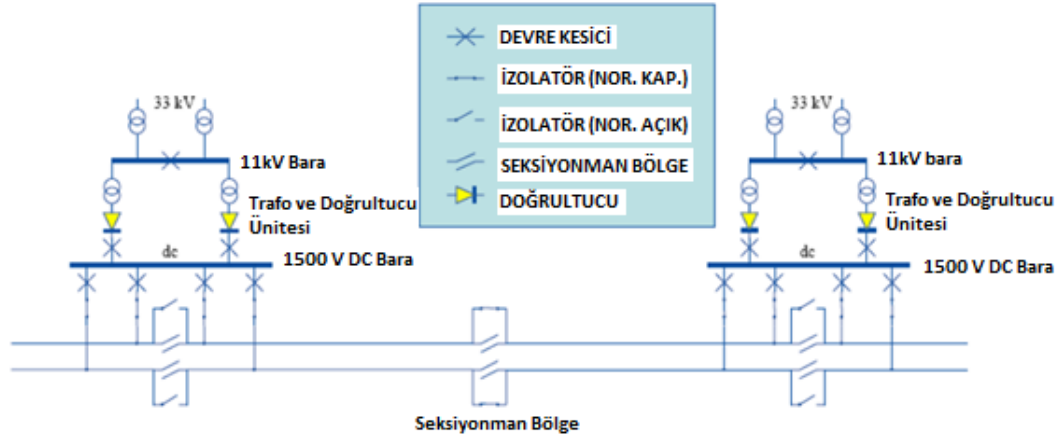
Raylı sistemler değişken hızlarda çalışmalıdır. 1950'li yılların ortalarına kadar bu sadece fırça tipi DC motorlarla olmaktadır, ancak bu tip bir doğru akım (DC) motoru araç üzerinde bulunan bir güç dönüşüm sistemi ile AC katenerinden beslenmelidir. Bu dönüşüm sistemi 20. yüzyılın başlarında iyi bir gelişme gösteremediğinden ilk elektrikli raylı sistemler doğru akım sistemlerini kullanmaktaydı [2].

Güç elektroniğindeki gelişmelerden önce transformatörler DC gerilimi azaltamıyordu bu sebeple trenler motorların kullanabileceği düşük DC gerilimler (600 V DC) ile besleniyordu. Üçüncü ve dördüncü ray sistemleri güvenlik nedeniyle 1 kV' un altında, havai hatlar ise verimlilik sebebiyle genellikle daha yüksek gerilimler kullanır [2].

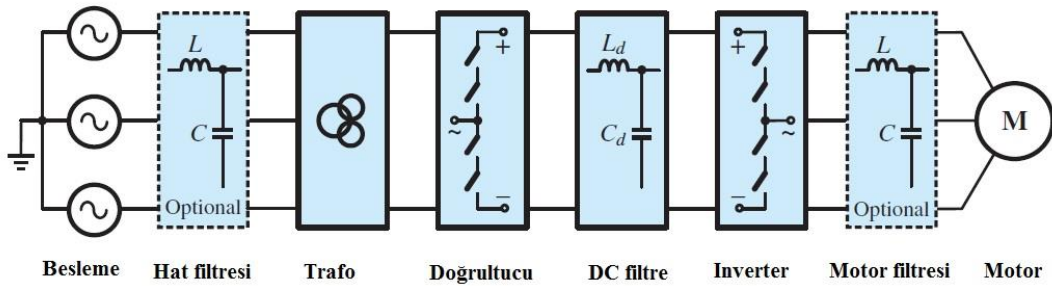
Şebekelerden yüksek gerilimli AC sağlandığından dolayı, raylı sistemler düşük DC gerilim (genellikle 3000 Volt ve daha düşük) elde etmek için dönüştürücü istasyonlar yani trafo merkezleri kullanır. Mevcut DC sistemlerde $P=VI$ olduğundan düşük gerilim yüksek akım anlamına gelir. DC motorlar DC güç ile doğrudan beslenecek ise direnç kayıplarını azaltmak için daha kalın, daha kısa besleme kabloları ve yakın mesafede trafo merkezleri kullanılmalıdır.

Trafo merkezleri arası mesafe yaklaşık olarak 750 V DC sistem için 1-3 km, 1500 V DC sistem için en uzun 5 km, 3000 V DC sistem için ise en uzun 7,5 km olmalıdır. Bu sebeple kent içi raylı sistemlerinde ve iki istasyon arası veya hat boyu 40 km mesafeye kadar olan hatlarda DC sistem tercih edilebilir fakat 40 km üzeri olan hatlarda gerilim düşümünün fazla olacağından dolayı ve trafo merkezleri sayısı artacağından dolayı DC sistemler tercih edilmez [2]. Modern yüksek hızlı demiryolu projeleri genellikle yüksek gerilimli AC kullanılmaktadır. Şekil 2.14'te de tipik cer gücü besleme sisteminin

konfigürasyonu gösterilmiştir. Şekil 2.15’de hattın şebekeden motora kadar işleyişinin şeması verilmiştir.



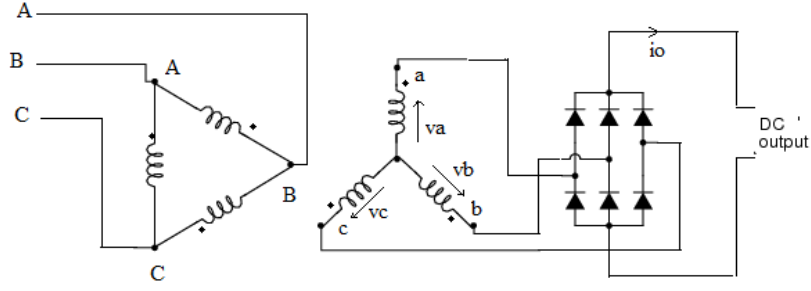
Şekil 2.14: Tipik cer gücü besleme sistemi konfigürasyonu, 1500 V DC [2].



Şekil 2.15: Şebekeden motora kadar hattın işleyişi.

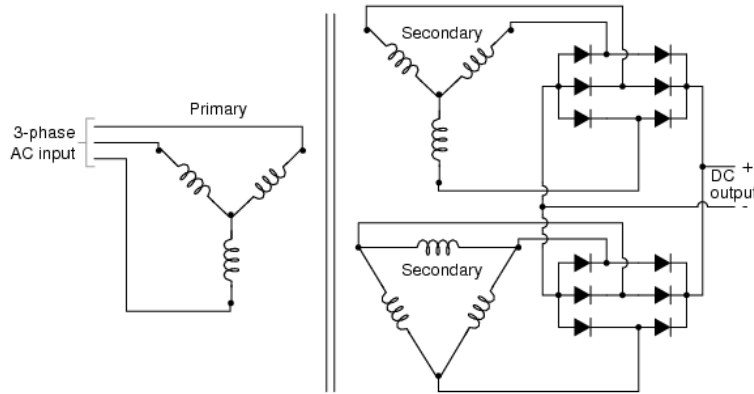
Cer gücü besleme sisteminde bulunan trafolar yüksek gerilimi istenilen seviyeye düşürür ve bağlı oldukları doğrultucu üniteleri besler. Doğrultucular 6, 12, 18 veya 24 darbeli olabilir. Doğrultucular diyot yarı iletkeni kullanılıyorsa kontrolsüz doğrultucudur, tristör kullanılıyorsa kontrollü doğrultucudur. Günümüzde 6 darbeli doğrultucular DC hatlarda çok kullanılmamaktadır. 12 darbeli doğrultucular daha yoğun kullanılsa da yeni kurulan sistemlerde 24 darbeli doğrultucular da tercih edilmektedir.

Altı darbeli bir doğrultucu üç fazlı köprü doğrultucu olarak da bilinir. Altı darbeli diyot doğrultucunun güç devresi şeması şekil 2.16’da gösterilmiştir. Diyotlar üçayak şeklinde düzenlenmiştir. Üst diyotlar D1, D3, D5 diyotların pozitif grubudur. D2, D4, D6 alt diyotları negatif grubu oluşturur. Üçgen-yıldız üç fazlı bir trafo ile beslenir. Üç fazlı altı darbeli diyot doğrultucu, üç fazlı tam dalgalı diyot doğrultucu olarak da adlandırılır [8].



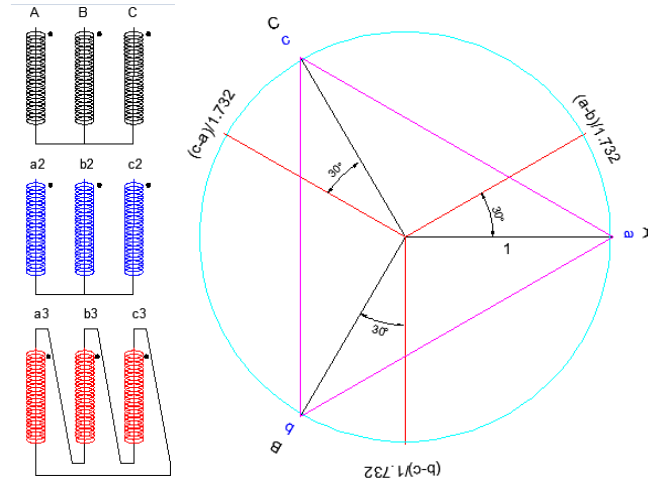
Şekil 2.16: Altı darbeli diyot doğrultucunun güç devresi şeması [8].

12 darbeli AC-DC çevirici aynı zamanda 3 fazlı 12 darbeli doğrultucu olarak da bilinir. Döngü başına darbe sayısı arttıkça çıkış DC dalga şekli iyileşir. Bu sebeple 12 darbeli doğrultucuyla elde edilen dalga formunun kalitesi 6 darbeli doğrultucunun dalga formunun kalitesinden daha iyidir. Şekil 2.17’de on iki diyottan oluşan bir 3 fazlı 12 darbeli doğrultucu için devre şeması verilmiştir. 12 darbeli doğrultucuyu besleyen 3 fazlı trafonun ikincil (sekonder) sargısı iki adettir ve üçgen bağlantılı birincil (primer) sargısı vardır. İkincil sargının biri üçgen diğeri ise yıldızdır. Yıldız bağlı ikincil sargı üst 3 faz diyot köprü doğrultucuyu beslerken, üçgen bağlı ikincil sargı alt üç faz diyot köprü doğrultucuyu besler. Her köprü doğrultucu 6 diyot kullanır [8]. 12 darbeli doğrultucu için sargı durumları ve fazör diyagramı ise Şekil 2.18’de gösterilmiştir. 12 darbeli doğrultucuda ikincil gerilimler arası faz farkı 30 derecedir [8].



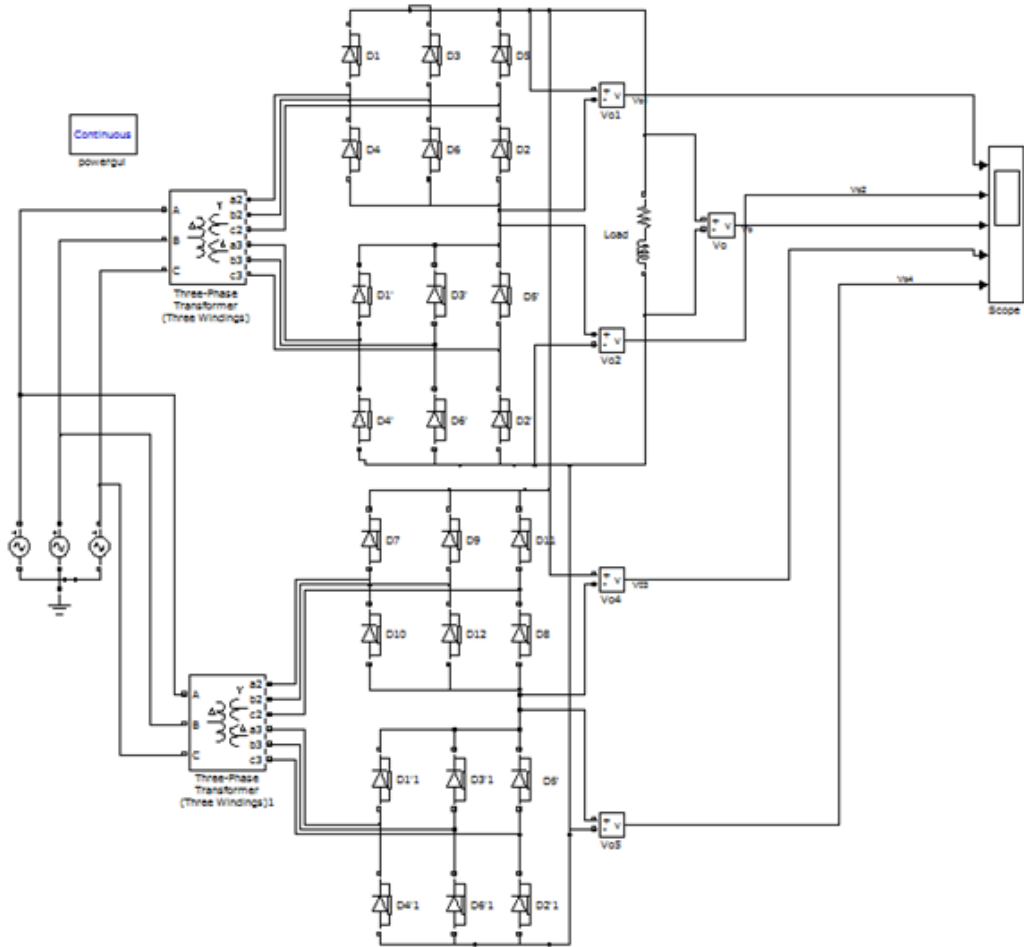
Şekil 2.17: 12 diyottan oluşan 3 fazlı 12 darbeli doğrultucu [8].

12 darbeli doğrultucular kullanıldığında giriş hattının akım total harmonik bozunumu (THD-I) kabul edilebilir seviyelere indirmek için pasif veya aktif filtrelerin kullanılması gerekir. 24 darbeli doğrultucular ek filtre olmaksızın harmonik gereksinimleri karşılayabilir, böylece hacimleri ve ağırlıkları 12 darbeli doğrultucular ve filtrelerden daha az olabilir [9].



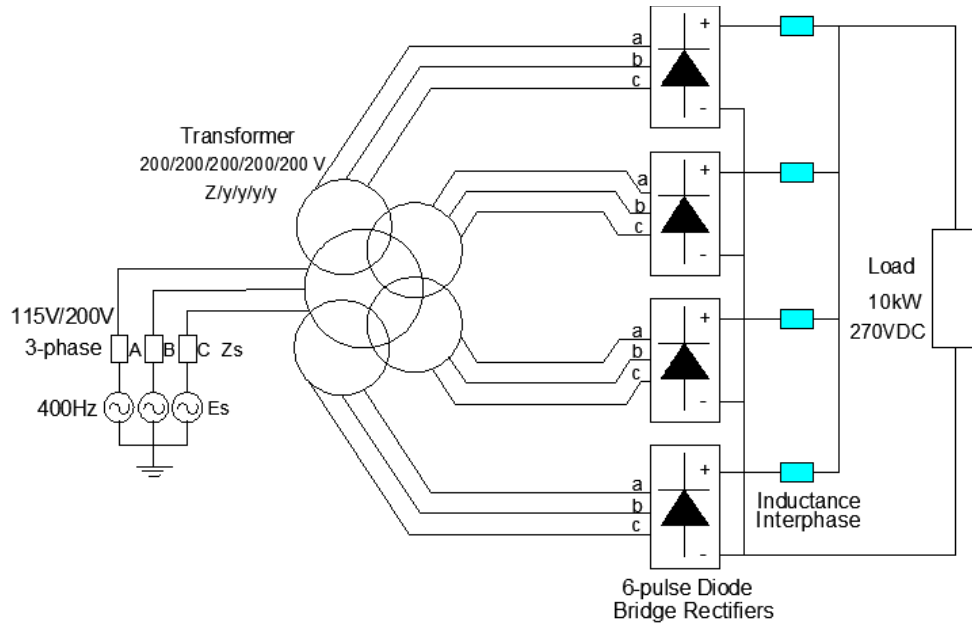
Şekil 2.18: 12 darbeli doğrultucu için sargı durumları ve fazör diyagramı [9].

Şekil 2.19’da gösterildiği gibi üçgen bir primer sargıya ve yıldız ve üçgen olmak üzere iki sekonder sargıya sahip iki trafo ile 24 darbeli doğrultucu beslenebilir veya Şekil 2.20’de gösterildiği gibi dört zikzak (zigzag) trafo bu besleme için kullanılabilir.

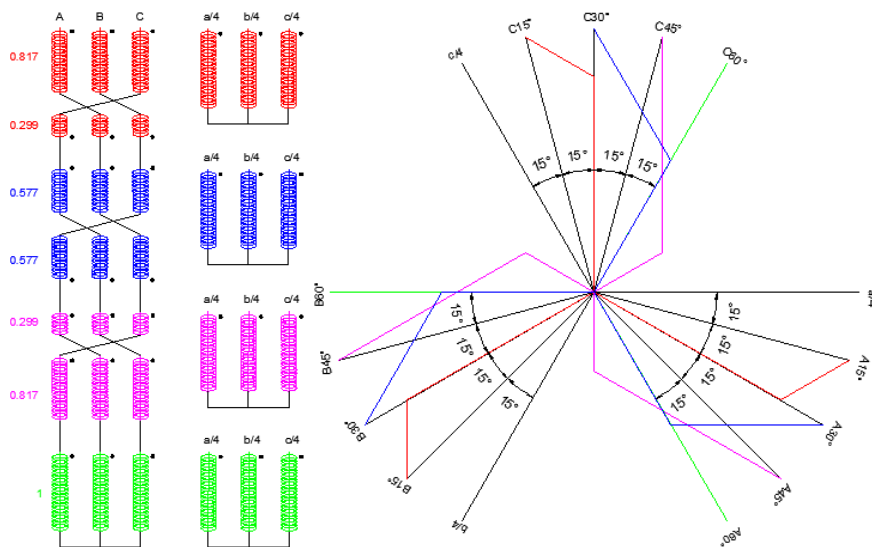


Şekil 2.19: Üçgen bir primer sargıya ve yıldız ve üçgen olmak üzere iki sekonder sargıya sahip iki trafo ile 24 darbeli doğrultucu [8].

Zigzag yapılandırmada konvansiyel trafoların birbirine bağlanmasıyla 15, 30, 45 ve 60 derece faz kaymalı dört adet üç fazlı sekonder elde edilir [9]. Üç fazlı çıkış gerilimleri, aralarında aynı genliğe ve 15 derece faz kaymasına sahip dört sekonderden elde edilir. Gerekli faz kaymaları primer sargıların zigzag konfigürasyona bağlanmasıyla elde edilir. Şekil 2.21’de 24 darbeli transformatör sargıları bağlantısını ve trafo çıkışındaki 12 fazlı gerilim sistemini temsil eden faz diyagramını göstermektedir [9]. İstanbul’da M4 Kadıköy-Kartal ve M3 Kirazlı-Başakşehir raylı taşıma sistemlerinde 24 darbeli doğrultucu kullanılmaktadır [2].



Şekil 2.20: Dört zigzag trafo ile 24 darbeli doğrultucu [9].



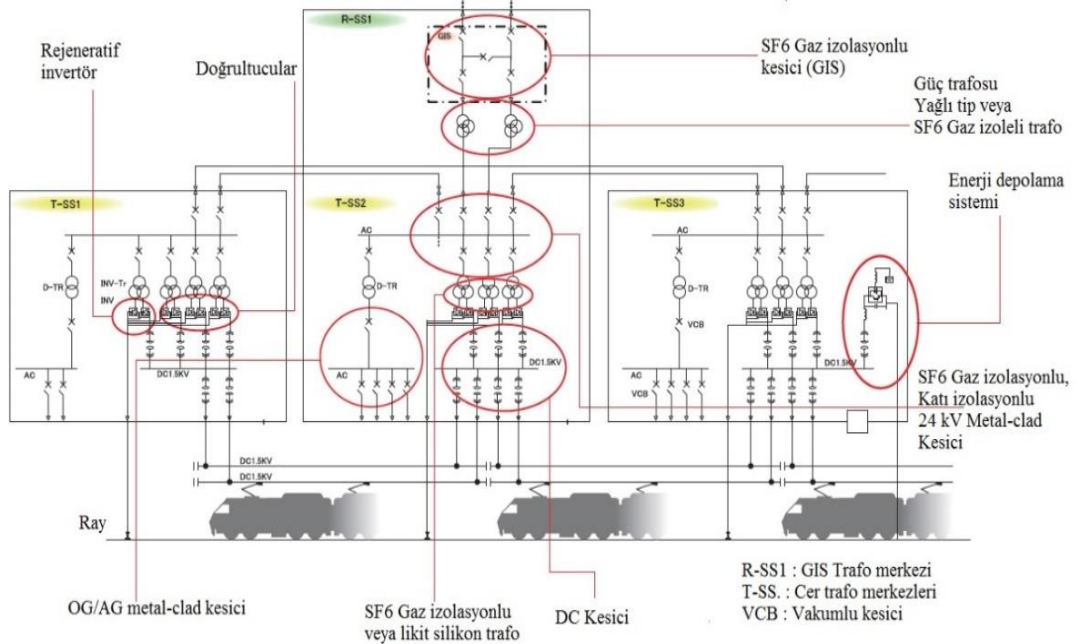
Şekil 2.21: 24 darbeli doğrultucu için trafo çıkışındaki 12 fazlı gerilim sistemini temsil eden faz diyagramı [9].

Tüm raylı sistemlerde, güvenli bir işletme için devre kesici kullanılır. DC devre kesiciler demiryolu altyapısının kritik bir parçasıdır. Devre kesiciler trenlerin üzerine veya cer gücü trafo merkezlerinde monte edilebilir. Trafo merkezlerinde doğrultucu ile DC bara arasında ve DC bara ile canlı hat arasında kurulurlar. Devre kesicilerin en önemli görevi korumadır. Arıza ve kısa devre esnasında açmaya giderek altyapıyı ve sistemdeki cihazları korur. Devre kesicinin çalışmaması durumunda hat enerjisiz kalabilir veya altyapıda ciddi hasarlar meydana gelebilir [23].

Devre kesicilerin diğer görevleri arasında kumanda, servis ve izolasyon sayılabilir. Devre kesicilerin kullanım ömrü uzundur. Şekil 2.22’de arabalı çekmeceli tip bir DC devre kesici gösterilmiştir ve mekanik dayanımı 20,000 operasyondur [23]. Şekil 2.23’te DC akım güç sistemlerinin genel yapısı verilmiştir [24].



Şekil 2.22: Arabalı ve çekmeceli tip bir DC devre kesici [23].



Şekil 2.23: DC akım güç sistemlerinin genel yapısı [24].

2.3.2 Alternatif akım güç sistemleri

Elektrik tesisleri ve demiryolları yüksek gerilimler üretmek için alternatif akım kullanır. Gerilim ne kadar yüksek olursa, aynı gücü elde edebilmek için taşınan akım o kadar düşük olur. Bu da hat kayıplarını azaltır, böylece daha yüksek gücün iletilmesine izin verilir. Alternatif akım yüksek gerilimlerde kullanıldığı için, iletilmesi havai hatlar ile olur, 3. ray sistemi ile taşınmaz. Lokomotif içinde bulunan bir trafo, cer motorları ve yardımcı yüklerin kullanması için gerilimi istenen seviyeye düşürür. AC sistemin ilk kullanıldığı zamanlardaki avantajı DC lokomotiflerde hız kontrolü için kullanılan ve güç harcayan dirençlere AC lokomotiflerde ihtiyaç olmamasıdır. Trafolardan çeşitli aralıklarda gerilim sağlanabilir. Ayrı düşük gerilimli trafo sargıları, aydınlatma ve motoru süren yardımcı makineler için güç sağlayabilir.

Son zamanlarda çok yüksek güçteki yarı iletkenlerdeki gelişmeler ile değişken frekanslı bir sürücü tarafından beslenen üç fazlı indüksiyon motorları ilk zamanlarda hız kontrolünün basit olması nedeni ile yaygın olarak tercih edilen DC motorların yerini almıştır [2]. Bu sürücü frekans ve gerilimi değiştirerek motor hızını kontrol edebilmektedir. Bu sürücüler AC ve DC sistemlerde herhangi bir frekansta iyi sonuçlarla çalışabildiğinden birçok modern elektrikli lokomotif değişik gerilim kaynakları ve frekanslar ile çalışabilmek için bu sürücülerle dizayn edilmiştir. 50 ve 60 Hz'lik standart AC dağıtım frekanslarında karşılaşılan zorluklar nedeni ile birçok demiryolu bu problemlerin üstesinden gelmek için düşük AC frekanslarını seçmiştir. AC sistemi DC sisteme çeviren, yüksek güçlü cıva-ark ve yarı iletken doğrultucularının geliştirilmesi ile düşük frekansların kullanımı azaldı. Güç elektroniğindeki bu gelişmeler neticesinde demiryolu sisteminde kullanılan frekanslar, standart şebeke sisteminde kullanılan frekanslarla aynı seviyeye geldi. Bazı AC demiryolları standart şebeke frekanslarına dönüştürüldü ancak büyük maliyetler nedeni ile düşük frekanslı sistemler hala kullanılmaktadır [2].

Düşük frekanslı alternatif akım Avrupa'da Almanya, Avusturya ve İsviçre gibi ülkelerin demiryolu sistemlerinde 15 kV 16,7 Hz olarak kullanıldı. Amerika Birleşik Devletleri'nde bir zamanlar yaygın endüstriyel güç frekansı 25 Hz, birçok demiryolu sisteminde 12 kV gerilimi ile kullanıldı [2].

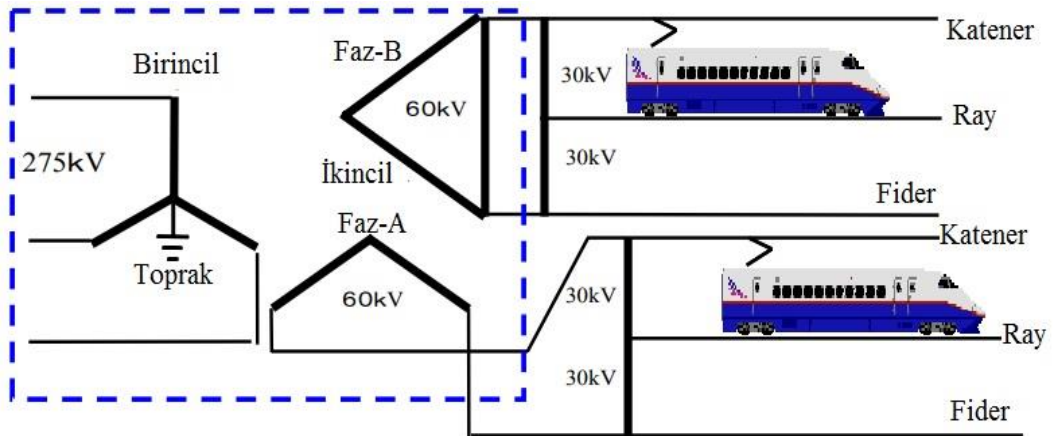
Standart 50 (veya 60 Hz) Hz frekanslı tek fazlı alternatif akım 1950'li yıllarda Fransa'da 25 kV olmak üzere kullanıldı [2]. Oldukça ekonomik olan bu sistemde,

harici güç sisteminin fazları eşit olmayan şekilde yüklenmektedir ve önemli akustik gürültünün yanı sıra önemli bir elektromanyetik girişim meydana gelir. Standart 50 Hz AC sistemlerde yüksek gerilim kullanılması nedeni, hatlarda daha düşük akımlar taşınabilir ve bu sebeple gerilim düşüşü daha az olur. Bu, trafolar arası mesafenin uzak olmasına olanak sağladığından uzak mesafeli hatlarda tercih edilmektedir. Bu sistemlerde cer trafoları daha fazla alana ihtiyaç duyar, trafo merkezlerini inşa etmek zorlaşır. Bu sebeple kent içi sistemlerde tercih edilmez [2].

AC sistemlerde kullanılan trafoların arasındaki mesafe 15-50 km arasında olup, DC sistemler ise bu mesafe 2-5 km arasındadır. AC sistemlerde hat iletkenleri hafiftir fakat çok daha büyük izolatör kullanır, DC sistemlerde ise hat iletkenleri daha ağırdır fakat küçük izolatörler kullanılır. İletkenlerde oluşan kaçak akımların AC sistemlerde metal aksamalara etkisi yoktur, DC sistemlerde ise korozyon gibi ciddi etkileri vardır. AC sistemlerin haberleşme ve sinyalizasyon cihazlarına elektromanyetik girişim etkisi oldukça fazladır, DC sistemlerde ise etkileri pek görülmez [2].

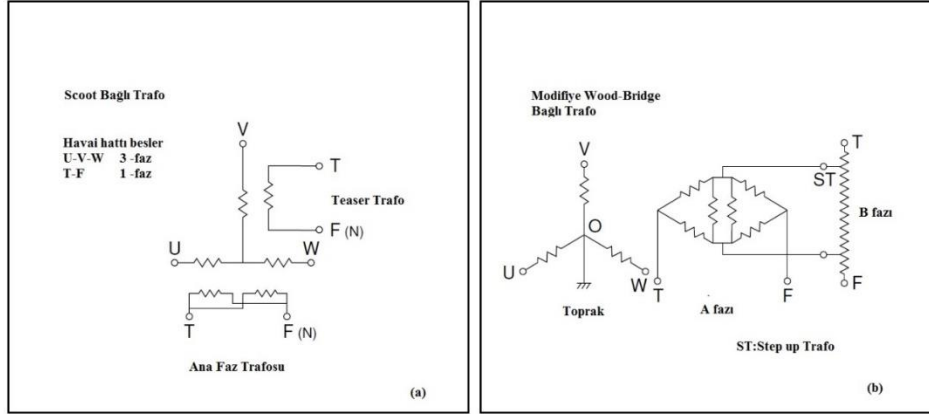
AC besleme sistemleri için, basit AC besleme sistemi, yükseltici trafolu (BT: booster transformer) besleme sistemi, oto trafolu (AT: auto transformer) besleme sistemi ve koaksiyel kablolu besleme sistemi olmak üzere dört farklı besleme sistemi vardır [10].

Basit AC besleme sisteminde elektrik şebekesinden gelen üç fazlı güç, iki faza dönüştürüldüğünden, yukarı ve aşağı havai katener hattının her biri bir faz ile beslenir. Besleme trafolarını bağlamak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Günümüzde, Şekil 2.24'de çatı üçgen (roof-delta) bağlı trafo, Şekil 2.25 (a)'da gösterilen scott bağlı trafo ve Şekil 2.25 (b)'de gösterilen modifiye ahşap köprü (wood-bridge) bağlı trafo nötr noktası doğrudan topraklanarak ekstra yüksek gerilim almak için kullanılır [10].

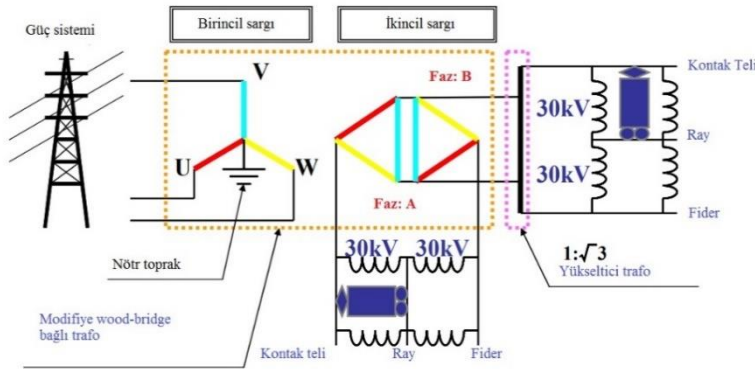


Şekil 2.24: Roof-delta bağlı trafo [24].

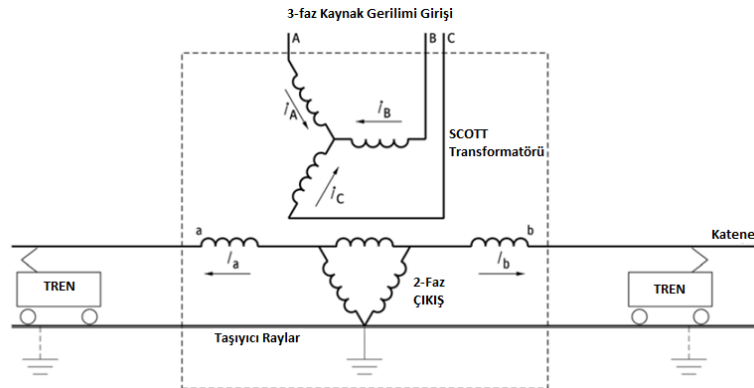
Wood-bridge bağı transformator Şekil 2.26'daki gibi üç fazı 90 derecelik açıda farklı iki faza dönüştürür. Sekonder sargıda, transformatorün tek fazını $\sqrt{3}$ katına dönüştüren bir yükseltici trafosu vardır [24]. Scoot trafo üç fazlı bir sistemin iki fazlı bir sisteme çevirerek faz dengesizliğini azaltabilmektedir, Şekil 2.27'de scoot trafonun demiryolu sistemine bağlantı şekli verilmiştir [2]. Şekil 2.28'de scoot bağı bir trafo görünmektedir.



Şekil 2.25: (a) Scott bağı trafo. (b) Modifiye wood-bridge bağı trafo [10].



Şekil 2.26: Wood-bridge bağı trafonun 3 fazı 2 faza dönüştürmesi [24].

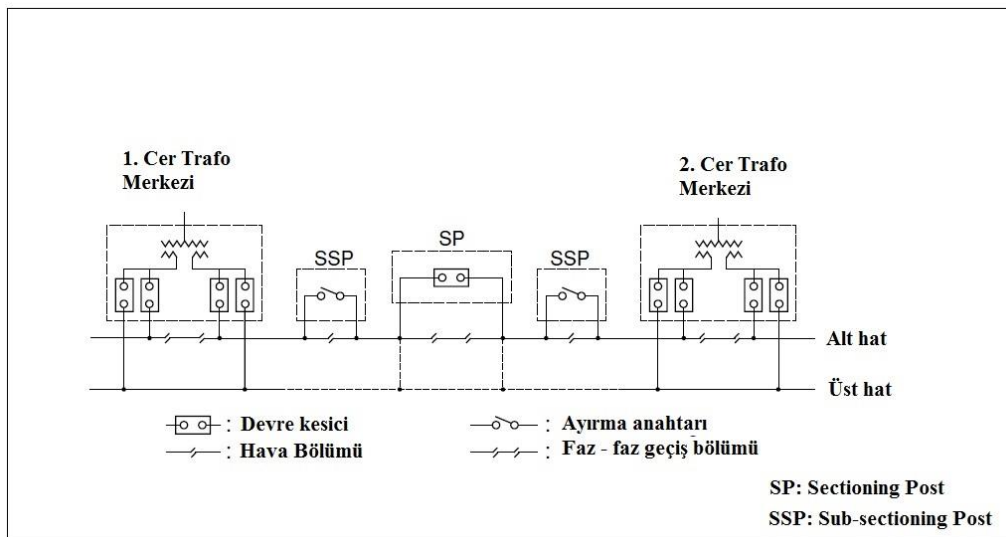


Şekil 2.27: Scoot trafonun demiryolu sistemine bağlantısı [2].



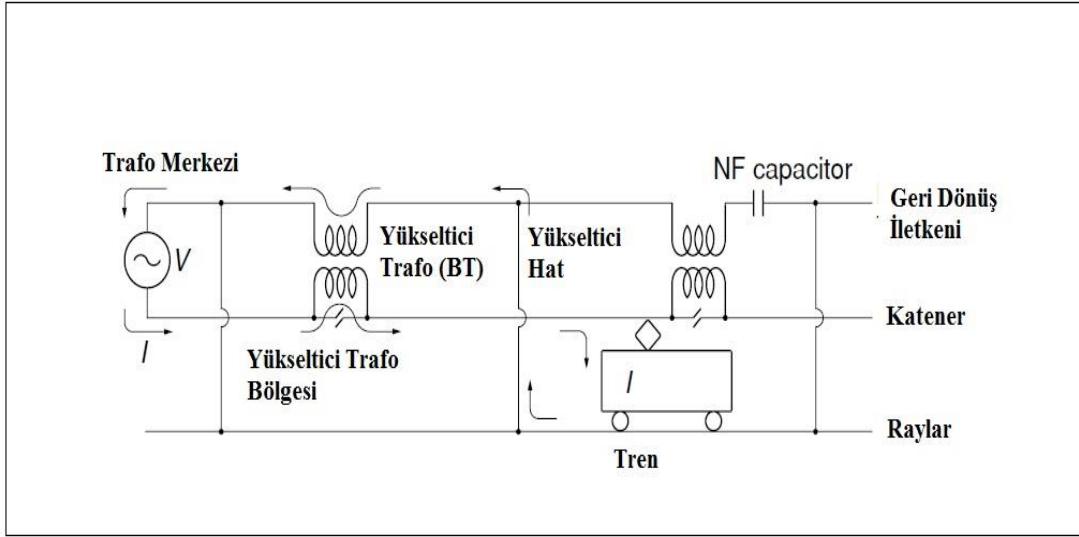
Şekil 2.28: Scoot bağlı bir trafo örneği.

Basit bir AC besleme sisteminin yapısı Şekil 2.29’da gösterilmiştir [10]. Cer trafo merkezlerinde bulunan trafolar şebekeden gelen gerilimi istenilen seviyeye düşürür. Ülkemizde genellikle 154 kV şebeke 25 kV seviyesine düşürülür. Cer trafo merkezlerinde bulunan kesiciler üzerinden alt ve üst hatlar beslenir. Cer trafo merkezi 1 ve cer trafo merkezi 2 birbirine seksiyonman bölgede bulunan kesiciler üzerinden bağlıdır. Bu kesiciler normalde açık pozisyonundadır. Herhangi bir trafonun merkezinin çökmesi durumunda ilgili kesiciler kapalı pozisyona geçer ve hat diğer trafodan beslenmeye devam eder. Hatlar trafoların farklı fazlarından beslenmektedir. Farklı fazlar birbirleri ile çakışırsa kısa devre ile sonuçlanabilir. Bu sebeple faz-faz geçiş bölümleri oluşturulmuştur. Bu bölümlere nötr bölge de denilmektedir [2].



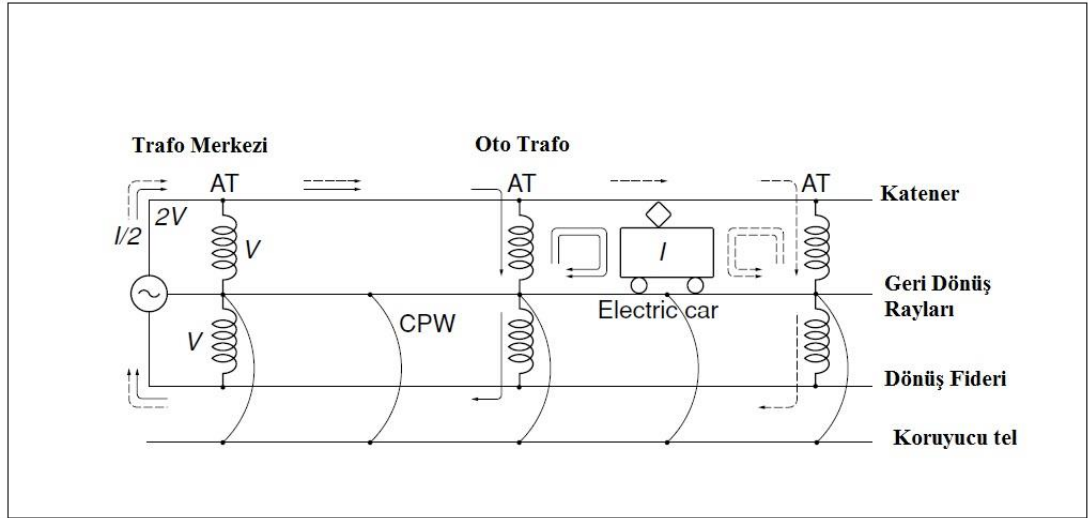
Şekil 2.29: Basit bir AC besleme sisteminin yapısı [10].

Diğer bir besleme sistemi olan yükseltici transformatör besleme sisteminin devresi Şekil 2.30’da gösterilmiştir. Negatif hattaki dönüş devresinin akımını arttırmak için katener üzerine her 4 km’de bir BT kurulur. Bu tasarım, telekomünikasyon hatları üzerindeki endüktif girişimi en aza indirir çünkü akım sadece sınırlı bölümlerde raylara akar. Bir elektrikli tren, bir BT bölümünden geçerken, bölümde büyük bir ark oluşur. Büyük bir yük akımı çok büyük bir arka neden olabilir ve bu ark havai hatta zarar verebilir. Bu nedenle, kondansatörler reaktansı kompanze etmek, pantograf tarafından yakalanan akımın miktarını azaltarak böylece arkı azaltmak ve gerilim düşüşünü önlemeye yardımcı olmak için genellikle seri olarak negatif fidere eklenir [10].



Şekil 2.30: Yükseltici transformatör besleme sisteminin devresi [10].

Oto transformatör beslemeli sistemlerde ise katener ve dönüş fiderine, trene uygulanan gerilimin iki katı uygulanır. Şekil 2.31’ gösterildiği gibi gerektiğinde hat boyunca her 10 km’de bir yerleştirilen 1:1 dönüştürme oranına sahip AT, havai hat gerilimini bölerek katener ve dönüş fiderine uygulanan gerilimin yarısını elde etmeyi sağlar. Bu telekomünikasyon hatlarında endüktif girişimi azaltmada oldukça etkilidir [10]. Ayrıca trafo merkezlerinin arasındaki mesafenin artmasını sağlar, dolayısıyla bu merkezlerin sayısını azaltmaya da yardımcı olur. Dünyada az da olsa AT dönüştürme oranı 2:1 ve 3:1 olan AC sistemler de mevcuttur. Gerilim seviyesi yükseldikçe aynı güç için iletilecek akım azalacağından trafo merkezleri arasındaki mesafeler de dönüştürme oranının yükselmesiyle artabilir [2]. Şekil 2.32’de bir oto trafo resmi gösterilmiştir.



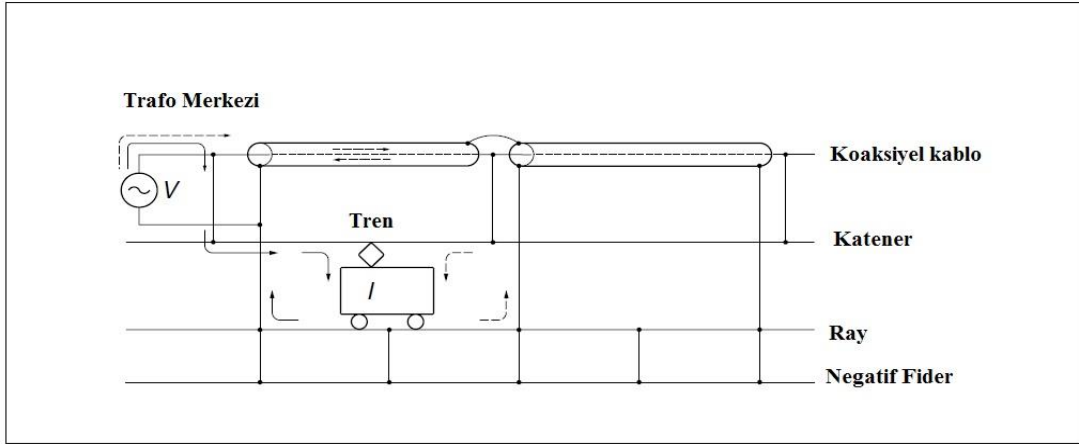
Şekil 2.31: Oto transformatör besleme sisteminin devresi [10].



Şekil 2.32: Bir oto trafo resmi [24].

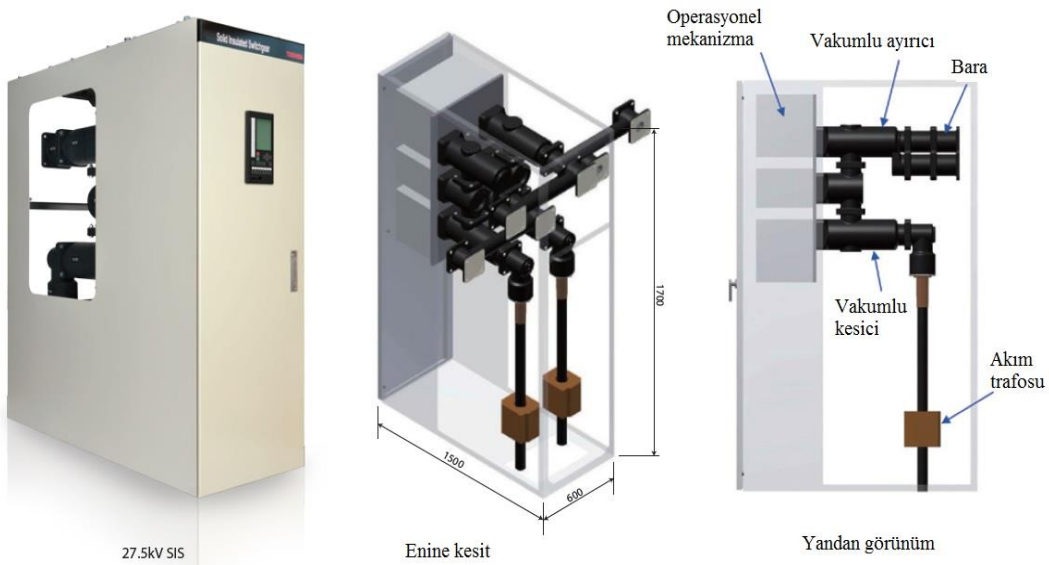
Koaksiyel kablo besleme sistemi ise sadece Japonya’da Tohoku Shinkansen ve Tokaido Shinkansen’in Tokyo bölümlerinde kullanılmıştır. Şekil 2.33’de gösterildiği gibi ray boyunca yerleştirilmiş koaksiyel kabloya sahiptir ve her birkaç kilometrede iç iletken katener hattına bağlanırken, dış iletken raya bağlanır. Kablo çok pahalı olmasına rağmen iletken düzeni gayet basittir. Bu sebeple alanın kısıtlı olduğu yerlerde tercih edilebilir. Havai hat ile karşılaştırıldığında, koaksiyel kablo oldukça düşük empedansa sahiptir. Bu nedenle yük akımı, havai hattın yük akımına göre yüksektir.

Bu da AT besleme sistemine benzer bir akım dağılımı elde etmeyi ve telekomünikasyon hatlarında endüktif girişimin önemli ölçüde azalmasını sağlar [10].



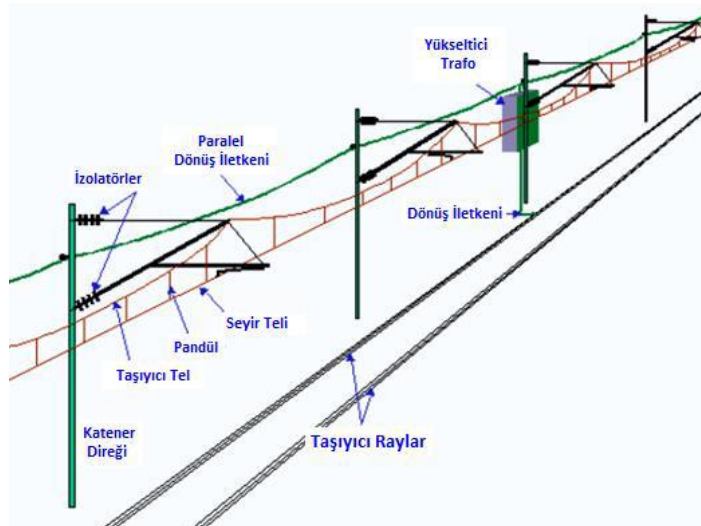
Şekil 2.33: Koaksiyel kablo besleme sistemi [10].

Alternatif akım güç sistemlerinde, cer trafosu, oto trafo, yükseltici trafo, devre kesiciler, sviçler, kontrol ve röle panosu, AC besleme koruma rölesi ekipmanları yaygın olarak kullanılmaktadır. Devre kesiciler katı izolasyonlu, gaz izolasyonlu veya vakumlu olabilir. Katı izolasyonlu devre kesiciler, SF6 gazı veya hava yerine yalıtkanlığı sağlamak için işlevselliği ve güvenilirliği daha da arttırılmış epoksi reçine malzeme kullanır. Bu katı yalıtkan sayesinde daha kompakt çözümler elde edilebilir. Baralar arası mesafe çok daha kısadır ve bakımı çok daha kolaydır. Şekil 2.34'te katı izolasyonlu bir kesici görünmektedir. Şekil 2.35'te de AC güç sisteminin genel yapısı verilmektedir [24].



Şekil 2.34: Katı izolasyonlu bir kesici [24].

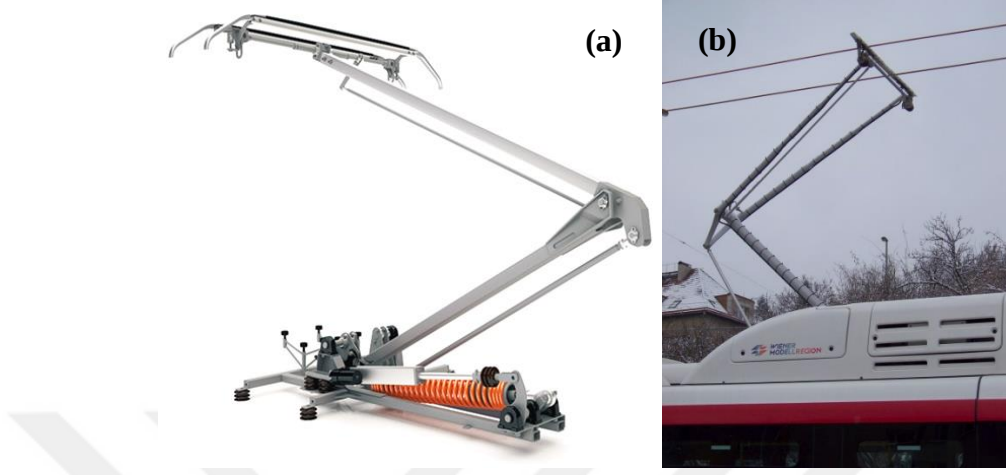
Trenler üzerinde bulunan motorlara ve yardımcı sistemlere güç sağlamak için gerekli olan elektrik bir katener üzerinde çalışan pantograf ile toplanır. Katener, pantograf ile donatılmış ve elektrik ile çalışan lokomotif, elektrik enerjisi sağlamak için kullanılan havai kabloların sistemidir. Pantograf ise lokomotifin çatısına sabitlenmiş bir mafsallı kol sistemidir. Dikey bir eksen boyunca açılır ve uzar. Görevi iletkendeki gücü aktarmaktır. Bir ana çerçeveden, bir koldan, bir pantograf kafasından ve bir sürücünden oluşur. Tek ve çift kollu pantograf olmak üzere iki tipi vardır. Günümüzde tek kollu pantograf yüksek hızlarda daha kompakt ve duyarlı bir tasarıma sahiptir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek kollu pantograf düşük hızlı tramvaylardan çok hızlı trenlere kadar havai hat kullanan her sistemde kullanılabilir. Pantograf kafasına monte edilen kontak şeritler ile akım toplanır. Bu şeritlerin tipi ve sayısı iletilecek akım miktarına göre ve katenerin şartlarına göre belirlenir. Yüksek gerilimli AC hatlarda saf karbon tercih edilirken, düşük gerilimli DC hatlarda metal grafit tercih edilebilir [25]. Pantograf kesintisiz ve iyi kalitede güç sağlamak için havai hatlar ile her zaman temas halinde olmalıdır. Ancak bu teması sağlarken ne çok fazla sertlikte bir temas olmalı ne de yetersiz sertlikte olmalı. Çok fazla sertlikte temas halinde kontak şeritleri hızla aşınır, yeterli temasın olmaması ise arklara neden olabilir. Havai hatlar ile pantograf arasında ideal bir temas sağlamak için havai hatların, hat boyunca düz bir şekilde çekilmiş olması önemlidir. Şekil 2.36’da standart havai katener hattı gösterilmiştir [2].



Şekil 2.36: Standart havai katener hattı [2].

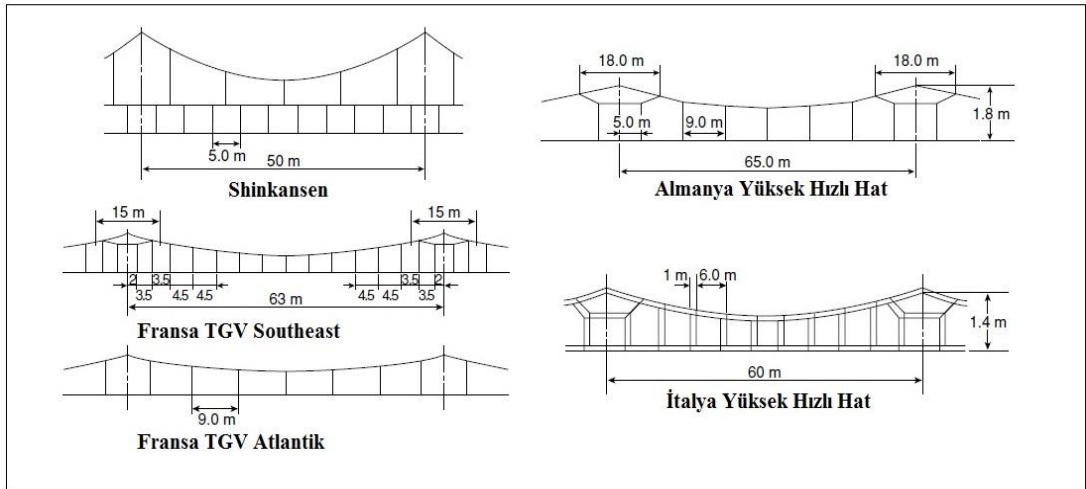
Pantograf, tren hız ve akım gereksinimlerini karşılayacak özelliklerde olmalıdır. Yüksek hızlarda veya güçlü rüzgârlar sırasında kesintisiz ve kaliteli güçte çalışabilmesi pantograf geçişini sağlamak için minimum titreşim ve harekete sahip

olmalıdır. Titreşime, korozyona, ısıya vb. karşı dayanıklı olmalıdır [10]. Şekil 2.37 (a)'da tek kollu bir pantograf ve Şekil 2.37 (b)'de ise havai hat ile temas halinde bir pantograf resmedilmiştir.



Şekil 2.37: (a) Tek kollu pantograf. (b) Havai hat ile temas halinde bir pantograf.

Farklı ülkelerdeki yüksek hızlı trenler için katener sisteminin karşılaştırılması Şekil 2.38'de verilmiştir. Çizelge 2.4'de ise bu farklı katener sistemlerin teknik verileri karşılaştırılmıştır. Japonya'da Shinkansen metrosu için üç uzunlamasına hattın oluşan bileşik katener sistemi kullanılmıştır. Avrupa'da ise basit veya dikişli katener sistemi kullanılmıştır. İtalya'da ise 3 kV DC hatta büyük akım değeri sağlamak için ikiz katener sistemi kullanılmıştır. Bileşik katener sistemleri daha az pantograf dikey hareketine ve daha büyük akım kapasitesine sahiptir ancak daha karmaşık bir tasarım gerektirir [10].



Şekil 2.38: Farklı ülkelerdeki yüksek hızlı trenler için katener sisteminin karşılaştırılması [10].

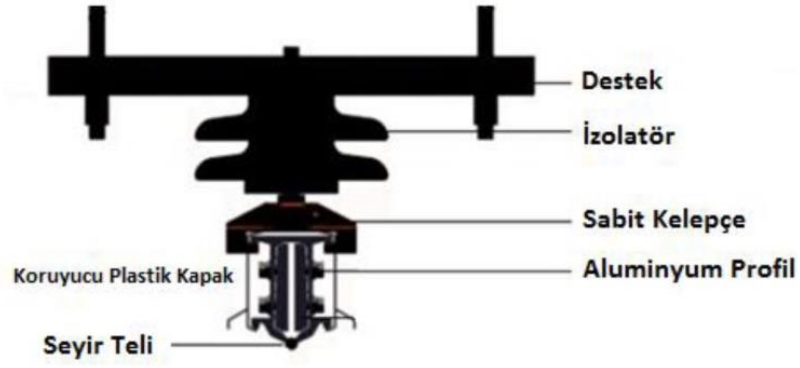
Çizelge 2.4: Farklı katener sistemlerin teknik verilerinin karşılaştırılması [10].

		Japonya	Fransa		Almanya	İtalya
			TGV Southeast	TGV Atlantic		
Katener tipi		Ağır bileşik tipi	Dikişli ve basit	Basit	Dikişli ve basit	İkiz dikişli ve basit
Standart açıklık (m)		50	63 (Stitched wire 15)	63	65 (Stitched wire 18)	60 (Stitched wire 14)
Standart kablo yüksekliği (m)		5.0	4.95	4.95	5.3	4.85
Sistem yüksekliği (mm)		1,500	1,400	1,400	1,800	1,400
Kablo sınıfı	Askıda	St 180 mm ² (1.450 kg/m)	Bz 65 mm ² (0.59 kg/m)	Bz 65 mm ² (0.59 kg/m)	Bz11 70 mm ² (0.63 kg/m)	CdCu 153.7 mm ² (1.42 kg/m)
	Yardımcı askıda	Cu 150 mm ² (1.375 kg/m)	Bz 35 mm ²	—	Bz11 35 mm ² (0.31 kg/m)	(0.30 kg/m)
	Kontak kablo	Cu 170 mm ² (1.511 kg/m)	CdCu 120 mm ²	Cu 150 mm ² (1.33 kg/m)	CuAg Ri 120 mm ² (1.08 kg/m)	CuAg 151.7 mm ² (1.35 kg/m)
Contact line total density [kg/m]		4.34	1.65	1.92	1.71	2.77 × 2
Katener tel gemesi	Askıda [N]	24,500	14,000	14,000	15,000	18,400
	Yardımcı askıda [N]	14,700	4,000 (Stitched wire)	—	2,800 (Stitched wire)	2,900 (Stitched wire)
	Kontak kablo [N]	14,700	14,000	20,000	15,000	14,700
Toplam gergi [N]		(53,900)	(28,000)	(34,000)	(30,000)	(33,100 × 2)
Kontak kablosu dalga yayılım hızı (km/h)		355	414	441	424	376
β tren hızı/dalga yayılım		0.68, 0.76 (= 240, 270/355)	0.65 (= 270/414)	0.68 (= 300/441)	0.59 (=250/424)	0.66 (= 250/376)
Ön-sarkma teli		None	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000

Diğer bir katener türü ise rijit katenerdir. Klasik bir katener göre daha az alan gerektirmesi temel avantajıdır. Bu sebeple bu sistemler tünellerde çok daha kullanışlıdır. Klasik katener göre daha sağlamdır ve daha güvenilirdir. Montaj, bakım ve işletmede kolaylık sağlar. Akım taşıma kapasitesi daha yüksektir. Metro projelerinde sıklıkla tercih edilir [2]. Üçüncü ray ile kıyaslandığında, üçüncü ray kullanan sistemler için daha fazla güvenlik önlemi almak gerekir ve daha fazla ekipmana ihtiyaç duyulan bir sistem olduğundan maliyeti de yüksektir. Üçüncü ray sistemlerinde bulunan kolektör pabuçları daha büyük sürtünme kuvvetine maruz kalır. Bu sebeple bakım masrafları daha fazladır. Genellikle, kontak teli ve bu teli askıda tutan alüminyum profilden oluşur. Alüminyum profil Şekil 2.39’da, rijit katener sistemi parçaları Şekil 2.40’da gösterilmiştir. 750 V DC, 1500 V DC, 3000V DC, 15000 V AC ve 25000 V AC sistemlerde kullanılabilir [26].

	Profil Kesiti	2.220 mm ²
	Toplam Profil Yüksekliği	110 mm
	Profil Uzunluğu	10-12m
	Profil Ağırlığı Kg/m	6,1
	Atalet Momenti 1xx	338x104 mm ⁴
	Atalet Momenti 1yy	113,7x10 mm ⁴
	Bakır Eşdeğer Kesiti	1.400 mm ²
	Genleşme Katsayısı	24x10 ⁻⁶
Esneklik Modülü		69.000 N/mm ²

Şekil 2.39: Alüminyum profil ve özellikleri [26].



Şekil 2.40: Rijit katener sisteminin parçaları [2].

Üçüncü ray sistemi ise, zemin ile aynı seviyede, taşıyıcı rayların yanına veya ortasına kurulan yarı-sürekli 3. bir ray sistemi ile trene elektrik gücü sağlama yöntemidir. İletken ray, iletkenliği yüksek malzemeden yapılır. Daha önceleri düşük karbonlu çelik kullanılırken daha sonraları demir kullanılmaya başlandı. Alüminyum çelik kullanımı ise şu anki sistemlerde daha çok tercih edilmektedir [2]. Şekil 2.41 (a)'da ve Şekil 2.41 (b)'de rayların yanına kurulan bir üçüncü ray sistemi; Şekil 2.42 (a) ve Şekil 2.42 (b)'de taşıyıcı rayların ortasına kurulan bir üçüncü ray sistemi resmedilmiştir.



Şekil 2.41: (a) ve (b) Rayların yanına kurulan bir üçüncü ray sistemi.



Şekil 2.42: (a) ve (b) Rayların ortasına kurulan bir üçüncü ray sistemi.

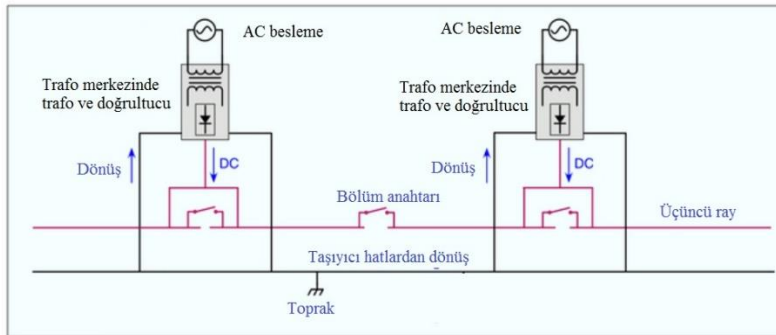
Trenlerde, üçüncü raylar ile devamlı temas halinde olan kolektör pabuçları vardır ve trenler bu pabuçlar üzerinden gerekli olan elektrik gücünü temin eder. Pabuçlar devamlı temas halinde olmasına rağmen hemzemin geçitler, geçitler, trafo boşlukları gibi hattın bazı geçiş yerlerinde iletken hat kesintiye uğrayabilir. Bu gibi yerlerde geçişler jumperlar üzerinden veya enerjisiz olarak yapılabilir [2]. Tren ile ray arasındaki pabuçların konumu değişiklik gösterebilir. İlk zamanlarda bazı sistemler üstten temaslı pabuçlar kullanmışlarsa da daha sonraki geliştirmeler neticesinde yandan ve alttan temaslı pabuçlar kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.43 (a) ve Şekil 2.43 (b)'de üstten ve alttan temaslı pabuçlar resmedilmiştir. Bu gelişmeler neticesinde iletken rayın kapatılması sağlandı ve böylece insanların raya istemeden temaslari önlenmiş oldu. Şekil 2.44'te kapatılmış bir üçüncü ray resmedilmiştir [2]. Şekil 2.45'te üçüncü ray sisteminin güç besleme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.43: (a) Üstten temaslı pabuçlar. (b) Altan temaslı pabuçlar [2].



Şekil 2.44: Kapatılmış bir üçüncü ray.



Şekil 2.45: Üçüncü ray sisteminin güç besleme sistemi gösterilmiştir.

Dördüncü ray sistemlerinde ise üçüncü raya veya havai hatta ek olarak kullanılan bir ray geri dönüş akımlarını taşır. Şekil 2.46’da gösterilen Londra metrosunda üstten temaslı bir üçüncü ray, taşıyıcı rayların hemen yanında görünmektedir. Dördüncü ray ise taşıyıcı rayların arasında konumlandırılmıştır.



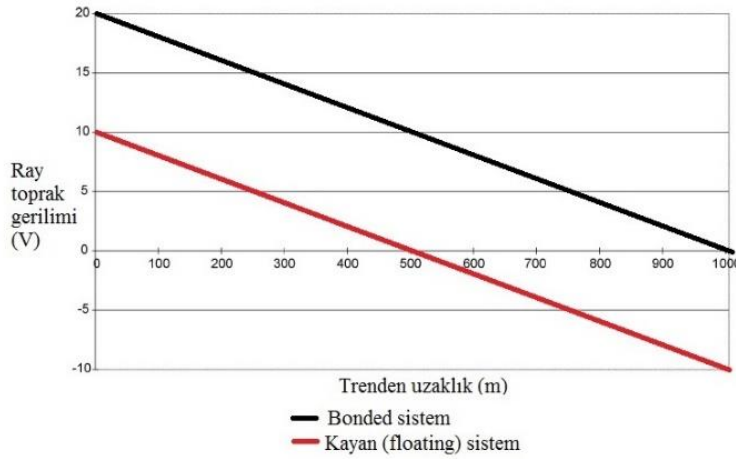
Şekil 2.46: Londra metrosunda 3. ve 4. rayların konumlandırılması.

Dördüncü ray sistemlerinde taşıyıcı raylar akım taşımazlar ve bu büyük avantajdır fakat sisteme ekstradan bir ray eklenmesi maliyeti arttırmaktadır. Bakım ve kurulum maliyetlerinden dolayı taşıyıcı raylar DC sistemlerde geri dönüş rayı olarak tercih edilmektedir. Taşıyıcı raylar tamamen izole olmadıklarından dolayı sistemde kaçak akımlar oluşabilir [11].

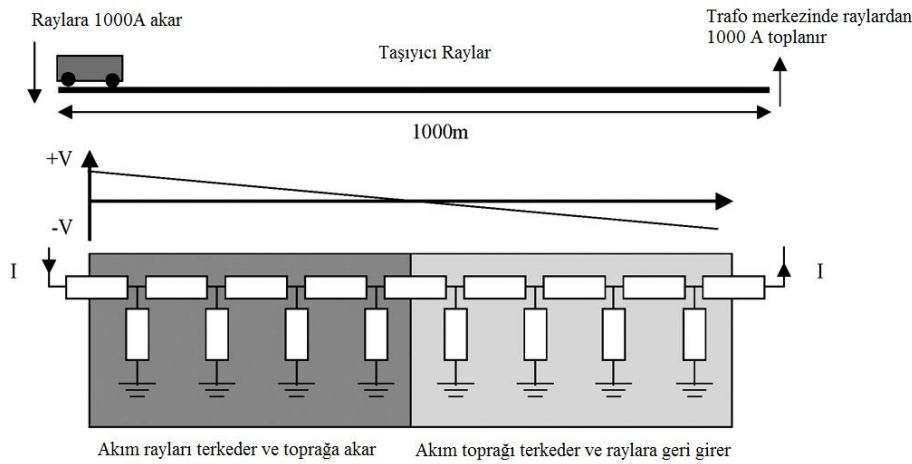
Taşıyıcı rayların direnci seri ve uzun olduğundan $40-80 \text{ m}\Omega/\text{km}$ veya $40-80 \text{ }\mu\Omega/\text{m}$ dirence sahiptir ve rayların toprak ile aralarında $2-100 \text{ }\Omega/\text{km}$ arasında zayıf bir direnci vardır. Dönüş yapan akımlar, raylara ve DC doğrultucunun negatif terminaline geri dönmeye önce zayıf toprak ray direnci sebebiyle bu bölgelerden toprağa paralel devreler oluşturarak kaçak akacaktır. DC sistemlerde bu kaçak akımlar korozyon hasarlarına ve demir kayıplarına sebep olurken, AC sistemlerde önemli korozyon hasarları oluşturmazlar. Şekil 2.47’de pozitif gerilim durumunda bir akımın toprağa raylardan dışarı kaçak olarak nasıl aktığını gösterir. Negatif gerilim durumunda ise akım raylara geri akar. Raylardan kaçak akan akımın büyüklüğü, hat boyunca herhangi bir uzaklıktaki noktada gerilime ve her bir rayın uzak toprağına direnci ile belirlenir [11].

Taşıyıcı rayların ve dolayısıyla DC negatif veri yolunun izin verdiği toprağa göre kayan bir sistemde, gerilim rayların üzerinde, trenin yanında 10 V ve trafo merkezinin

yakınındaki uzak toprakta -10 V olarak görünür. Taşıyıcı rayların toprağa etkili bir biçimde bağlandığı (bonded) bir ray sisteminde (bir kaçak akım toplama sistemi veya bir tünel gibi yolun etrafındaki herhangi bir betonarme veya metalik yapı ile), gerilim uzak toprağa göre trende 20V, trafo merkezinde ise 0 V olacaktır. Şekil 2.48’de gösterilen durumda, trene 500 metre uzaklıkta gerilim 0 V olacaktır ve her iki yönde de akım kaçağı olmayacaktır. Kayan sistemde kaçak akım bu nedenle rayları 0-500 metrede bırakacak ve daha sonra 500-1000 metrelik mesafede raylara tekrar girecektir [11].

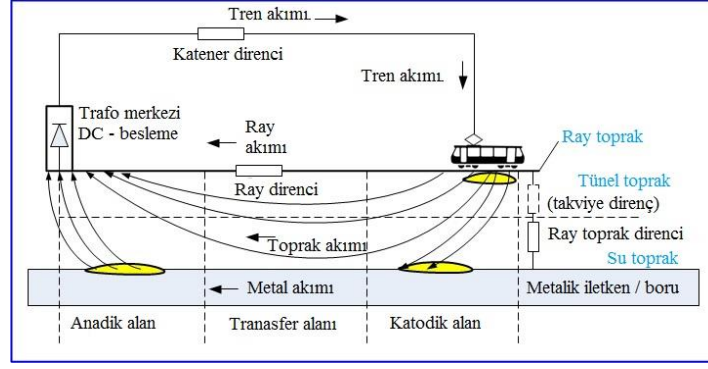


Şekil 2.47: Pozitif gerilim durumunda akımın toprağa raylardan dışarı kaçak akışı [11].



Şekil 2.48: Kaçak akım sisteminin temel modeli ve kaçak akım kaçağı [11].

Gerilimin toprağa göre devamlı olarak pozitif olduğu topraklanmış ray sistemi durumunda (bonded sistem), Şekil 2.49’daki gibi kaçak akım rayları tam uzunlukları boyunca terk eder ve trafo merkezi topraklama sistemi ve buna bağlı herhangi bir metalik bileşen ile trafo merkezinde cer sistemi güç kaynağına geri döner [11].



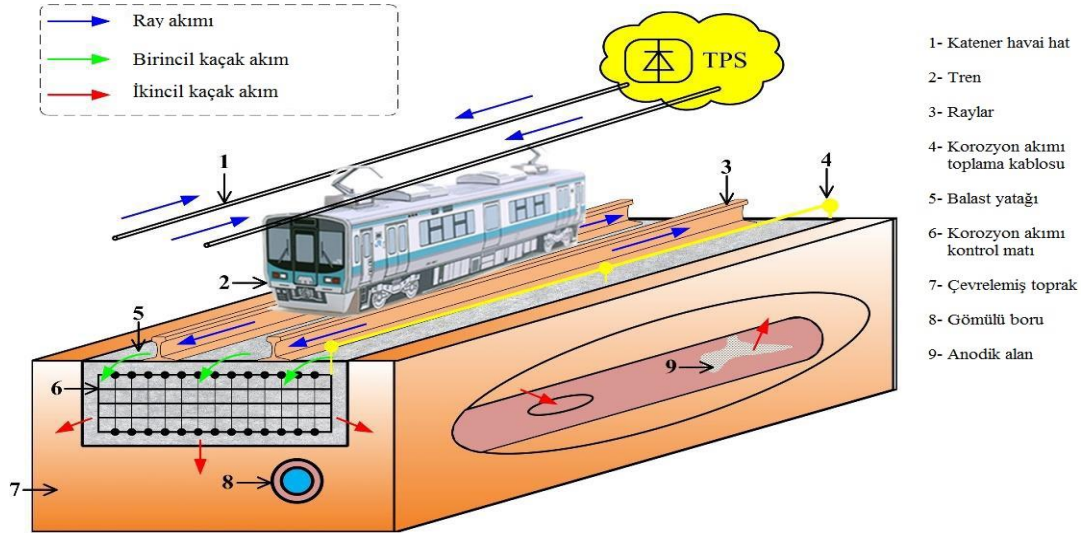
Şekil 2.49: Gerilimin toprağa göre devamlı olarak pozitif olduğu topraklanmış ray sistemi durumu [11].

Dönüş akımları taşıyıcı raylardan cer gücü trafo merkezine doğru akarken düşük dirence sahip, çıplak veya iyi bir şekilde yalıtılmamış metalik boru hatları, tanklar, takviye çubukları, kablolar gibi alternatif bir rota bulursa zemine veya betona sızabilir ve bu metalik yapılara akabilir. Akıntının büyüklüğü raydaki gerilim düşüşüne ve ray zemin arasındaki dirence bağlıdır. Ray devrelerindeki her elektrik kesintisi kaçak korozyon akımlarının miktarını bazen geri dönüş akımlarının %50'sine kadar artırır ve topraktaki anlık yoğunluk yüzlerce ampere kadar ulaşabilir [27].

Korozyon akımların karakterleri akış yönüne, yoğunluğa, trafo merkezinin yüküne ve trenlerin konumuna göre sürekli olarak değişiklik gösterir. Bu dinamik potansiyel değişiklikleri ve katodik ve anodik yapıların arasındaki potansiyel fark korozyon akımlarını oluşturur. Gömülü yapıları çevreleyen topraklar da betonlar kadar elektrolittir. Bir DC sistemde meydana gelen kaçak akım durumunda, akımın metalik yapıya girdiği yerde, katodik bir oksijen azaltma reaksiyonu; akımın metali terkettiği yerde ise anodik bir metal çözünme reaksiyonu meydana gelir [27]. İşte bu reaksiyon sonucu Şekil 2.50'deki gibi raylarda ve metal iletkenlerde korozyon ve demir kayıpları meydana gelir. Şekil 2.51'de metro sistemlerinde kaçak akım profili gösterilmiştir [28].



Şekil 2.50: Raylarda ve metal iletkenlerde korozyon ve demir kayıpları [2].



Şekil 2.51: Metro sistemlerinde kaçak akım profili [28].

Kaçak akım toplama sistemi, kaçak akımların diğer yapılar ile elektrik girişimini önlemek amacıyla kurulmuş bir sistemdir. Taşıyıcı raylardan akan kaçak akımlar küçük dirençli bir yol ile toplanır. Beton ray yatağındaki takviye çubuklar bu amaçla kullanılır. Kaçak akım toplama matı korozyona sebep olan akımları için bir yol olarak çalışırken aynı zamanda yapısal bir destek görevi de görmektedir. İnşaat demirleri bölümler halinde birbirine kaynaklanır ve bu bölümler toplanan kaçak akım için düşük dirençli bir yol sağlar. Kaçak akım toplama sisteminin ilk amacı oluşacak akımları baştan en aza indirmektir ve sonrasında oluşan kaçak akımların akışını kontrol altına almak ve kaçak akım toplama sistemi ile demiryolu ve dış yapılar arasında yeterli elektriksel ayrımı sağlamaya çalışmaktır [27].

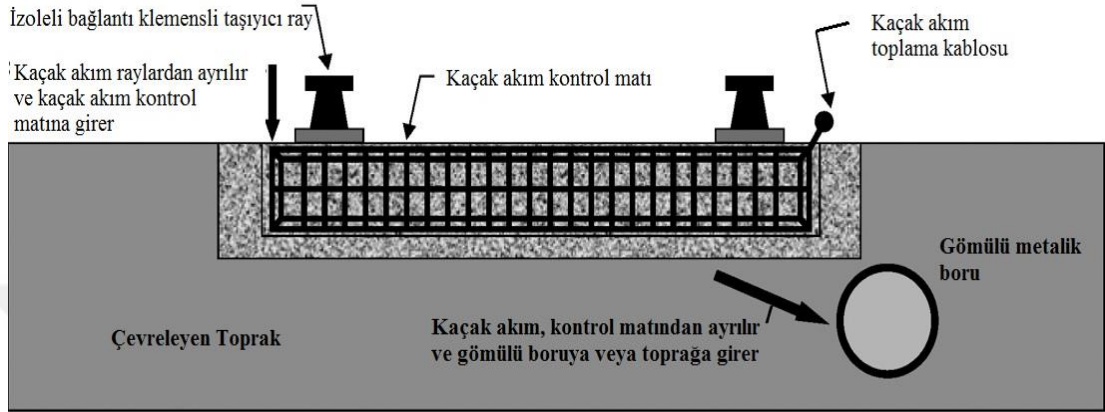
Bunu sağlamak için aşağıdaki tasarım aktiviteleri takip edilir [2,27] :

- 1- Etkin bir cer gücü trafo merkezi (TPS) tasarımı ve ray dönüş akımı devresi ile kaçak akımın potansiyelini en aza indirmek gerekir. Trafo merkezleri arasındaki mesafe kısa tutulabilir.
- 2- Taşıyıcı raylar ile yapı arasındaki yüksek yalıtımın sağlanması bu yolla oluşacak kaçak akımı minimuma indirir.
- 3- Akım geri toplama ve geri dönüş sistemi için düşük dirençli yolun verimli kalmasını sağlamak için kaçak akım toplama sisteminin yapımı ve bakımı ile kaçak akım dağıtımının kontrol edilmesi gerekir.
- 4- Topraklama sistemi ile yapının diğer iletken kısımları arasındaki elektriksel ayrımı korumak gerekir.

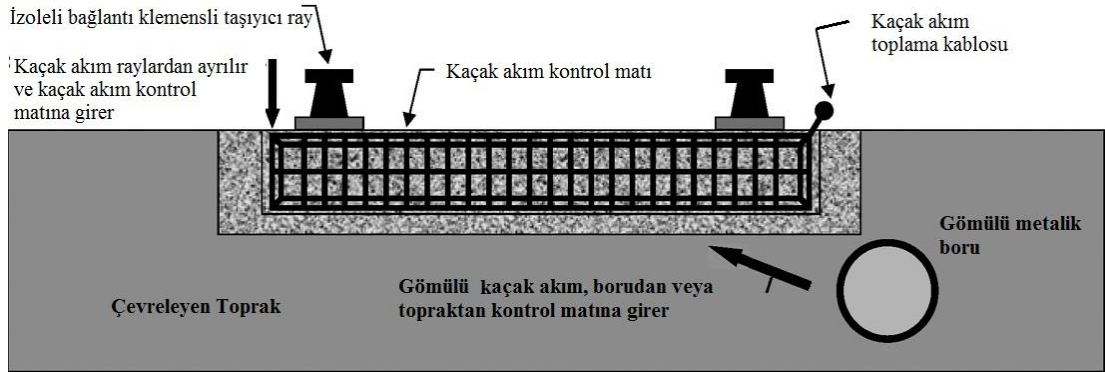
5- Taşıyıcı rayların paralelleme metodu ile bağlanması gerekir.

6- Dördüncü ray sistemleri kullanılabilir

Şekil 2.52 rayları terk eden kaçak akımın etkisini göstermektedir; Bu durum, ray potansiyelinin yeryüzüne göre pozitif olduğu ray sistemlerinde bulunmaktadır. Şekil 2.53 ise raylara giren kaçak akımı göstermektedir [11].



Şekil 2.52: Rayları terk eden kaçak akımın etkisi [11].



Şekil 2.53: Raylara giren kaçak akım [11].

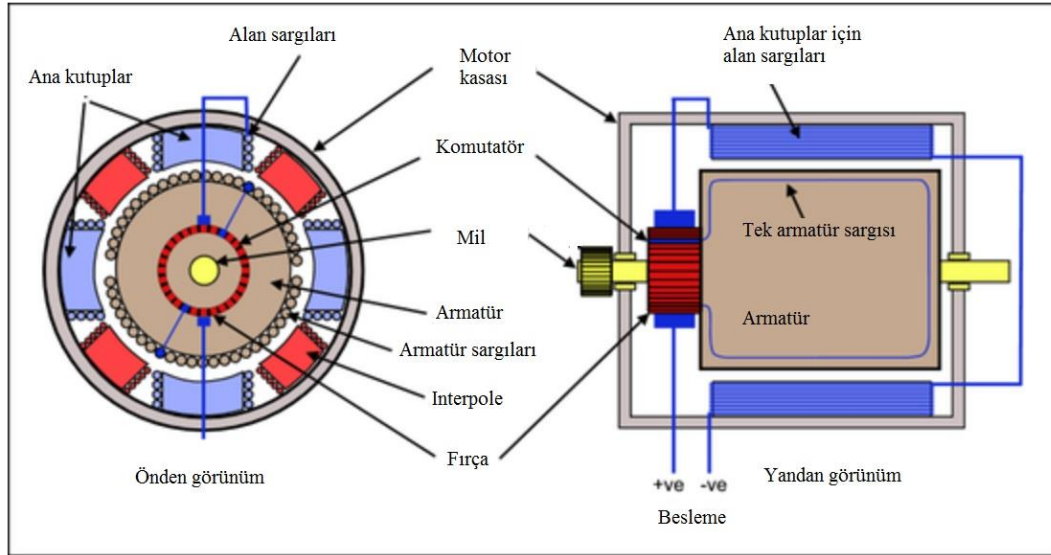
2.5 Raylı Sistemlerde Kullanılan Motorlar ve Sürücüler

Raylı sistemlerde treni hareket ettirmek için kullanılan motorlar dizel motorlar olabileceği gibi yaygın olarak elektrikli motorlar tercih edilmektedir. Bu elektrikli motorlar güçlerini ya havai hattan alır ya da üçüncü ray sisteminden alır. DC ve AC motorlar temelde aynı yapıya sahip olmalarına rağmen tabii ki birçok farklılık barındırmaktadır. DC motorlar güçlü tork karakteristiği ve kontrolünün basitçe yapılmasından dolayı raylı sistemler için daha uygun bir yapıdaydı ve bu sebeple ilk yıllarda birçok sistemde kullanıldı. Zaman içinde güç elektroniğindeki gelişmeler neticesinde AC motorlar da raylı sistemlerde kullanılmaya uygun hale geldi.

Günümüzde birçok raylı sistemde artık özellikle sincap kafesli asenkron motorlar kullanılmaktadır. Çünkü AC motorların basit yapıları ve fırçasız yapısından dolayı bakımları daha kolaydır, DC motora göre aynı güçlerde daha hafif olmasına rağmen daha dayanıklıdır. Güç elektroniğinde gelişmelerden sonra kontrolü de DC motorlara göre daha efektif ve kolay hale gelmiştir [29].

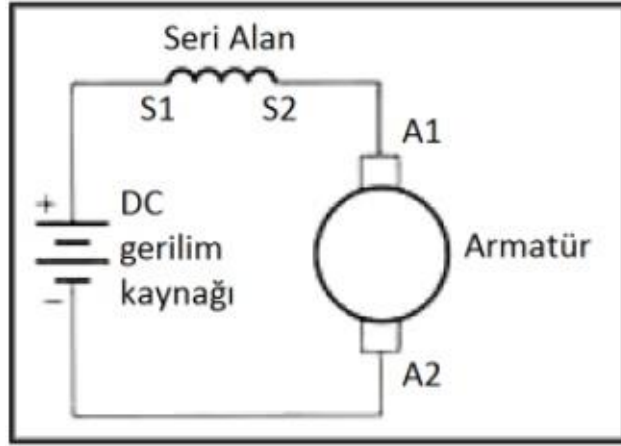
2.5.1 DC motorlar

DC motor uzun yıllar elektrikli ve dizel-elektrikli sistemlerde standart temel elektrik cer motoru olarak kullanıldı. Şu anda bile hala birçok trende bunu görmek mümkündür. Şekil 2.54’de görüldüğü gibi motor dönen ve sabit bir alandan oluşmaktadır. Komütatör dönen ve sabit alanı elektrikselsel olarak birleşmesini sağlar. Sabit alan motor kasası içine yerleştirilmiş tel bobinlerinden oluşurken, armatür ise merkezi bir milin etrafına sarılmış bobinlerden oluşur [29].



Şekil 2.54: Seri DC Cer motorunun yapısı [29].

Şekil 2.55’de basit devresi verilen seri DC motorların çalışması basit bir elektromanyetik prensip ile açıklanabilir. Bu seri DC motorların stator alan sargıları ve armatür sargıları seri bağlıdır. Güç kaynağının giriş ve çıkışı armatüre ve alan sargılarına bağlıdır. Güç kaynağından verilen yüksek akım seri alan sargılarına ve armatüre akar. Alan sargılarının kalın ve sarım sayısının az olması nedeniyle, düşük dirençli devresinde oluşan yüksek akımlar, güçlü bir manyetik alan oluşturur. Manyetik alan içindeki armatürden akan yüksek akımlar nedeniyle oluşan büyük miktardaki tork, armatürün yüksek bir güç ile dönmesini sağlar.



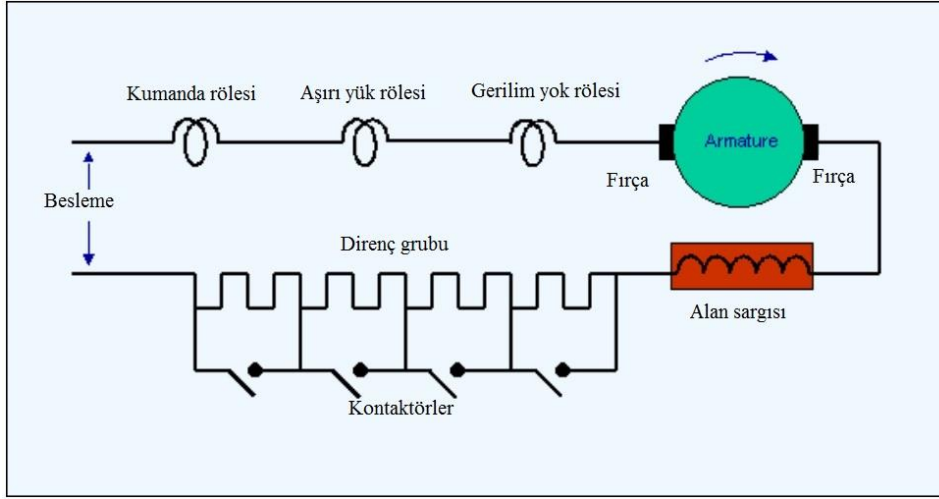
Şekil 2.55: Seri DC motor devresi.

2.5.2 DC motor sürücüler

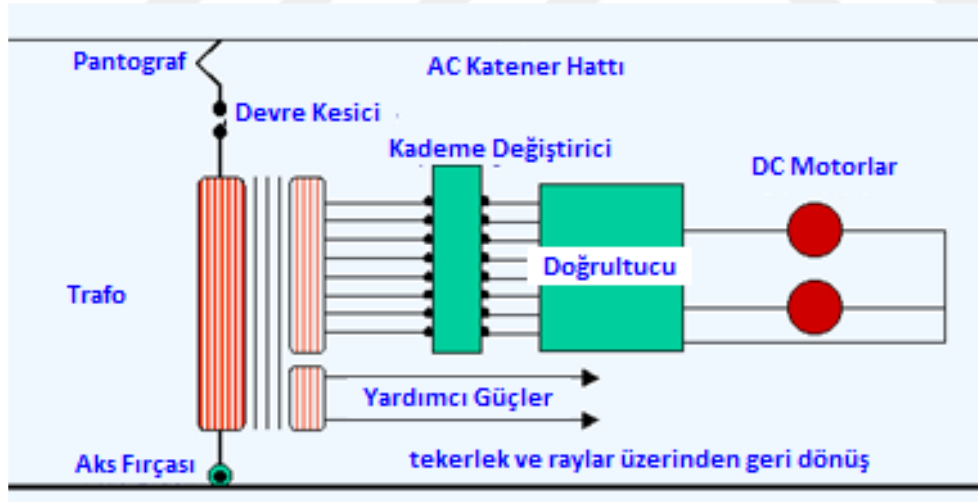
DC motor dönmeye başladığında içindeki manyetik alan ile etkileşmesi dâhili bir gerilim üretir. Bu dâhili gerilim sisteme uygulanan gerilime karşı gelir. Bu iki gerilim arasında oluşan fark aslında treni hızlandıran gerilimdir. Motorun hızı arttıkça bu dâhili gerilimin miktarı ve uygulanan etkili gerilime karşı gelme mukavemeti yükselir. Etkili gerilim miktarı düşer. Motora verilen akımın miktarı da düşeceği için daha az tork motora uygulanır. Motor hızlanması durur. Trenin hızlanmasını sürdürebilmesi için Şekil 2.56’da gösterilen eski bir yöntem kullanılır. Alan sargıları önünde bulunan dirençler sırayla devreden çıkartılır. Direnç azaldıkça etkin gerilim artar. Tüm dirençler devreden çıktığında tüm hat gerilimi motora uygulanır. Trenin hızı, motorun torkunun sabit olduğu noktada sabitlenir. Bu sistem trende bulunan yolcuları rahatsız edecek derecede sarsıntıya sebep olan bir sistemdir. Bu sistemde sürücü dirençleri 1914 yılına kadar manuel kontrol etme durumundaydı ancak bu yıllardan sonra otomatik hızlanma sistemi kullanılmaya başlandı. Sistemin kontrolünü sağlayan kumanda rölesi dışında bazı koruyucu röleler de kullanılmıştır. Aşırı akımlar DC motora zarar vereceğinden aşırı yük rölesi kullanılmıştır. Bu röle sistemde aşırı bir yük algıladığında aşırı akımların DC motora zarar vermemeleri için gücü kapatmaktadır. Diğer bir koruma rölesi ise gerilim yok rölesidir. Herhangi bir sebepten dolayı güç kaybetmiş bir sistemi algılar ve sistemdeki dirençler başlangıç konumuna gelmeden akımın sisteme verilmesini engeller. Bu sayede hızını düşürmüş bir motora aniden yüksek miktarda akım verilmemesi sağlanmıştır [29].

Direnç kontrollü DC motor kontrolü yönteminden sonra kullanılan yöntem ise tren üzerinde bulunan bir trafo yardımıyla Şekil 2.57’deki gibi DC motor kontrolünün

yapılmasıydı. Bu yöntemde 25 kV AC gerilim akım toplama yöntemleriyle tren üzerinde bulunan trafoya alınır. Bu trafo yük altında kademe değiştirme özelliğine sahip bir trafodur. Kademe değiştiricilerin çıkışına bağlı diyot doğrultucu grubu trafoda istenilen ayarda çıkış yapan AC gerilimi DC gerilime çevirir ve DC motorlara uygular. Bu sistemde trafolar tren üzerinde oldukça fazla yer kaplar [2]. Trende bulunan yardımcı ekipmanlar da bu trafonun çıkışından beslenir.

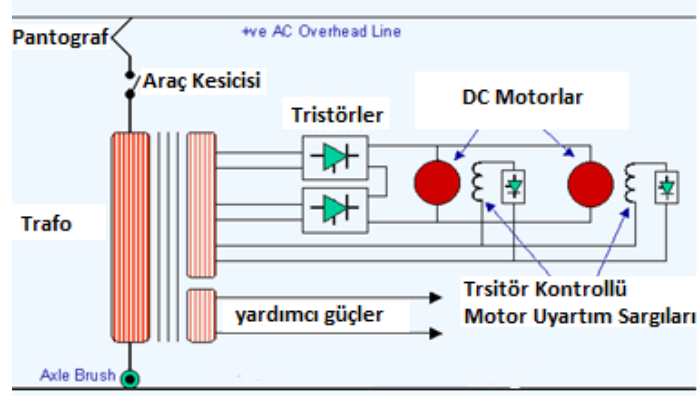


Şekil 2.56: DC motoru güç devresi [29].



Şekil 2.57: Tren üzerinde bulunan bir trafo yardımıyla DC motor kontrolünün yapılması [2].

Direnç kontrollü ve diyot kontrollü bu iki yöntem dışındaki diğer bir yöntem ise tristörlü DC motor kontrolüdür. Bu sistemde de Şekil 2.58’de görüldüğü gibi trafo tren üzerindedir ve yine pantograf aracılığı ile 25 kV AC gerilim trafonun birincil sargısına alınır. Burada tristörün açıları değiştirilerek farklı DC gerilimler elde edilir ve DC motorlara uygulanır.



Şekil 2.58: Tristörlü DC motor kontrolü [2].

Raylı sistemlerde DC motorlardan AC motorlara geçilmeden önce kullanılan diğer yöntemlerden bazılarını SepEx, DC kıyıcılar, dinamik frenleme ve GTO tristör olarak sıralayabiliriz [29].

SepEx (separately excited) sistemi daha yeni bir tristör kontrol sistemidir. DC motorlar daha farklı şekilde dizayn edilmiştir. Armatürler ve alanlar seri olarak değil de ayrı ayrı kablolanmıştır. Bu şekilde her alan kendi tristörüne sahiptir ve daha hassas kontrol edilir [29].

DC motorların klasik direnç kontrolü havai hattın veya 3. raydan beslenirken akım kayıpları oluşturur ve sadece bazıları tam gerilim uygulandığında 30-40 km/saat hıza çıkabilir. Akımın çoğu dirençlerde tüketilir. Tristörler kullanılmaya başlandıktan sonra ise tristörün ateşlendikten sonra nasıl kapatılacağı problem ile karşılaşıldı. Yani tek yönlü bir DC devresinde nasıl ters gerilim alınacağı düşünüldü. Akımın ters yönde akmasını zorlamak için bir endüktans ve bir kondansatör eklenmesi ile bu sağlandı. Bu tristörün kapatılmasının etkisine sahiptir [29].

1980'lerin sonunda tristör artık GTO (gate turn off) kontrol devresi tarafından kapatılabiliyordu. Bu sayede bir DC motoru kontrol edebilmek için bir tristör kullanılabilirdi. Bu noktada konvansiyonel DC motor raylı sistemlerde nihai halini almıştır. Şu anda kurulan çoğu sistem artık AC motorları kullanmaktadır [29].

2.5.3 AC motorlar

Senkron ve asenkron olmak üzere iki tip AC motor vardır. Senkron motorlar normal uygulamanın tersi olarak kendi alan sargıları tahrik miline monte edilmiş olup armatür sargıları ise mahfazaya monte edilmiştir [29]. Senkron motorun cer motoru olarak sincap kafesli AC motor yerine kullanıldığı en popüler uygulama Fransızlar tarafından

yapılan TGV Atlantik trenidir. Burada saatte 380 km'ye çıkan çok hızlı trenler bulunduğundan senkron motorun sunduğu avantajlardan faydalanılmıştır [3]. Burada 25 kV AC kaynak kullanılmış ve DC'ye doğrultulduktan sonra motoru beslemesi için AC'ye çevrilmiştir. Bu uygulamanın tasarımı sırasında GTO tristörü demiryolu uygulamaları için yeterince gelişmemişti bu sebeple bu uygulamada basit tristörler kullanıldı. Bu uygulamadaki senkron motorun avantajı motorun, tristörün kapanması için gereken ters gerilimleri üretmesidir. Bu, o yıllar için iyi bir çözüm olsa da GTO tristörleri geliştirilince bundan sonra AC motorlar daha avantajlı hale gelmiştir [29].

Asenkron makinenin yapısı, birinin görevi manyetik alanı yaratmak olan ve diğerinin görevi ise hareketi sağlayacak kuvveti oluşturacak olan iki kısımdan oluşur. Bu kısımlardan biri hareketlidir ve rotor diye adlandırılır, diğer kısım sabittir ve bu da stator olarak adlandırılır. Rotor ile stator arasında hava aralıkları mevcuttur. Asenkron makineler rotor yapılarındaki farklılığa göre sincap kafesli asenkron makine ve rotoru bilezikli asenkron makine olmak üzere ikiye ayrılır [12].

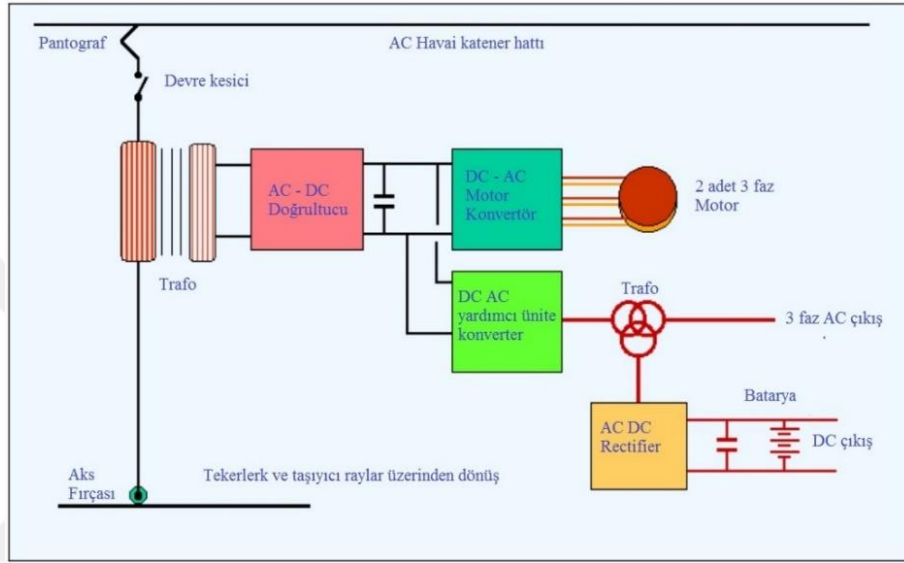
Üç fazlı tasarıma sahip AC motorlar fırçaya sahip değildir ve bu sebeple armatür ve alan sargıları arasında elektriksel bir bağlantı yoktur. Ayrıca komütatör yoktur ve armatür, çelik laminasyonlardan yapılabilir, bu sayede daha sağlam ve maliyeti daha az motorlar kullanılmış olur.

2.5.4 AC motor sürücüleri

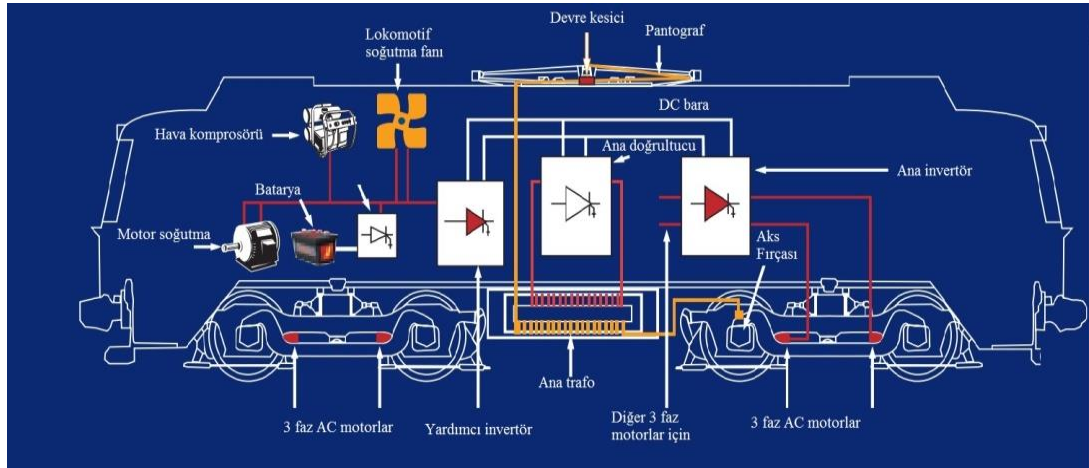
Üç fazlı bir AC motorun hızı, beslemesinin frekansı ile belirlenmektedir ve aynı zamanda gücün de değiştirilmesi gerekmektedir. Güç elektroniğinde yaşanan gelişmelerden önce AC motorlar neredeyse sadece sabit hız uygulamalarında kullanılıyordu çünkü hızının belirlenmesi için gereken frekansın kontrol edilmesi çok zordu. Bu nedenle demiryolu uygulamaları için uygun değildi ve bu sebeple demiryolu sistemlerinde DC motorlar tercih ediliyordu. Modern üç fazlı cer motoru, makinenin dönmesini sağlayan üç AC akımın beslemesi ile kontrol edilir. AC motor girişine uygulanan üç faz, değişken gerilim ve değişken frekanslı (VVVF) bir invertör ile en kolay ve en verimli şekilde kontrol edilir [29]. DGM (Darbe genişlik modülasyonu) ile IGBT'nin kapı sinyali kontrol edilir ve çıkış gerilimi ayarlanır [2].

AC motorlar AC cer gücü sistemlerinde kullanılabildiği gibi DC cer gücü besleme sistemlerinde de kullanılabilir. Şekil 2.59'da gösterildiği gibi AC beslemesi durumunda, 25 kV tek fazlı hat gerilimi pantograf ve yüksek hızlı kesici üzerinden bir

trafoyu besler. 25 kV değerindeki bu gerilim değeri motor beslemesi için çok yüksektir ve tren üzerindeki trafo ile genellikle 1000 VAC değerlerine düşürülür [2]. Trafonun çıkışı, uygulamaya bağlı olarak 1500-2000 V DC çıkışı üreten AC-DC doğrultucuyu besler. Doğrultucu gelen AC gerilimi doğrultur ve bu gerilim cer motorlarının kontrolünü sağlayan invötere aktarılır. AC-DC konvertör ve invertör arasında bulunan DC bara bölgesinden aynı zamanda yardımcı üniteleri besleyen DC-AC konvertör de beslenir. Şekil 2.60'da AC bir lokomotifin parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2.59: AC beslemesi durumunda, pantograf ve yüksek hızlı kesici üzerinden bir trafonun beslenmesi [29].



Şekil 2.60: AC bir lokomotifin parçaları.

DC kaynaklı cer gücü sisteminde tren üzerinde bir trafoya veya doğrultucuya ihtiyaç duymaz, cer motorunu kontrol eden invertöre uygular. Bu sebeple AC kaynaklı cer gücü sistemine göre yapısı daha basittir.

Günümüzde, AC motor kontrolü sürücülerin kullandığı IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) modern elektronikte olduğu gibi raylı sistemlerde de öncü oldu. Tristör gibi açılıp kapatılabilir ancak tristörü kapatmak için gereken yüksek akımlara ihtiyaç duymaz [29].

Çok yakın zamana kadar, sadece mili amperler seviyesindeki akımlar için kullanılabilirdi. Şu anda ise kiloamperler seviyesindeki akımlar ile kullanılabilmektedir ve bu gelişmesi ile raylı sistem uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [29]. 1990'lı yılların başlarında küçük akımlar için tristörler yerine yardımcı besleme invertörlerinde kullanılıyordu ancak daha yüksek akımlar için artık AC ger gücü sürücülerinde kullanılmaya başlanmıştır [29].

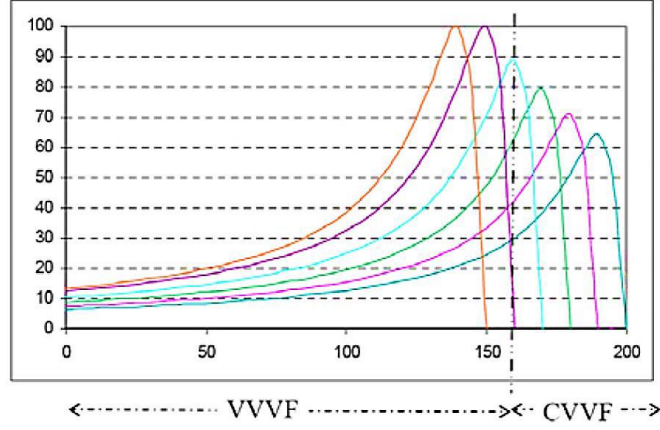
Hızlı anahtarlama kapasiteleri sayesinde trenin altından gelen ses daha yumuşaktır ve yolculuk konforunu artırır [29].

IGBT kullanan invertörlerde asenkron motorun hızı kaynak frekansı ile belirlenir. Kaynak frekansı artırılarak motorun hızı artırılır ve kaynak frekansı düşürülerek motorun hızı düşürülebilir. Kaynak gerilimini değiştirmeden frekans kaynağında yapılacak değişiklikler ya torku azaltır ya da hat gerilim ve akımında bozulmalara neden olur. Kaynak gerilimini sabit tutup frekansı azaltırsanız hat gerilimi ve akımı bozulur. Kaynak gerilimini sabit tutup frekansı arttırırsanız tork azalır. Eğer tork azalırsa motorun hızı da azalır [2,3]. Aynı şekilde sadece gerilimi değiştirip yapılan motor kontrolü de raylı sistemler için uygun değildir çünkü tork gerilimin karesi oranında artarken motor hızı senkron hızı geçemez [2,3].

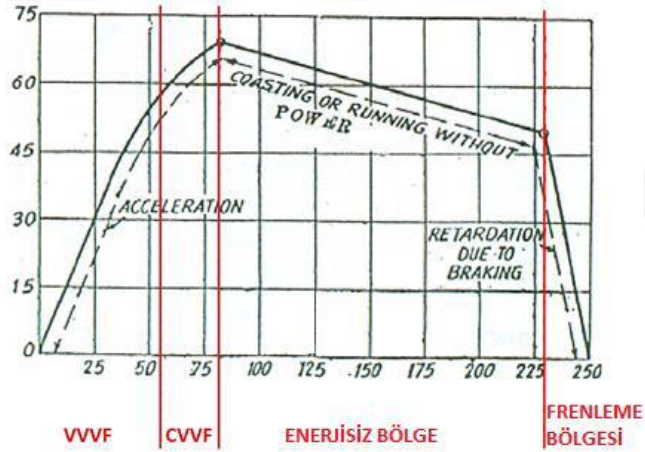
Değişken gerilimli değişken frekanslı (VVVF) invertörler ile ger motorunun kontrol edilebilen hız aralığı yüksektir ve tork kontrolü yapılabilir [2,3].

Frekansı arttırırken gerilimi de arttırmak gerekir. Çünkü V/Hz oranını sabit tutarak akı da sabit tutulur. Bu, tren maksimum hıza gelene kadar sürmelidir. Fakat belli bir gerilim üzerine çıkıldığı takdirde izolasyon sorunları ortaya çıkar. Bu sebeple belli bir noktadan sonra gerilim arttırılmaz ve sadece kaynak frekansının arttırılması ile trenin hızı arttırılmaya devam edilir. Bu bölgede gerilim değişmediğinden ve sadece frekans değiştiğinden dolayı bu bölgeye Sabit Gerilim Değişken Frekans (Constant Voltage Variable Frequency, CVVF) bölgesi adı verilmiştir. Bu bölgede güç sabittir. Tren maksimum hıza ulaştıktan sonra fren yapacağı ana kadar enerjisiz olarak çalışmaya devam eder ve bu bölgede tren serbest bir şekilde yavaşlamaya başlamıştır. Son

bölgede ise tren artık fren yapar ve duruncaya kadar süren bu bölgede motor jeneratör olarak çalışmaktadır ve frenleme enerjisi geri toplanabilir [3]. Şekil 2.61’de VVVF ve CVVF bölgeleri, Şekil 2.62’de ise trenlerin dört bölge çalışması gösterilmiştir [2].



Şekil 2.61: VVVF ve CVVF bölgeleri [2].



Şekil 2.62: Dört farklı tren işletme bölgesi [2].

2.5.5 Kalıcı mıknatıslı motorlar

Elektrik motoru tasarımında bir sonraki tasarım kalıcı mıknatıslı motordur. Bu motor bir üç fazlı sincap kafesli AC senkron motordur fakat rotoru sabit mıknatıslarla değiştirilmiştir. Yapısı gereği normal üç faz motorlardan daha küçüktür ve daha düşük çalışma sıcaklıkları sağlar. Bu sebeple rotor soğutmasına gerek olmamakla birlikte stator soğutması entegre sıvı soğutmalı sızdırmaz özelliktedir. 2011 yılında Avrupa’da ve Japonya’da bir dizi farklı tren tipinde bu sistem kullanıldı. Daha küçük boyutlarda olduğundan, alçak zemin araçlarda daha caziptir. Motor tasarımı ve ilgili kontrol sistemlerinin geliştirilmesi devam etmektedir. Kalıcı mıknatıs motorunun gelecekte raylı sistemlerde daha fazla görüleceği tahmin edilmektedir [29].



3. DC BESLEMELİ BİR METRO SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

3.1 Amaç

Raylı sistemlerden biri olan metro sistemlerinin yaygın olarak kullanılan bir örneği bu çalışmada incelenmiş olup, MATLAB® Simulink programı kullanılarak modellenmiştir. Modellerin oluşturulması için gereken metro sistemlerinin genel teknik özellikleri bu bölümde anlatılmıştır.

3.2 Bir Metro Hattı Modelinin Elektrik Altyapısı

Örnek metro sisteminde, gerekli olan tüm elektrik gücü 154 kV şebekeden sağlamaktadır. 25 MVA gücündeki bir gaz izoleli trafo merkezi (GIS) çift fider ile gücünü şebekeden çeker ve 154 kV şebeke gerilimini 34.5 kV gerilime düşürür. Orta gerilim (OG) ring sistemi ile cer gücü trafo merkezlerini besler [2]. Kullanılan ring sistemi, hatta meydana gelebilecek herhangi bir arızada beslemenin ring sisteminin diğer tarafından yapılmasını sağlayarak daha güvenilir ve sürdürülebilir bir işletme sunar. Tüm trafo merkezleri birbirine bu ring üzerinden bağlıdır [5]. Cer trafo merkezinde bulunan 34.5/0.4 kV trafolar yardımcı birimleri beslerken, 34.5/0.59 kV trafo ise trenlere gereken gücü sağlamak üzere üçüncü ray sistemini besler. Ancak bu trafonun sağladığı 590 VAC gerilim direkt olarak üçüncü rayı beslemez. İlk önce yine trafo merkezinde bulunan doğrultucu ile 750 V DC gerilime çevrildikten sonra LC filtresinden geçirilir ve daha sonra üçüncü raya iletilir. 750 V DC gerilim yerine 1500 V DC, 3000 V DC ve benzeri gerilim seviyelerini kullanan farklı sistemler de mevcuttur.

3.2.1 Bir metro hattının orta gerilim dağıtım sistemi

Metro sistemlerinde ve diğer raylı sistemlerde 154/34.5 kV gibi GIS veya AIS indirici trafo merkezleri, cer trafo merkezlerinin talep ettiği enerjiyi şebekeden temin eder ve istenilen seviyesine indirerek OG ring kabloları ile cer trafo merkezlerine iletir.

Jeneratör sistemleri, trafo merkezlerinde herhangi bir elektrik kesintisi durumunda devreye girerek, orta gerilim ring sistemini besleyip trenleri en yakın istasyona götürecek gücü sağlamak üzere hazır tutulabilir [2]. Ölçüm barası bu trafo merkezlerinde bulunur ve buradan raylı sistemin harcadığı enerjiyi ölçmek mümkündür [5]. Bu trafo merkezlerinde SF6 gazlı kesiciler veya vakumlu kesiciler ile sistemin arızaya geçtiğinde açması sağlanır [2].

3.2.2 Bir metro hattının cer gücü dağıtım sistemi

Metro sistemleri üçüncü ray üzerinden 750 V DC, 1500 V DC, 600 V DC ve 3000 V DC gerilim seviyelerinde çalışmaktadır. Örnek metro sisteminde bu gerilimleri elde etmek için 34.5 kV giriş gerilimi olan redresör trafoları ve darbeli doğrultucular kullanılmıştır.

Doğrultucudan elde edilen gerilim raya verilmeden önce DC kesicilerden geçirilir. Raylar genellikle az karbonlu masif çelikten veya alüminyum kompozitten imal edilir. Rayların akım taşıma kapasitesi ve gerilim düşümü miktarı rayların kesit alanı ve direnci ile değişeceğinden kullanılan malzemenin özellikleri önem kazanır [2].

3.2.3 Metro hattında kullanılan diğer sistemler

Ortak alanlar, tüneller, yangın sistemleri, ticari alanlar, havalandırmalar ve benzeri yardımcı sistemler alçak gerilim dağıtım sistemi tarafından beslenmektedir. Kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve batarya şarj üniteleri acil durum güç dağıtım sistemini oluşturan ekipmanlardır. Transfer link sistemi, yardımcı sistem hatlarından biri arızaya geçerse arızalı hattın kesintiye uğramaması için başka bir hattan beslenmesine olanak sağlar. Topraklama sistemi ile metro sisteminde bulunan ekipmanlar topraklanarak insan ve ekipman koruması amaçlanır. Metro hattının kontrolü SCADA sistemi ile sağlanmaktadır [2]. SCADA sistemleri gelişmiş dijital teknoloji ile tasarlanmıştır ve dijital koruma röleleri, programlanabilir lojik kontrolör (PLC), renkli dokunmatik panel gibi ekipmanlardan gelen verileri okur ve bu verilere bilgi gönderebilir. Bu veri alışverişini Ethernet altyapısı veya benzeri haberleşme protokolleri ile sağlayabilir.

3.3 Türkiye’de Raylı Sistemler ve Metro Araçlarının Genel Özellikleri

İstanbul Ulaşım A.Ş. genel kataloğuna göre İstanbul’da raylı sistemlerde kullanılan araç sayısı 1988-2014 yılları arasında 614 adettir. Bu filo, 4 farklı modelde metro

aracından, 2 hafif metro ve 4 farklı model tramvaydan oluşmaktadır. Çizelge 3.1’de İstanbul raylı sistemlerinde 1988-2014 yılları arasında kullanılan araçların listesi verilmiştir. 2014 yılında ve sonrasında devam eden ve biten projeler için araç alımları ve üretimleri devam etmektedir [22]. 2015 yılında M6 Levent-Boğaziçi-Hisarüstü hattına 3 adet Alstom, Bombardier ve Hyundai Rotem marka araçlar, 2017 yılında kısmi olarak M5 Üsküdar-Çekmeköy hattına 126 adet Mitsubishi marka araçlar eklenmiştir. Marmaray hattında ise 2013 yılında kısmi olarak 440 adet Hyundai Eurotem araç kullanılmıştır [1].

Çizelge 3.1: İstanbul raylı sistemlerinde 1988-2014 yılları arasında kullanılan araçların listesi.

Hat	Araç tanımı	İşletmeye alındığı	Adet	Tren set	Boy (mm)	Genişlik (mm)	Maks hız (km/h)
M2: Yenikapı-Haciosman metro hattı	Alstom Metro Aracı	1999	32	4	21500	3050	80
M2: Yenikapı-Haciosman metro hattı	Hyundai - Rotem Metro Aracı	2008	92	4	21550	3050	80
M3: Başakşehir-Olimpiyatköy-Kirazlı metro hattı	Alstom Metro Aracı	2009	80	4	21550	2780	80
M4: Kadıköy-Kartal metro hattı	CAF Metro Aracı	2012	144	4	22430	3009	80
M1: Atatürk Havalimanı-Aksaray-Kirazlı hafif metro hattı	ABB- Hafif Raylı Metro Aracı	1988	105	4	23200	2650	80
T4: Topkapı-Habipler tramvay hattı	Hyundai Rotem - Hafif Raylı Metro Aracı	2008	34	3	26960	2650	50
T1: Kabataş-Bağcılar tramvay hattı	Bombardier - Hafif Raylı Tramvay Aracı	2002	55	2	29650	2650	70
T1: Kabataş-Bağcılar tramvay hattı	Alstom - Hafif Raylı Tramvay Aracı	2009	37	2	28580	2650	70
T4: Topkapı-Habipler tramvay hattı	Siemens Duewag Hafif Raylı Tramvay Aracı	2007	32	3	26900	2650	50
T4: Topkapı-Habipler tramvay hattı	RTE 2009 Hafif Raylı Tramvay Aracı	2009	2	2	25000	2650	50
T4: Topkapı-Habipler tramvay hattı	RTE 2000 Hafif Raylı Tramvay Aracı	2000	1	-	28580	2650	50
T3: Kadıköy-Moda tramvay hattı	Gotha-Jena Heritage Tramvay	2003	6	1	11000	2100	-
F1: Kabataş föniküler hattı	Garaventa Föniküler Aracı	2006	4	-	34500	2700	-

Ankara'nın M1 Batıkent–Kızılay metrosunda Bombardier marka araçlardan 18 adet 6'lı set toplam 108 adet, Ankaray hattında Ansaldo Breda marka araçlardan 33 adet, Sincan–Kayaş banliyösünde Rotem marka araçlardan 96 adet ve M2 Kızılay–Çayyolu, M3 Batıkent–Töre, M4 Keçiören–AKM hatlarında CSR ZELC marka araçlardan 324 adet kullanılmıştır [1]. İzmir'de Üçyol–Bornova Hastanesi–Evka3 hattında 45 adet ABB ve 32 adet CSR marka araç, Aliğa–Cuma Ovası banliyö hattında ise CAF marka araçlar kullanılmıştır. Bursa'da 44 adet Siemens, 30 adet Bombardier, 60 adet Durmazlar Green City, 25 adet Duewag olmak üzere 159 hafif raylı araç ve 18 adet Durmazlar İpekböceği, 6 Gotha olmak üzere 24 adet tramvay aracı kullanılmaktadır. Adana metrosu için 36 adet Hyundai Rotem marka araç, Eskişehir tramvayı için 33 adet Bombardier ve 26 adet Skoda marka araç, Kayseri hafif raylı sistem için 30 adet Talas marka araç, Gaziantep tramvayı için 36 adet Duwag – Tulomsaş ve 28 adet Alstom marka araç, Samsun hafif raylı sistemi için 17 adet Ansaldo Breda ve 8 adet Durmazlar Panorama marka araç, Antalya tramvayları için 16 adet CAF ve 10 adet Duewag marka araç, Konya raylı sistemleri için 72 adet Skoda ve 60 Duewag markalar araç, Kocaeli raylı sistemi için ise Durmazlar firması tarafından üretilen 12 adet Panorama marka araç tercih edilmiştir [1]. Bu araçlardan İpekböceği, Panorama, Green City, Talas, Tulomsaş ve RTE marka araçlar Türkiye yapımıdır.

İskenderun (Hatay), Malya, Denizli, Mersin, Diyarbakır, Erzincan, Kahramanmaraş, Afyon, Elazığ, Erzurum, Isparta, Aydın, Rize, Şanlıurfa ve Trabzon illerine raylı sistem yapılması planlanmaktadır [1].

Metro sistemlerinde araçların markalarına ve modellerine göre boyutları, yolcu taşıma kapasiteleri, tren seti konfigürasyonları, maksimum hızları, kullanılan malzeme tipleri, malzeme kaliteleri, kullanılan motor tipleri, kullanılan invertör tipleri, performansları, enerji tüketimleri vb. özellikleri değişiklik göstermektedir.

Türkiye'de yaygın olarak kullanılan araçlardan biri olan Alstom firmasına ait metro araçlarının standart konfigürasyonları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu araçların besleme gerilimleri 3. ray veya katener hat üzerinden sisteme uygun olarak 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 25 kV AC seçilebilmektedir. Aracın gövdesi için alüminyum veya paslanmaz çelik opsiyonları sunulmaktadır [30]. Bir başka firma olan Siemens'in metro araçlarının konfigürasyonu Şekil 3.2'de verilmiştir. Temel konfigürasyonda araçlar üçüncü ray kullanırken 750 V DC gerilim ile beslenmektedir. Opsiyonel olarak 1500 V DC ve pantograf sistemi tercih edilebilir. Gövdesi alüminyum malzemedir.

2 Tren setli (2M)



3 Tren setli (2M-1T)/(3M)



4 Tren setli (2M-2T) / (3M-1T) / (4M)



5 Tren setli (3M-2T) / (4M-1T) / (5M)



6 Tren setli (3M-3T) / (4M-2T) / (6M'e kadar)



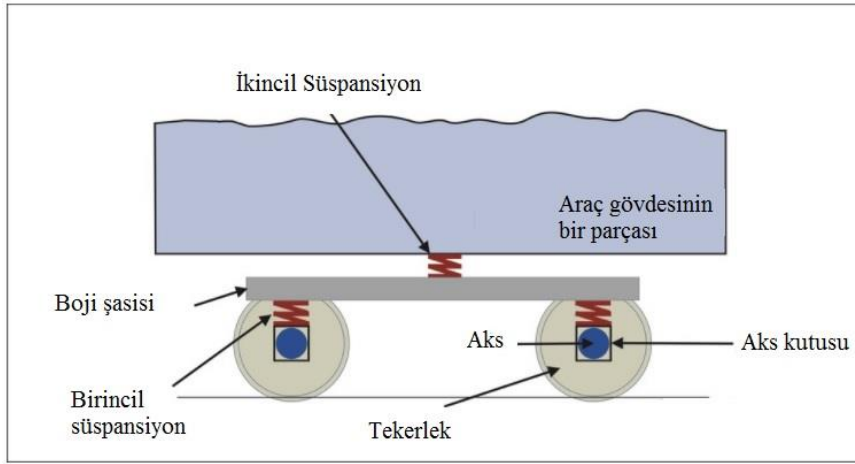
MC - Motorlu kabinli araç
M - Motorlu araç
T - Taşıyıcı araç

Temel konfigürasyon

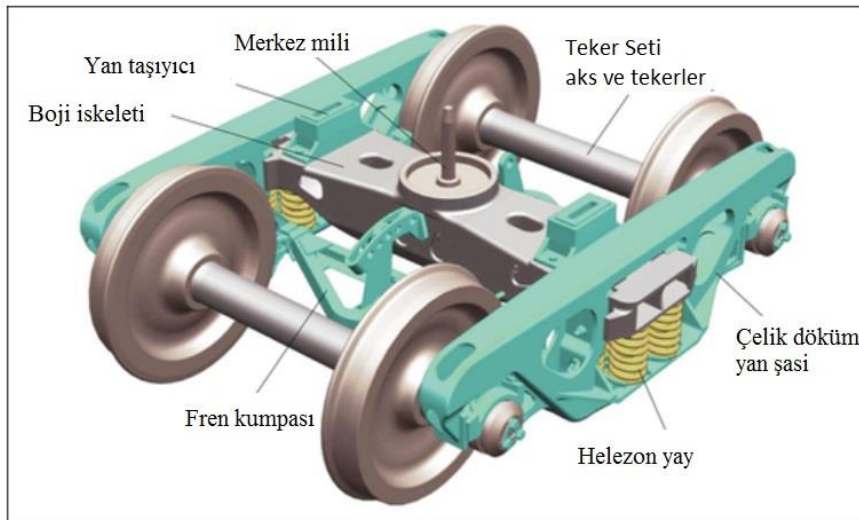
Metro araçlarında günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan alüminyum gövde ve ağırlığı optimize edilmiş boji, tek bir araç için toplam ağırlığı daha önceki araçlara göre 3 ton kadar azaltmaktadır [31].

53

bojiler genellikle aracın başlangıç ve bitiş ucunda olmak üzere iki adet bulunur. Bojiler dört tekerlekli veya altı tekerlekli olabilir. Bojiler, taşıyıcı boji olarak adlandırılıp sadece taşıma işlemini de sağlayabilir. Hem motorlu hem de taşıyıcı bojiler trenin frenleme sistemi kontrolünde frenleme yapar. Tekerler aksa beraber hareket edecek şekilde oturtulur. Dünyada yaygın olarak Şekil 3.4’de gösterilen üç parçalı boji tipi araçlar kullanılır. Bu tasarım çok basittir. Destekleyici olarak bilinen eleman, süspansiyon sağlamak için iki yan taşıyıcı vasıtasıyla sabit helezon yaylar üzerine, araç gövdesi de merkez mili üzerine oturur [32]. Kompresör tarafından basıncı araç ağırlığına göre otomatik olarak belli seviyede tutulan hava yastığı süspansiyonu merkez mili içinden geçirilerek monte edilir. Motorlar da bojiler üzerine dengeyi bozmayacak şekilde yerleştirilir. Motorlar dişli kutusuna bağlıdır, dişli kutusu da tekerlerin bağlı olduğu aksa bağlıdır [2].

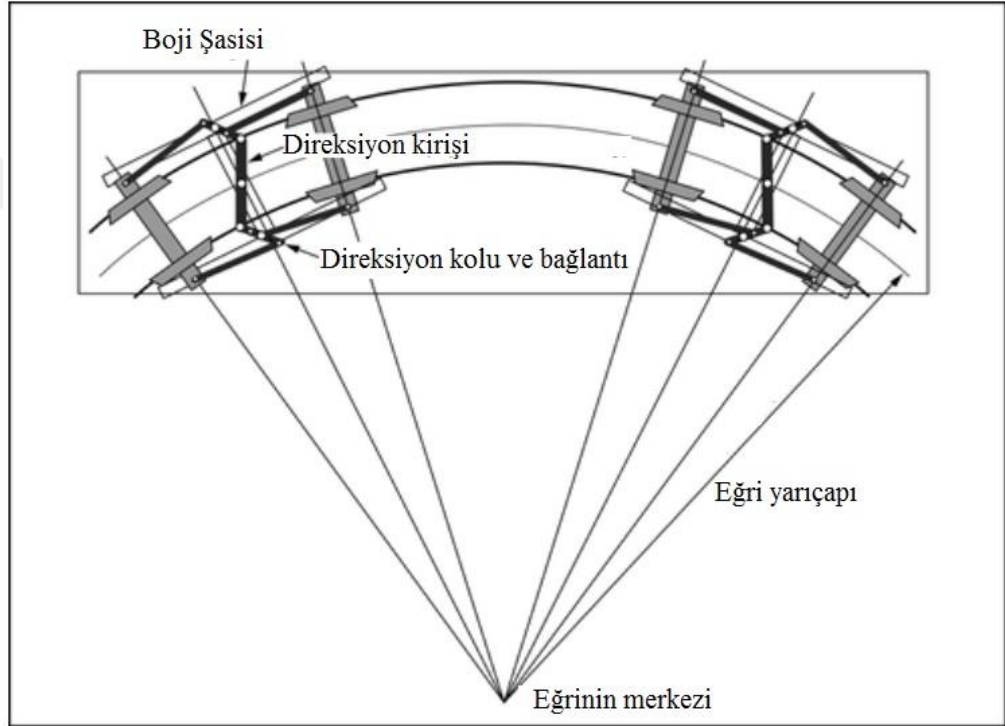


Şekil 3.3: Bojilerin süspansiyon sistemleri [32].



Şekil 3.4: Üç parçalı boji tipi araçlar [32].

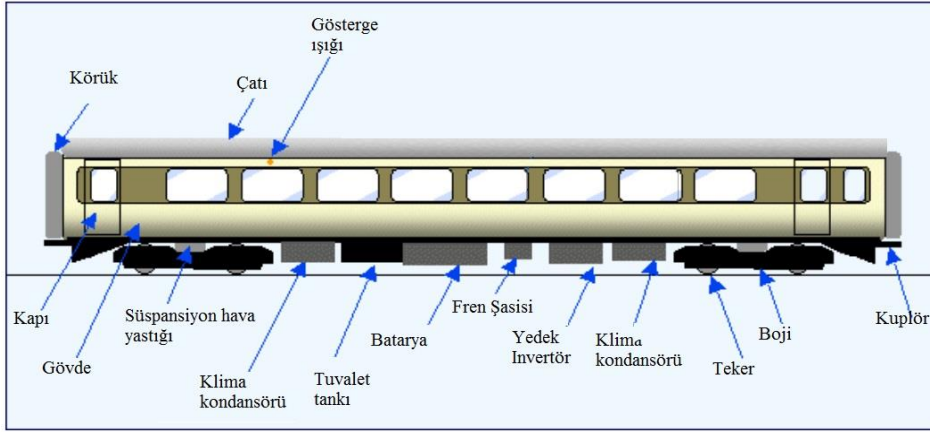
Geleneksel bir boji şasisi raylar tarafından yönlendirilir. Yönlendirilebilir bojilerde öndeki tekerlek takımı boji şasisinin Şekil 3.5'te gibi eğriye dönüşmesini sağlar. Bu Japon tasarımı, aksların boji şasisinde ihtiyaç olan bir dereceye kadar hareket etmesine izin verilir ve aks kutuları bir direksiyon kirişi ile araba gövdesine bağlanır. Tekerlek aşınması ve boji şasisi stresini azaltmak için farklı sistemler mevcuttur. Yön değiştirmesine izin vermek için çok fazla kuvvete ihtiyaç vardır. Çünkü bir aracı iki bojinin taşıdığı düşünülürse, bir boji desteklediği aracın ağırlığının yaklaşık yarısını taşımaktadır [32].



Şekil 3.5: Yönlendirilebilir bojiler [32].

Bojiler birçok farklı boyutta ve şekilde üretilebilir ancak özellikle yüksek hızlarda kullanılan bojilerin şiddetli darbelere ve strese dayanıklı olabilmesi beklenir. Boji şasisi çelik levha veya dökme çelik olabilir. Araç frenlemeyi boji üzerinde bulunan fren diski yardımıyla yapar [32].

Tren setlerinin önünde ve arkasında kuplör adı verilen ekipmanlar bulunur. Bu ekipmanlar yardımıyla tren setleri birbirine bağlanabilir. Örneğin 4 tren setli bir sistem, iki adet 4 tren setinin kuplör yardımı ile bağlanmasıyla 8 tren setli sisteme dönüştürülebilir. Araçları birbirine körük sistemi bağlar ve bu körükler trene virajlarda ve kıvrımlarda hareket kabiliyeti sağlar [2]. Bir aracın genel parçaları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Trene ait bir aracın genel parçaları [32].

Her araçta genellikle iki boji bulunur, her bojide 2 tekerlek takımı ve 2 motor bulunur. Motorlar genellikle üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlardır. Her motorlarından sağlam yapıda olması, az bakım gerektirmesi, yekpare kasaya sahip olması, statorun ve rotorun şiddetli şok ve titreşimlere dayanıklı olması, neme, kara ve kire karşı dayanıklı olması, iyi bir soğutma sistemine sahip olması beklenir [2].

Örnek metro modelinde kullanılacak konfigürasyon MC-M-T-MC (Motorlu kabinli-Motorlu-Taşıyıcı-Motorlu kabinli) 4'lü tren setlidir ve her araçta 2 adet boji bulunmaktadır. Her motorlu aracın her bojisinde 1 adet IGBT ünitesi ve her bir IGBT ünitesine bağlı ikişer adet motor bulunmaktadır. Örnek modelde kullanılan 750 V DC beslemeli motorların teknik verileri Çizelge 3.2'deki gibidir.

Çizelge 3.2: Örnek modelde kullanılan 750 V DC beslemeli motorların teknik verileri.

3. Ray Gerilimi	750 V DC
Motor Tipi	3-fazlı, 4 kutuplu, Sincap Kafesli Asenkron Motor
Nominal Güç	150 kW
Nominal Gerilim	550 V
Nominal Akım	199 A
Devir (rpm)	2210 rpm (50 Hz' de)
Maksimum hız	4492 rpm, 810 mm tekerler ile 85 km/h
Ağırlık	520 kg
Soğutma	Kendinden soğutmalı

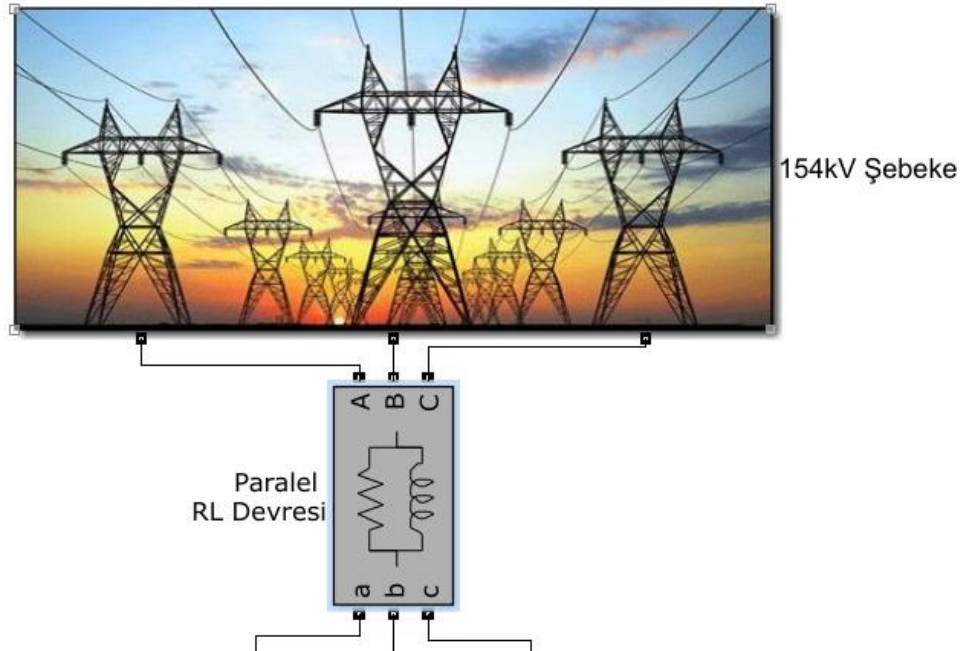
Örnek metro sisteminde değişken gerilimli ve değişken frekanslı (VVVF) invertör kullanılmış olup; bu invertör PWM (pulse wide modulation – darbe genişlik modülasyonu) modülasyon tekniği kullanan IGBT (insulated gate bipolar transistor – yalıtılmış çift kutuplu geçit transistörü) kullanılmaktadır. IGBT çok hızlı anahtarlama yaparak motoru sürmektedir.

4. 750 V DC BİR METRO SİSTEMİNİN MATLAB/SİMULİNK MODELİ

Bir, iki ve dört tren setli, çok istasyonlu 750 V DC beslemeli, üçüncü raylı bir metro sisteminin çalışırken ne gibi kalkış karakteristiklerine sahip olduğu, tren sayısı arttıkça sistemde ne gibi değişikliklerin yapılmasına ihtiyaç olduğu ve şebekede oluşturduğu harmoniklerin değişik tiplerde doğrultucu kullanılarak kabul edilebilir seviyelere nasıl getirildiği bu tez çalışmasında analiz edilmiştir. Metro hattının modellemesi için **MATLAB® Simulink** programı kullanılmıştır. Kullanılan veriler, metro sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 750 V DC üçüncü raylı bir sistemin verilerine oldukça yakındır.

4.1 Şebeke Modeli

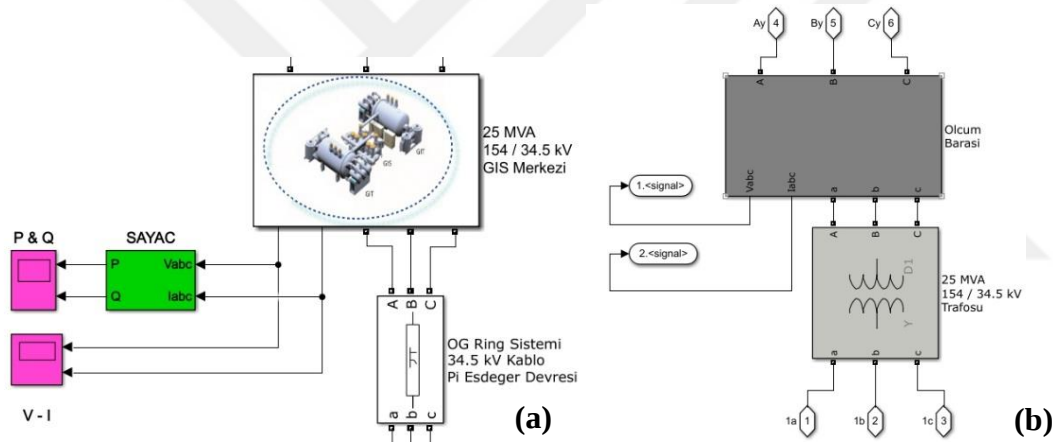
GIS trafo merkezleri, cer trafo merkezlerinin metro sistemleri için talep ettiği gücü enerji iletim şirketinden veya ulusal şebekeden paralel RL devresi üzerinden alır. Şebeke modellenirken faz-faz arası gerilimi 154 kV, 3-faz ve 50Hz olarak modellenmiştir. Şekil 4.1’de şebeke ve paralel RL devresi görünmektedir.



Şekil 4.1: Şebeke ve paralel RL devresi.

4.2 İndirici Trafo Merkezi (GIS) Modeli

Matlab simulink modelinde indirici trafo merkezi modelini oluşturan bölümler ölçüm barası, trafolar ve orta gerilim link sistemidir. İndirici trafo merkezinde bulunan trafolar, cer trafo merkezi için gereken gücü 154 kV iletim şebekesinden alır ve 34.5 kV gerilim seviyesine indirerek orta gerilim ring sistemi ile cer trafo merkezine iletir. Şebeke ile GIS trafo merkezi arasında şebekeden çekilen aktif ve reaktif gücü ölçebilen bir ölçüm barası modellenmiştir. Trafolar 25 MVA, 50 Hz olarak ve üçgen-yıldız yapısında modellenmiştir. Orta gerilim ring sisteminin modellenmesi 40 km uzunluğunda, 50 Hz ve 34.5 kV kablunun pi eşdeğer devresidir. Şekil 4.2 (a)'da GIS trafo merkezinin ve orta gerilim ring sistemi pi eşdeğer devresinin modeli gösterilmiş olup, Şekil 4.2 (b)'de ise GIS merkezi bloğunun içinde bulunan ölçüm barasının ve trafonun modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.2: (a) GIS trafo merkezinin ve orta gerilim ring sisteminin pi eşdeğer devresinin modeli. (b) Ölçüm barasının ve trafonun modeli.

4.3 Cer Trafo Merkezi Modeli

Matlab simulink modelinde cer trafo merkezi modelini oluşturan kısımlar, doğrultucu (rectifier) trafoları, doğrultucular (rectifier) ve LC filtredir. Cer trafo merkezleri, metro sisteminin ihtiyacı olan gücü 34.5 kV ring sisteminden temin eder. Doğrultucu trafoları 34.5 kV gerilimi indirir ve bu gerilim darbeleri doğrultucular vasıtasıyla 750 V DC gerilime dönüşür. Daha sonra L (indüktör) değeri 200×10^{-6} H (Henry) ve C (Kapasitör) değeri 0.1 F (Farad) olan filtre üzerinden 3. raya iletilir.

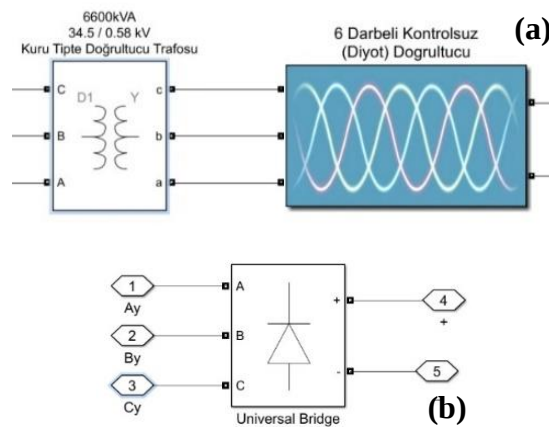
Doğrultucular 6, 12, 18 ve 24 darbeleri olarak modellenmiş ve bu durumda sisteme etkilerinin ne olduğu analiz edilmiştir.

6 darbeli doğrultucu için üçgen yıldız yapısında 34.5/0.58 kV doğrultucu trafosu kullanılmıştır. Şekil 4.3 (a)'da 6 darbeli doğrultucunun trafosu ve Şekil 4.3 (b)'de 6 darbeli doğrultucunun modeli gösterilmiştir. Doğrultucu trafosu 6.6 MVA gücünde ve 50 Hz olarak modellenmiştir.

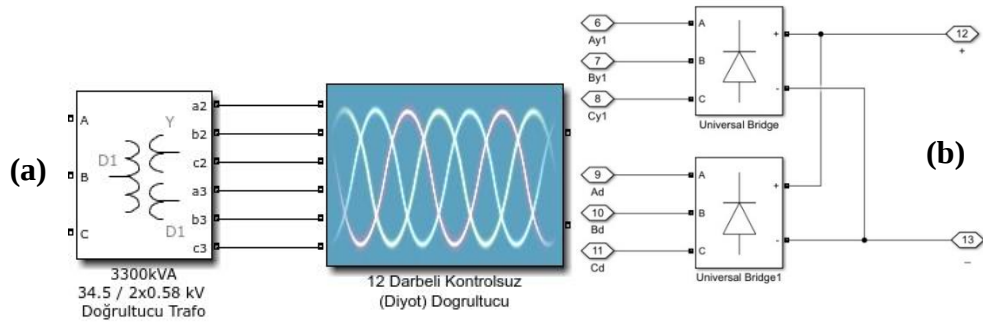
12 darbeli doğrultucu için birincil sargısı üçgen ikincil sargılarından biri üçgen, diğeri yıldız olan, 34500 V giriş gerilimine ve 580 V çıkış gerilimine sahip kuru tipte doğrultucu trafosu kullanılmıştır ve 30 derece faz kaymasına sahiptir. Şekil 4.4 (a)'da 12 darbeli doğrultucu trafosunun modeli ve Şekil 4.4 (b)'de 12 darbeli doğrultucunun modeli gösterilmiştir. Doğrultucu trafoları 3.3 MVA gücünde ve 50 Hz olarak modellenmiştir.

18 darbeli doğrultucu için 3 adet zigzag doğrultucu trafosu kullanılmıştır, trafoların giriş gerilimi 11500 V, çıkış gerilimi ise 580 V olarak modellenmiştir. İkincil sargıları yıldız bağlıdır ve 20 derece faz kaymasına sahiptir. Trafo çıkışları, paralel bağlı üç adet üç fazlı tam dalga doğrultucuya bağlıdır. Doğrultucu trafoları 2.2 MVA gücünde ve 50 Hz olarak modellenmiştir. Şekil 4.5 (a)'da birbirine bağlı 3 zigzag trafo ve Şekil 4.5 (b)'de doğrultucuların modelleri gösterilmiştir.

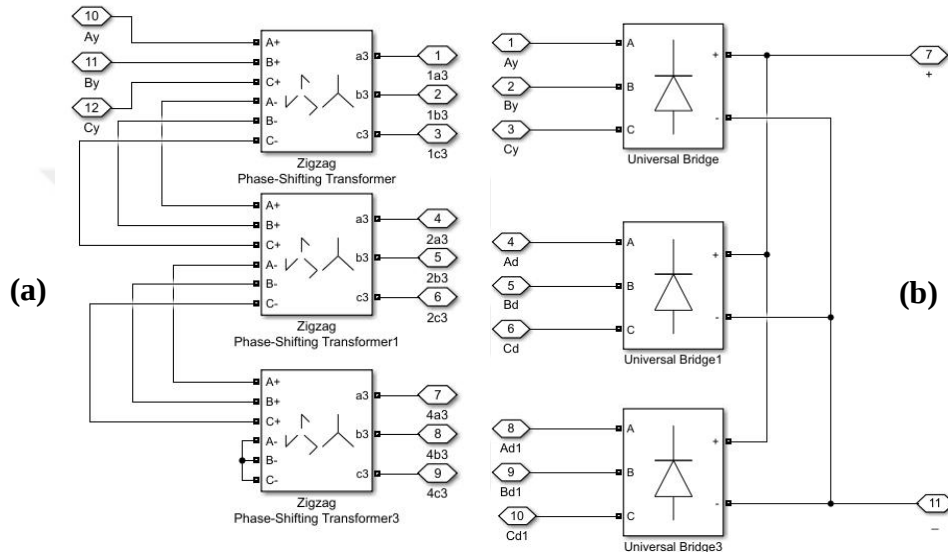
24 darbeli doğrultucu için 4 adet zigzag doğrultucu trafosu kullanılmıştır, trafoların giriş gerilimi 8625 V, çıkış gerilimi ise 580 V olarak modellenmiştir. İkincil sargıları yıldız bağlıdır ve 15 derece faz kaymasına sahiptir. Trafo çıkışları, paralel bağlı 4 adet üç fazlı tam dalga doğrultucuya bağlıdır. Doğrultucu trafoları 1650 kVA gücünde ve 50 Hz olarak modellenmiştir. Şekil 4.6'da cer trafo merkezi bloğu içinde bulunan doğrultucu trafosu, 24 darbeli doğrultucu ve LC filtre, Şekil 4.7 (a)'da birbirine bağlı 4 zigzag trafo ve Şekil 4.7 (b)'de doğrultucuların modelleri gösterilmiştir.



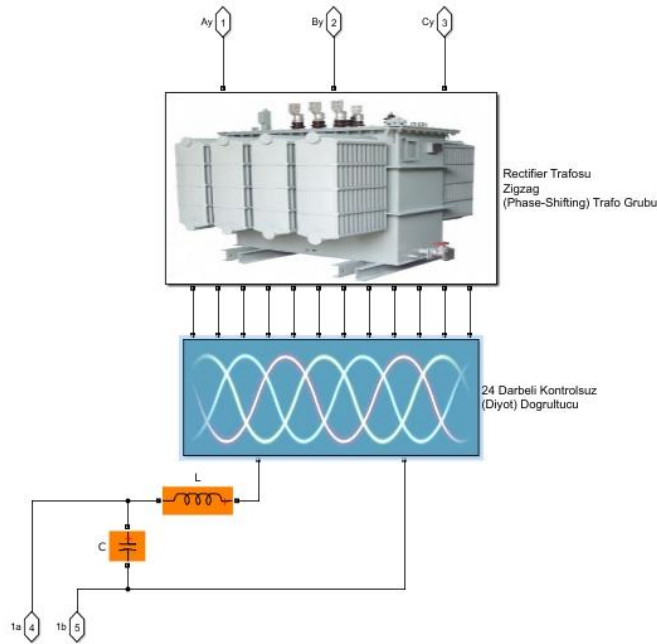
Şekil 4.3: 6 darbeli (a) Doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.



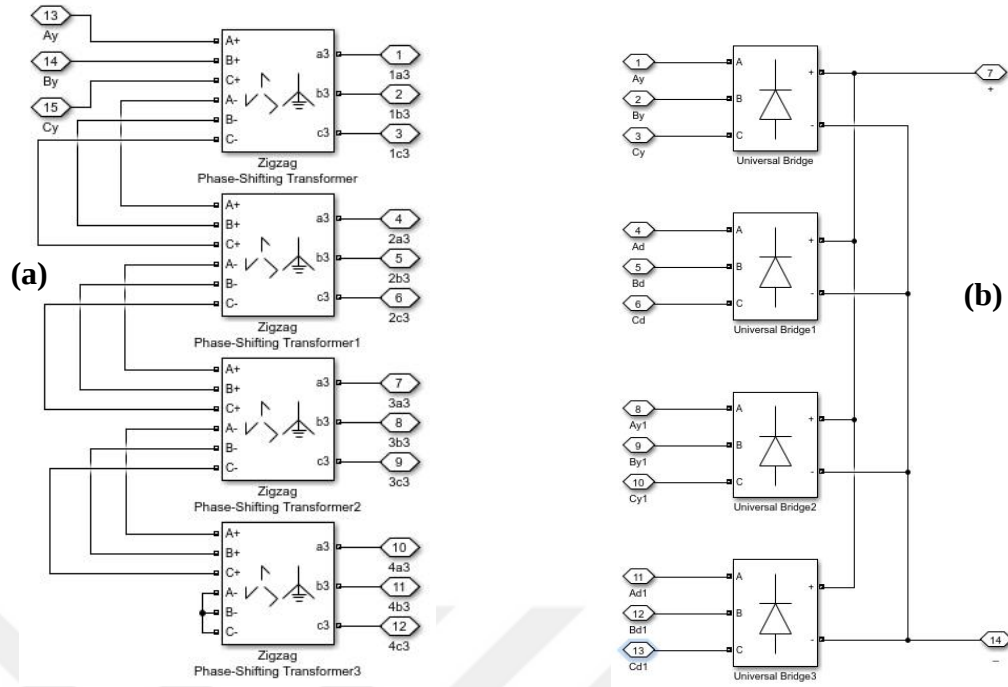
Şekil 4.4: 12 darbeli (a) Doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.



Şekil 4.5: 18 darbeli (a) 3 zigzag doğrultucu trafosu (b) Doğrultucunun modeli.



Şekil 4.6: Cer trafo merkezi bloğu içinde bulunan doğrultucu trafosu, 24 darbeli doğrultucu ve LC filtre.

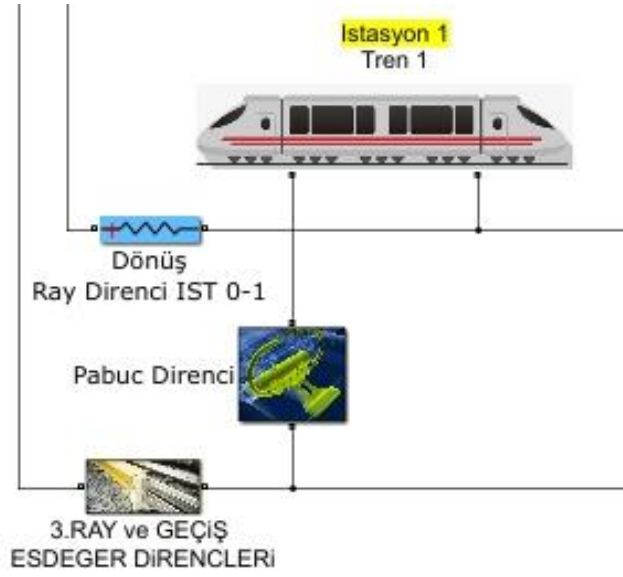


Şekil 4.7: 24 darbeli (a) 4 zigzag doğrultucu trafosu modeli. (b) Doğrultucunun modeli.

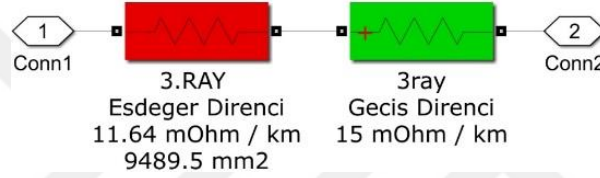
4.4 Akım Toplama Sisteminin Modeli

Matlab Simulink modelinde akım toplama sistemi modelini oluşturan kısımlar, üçüncü ray sistemi, ray geçişleri, dönüş rayları ve kolektör pabuçlarıdır. Metro araçları enerjisini üçüncü ray sistemi üzerinden kolektör pabuçları ile alır ve çekilen akım çalışan raylar üzerinden geri döner. Üçüncü ray eşdeğer direnci her bir kilometrede 11.64 mOhm, dönüş rayları eşdeğer direnci paralel iki ray için her bir kilometrede 20 mOhm, ray geçiş eşdeğer direnci her bir kilometrede 15 mOhm olarak modellenmiştir. Her bir tren setinde 4 araç ve her araçta ikişer boji bulunduğundan toplamda sekiz adet boji mevcuttur. T aracı hariç her bojide 1 kolektör pabucu vardır. Modelde T aracı motor ve IGBT ünitesi taşımadığından kolektör pabucu da taşımamaktadır. Toplamda 6 adet 30 mOhm dirençli kolektör pabucu kullandığı varsayılmış ve eşdeğer direnç olarak her bir tren seti için 5 mOhm olarak modellenmiştir. Kolektör pabucu sade karbon olarak seçilmiş ve direnç değerleri akım toplama sistemleri için teknik kılavuz kaynağından alınmıştır [25].

Şekil 4.8’de dönüş ray direncinin, 3. ray ve geçiş eşdeğer direncinin ve pabuç direncinin modelleri görülmektedir. Şekil 4.9’da ise 3. ray eşdeğer ve 3. ray geçiş eşdeğer dirençlerinin modeli görülmektedir.



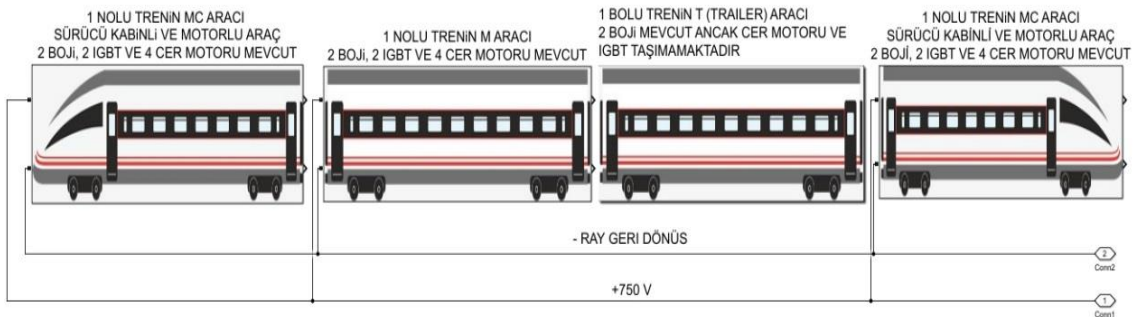
Şekil 4.8: Dönüş ray, üçüncü ray, geçiş eşdeğer ve pabuç dirençlerinin modeli.



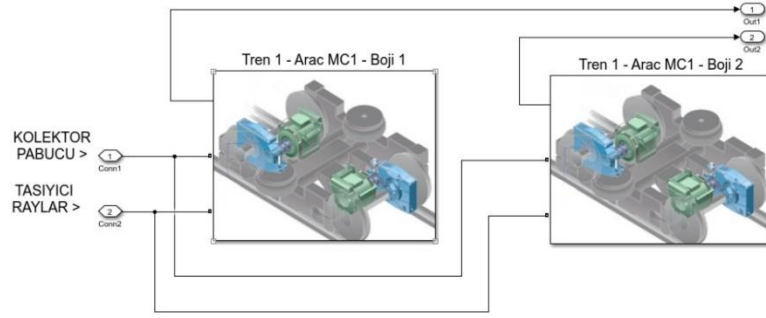
Şekil 4.9: 3. ray eşdeğer ve 3. ray geçiş eşdeğer dirençlerinin modeli.

4.5 Metro Aracının ve Bojisinin Modeli

Matlab Simulink modeli 1 trenli, 2 trenli ve 4 trenli olarak modellenmiştir. Her bir tren MC-M-T-MC 4'lü araç setinden oluşmaktadır. Her araç ikişer bojiye sahiptir, T aracı dışındaki her boji 1 kolektör pabucu, 1 IGBT ünitesi ve 2 cer motoru taşımaktadır. T aracı sadece taşıma amaçlı olup üzerinde kolektör pabucu, IGBT ünitesi ve motor bulunmamaktadır ve modelde sisteme etkisi yok sayılmıştır. Şekil 4.10'da 4'lü tren setini oluşturan araçların modeli, Şekil 4.11'de ise her tren aracı içinde bulunan boji modeli gösterilmiştir.



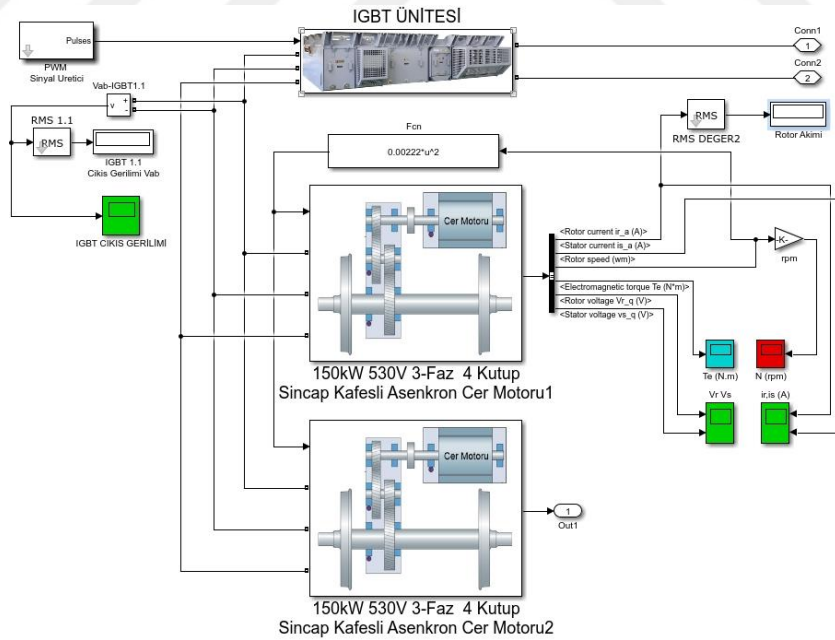
Şekil 4.10: 4'lü tren setini oluşturan araçların modeli.



Şekil 4.11: Her tren aracı içinde bulunan boji modeli.

4.6 IGBT Ünitesi ve Motor Modeli

Matlab Simulink modelinde, MC ve M araçlarında bulunan her boji 1 IGBT ünitesi ve 2 motor taşımaktadır. IGBT ünitelerinin kontrolü için DGM sinyal üretici kullanılmıştır. DGM sinyal üreticisinin modülasyon indeksi 0.83, örnekleme zamanı 0.0002, taşıyıcı frekansı 1440 Hz, çıkış geriliminin frekansı 60 Hz'dir. IGBT ünitesi tarafından dönüştürülen 60 Hz, 3 faz AC gerilim cer motorlarına uygulanır. Her IGBT ünitesi Şekil 4.12'de gösterildiği gibi 2 adet motoru kontrol edecek şekilde modellenmiştir.



Şekil 4.12: 2 adet motorun kontrolünü sağlayan IGBT ünitesi.

Modelde bulunan motorlar 150 kW (200 HP) gücünde, 530V faz-faz arası gerilime sahip, 60 Hz sincap kafesli asenkron AC cer motoru olarak parametrelenmiştir. Şekil 4.13'te modelde girilen motora ait veriler gösterilmektedir.

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.

Configuration	Parameters	Advanced	Load Flow
Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [200*746, 530, 60]			
Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Ls(H)]: [0.087 0.8e-3]			
Rotor resistance and inductance [Rr(ohm) Lr(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()]: [27.09 0.1 2]			
Initial conditions [slip, th(deg), ia, ib, ic(A), pha, phb, phc(deg)]: [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]			
☐ Simulate saturation			
Plot			
[(Arms) ; v(VLL rms)]: , 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]			

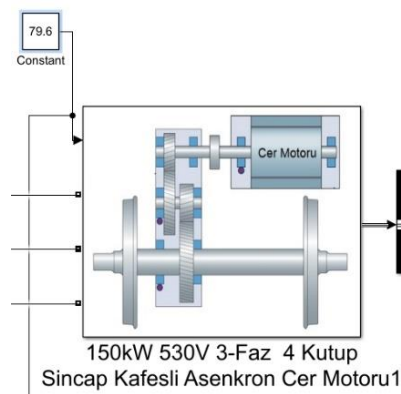
Şekil 4.13: Modelde kullanılan motorlara ait parametreler.

4.7 Trenlerin Yüklenmesi

Matlab Simulink modelinde, aynı anda kalkış yapacak olan 1 trenli, 2 trenli ve 4 trenli modelde bulunan her cer motoru şaftına %100, %75, %50 ve %25 nominal yük uygulanarak çalıştırılabilmesi için Şekil 4.14'deki gibi asenkron motor bloğunun moment girişine sabit değer fonksiyonu bağlandı. Bu fonksiyona girilecek değerler Formül 4.1 ile hesaplandı.

$$N_m = 60 \cdot P / 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4.1)$$

Formül 4.1'de görüleceği üzere nominal yük momenti (Nm) hesaplanırken, sistem frekansı 60 Hz, motor gücü (P) 150 kW ve nominal hız (n) 1800 rpm olarak alındı. Bu durumda nominal yük değeri yaklaşık olarak 796 N.m olarak bulundu ve %75 yük için 597 N.m, %50 yük için 398 N.m, %25 yük için ise 199 N.m olarak hesaplandı. Standart modelde ise asenkron motorun momenti, Şekil 4.12'deki gibi nominal torkun hızın karesine bölünmesi ile elde edilen katsayı ile hız fonksiyonu olarak tork ifadesinin Simulink modelinde FCN bloğuna girilmesi ile elde edilir.



Şekil 4.14: Asenkron motor modeline sabit değer parametresinin girilmesi.

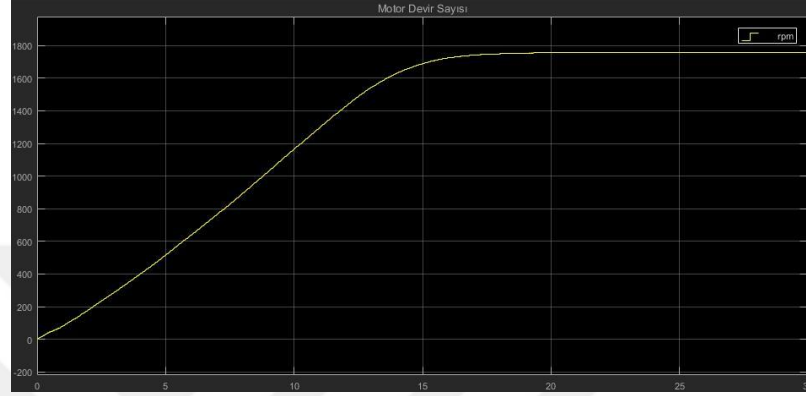
5. MATLAB/SİMULİNK MODELİ SONUÇLARININ ANALİZİ

Matlab Simulink modelinde, 1 trenli 1 istasyonlu, 2 trenli 2 istasyonlu, 2 trenli 4 istasyonlu ve 4 trenli 4 istasyonlu sistemlerde bulunan trenlerin aynı anda, onar ve yirmişer saniye aralıklar ile kalkış yaptıkları durumlarda, doğrultucuların darbe sayılarının değiştirilmesi durumunda, doğrultucuların değişmesine bağlı olarak değişen trafo tiplerine göre sistemin değişmesi durumunda, LC filtresinin değerlerinin değiştirilmesi durumunda, üçüncü rayı besleyen cer trafo merkezlerinin rayı farklı yerlerden beslemesi durumunda, aynı istasyon sayısına ve aynı tren sayısına sahip sistemin farklı sayıda cer trafo merkezi ile beslenmesi durumunda, cer trafo merkezlerinin üçüncü rayı besleyen hattının devre dışı kalması durumunda ve trenlere ait motor şaftlarına farklı oranda nominal yük uygulanması durumunda trenlerin kalkış analizleri ve sistemin güç kalitesinin analizleri yapılmıştır. Modellerde trenlerin kalktıktan sonra aldığı yolun empedansları ihmal edilmiştir ve mesafenin değişmesi ile değişen eşdeğer dirençleri hesaba katılmamıştır. İstasyonlar arası mesafe birer kilometre olarak kabul edilmiştir. Trenler ve kullandıkları motor, evirici ve diğer ekipmanların özdeş oldukları kabul edilmiştir. Taşıdıkları ağırlık ve yolcu sayısı her tren için aynı kabul edilmiştir. Trenlerin kullandığı hattın düz olduğu kabul edilmiştir. Modelde kullanılan tüm tren setleri 4 araca sahiptir. Aksi belirtilmedikçe standart model için 12 darbeli doğrultucu kullanılmıştır. Birinci trenin birinci istasyondan beslendiği durumda, beslenen nokta ile tren arasındaki mesafenin 1 kilometre olduğu kabul edilmiştir ve eşdeğer dirençler buna göre hesaplanmıştır. Modellemede, motor ataleti parametresi kalkış analizleri ve harmonik analizleri için 27.09 kgm^2 olarak girilmiştir.

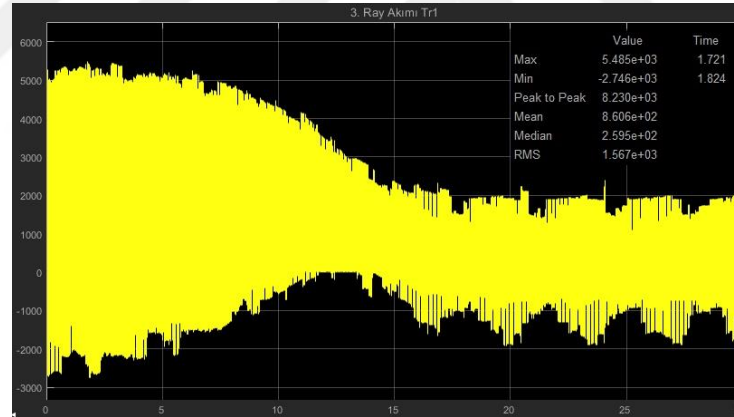
5.1 Bir Trenli Bir İstasyonlu Bir Cer Trafo Merkezli Modellerin Analizi

Bir trenli, bir istasyonlu, bir cer trafo merkezli modelde 4 araçlı 1 tren kullanılmıştır. Sadece 1 istasyon vardır ve sistem sadece 1 cer trafo merkezinden beslenmektedir. Model kalkış analizi için 30 saniye, harmonik analiz için ise 1.2 saniye çalıştırılmıştır. Tren sayısı ve istasyon sayısı 1 olan sistemin tam modeli Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

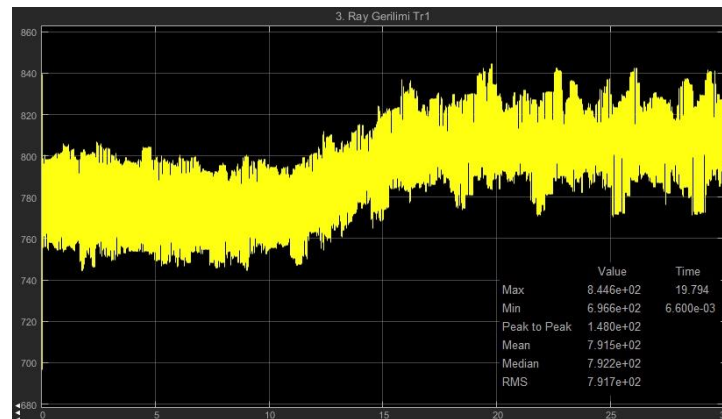
Kalkış sırasında, çekilen akımın yüksek olması sebebi ile 3. ray gerilimi düşük bir seviyededir. Şekil 5.4’de gösterildiği gibi minimum değer 696.6V maksimum değer ise 844 V olarak ölçülmüştür. Bu değerler BS EN 50163 standardına göre izin verilen gerilim aralıkları içerisinde kalmaktadır. Bu standarda göre izin verilen geçici en düşük gerilim 500V ve geçici en yüksek gerilim 1000V’dur [20]. Kalkış gerçekleşikten sonra 3. ray gerilimi 780-820 V bandına yerleşmektedir.



Şekil 5.2: Motor devir sayısı.

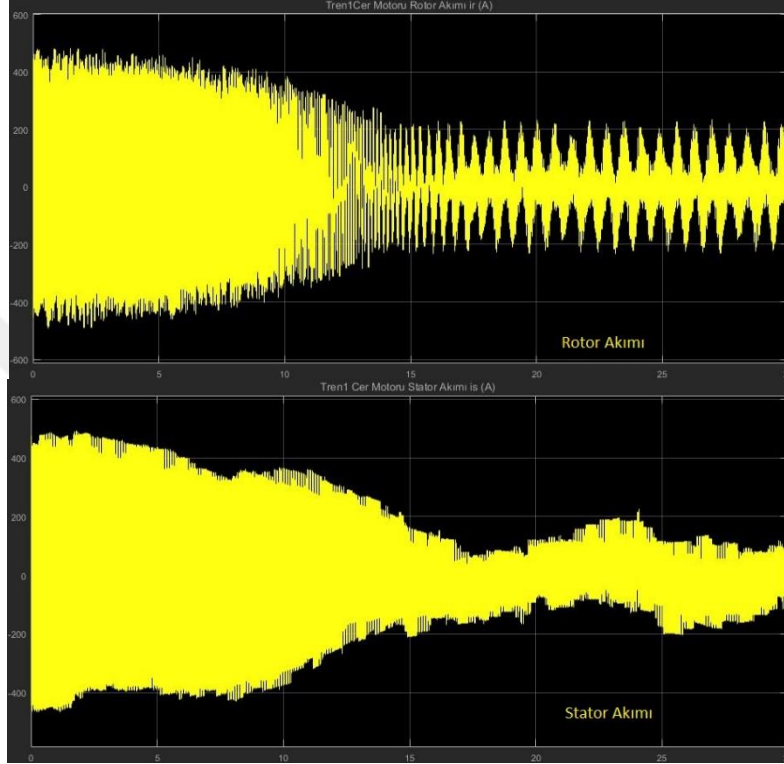


Şekil 5.3: 3. ray akımı.



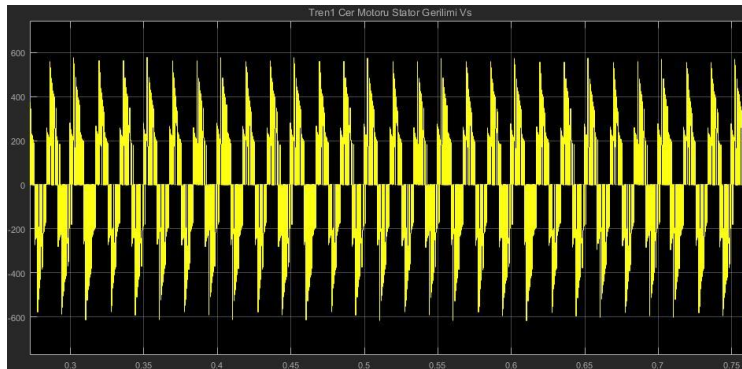
Şekil 5.4: 3. ray gerilimi.

Trenlerde kullanılan motorlardan sadece birinin rotor akımının ve stator akımının zamana göre grafiği Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Diğer motorlar da aynı grafiklere sahiptir. Kalkış anında çekilen maksimum akım değeri yaklaşık olarak 480A’dır. Kalkışın gerçekleşmesinden sonra ise akımın tepe değeri yaklaşık 200A seviyelerine düşmüştür.

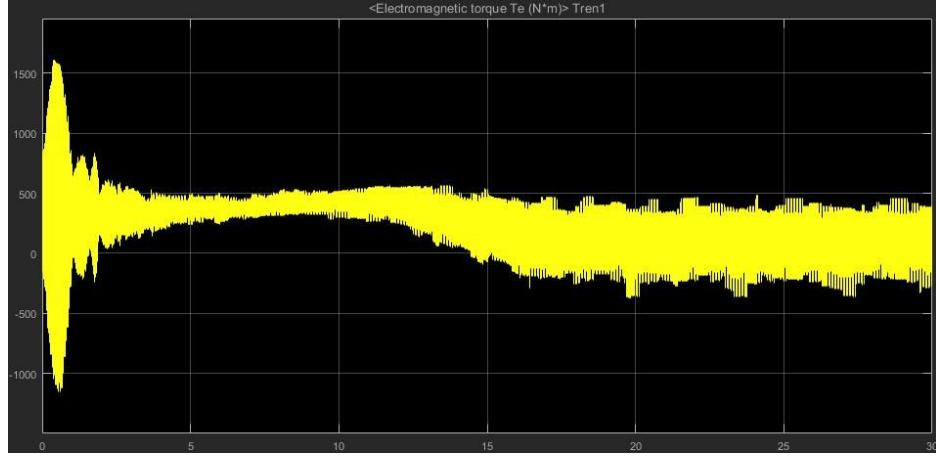


Şekil 5.5: Rotor akımının ve stator akımının zamana göre grafiği.

Şekil 5.6’da motorların stator gerilimi ve Şekil 5.7’de motorların elektromanyetik tork-zaman (Te) grafiği görülmektedir. Trenin kalkış anında elektromanyetik torkun (Te) kararsız olduğu ve kalkış tamamlandıktan sonra kararlı hale geldiği görülmektedir.

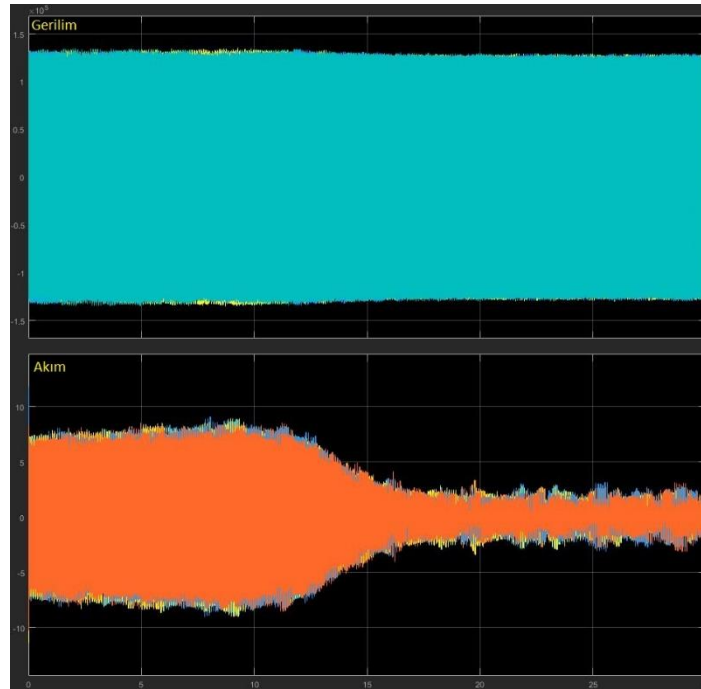


Şekil 5.6: Motorlara ait stator gerilimi.

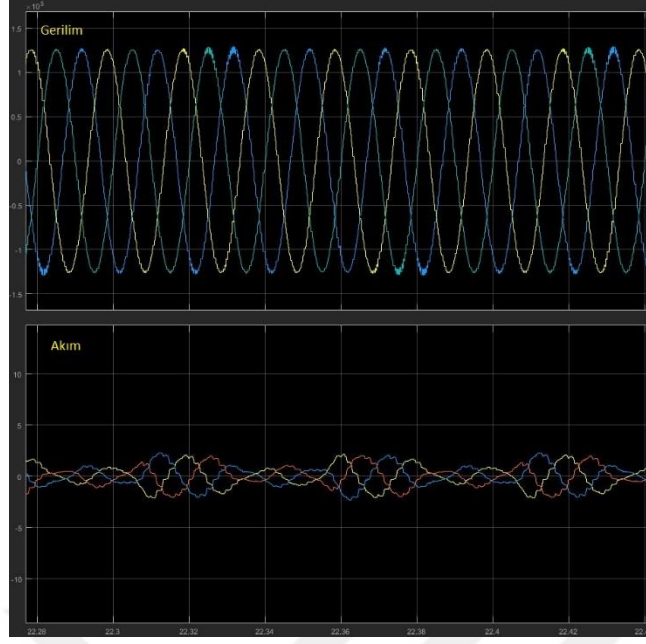


Şekil 5.7: Motorlara ait elektromanyetik tork-zaman grafiği.

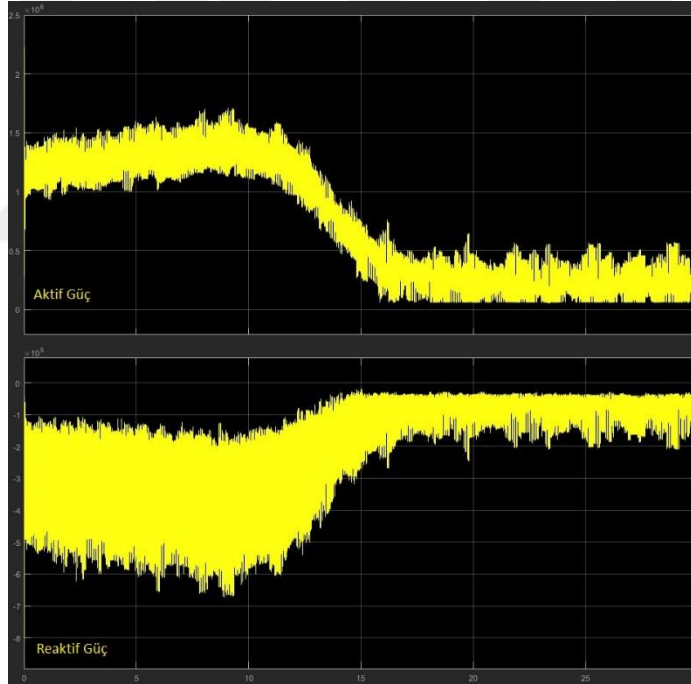
GIS merkezinde bulunan ölçüm barasından alınan değerlere göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 5.8’de, başlangıç anındaki yakınlaştırılmış gerilim ve akım grafikleri Şekil 5.9’da aktif güç ve reaktif güç grafikleri ise Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Gerilim değeri otuz saniyelik süre boyunca hemen hemen aynı değerde kalsa da akım değeri kalkış anında maksimum 11.8A değerine ulaşmakta ve kalkış tamamlanana kadar 8A seviyelerinde seyretmektedir. 20 saniye sonra tren kalkışını gerçekleştirip kararlı harekete geçtiğinde ise akım değeri 2-3A seviyelerine düşmüştür. Bu akım ve gerilim değerleri ile orantılı olarak aktif güç değerleri kalkış anında oldukça yüksek olsa da kalkış tamamlandıktan sonra değerler beklenen seviyelere inmektedir.



Şekil 5.8: Gerilim ve akım grafikleri.



Şekil 5.9: Yakınlaştırılmış gerilim ve akım grafikleri.

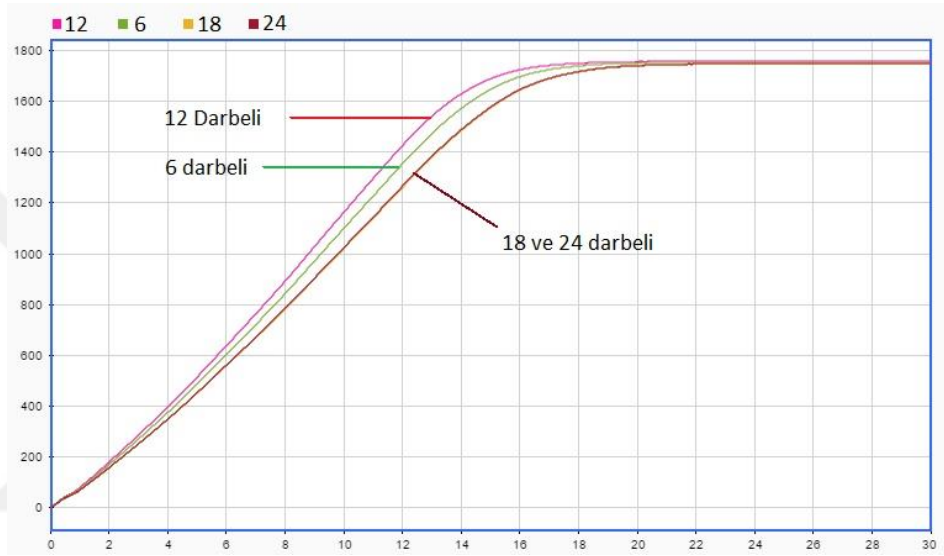


Şekil 5.10: Aktif güç ve reaktif güç grafikleri.

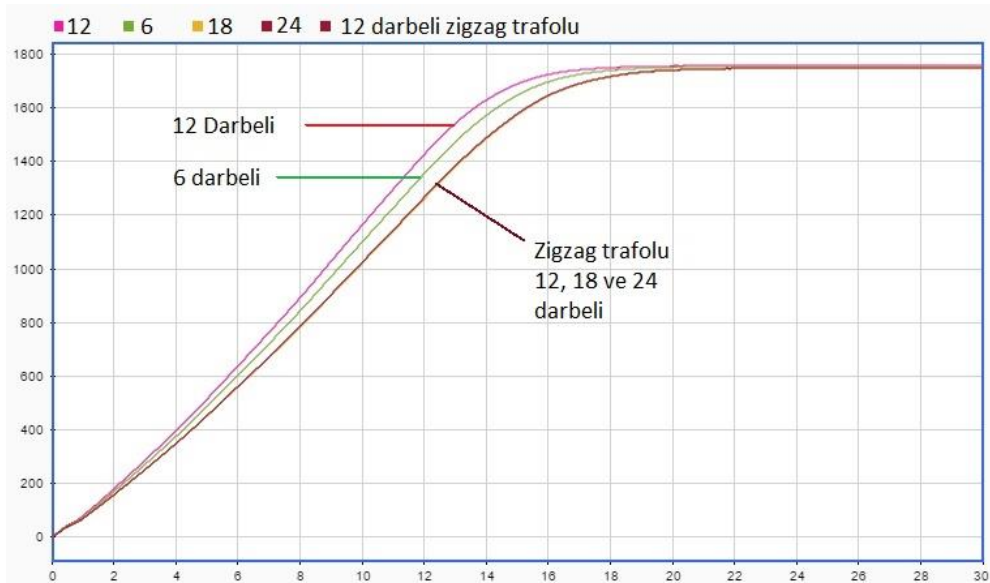
5.1.2 Doğrultucu darbe sayısına göre tren kalkış analizi

Bir önceki bölümde 12 darbeli diyot doğrultuculu model analiz edildi. Bu bölümde ise doğrultucu darbe sayısına göre tren kalkış analizi yapıldı. Şekil 5.11’de 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemdeki trenlerin motor devir sayısı grafiği verilmiştir. 12 darbeli sistem diğer sistemlere göre daha dik bir devir sayısı zaman grafiğe sahipken; 6 darbeli sistem ise 18 ve 24 darbeli sisteme göre daha dik bir grafiğe

sahiptir. 18 ve 24 darbeli sistem ise hemen hemen aynı devir sayısı zaman grafiğine sahiptir. Şekil 5.12’de gösterilen devir sayısı zaman grafiği incelendiğinde, 12 darbeli doğrultucu sistemi için birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları yıldız üçgen olan trafo yerine zigzag trafo kullanıldığında, 12 darbeli sistemin devir sayısı zaman grafiğinin zaten zigzag trafo kullanılmış olan 18 ve 24 darbeli sistemlerin devir sayısı zaman grafiği ile hemen hemen aynı olduğunu görmekteyiz. Bu durumda, devir sayısı grafiğine darbe sayısının değişmesinin etkisinden daha çok trafo yapısının değişmesinin etkisinin olduğu anlaşılmaktadır.

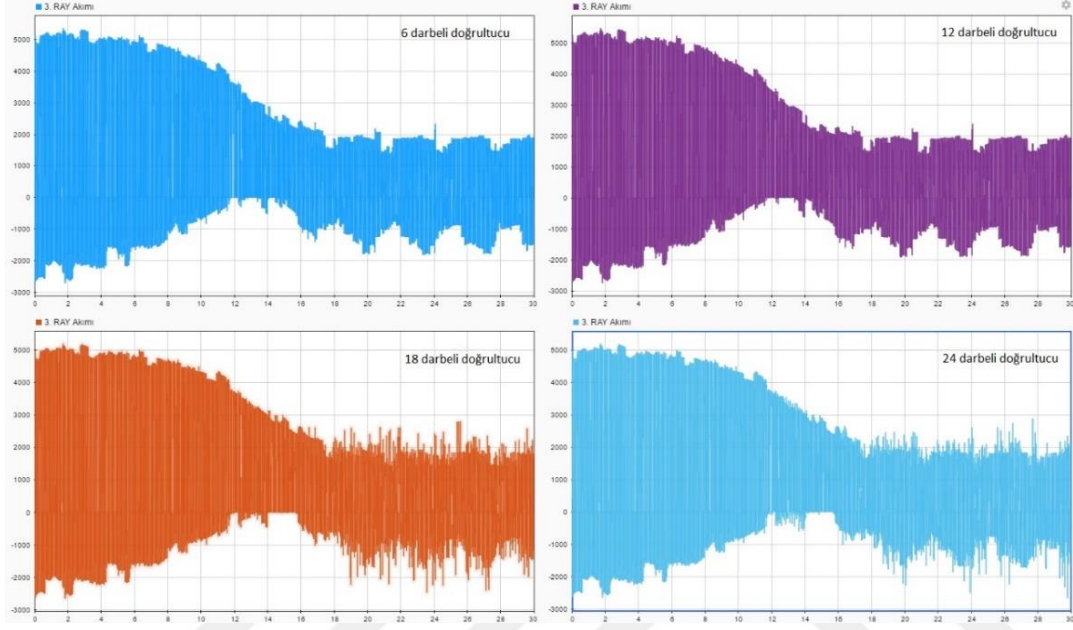


Şekil 5.11: 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucu sistemlerde trenlerin motor devir sayısı grafiği.

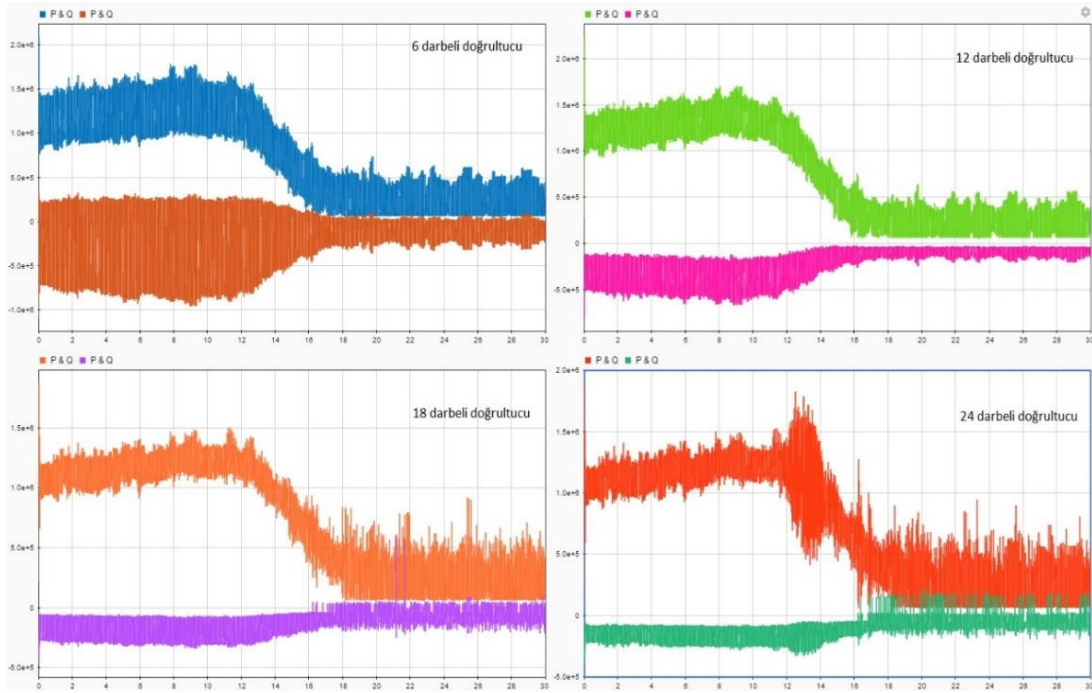


Şekil 5.12: 12 darbeli doğrultucu ve zigzag trafolu sistemlerde trenlerin motor devir sayısı grafiği.

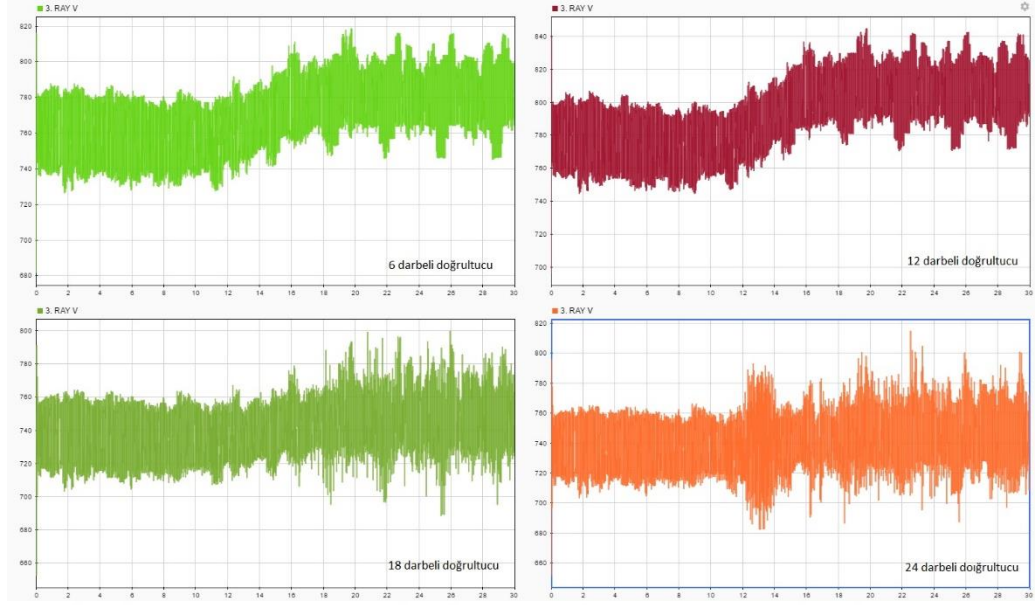
Şekil 5.13'te 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemin 3. ray akımları, Şekil 5.14'te GIS trafo merkezinden ölçülen aktif ve reaktif güçler, Şekil 5.15'te 3. ray gerilimleri, Şekil 5.16'da LC filtresi değiştirilmiş 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemlerin 3. ray gerilimleri, Şekil 5.17'de ise zigzag trafo kullanılmış 12 darbeli sistemin 3. ray gerilimleri verilmiştir.



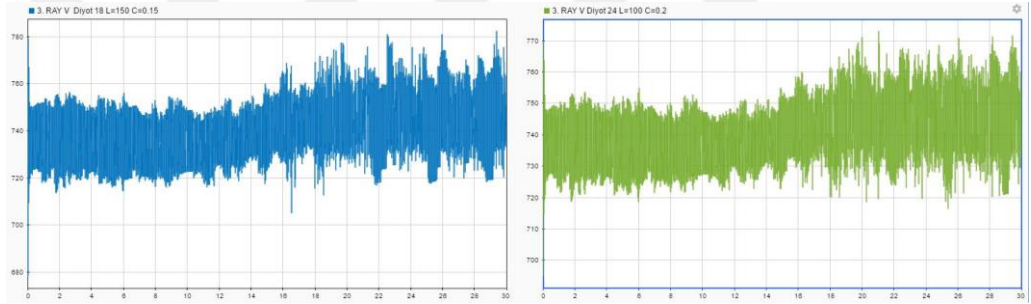
Şekil 5.13: 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerin 3. ray akımları.



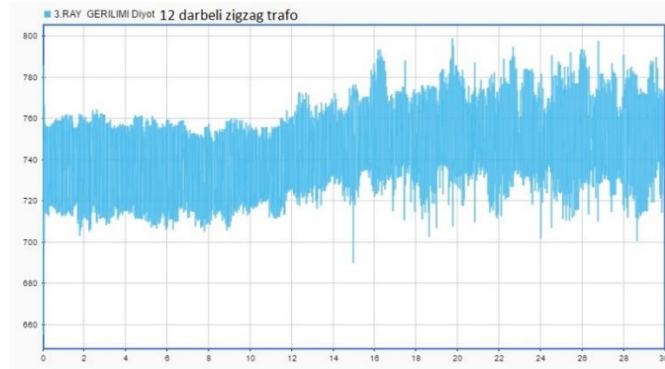
Şekil 5.14: 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistemlerde GIS trafo merkezinden ölçülen aktif ve reaktif güçler.



Şekil 5.15: 6, 12, 18 ve 24 darbeleri doğrultuculu sistemlerin 3. ray gerilimleri



Şekil 5.16: LC filtresi değiştirilmiş, 18 ve 24 darbeleri doğrultuculu sistemlerin 3. ray gerilimleri.



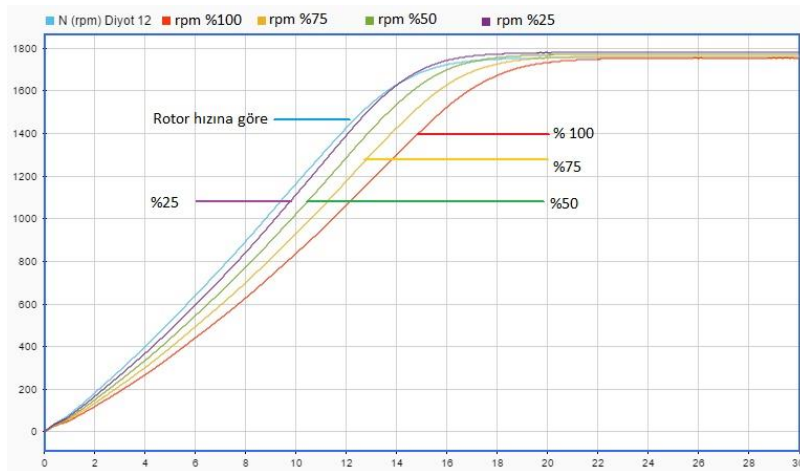
Şekil 5.17: Zigzag trafo kullanılmış 12 darbeleri doğrultuculu sistemin 3. ray gerilimleri.

Doğrultucu darbe sayılarının değişmesinin ray akımlarına etkisinin çok fazla olmadığı görülmektedir. Darbe sayısı arttıkça değişen trafo tipleri ile birlikte reaktif güç tüketiminin azaldığı görülmektedir. 6 darbeleri modelin 3. ray gerilimi ortalama yaklaşık 760V, 12 darbeleri modelin 3. ray gerilimi ortalama yaklaşık 780V, 18 ve 24 darbeleri

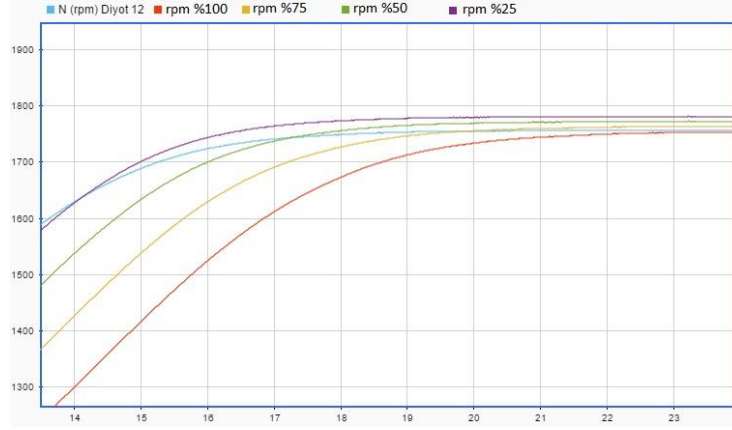
modellerin 3. ray gerilimleri ise ortalama yaklaşık 740V seviyesindedir. Kapasitör değeri arttırılan 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemlerin 3. ray gerilimlerinin daha kararlı yapıda olduğu, maksimum gerilim değerlerinin düşerken, minimum değerlerinin arttığı ve bu sebeple maksimum tepe değeri ile minimum değer arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. 12 darbeli sistemde girişi üçgen, çıkışları yıldız ve üçgen trafolar yerine 18 ve 24 darbeli sistemlerde olduğu gibi zigzag trafo kullanılırsa 6 darbeli sistemden daha kararlı bir grafiğe sahip olduğu, 18 ve 24 darbeli sistemlere göre ise daha kararsız bir grafiği sahip olduğu görülmektedir. Aynı tip trafolar kullanan 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemlerin az da olsa farklı karakteristiklerinin olduğu, darbe sayısı arttıkça sistemin daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

5.1.3 Farklı yüklenme durumlarında tren kalkış analizi

Tren motor şaftlarına nominal yükün %25'i, %50'si, %75'i ve %100'ü uygulandığı durumlarda Şekil 5.18'de bir motora ait devir sayısı zaman grafiği ve Şekil 5.19'da yakınlştırılmış motor devir sayısı zaman grafiği incelendiğinde %25 ve rotorun hızına göre yüklenme durumlarında trenin en hızlı kalkışı gerçekleştirdiği ve yaklaşık 19-20 saniye sonra kararlı hızlarına ulaştığı görülmektedir. %25 yüklenme durumunda yaklaşık 1780 rpm hızına ulaştığı ve bu hızda devam ettiği; rotorun hızına göre yüklenmede ise yaklaşık 1755 rpm hızında devam ettiği görülmektedir. Motorlar %100 yüklendiğinde ise 26 sn. sonra yaklaşık olarak ancak 1755 rpm hızına ulaştığı ve bu hızda devam ettiği görülmektedir. %50 ve %75 yüklenme durumlarındaki hızları ise %25 ve %100 yüklenme durumlarındaki hızları arasına yerleşmiştir.

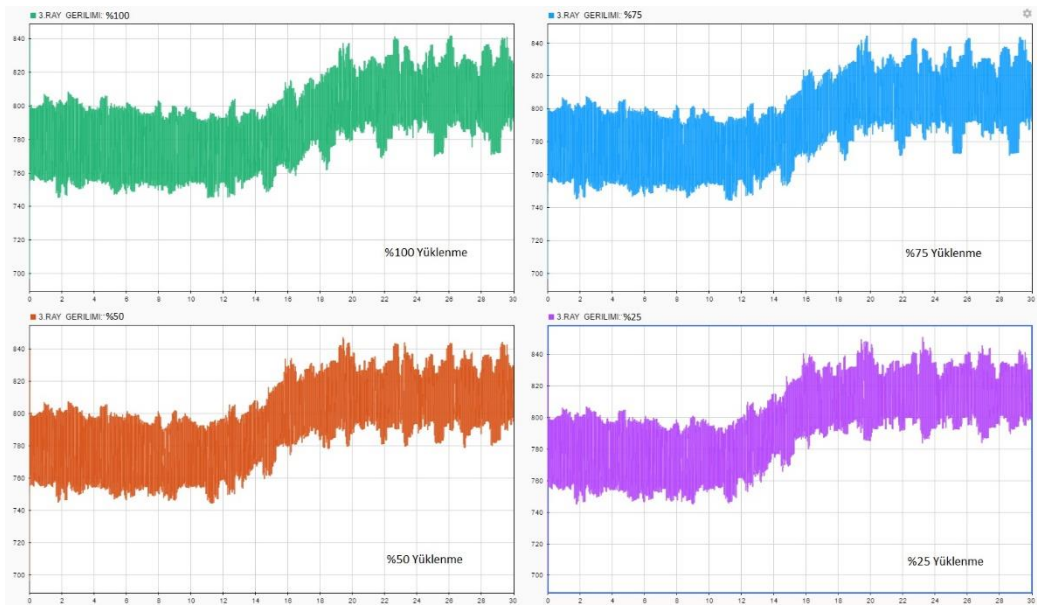


Şekil 5.18: Motor devir sayısı zaman grafiği.

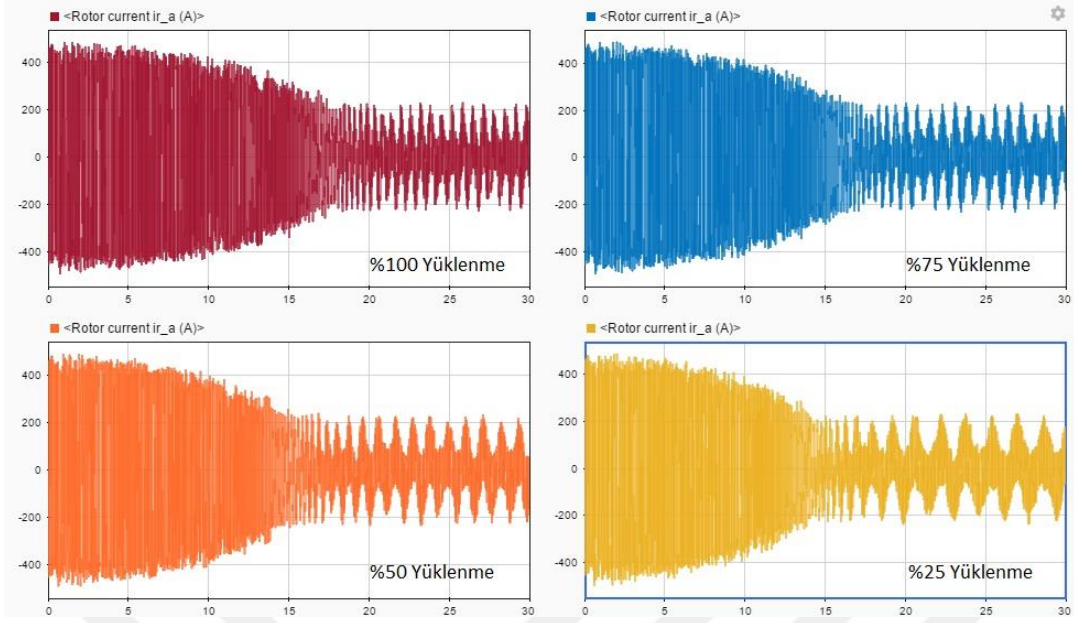


Şekil 5.19: Yakınlaştırılmış motor devir sayısı zaman grafiği.

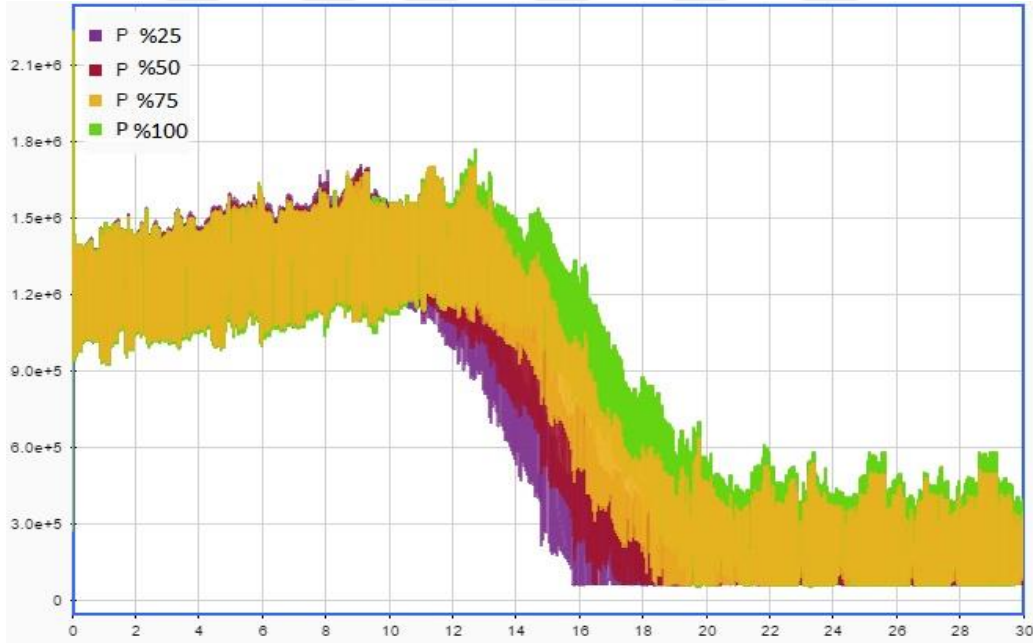
Şekil 5.20’de yüklenme durumlarına göre 3. ray gerilimleri, Şekil 5.21’de ise motor rotor akımları verilmiştir. Dört farklı yüklenme durumu ve rotor hızına göre yüklenme arasındaki fark görülmektedir. Şekil 5.22’de çekilen toplam aktif güç gösterilmiştir. İlk anda çekilen aktif güç hemen hemen aynı gibi olsa da ilerleyen zamanlarda tam yükte çekilen güç beklenildiği gibi diğer durumlardan daha fazladır ve çekilen güç yüklenme miktarının azalması ile azalmaktadır. %100 yüklenme durumunda 3. ray akımı tepe değeri yaklaşık 5550A seviyesindedir. %25 yüklenme durumunda ise 5490A seviyesindedir. Rotor hızına göre yüklenmenin, %25 yüklenmenin ve %100 yüklenmenin ilk kalkış anındaki tepe noktası birbirine çok yakın olsa da rotor akımının hızına göre yüklenme durumunda akım yaklaşık 19 saniye sonra kararlı seviyelerine düşmekte iken, %100 yüklenme durumunda bu süre yaklaşık 26 saniyedir.



Şekil 5.20: Farklı yüklenme durumlarına göre 3. ray gerilimleri.



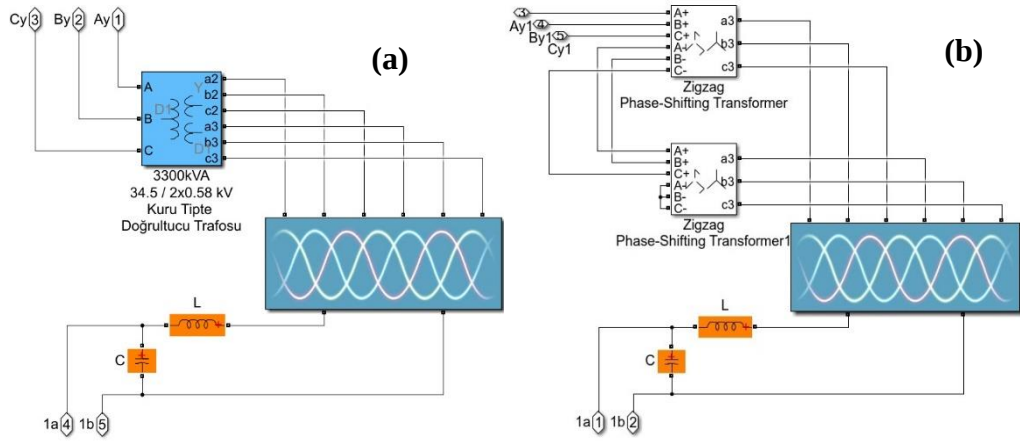
Şekil 5.21: Farklı yüklenme durumlarına göre motor rotor akımları.



Şekil 5.22: Farklı yüklenme durumlarına göre şebekeden çekilen toplam aktif güç.

5.1.4 Zigzag trafo kullanılması durumunda tren kalkış analizi

On iki darbeli diyot doğrultucu için doğrultucu trafosu olarak Şekil 5.23 (a)'daki gibi birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları üçgen ve yıldız olan trafolar yerine Şekil 5.23 (b)'deki gibi zigzag trafolar kullanılması durumunda kalkışta ne gibi değişiklikler olacağı gözlemlenmiştir. Sistem rotor hızına göre yüklenme durumunda incelenmiştir. On iki darbeli doğrultucu için kullanılan iki zigzag trafonun faz açıları 30 ve 60 derecedir, trafo güçleri ise 3.3 MVA'dır.

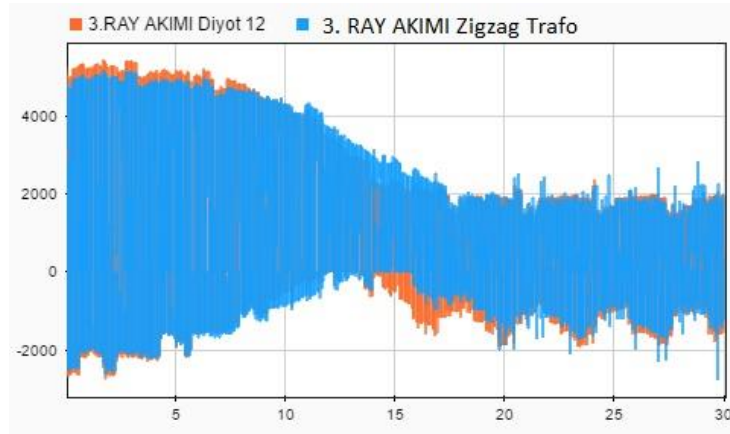


Şekil 5.23: (a) Birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları üçgen ve yıldız olan trafolar. (b) Zigzag trafolar.

Devir sayısı zaman grafiği Şekil 5.24’de verilmiştir. Zigzag trafolar kullanıldığında trenin yaklaşık 3-4 saniye kadar daha geç kararlı hal durumuna geçtiği görülmektedir. Şekil 5.25’de verilen 3. ray akımları incelendiğinde zigzag trafo kullanıldığında kararlı hale geçene kadar ray akımlarının biraz daha fazla olduğu görülmektedir.

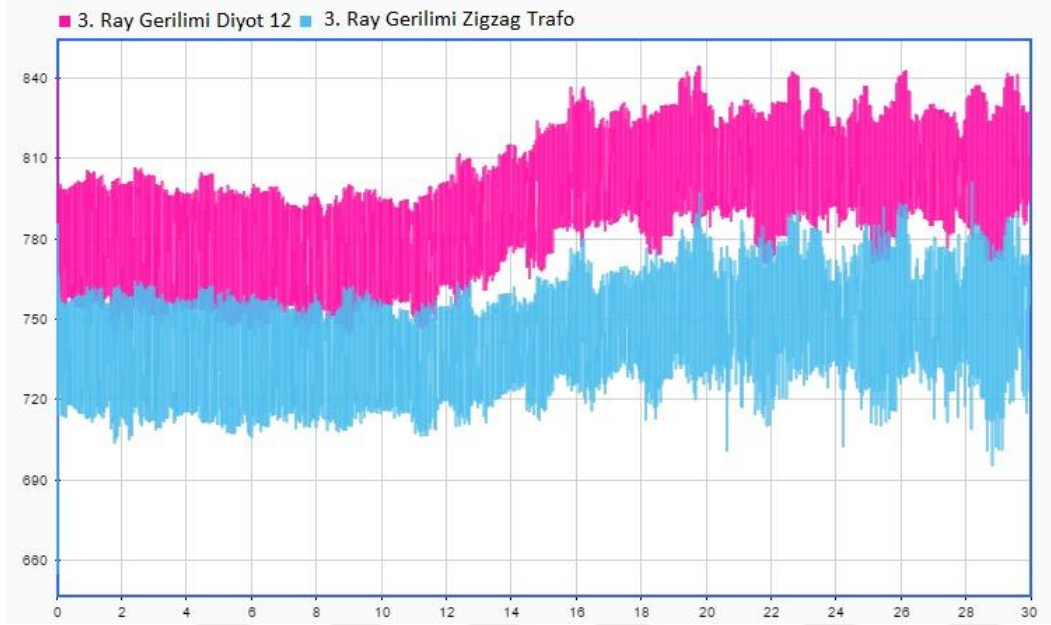


Şekil 5.24: Zigzag trafo kullanıldığında devir sayısı zaman grafiği.



Şekil 5.25: Zigzag trafo kullanıldığında 3. ray akımı.

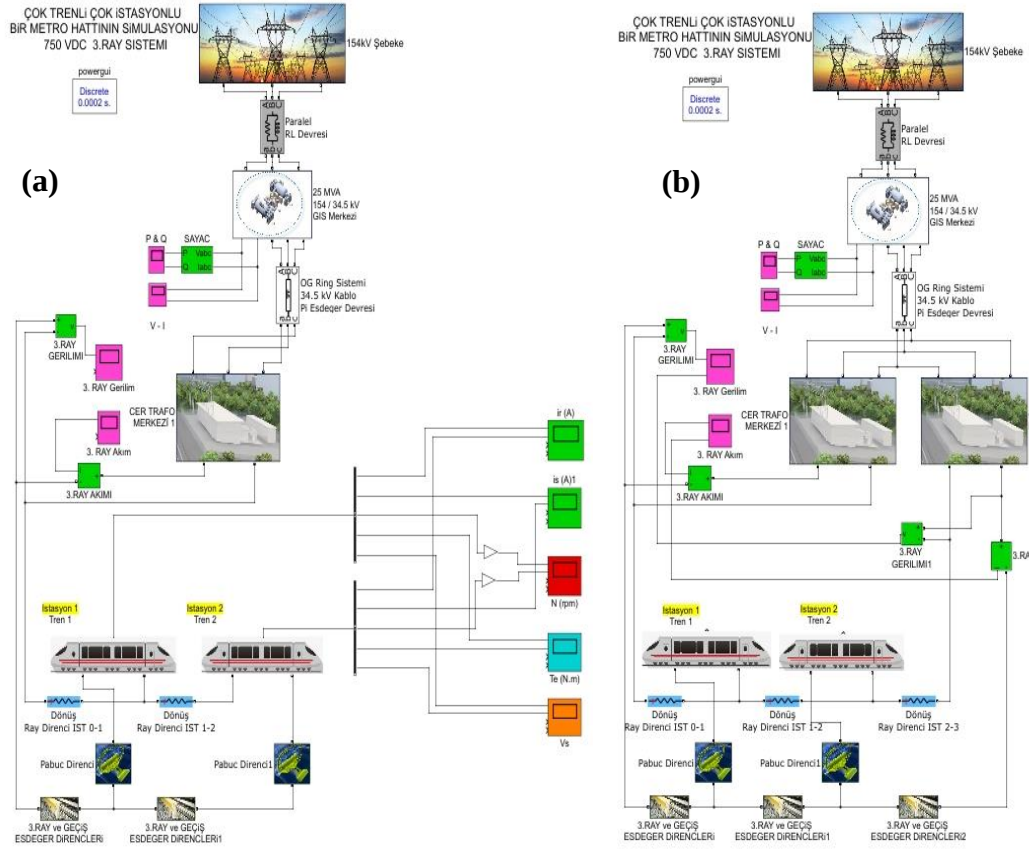
Modellerin 3. ray gerilimleri şekil 5.26’da verilmiştir. İlk durumda geçici en düşük gerilim 696V iken geçici en yüksek gerilim 838V ölçülmüştür; zigzag trafo kullanıldığında ise geçici en düşük gerilim 655V, geçici en yüksek gerilim ise 786V ölçülmüştür. Bu değerler kabul edilebilir aralıktadır. Zigzag trafo kullanıldığında 3. ray gerilimleri 750V DC bandına çok daha yakındır.



Şekil 5.26: Zigzag trafo kullanıldığında 3. ray gerilimi.

5.2 İki Trenli İki İstasyonlu Bir ve İki Trafo Merkezli Modellerin Analizi

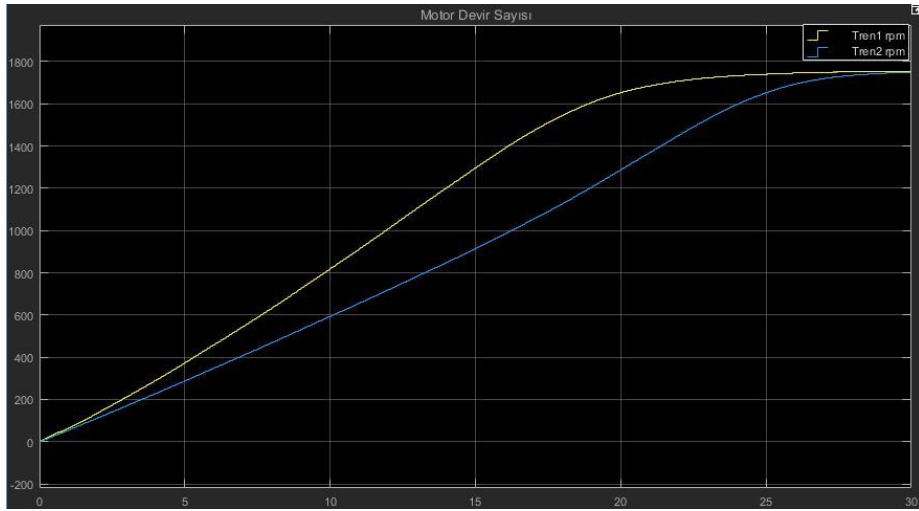
Bu modellerde 4 araçlı 2 tren kullanılmıştır ve sistemde 2 istasyon vardır. Trenler aralarında birer kilometre bulunan bu iki istasyondan aynı anda ve yirmişer saniye aralıklar ile kalkışlarını gerçekleştirmektedir. Mesafenin değişmesine bağlı olarak değişen ray ve geri dönüş dirençleri ihmal edilmiştir. 1 cer trafo merkezli ve 2 cer trafo merkezli modeller analiz edilmiştir. Aynı anda kalkış yapılan sistemler için model 30 saniye, harmonik analizi için ise 1.2 saniye; 20 saniye aralıkla kalkış yapılan sistemler için model 50 saniye çalıştırılmıştır. Aralarında kalkış aralığı bulunan trenler için Matlab Simulink modelinde bulunan basamak (step) fonksiyonu ve DGM sinyali için gecikme fonksiyonu kullanılmıştır. Bu değerler değiştirilerek kalkış zaman aralıkları rahatlıkla değiştirilebilir. Tren sayısı 2, istasyon sayısı 2, trafo merkezi sayısı 1 ve aynı anda kalkış yapacak olan sistemin tam modeli Şekil 27 (a)’da tren sayısı 2, istasyon sayısı 2, trafo merkezi sayısı 2 ve aynı anda kalkış yapacak olan sistemin tam modeli ise Şekil 27 (b)’de gösterilmiştir.



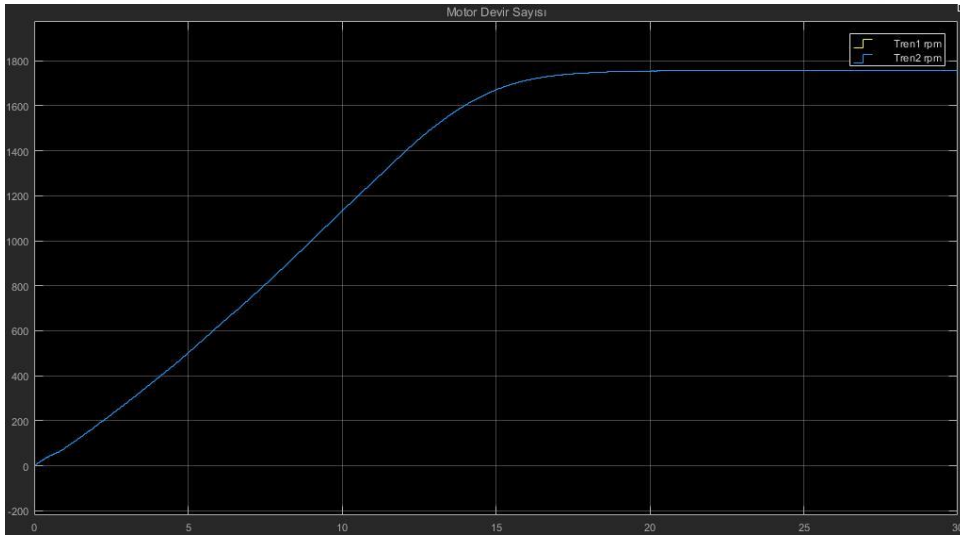
Şekil 5.27: Aynı anda kalkış yapacak olan 2 trenli 2 istasyonlu sistemin tam modeli:
(a) 1 cer trafo merkezli sistem. (b) 2 cer trafo merkezli sistem.

5.2.1 Tren kalkış analizi

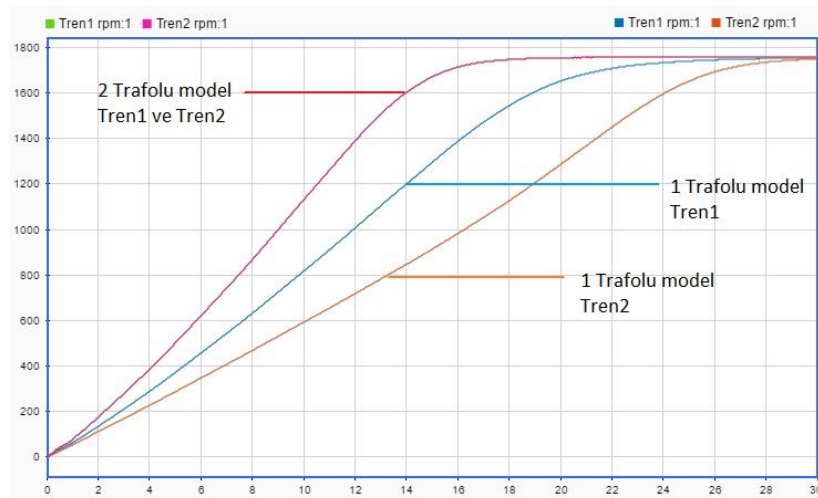
Bir adet cer trafosu kullanılan modelde, ikinci istasyonda bulunan trenin gerilim düşümünden dolayı birinci istasyonda bulunan trene göre daha farklı bir kalkış karakteristiğine sahip olması beklenmektedir. Şekil 5.28’de devir sayısı zaman grafiğinde görüldüğü gibi ikinci tren kararlı devir sayısına ulaşması birinci trene göre biraz daha gecikmelidir. Birinci istasyondaki tren 30 saniye sonra kararlı hal durumuna ulaşırken ikinci istasyondaki tren 30 saniye sonunda henüz kararlı hal durumuna ulaşamamıştır. Gerilim düşümünün daha da artması durumunda trenin kalkış için çok daha fazla zorlanması beklenmektedir. Eğer modelde, iki trafo, sistemi baştan ve sondan besleyecek şekilde kullanılırsa, Şekil 5.29’da devir sayısı zaman grafiğinde gösterildiği gibi iki tren de hemen hemen aynı karakteristik ile hiç zorlanmadan kalkışını yaklaşık 21 saniye sonra gerçekleştirecektir. Şekil 5.30’da devir sayısı zaman grafiği incelendiğinde ise 2 trafo merkezli modelde bulunan 2 trenin hemen hemen aynı karakteristiğe sahip olduğu görülmekte ve 1 trafo merkezli sistemde bulunan trenlere göre çok daha rahat ve hızlı kalkış gerçekleştirebildiği görülmektedir.



Şekil 5.28: 2 trenli 2 istasyonlu 1 trafo merkezli trenlerin devir sayısı grafiği.

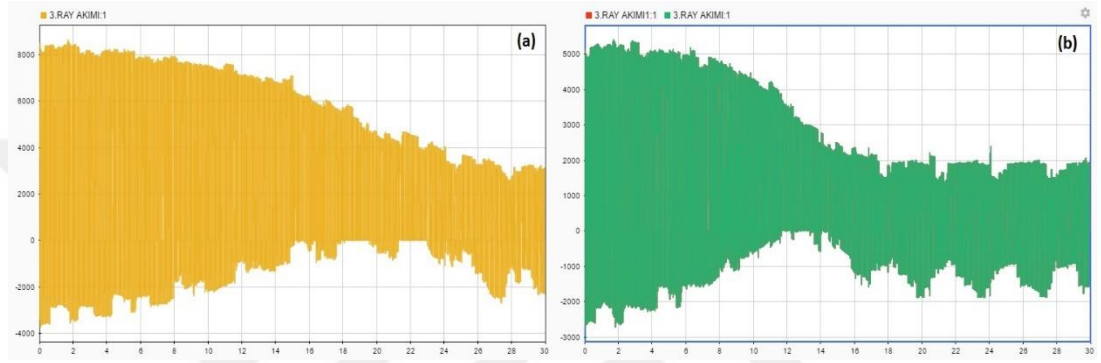


Şekil 5.29: 2 trenli 2 istasyonlu 2 trafo merkezli trenlerin devir sayısı grafiği.



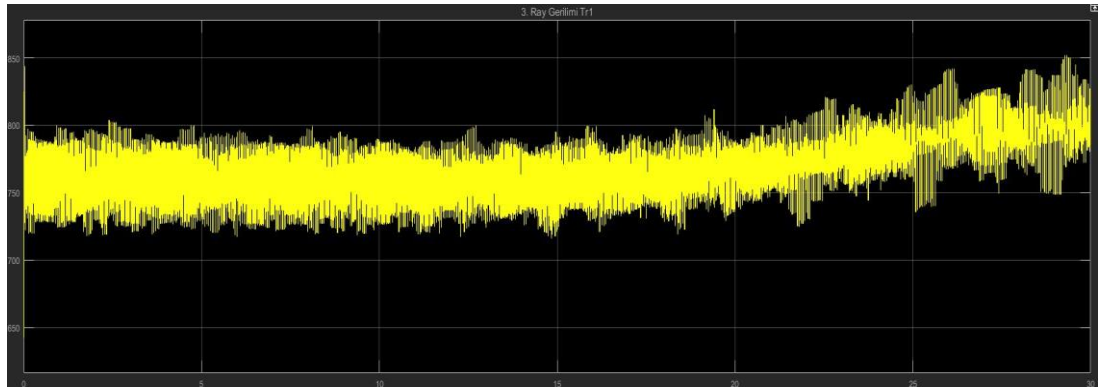
Şekil 5.30: 1 ve 2 trafo merkezli sistemlerde bulunan trenlerin devir sayısı zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

Bir trafo merkezli modelde 3. ray akımı Şekil 5.31 (a)'da görüldüğü gibi yaklaşık olarak maksimum 8654A seviyelerine çıkmakta iken, Şekil 5.31 (b)'deki gibi iki trafo merkezli modelde 3. ray akımı iki trafo arasında dağıtılır ve trafo başına yaklaşık olarak maksimum 5420A seviyelerine çıkar. Bu durumda her bir trafo daha az yüklenir. Trafolar birbirinin yedeği olarak çalışabileceğinden bir trafoda meydana gelecek bir arıza durumunda diğer trafo arızalı trafonun görevini üstüne alabilmektedir. İki trafolu sistemde her bir trafo için ray akımı grafikleri hemen hemen aynı olduğundan grafikte birbirleri ile örtüşmektedir.

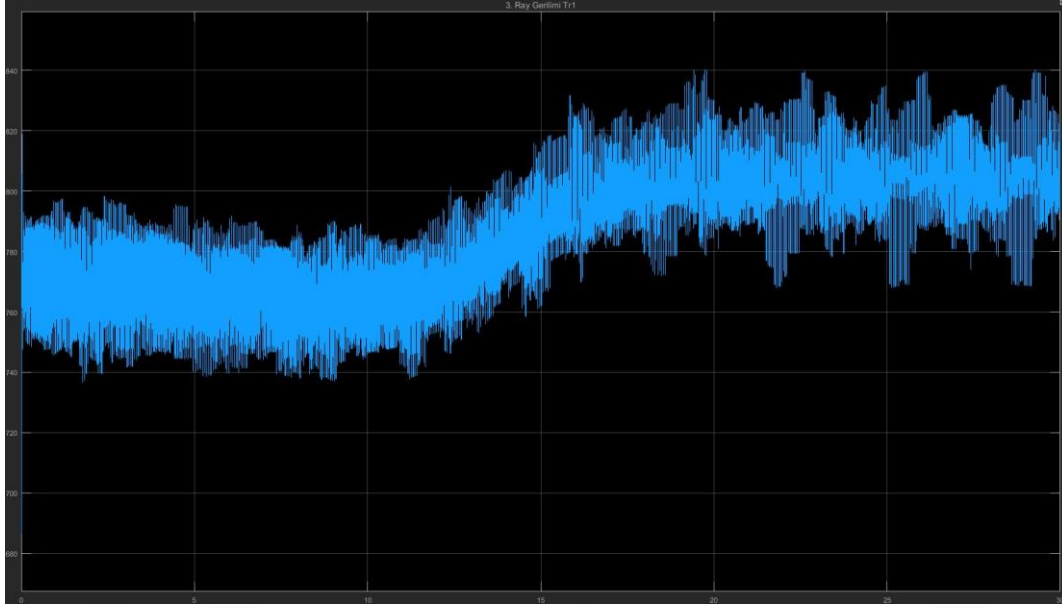


Şekil 5.31: 3. ray akımı: (a) 1 trafolu merkezli model. (b) 2 trafo merkezli model.

Bir trafo merkezli modelde 3. ray gerilimi Şekil 5.32'deki gibi 642V seviyelerine geçici olarak inmiş, hemen ardından kalkış sırasında yaklaşık 740V-780V seviyelerinde seyretmiş ve kalkış gerçekleştikten sonra yaklaşık 780V-820V bandına oturmuştur, bu değerler kabul edilebilir aralıktadır. İki trafo merkezli modelde ise 3. ray gerilimi Şekil 5.33'deki gösterildiği gibi yaklaşık 686V seviyelerine anlık olarak inmiş, kalkış esnasında 750V-790V arasında seyretmiş ve kalkış gerçekleştikten sonra 780V-820V bandına oturmuştur.

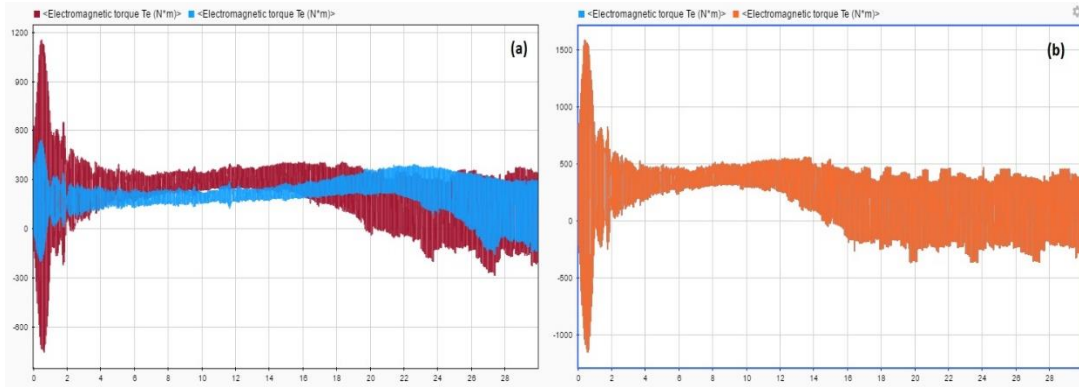


Şekil 5.32: 1 trafo merkezli modelde 3. ray gerilimi.



Şekil 5.33: 2 trafo merkezli modelde 3. ray gerilimleri.

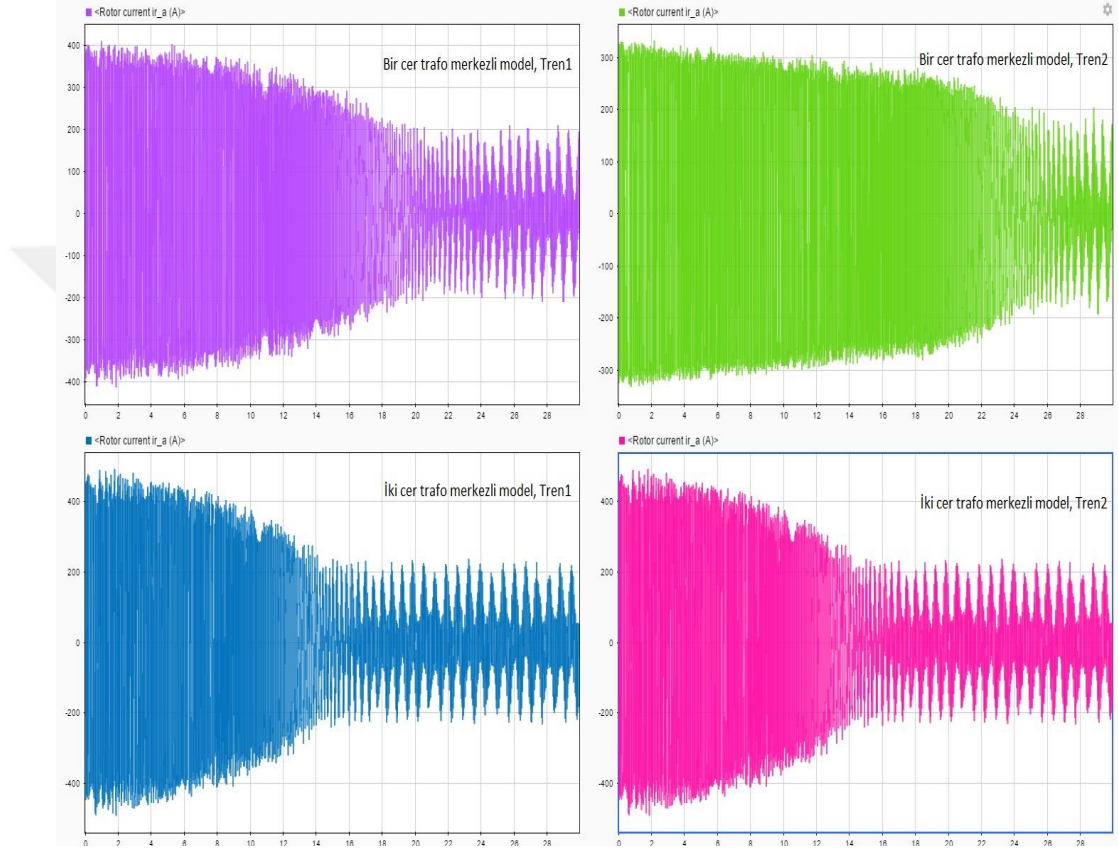
Elektromanyetik tork zaman grafikleri incelendiğinde Şekil 5.34 (a)'da 1 cer trafo merkezli modelde iki trenin yaptığı büyük osilasyonlardan sonra kararlı hale nasıl oturduğu; Şekil 5.34 (b)'de ise 2 cer trafo merkezli sistemde iki trenin yaptığı hemen hemen birbirinin aynısı olan büyük osilasyonlardan sonra kararlı hale nasıl oturduğu görülmektedir.



Şekil 5.34: Elektromanyetik tork zaman grafikleri: (a) 1 cer trafo merkezli model. (b) 2 cer trafo merkezli model.

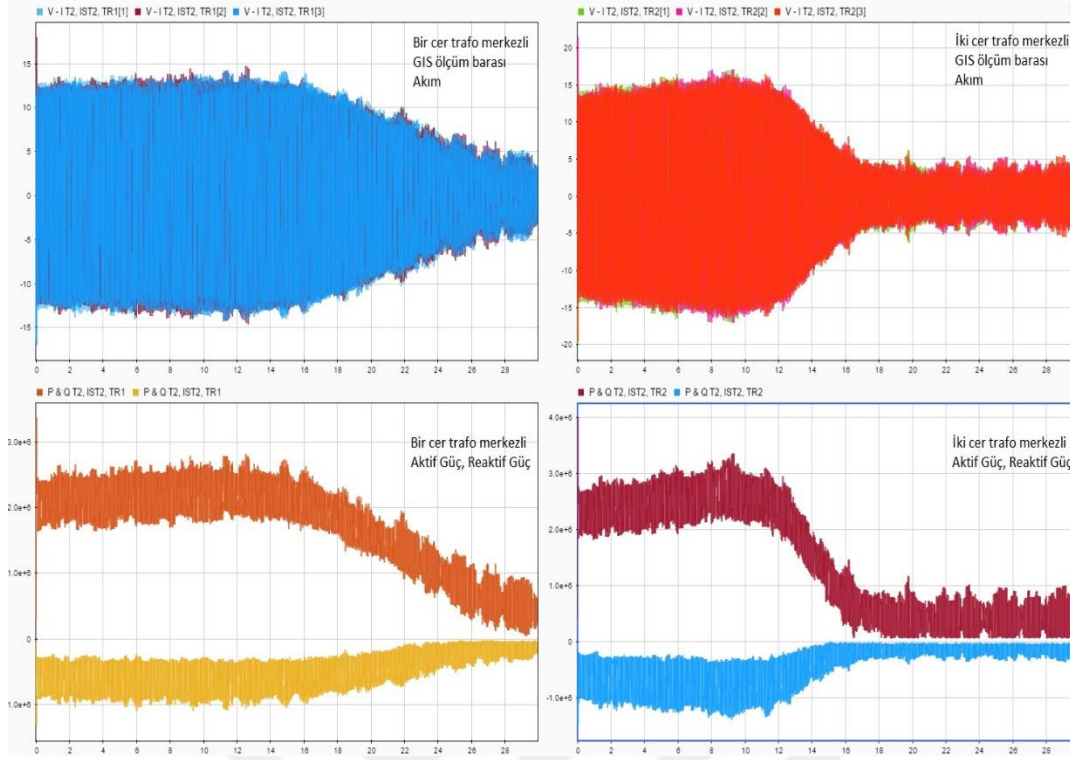
İki sistemde bulunan trenlerin motorlarının rotor akımları analiz edildiğinde Şekil 5.35'teki gibi grafikler elde edilir. Bir cer trafo merkezli modelde bulunan 1. istasyondaki trenin rotor akımı başlangıçta yaklaşık 400A seviyelerine ulaşır ve kendisi için kararlı hal durumu olan 200A tepe değeri seviyelerine yaklaşık 30 saniye sonra ulaşır ancak 2. istasyondaki trenin motor rotorları başlangıçta 320 A çekebilirken, kararlı hal durumuna yaklaşık 30 saniyeden geç ulaşabilir ve bu durumda

rotor akımı tepe değeri 190A seviyelerindedir. İki cer trafo merkezli modelde ise iki istasyondaki trenlerin rotoru başlangıçta maksimum 470A civarında akım çekmekte ve yaklaşık 20 saniye sonra maksimum değeri 200A seviyesine düşmektedir. Bir cer trafo merkezli modelde bulunan iki trenin de rotor akımları diğer modeldeki trenlere göre oldukça geç kararlı hal durumuna ulaşmakta dolayısıyla bir cer trafo merkezli modelde bulunan trenler kararlı hızlarına da oldukça geç ulaşmaktadır.



Şekil 5.35: 1 ve 2 cer trafo merkezli modellerde trenlerin motor rotor akımları.

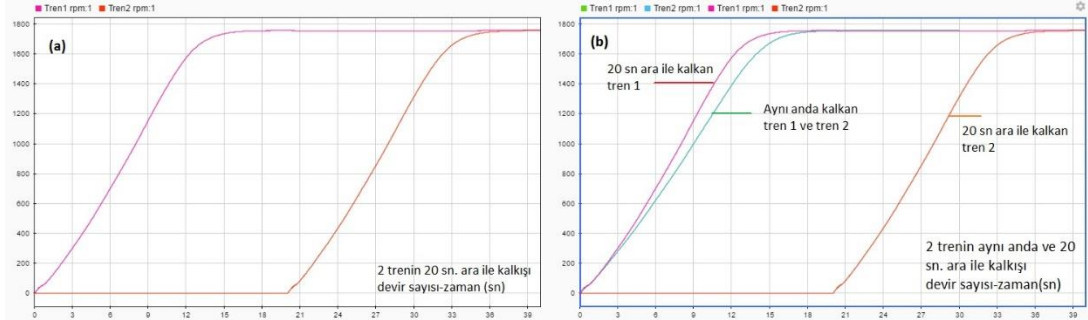
Bir cer trafo merkezli ve iki cer trafo merkezli modellerde GIS ölçüm barasından alınan akım değerleri ve P (aktif) güç ve Q (reaktif) güç değerleri Şekil 5.36’da gösterilmiştir. Bir cer trafo merkezli modelde başlangıçta anlık olarak 18A değerine ulaşan akım daha sonra 20 saniye boyunca 13A seviyelerinde kalmış ve trenlerin kalkışı tamamlandıktan sonra 3A-6A bandına yerleşmiştir. İki cer trafo merkezli sistemde ise başlangıç anında 21A seviyelerinde bir akım değeri görülse de 13 saniye boyunca 13A-15A bandında seyretmiş ve geri kalan kısmında 3A-4A seviyelerinde akım değeri ölçülmüştür. Bir cer trafo merkezli sistemde aktif güç yaklaşık 30 saniye sonra kararlı hal durumuna gelirken, iki cer trafo merkezli sistemde bu süre yaklaşık 20 saniyedir.



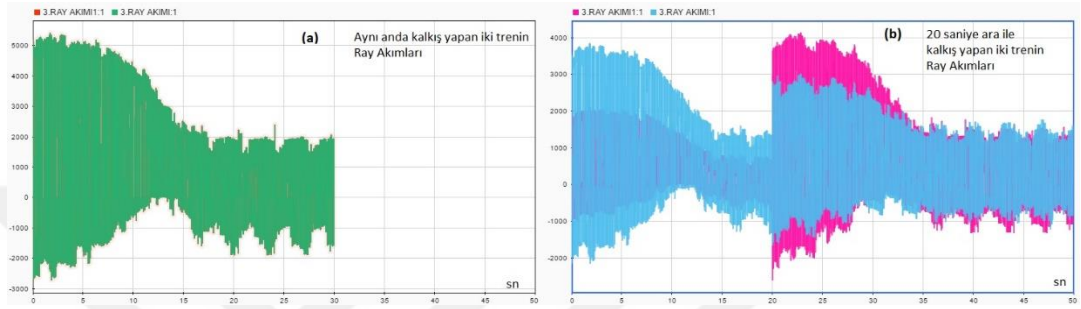
Şekil 5.36: 1 ve 2 cer trafo merkezli modellerde aktif ve reaktif güç.

5.2.2 Trenlerin 20 saniye aralık ile kalkışlarının analizi

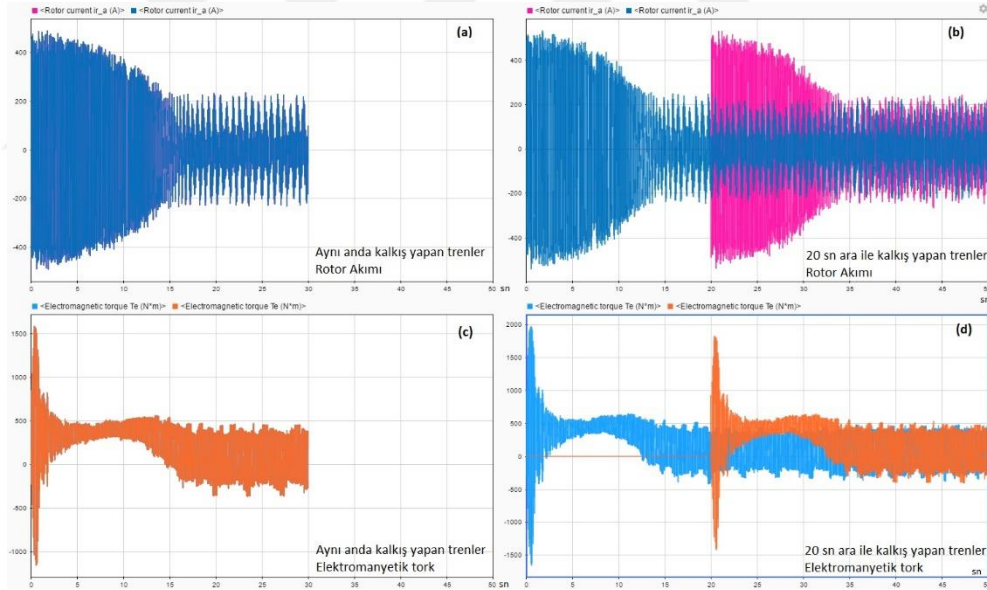
İki istasyonda bulunan iki trenin yirmi saniye ara ile ve aynı anda kalkış analizinde üçüncü rayı beslemek için iki cer trafo merkezli model kullanıldığında trenlere ait motorların devir sayısı zaman grafiği Şekil 5.37’de gösterildiği gibidir. Yirmi saniye ara ile kalkış durumunda trenlerin kalkış karakteristikleri birbirlerine çok benzemektedir. Trenler aynı anda kalktığına da kalkış karakterleri çok benzemektedir, ancak trenler 20 saniye ara ile kalktığına kalkış yapan trenlerin ilki aynı anda kalkış yapan trenlere göre biraz daha rahat ve hızlı kalkış yapmaktadır çünkü trenlerden biri henüz kalkışa geçmediğinden bir tren iki trafo tarafından daha rahat beslenmektedir. Şekil 5.38’de gösterilen ray akımları incelendiğinde aynı anda kalkış yapıldığı durumda iki trafonun her birinden başlangıçta yaklaşık maksimum 5400A akım yani toplamda yaklaşık maksimum 10800A çekilmekte; yirmi saniye aralık ile kalkış yapıldığında ise ilk tren kalkış yaptığına birinci trafo merkezinden başlangıçta yaklaşık maksimum 3850A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 2100A çekilirken, ikinci tren kalkış yaptığına birinci trafo merkezinden, yaklaşık maksimum 3000A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 4100A çekilmektedir. Rotor akımlarına ve elektromanyetik tork zaman grafiklerine bakıldığında ise Şekil 5.39’da gibi trenlerin benzer özellikler taşıdıkları görülmektedir.



Şekil 5.37: Trenlere ait motorların devir sayısı zaman grafiği: (a) 20 saniye ara ile kalkış yapan 2 tren. (b) Aynı anda ve 20 saniye ara ile kalkış yapan trenler.



Şekil 5.38: Ray akımları: (a) Aynı anda kalkış yapan 2 tren. (b) 20 saniye ara ile kalkış yapan 2 tren.

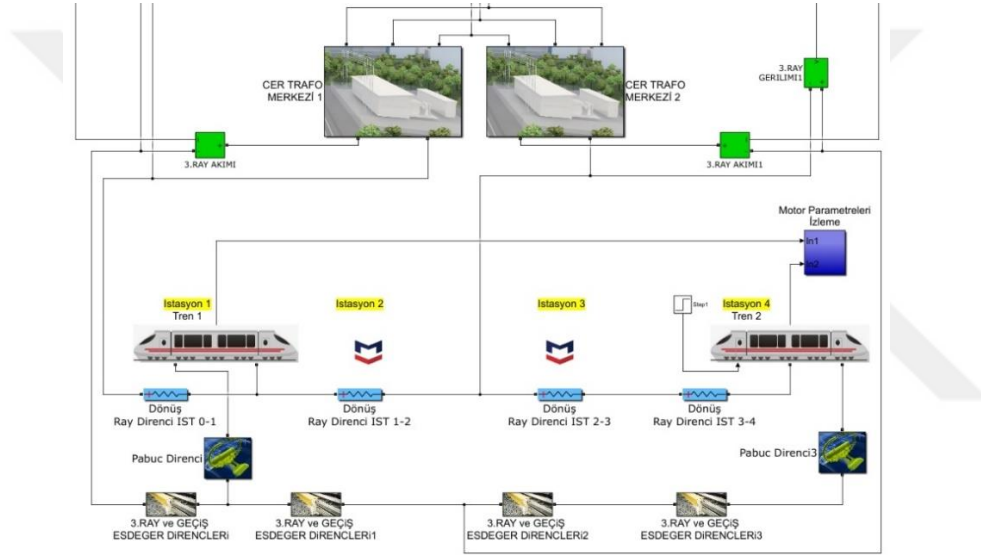


Şekil 5.39: Kalkış rotor akımları ve elektromanyetik tork grafikleri: (a) Aynı andaki rotor akımı (b) 20 sn. ara ile rotor akımı. (c) Aynı andaki T_e . (d) 20 sn. ara ile T_e .

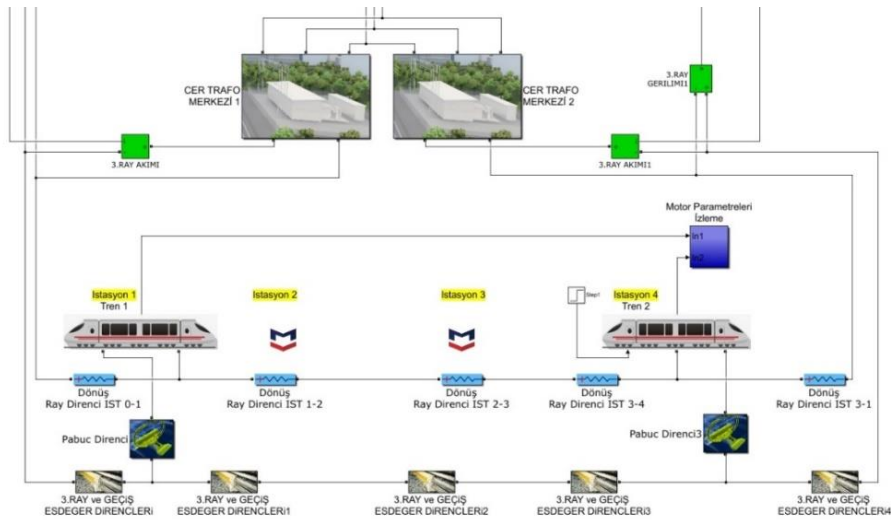
5.3 İki Trenli Dört İstasyonlu İki Trafo Merkezli Modellerin Analizi

Bu modelde 4 araçlı 2 tren kullanılmıştır ve sistemde 4 istasyon vardır. Trenler aralarında birer kilometre bulunan bu dört istasyonun birincisinden ve dördüncüsünden aynı anda kalkışlarını gerçekleştirmektedir. Mesafenin değişmesine bağlı olarak değişen ray ve geri dönüş dirençleri ihmal edilmiştir. Analiz edilen

modellerden birinde, Şekil 5.40'daki gibi cer trafo merkezlerinden biri sistemi ilk istasyondan beslerken, ikinci cer trafo merkezi sistemi ikinci istasyondan beslemektedir. 1. trenin 1. istasyonda olduğu varsayılmış ve 1. cer trafo merkezi ile arasında 1 km'lik eşdeğer dirençler, 2. cer trafo merkezi ile de 1 km'lik eşdeğer dirençler modellenmiştir. 2. tren ise 4. istasyondadır ve 2. cer trafo merkezi ile arasında 2 km'lik eşdeğer dirençler, 1. cer trafo merkezi ile arasında ise 4 km'lik eşdeğer dirençler modellenmiştir. Şekil 5.41'de gösterilen diğer modelde ise cer trafo merkezlerinden biri sistemi yine ilk istasyondan beslerken diğer cer trafo merkezi sistemi son istasyondan beslemektedir. Modeller kalkış analizi için 40 saniye, harmonik analizi için ise 1.2 saniye çalıştırılmıştır.



Şekil 5.40: 2 trenli 4 istasyonlu modelin baştan ve ortadan beslenmesi.

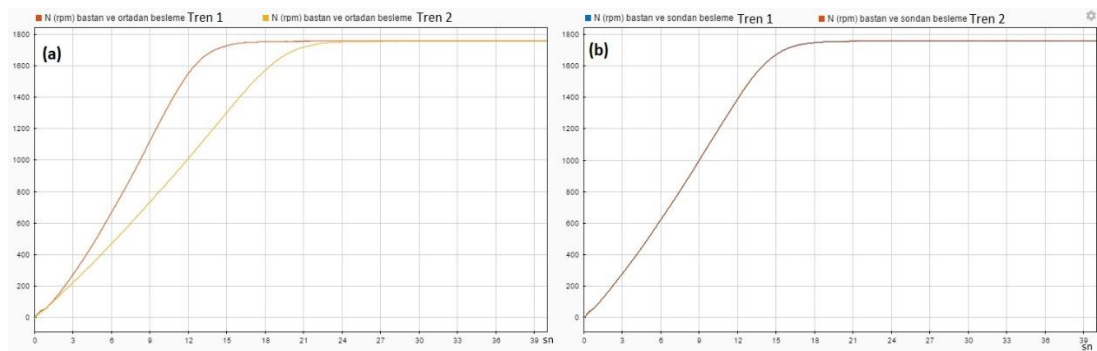


Şekil 5.41: 2 trenli 4 istasyonlu modelin baştan ve sondan beslenmesi.

5.3.1 Tren kalkış analizi

İlk istasyondan ve ikinci istasyondan beslenen model, baştan ve ortadan beslenen model olarak; ilk istasyondan ve dördüncü istasyondan beslenen model ise baştan ve sondan beslenen model olarak adlandırılmıştır.

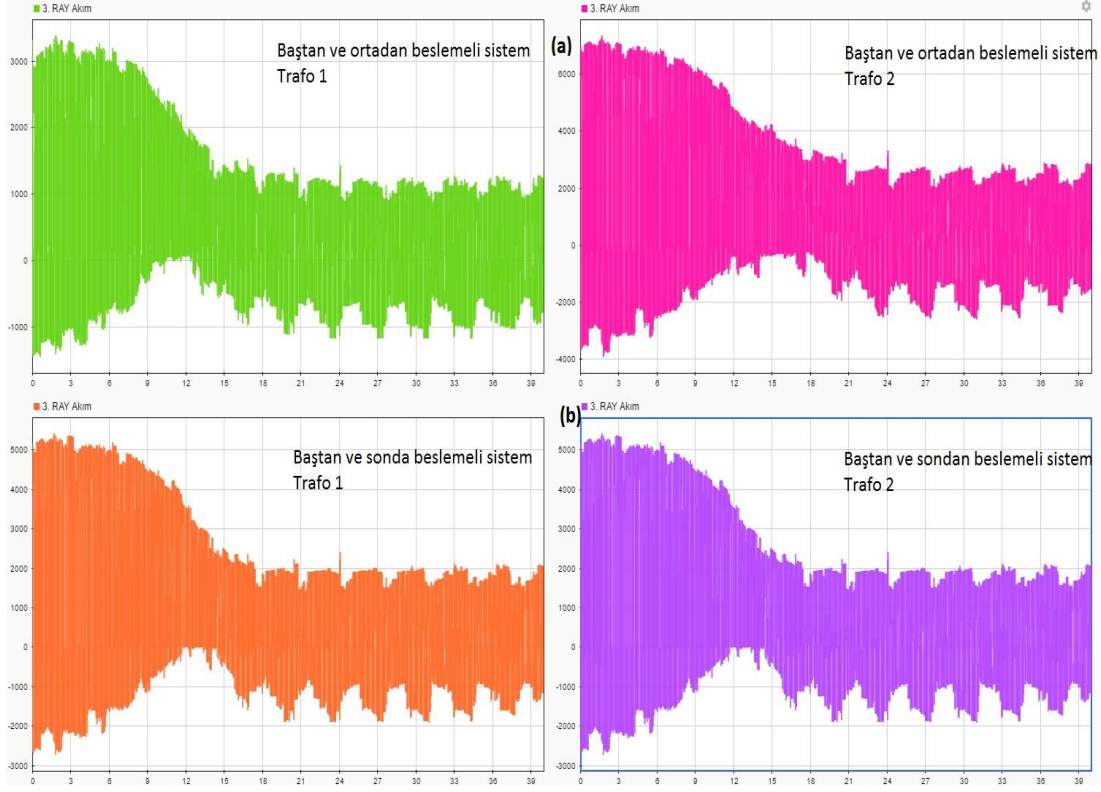
Baştan ve ortadan beslenen modelde bulunan iki trenin kalkış karakteristikleri ile baştan ve sondan beslenen modelde bulunan trenlerin kalkış karakteristikleri arasında farklılıklar olması beklenmektedir. Ancak bu farklılıklar trenlerin hangi istasyondan hareket edeceğine göre değişiklikler göstermektedir. Örneğin dört istasyonlu bir modelde, 3. rayın baştan ve sondan beslendiği ve iki trenden ilkinin birinci istasyondan hareket ettiği durumda, ikinci tren dördüncü istasyondan veya üçüncü istasyondan hareket ettiğinde sahip olduğu kalkış karakteristiklerinde farklılıklar göstermesi beklenir. Bu modelde sadece trenlerin birinci ve dördüncü istasyondan hareket ettiği durumdaki davranışları analiz edilmiştir. Ortadan besleme yapan cer trafo merkezi ise sistemin tam ortasında bulunmamakta, birinci tren ile arasında 1 km'yi temsil eden eşdeğer dirençler, ikinci tren ile arasında ise 2 km'yi temsil eden eşdeğer dirençler bulunmaktadır. Şekil 5.42'de görüldüğü gibi baştan ve ortadan beslemeli sistemde birinci tren yaklaşık 20 saniyede kararlı hıza ulaşırken, ikinci tren 27 saniyede kararlı hızına ulaşmaktadır. Baştan ve sondan beslemeli sistemde ise iki tren hemen hemen aynı zamanda ve diğer modelde bulunan birinci trene göre biraz daha geç, ikinci trene göre ise daha erken olmak üzere kararlı hızına ulaşmaktadır.



Şekil 5.42: 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin devir sayısı grafikleri. (a) Baştan ve ortadan besleme. (b) Baştan ve sondan besleme.

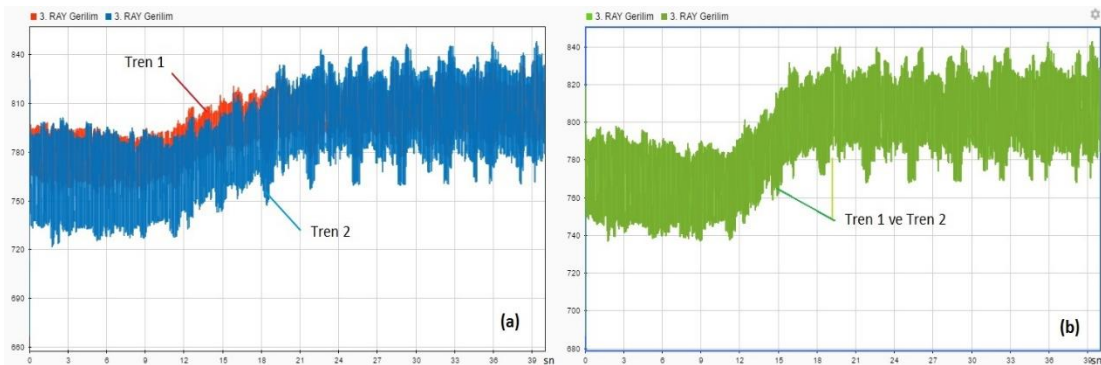
Şekil 5.43'te verilen 3. ray akım grafikleri incelendiğinde ise baştan ve ortadan beslemeli modelde birinci trafo merkezinden çekilen 3. ray akımı başlangıçta anlık olarak yaklaşık 3300A maksimum değerine ulaşırken ikinci trafo merkezinden çekilen akım anlık olarak yaklaşık 7200A değerine ulaşmaktadır. Toplamda ise başlangıçta

anlık olarak çekilen maksimum değer 10500A seviyelerindedir. Baştan ve sondan beslemeli modelde ise iki trafonun her biri yaklaşık olarak anlık 5250A maksimum değerine ulaşmıştır ki bu da toplamda yaklaşık olarak 10500A civarındadır.



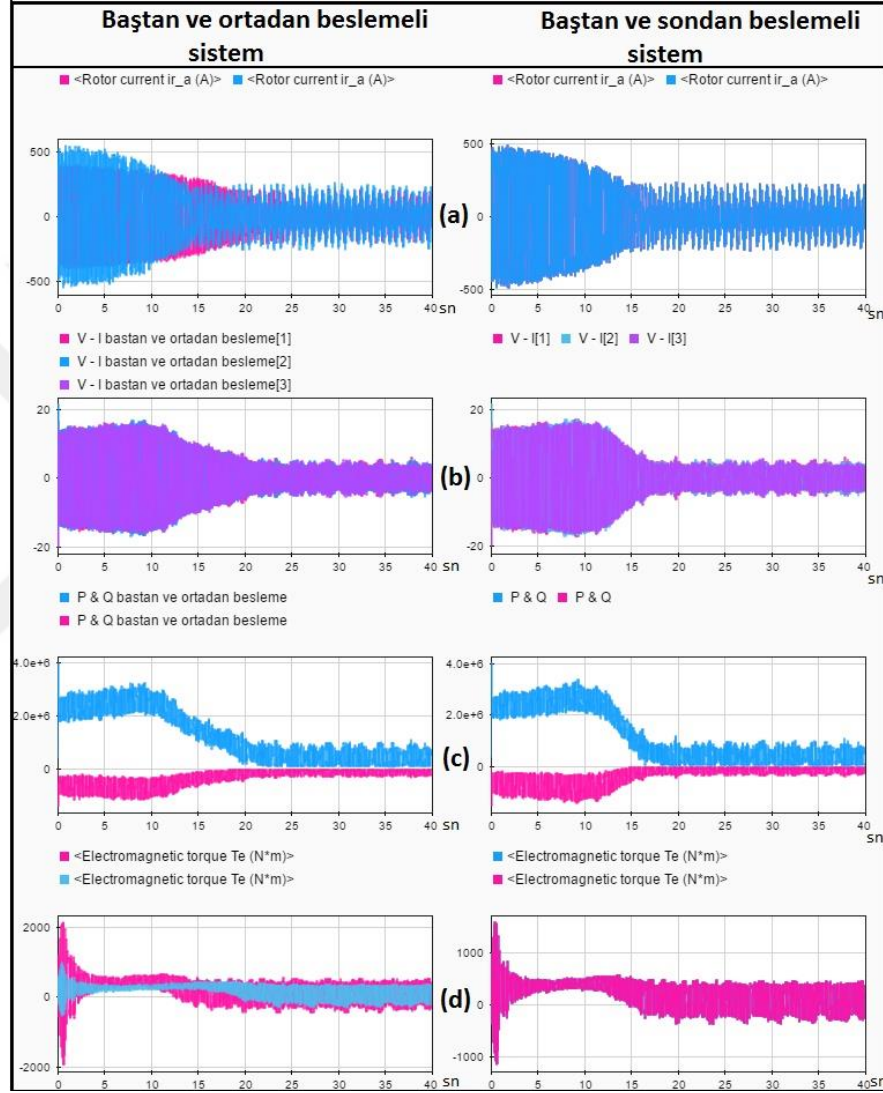
Şekil 5.43: 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin 3. ray akım grafikleri: (a) Baştan ve ortadan beslemeli. (b) Baştan ve sondan beslemeli.

Şekil 5.44'te üçüncü ray gerilimleri incelendiğinde ise baştan ve ortadan beslemeli modelde en düşük geçici gerilim yaklaşık 666V en yüksek geçici gerilim ise yaklaşık 848V; baştan ve sondan beslemeli modelde ise en düşük geçici gerilim yaklaşık 686V, en yüksek geçici gerilim yaklaşık 843V değerindedir ve kabul edilebilir aralıktadır.



Şekil 5.44: 2 trenli 4 istasyonlu 2 trafo merkezli modelin 3. ray gerilim grafikleri: (a) Baştan ve ortadan beslemeli. (b) Baştan ve sondan beslemeli.

İki sistem için trenlerde bulunan motorların rotor akımları, GIS merkezinde bulunan ölçüm barasından ölçülen akımlar, aktif reaktif güçler ve elektromanyetik tork zaman grafiği Şekil 5.44'teki verilmiştir. Baştan ve ortadan beslemeli modelde, dördüncü istasyondaki trenin, bir başka deyişle ikinci trenin başlangıçta çektiği rotor akımının daha az olduğu, daha geç kararlı hal durumuna geçtiği ve elektromanyetik torkunun daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.45: Baştan-ortadan ve baştan-sondan beslenen sistemlere ait grafikler: (a) Rotor akımları. (b) Şebekeden çektiği akımlar. (c) P ve Q. (d) T_e .

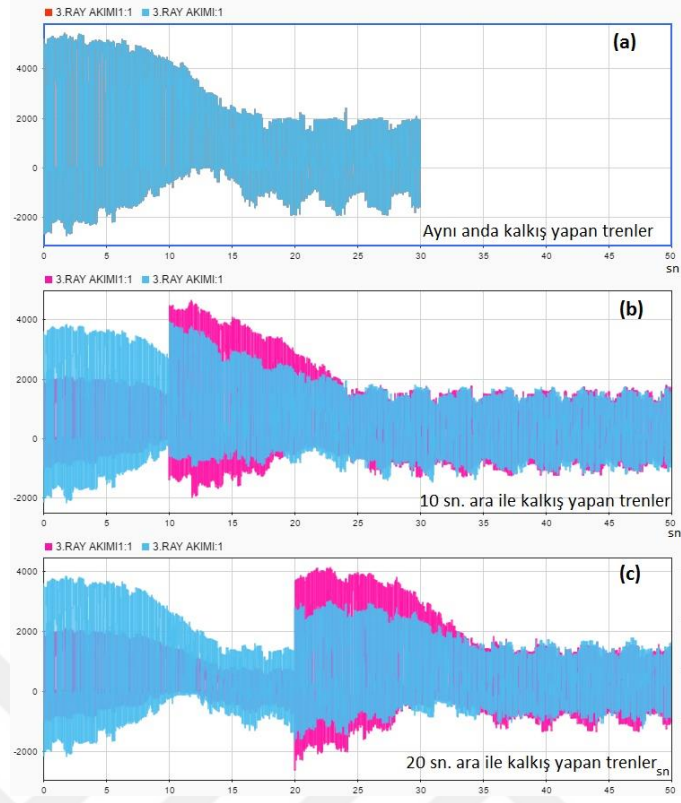
5.3.2 Trenlerin aynı anda ve 10 ve 20 saniye aralıklar ile kalkışlarının analizi

Dört istasyonlu sistemde bulunan iki trenin, aynı anda, on saniye ve yirmi saniye ara ile kalkış analizinde, iki cer trafo merkezinin üçüncü rayı baştan ve sondan beslediği model kullanıldığında trenlere ait motorların devir sayısı zaman grafiği Şekil 5.46'da gösterildiği gibidir. Yirmi saniye ara ile kalkış durumunda trenlerden biri kalkışını

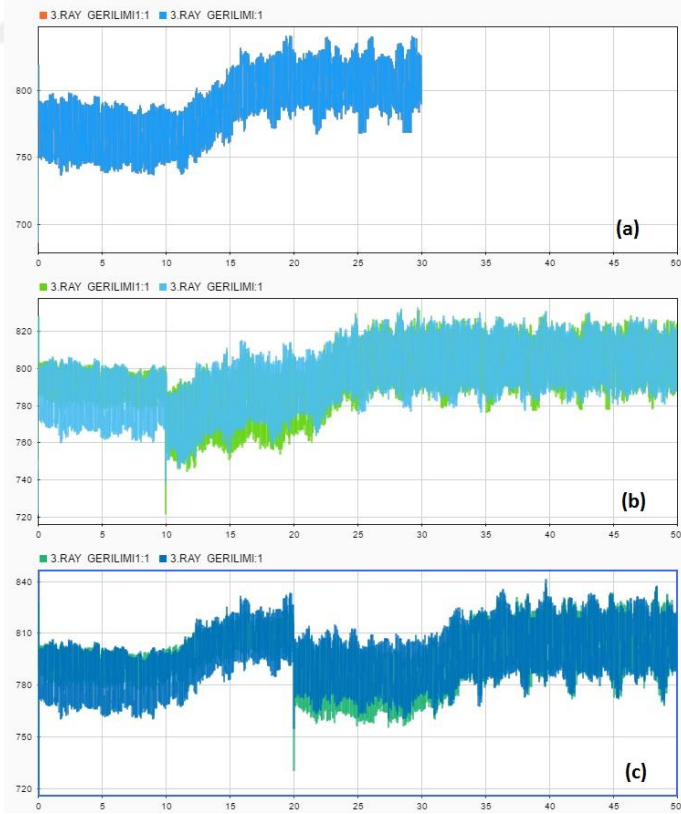
gerçekleştirdikten sonra diğer tren kalkışı için harekete geçmektedir. On saniye ara ile kalkış durumunda ise trenlerden biri henüz kararlı hal durumuna ulaşmadan diğer tren kalkış hareketine başlamaktadır. Aynı anda kalkış yapan trenlerin kalkış karakteristikleri beklenildiği gibi birbirlerine çok benzemektedir. Aynı anda kalkış yapan trenlerin devir sayısı, on saniye ara ile ve yirmi saniye ara ile kalkış yapan trenlerin, ilk kalkışı gerçekleştireninden daha geç kararlı hal durumuna geçmektedir. On saniye ve yirmi saniye ara ile kalkış yapılan modellerde ilk kalkışı yapan trenler hemen hemen birbirleri ile aynı anda kararlı hal durumuna ulaşır. Şekil 5.47’de gösterilen ray akımları incelendiğinde, aynı anda kalkış yapıldığı durumda iki trafonun her birinden başlangıçta yaklaşık maksimum 5400A akım yani toplamda yaklaşık maksimum 10800A çekilmekte; on saniye aralık ile kalkış yapıldığında ise ilk tren kalkış yaptığı anda birinci trafo merkezinden başlangıçta yaklaşık maksimum 3850A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 2100A çekilirken, ikinci tren kalkış yaptığı anda birinci trafo merkezinden yaklaşık maksimum 3930A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 4660A akım çekilmektedir. Yirmi saniye aralık ile kalkış yapıldığında ise ilk tren kalkış yaptığı anda birinci trafo merkezinden başlangıçta yaklaşık maksimum 4250A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 1300A çekilirken, ikinci tren kalkış yaptığı anda birinci trafo merkezinden yaklaşık maksimum 2000A, ikinci trafo merkezinden ise yaklaşık 4300A akım çekilmektedir. Şekil 5.48’de gösterilen ray gerilimleri incelendiğinde, aynı anda kalkış yapan trenlerin modelinde geçici en düşük 686V, geçici en yüksek 840V; on saniye aralık ile kalkış yapan trenlerin modelinde geçici en düşük 722V geçici en yüksek 833V; yirmi saniye aralık ile kalkış yapan trenlerin modelinde geçici en düşük 721V geçici en yüksek 841V değerleri görülmüştür ki bu değerler kabul edilebilir aralıktadır.



Şekil 5.46: Aynı anda, 10 saniye aralık ile ve 20 saniye aralık ile kalkış yapan trenlerin motorlarının devir sayısı zaman grafiği.



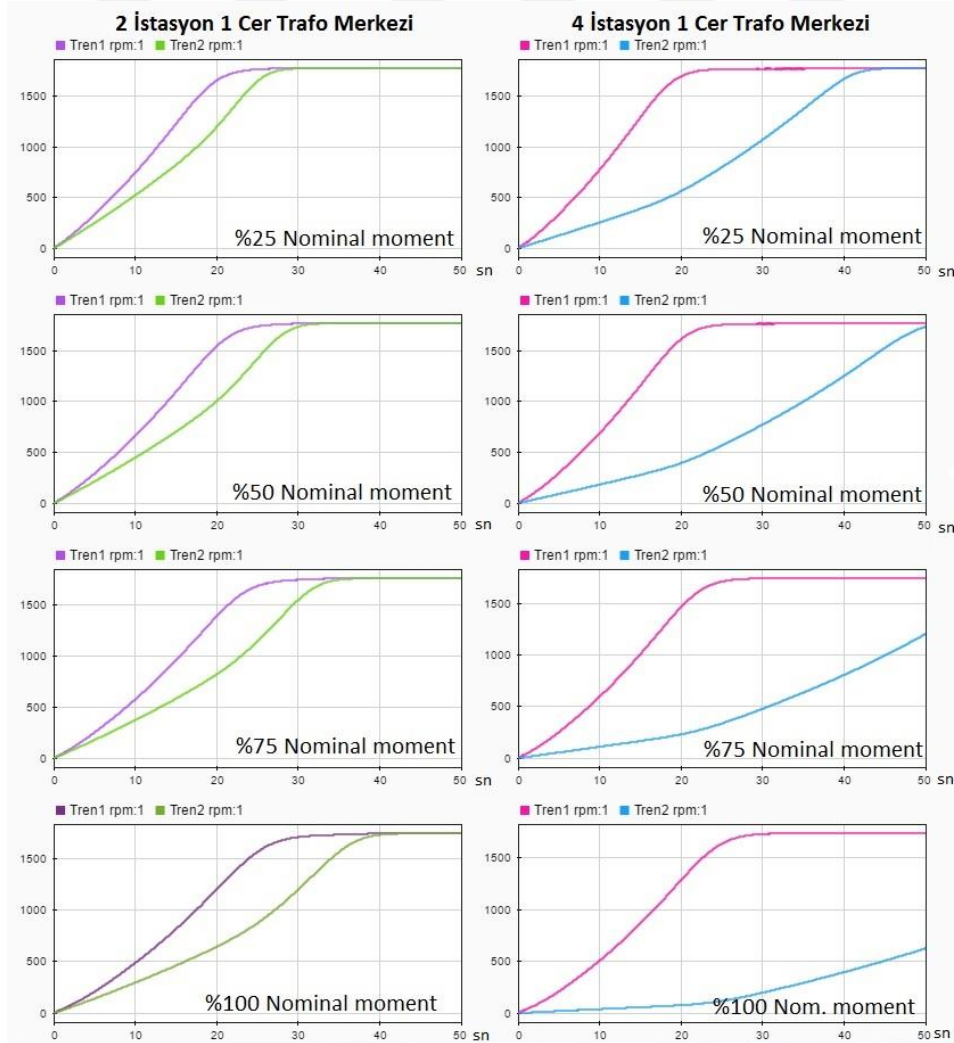
Şekil 5.47: Trenlerin motorlarına ait ray akımları: (a) Aynı anda kalkış. (b) 10 saniye aralık ile kalkış. (c) 20 saniye aralık ile kalkış.



Şekil 5.48: Trenlerin motorlarına ait ray gerilimleri: (a) Aynı anda kalkış. (b) 10 saniye aralık ile kalkış. (c) 20 saniye aralık ile kalkış.

5.3.3 Bir trafo merkezi kullanıldığı durumun analizi

Önceki bölümlerde iki istasyonlu, iki trenli, iki cer trafo merkezli model ile dört istasyonlu, iki trenli, iki cer trafo merkezli model analizleri yapılmıştı. İki istasyonlu modelde trenler birinci ve ikinci istasyondan hareket etmekte ve her istasyon arasında 1 km mesafe bulunmaktadır. Dört istasyonlu modelde ise trenlerden biri birinci istasyondan diğeri ise dördüncü istasyondan hareket etmekte ve her istasyon arasında 1 km mesafe bulunmaktadır. İki istasyonlu ve dört istasyonlu, iki trenli, baştan ve sondan beslemeli bu modellerde trafo merkezlerinden birinin olmaması durumunda sistemlerin farklı yük durumlarında nasıl tepki vereceği bu bölümde analiz edilmiştir. Şekil 5.49’da bir cer trafo merkezi bulunan, iki trenli, iki istasyonlu ve dört istasyonlu sistemlerde farklı tren motoru yüklerinde trenlerin zamana göre devir sayısı değişimi analiz edilmiştir.

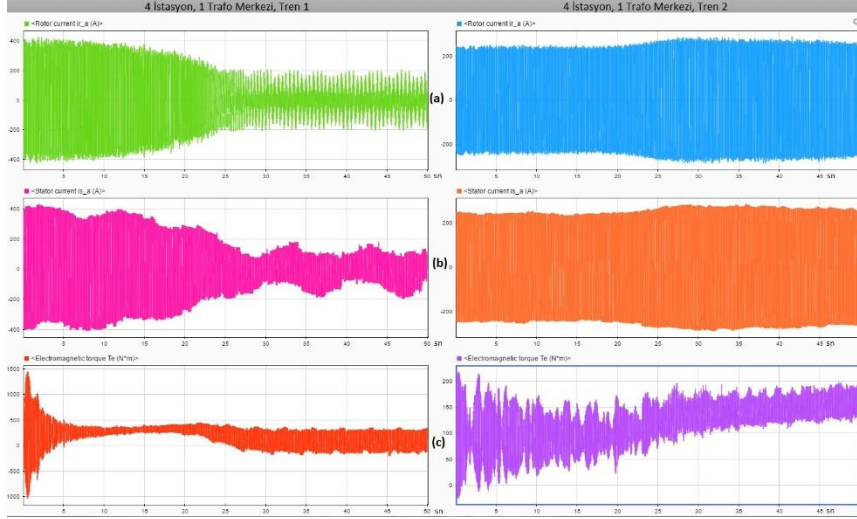


Şekil 5.49: 2 istasyonlu ve 4 istasyonlu sistemlerde ve farklı motor yüklerinde trenlerin zamana göre devir sayısı grafikleri.

İki istasyonlu modelde %25 yüklenme durumunda trenlerin kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1782 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 30 saniye sonra ikinci tren ise yaklaşık 32 saniye sonra ulaşmaktadır. %50 yüklenme durumunda ise kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1773 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 34 saniye sonra, ikinci tren ise 36 saniye sonra ulaşmaktadır. %75 yüklenme durumunda ise kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1763 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 39 saniye sonra, ikinci tren ise yaklaşık 42 saniye sonra ulaşmaktadır. %100 yüklenme durumunda ise kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1753 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 43 saniye sonra, ikinci tren ise yaklaşık 50 saniye sonra ulaşmaktadır. Trenlerin motorlarının yüklenme miktarları arttıkça, kararlı hal durumundaki devir sayıları azalmakta ve kararlı hal durumuna daha geç ulaşmaktadır.

Dört istasyonlu modelde iki tren arasında iki istasyon daha olduğundan dördüncü istasyon ile baştan beslemeyi yapan cer trafo merkezi arasında 4 km mesafe vardır. Bu sebeple ikinci istasyondaki trenin 3. ray direnci, birinci istasyondaki trene göre 4 kat olacaktır ve gerilim düşümü iki istasyonlu sisteme göre ikinci tren için çok daha fazla hissedilecektir. %25 yüklenme durumunda trenlerin kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1780 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 26 saniye sonra, ikinci tren ise yaklaşık 45 saniye sonra ulaşmaktadır. %50 yüklenme durumunda trenlerin kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1765 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 30 saniye sonra ulaşmaktadır. İkinci tren ise 50 saniye boyunca bu hıza ulaşamamıştır. %75 yüklenme durumunda trenlerin kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1750 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 33 saniye sonra ulaşmaktadır. İkinci tren ise 50 saniye boyunca bu hıza ulaşamamıştır. %100 yüklenme durumunda trenlerin kararlı hal durumundaki hızı yaklaşık olarak 1740 rpm'dir ve birinci tren bu hıza yaklaşık 35 saniye sonra ulaşmaktadır. İkinci tren ise 50 saniye boyunca bu hıza ulaşamamıştır. Bu modelde de trenlerin motorlarının yüklenme miktarları arttıkça, kararlı hal durumundaki devir sayıları azalmakta ve kararlı hal durumuna daha geç ulaşmakta, hatta çoğu durumda trenler 50 saniye boyunca kalkışlarını gerçekleştirememektedir. 1 cer trafo merkezi aralarında birer km bulunan 4 istasyonlu bir sistem için oldukça yetersiz kalmaktadır.

Dört istasyonlu model tam yüklü iken birinci istasyondaki trenin ve dördüncü istasyondaki trenin rotor akımları, stator akımları ve elektromanyetik tork zaman grafiği Şekil 5.50'deki gibidir.

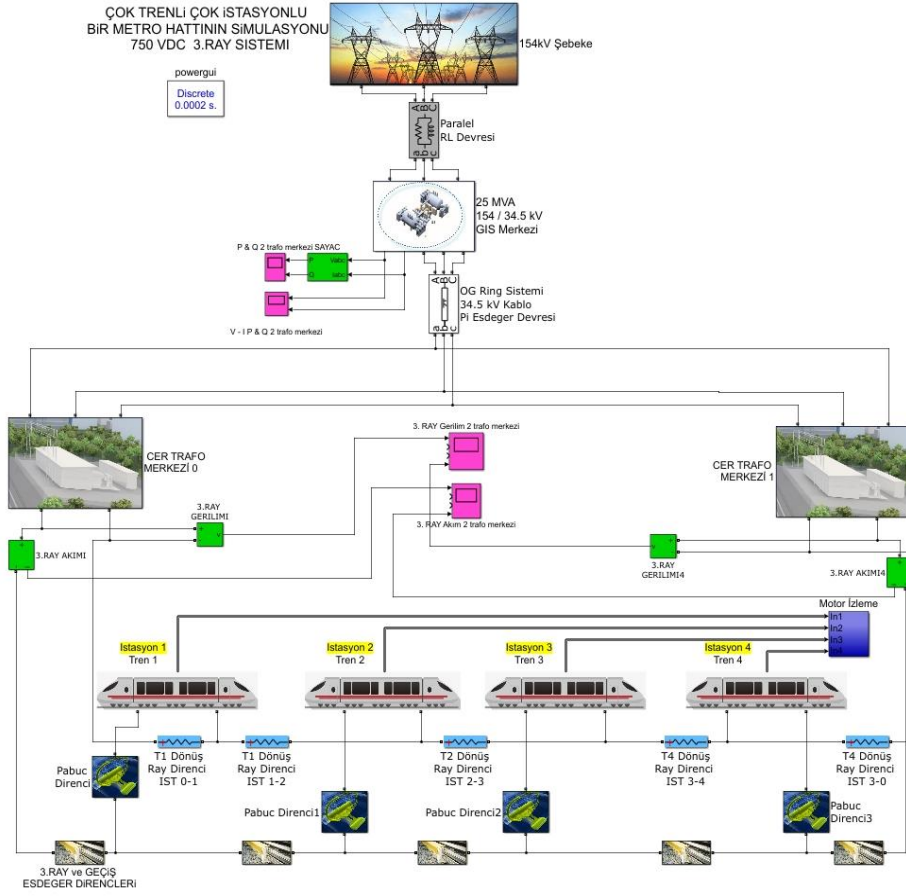


Şekil 5.50: 1 Trafo merkezli 4 istasyonlu modeldeki motorlar tam yüklükten 1. ve 4. istasyondaki trenlere ait grafikler: (a) Rotor akımları. (b) Stator akımları. (c) T_e .

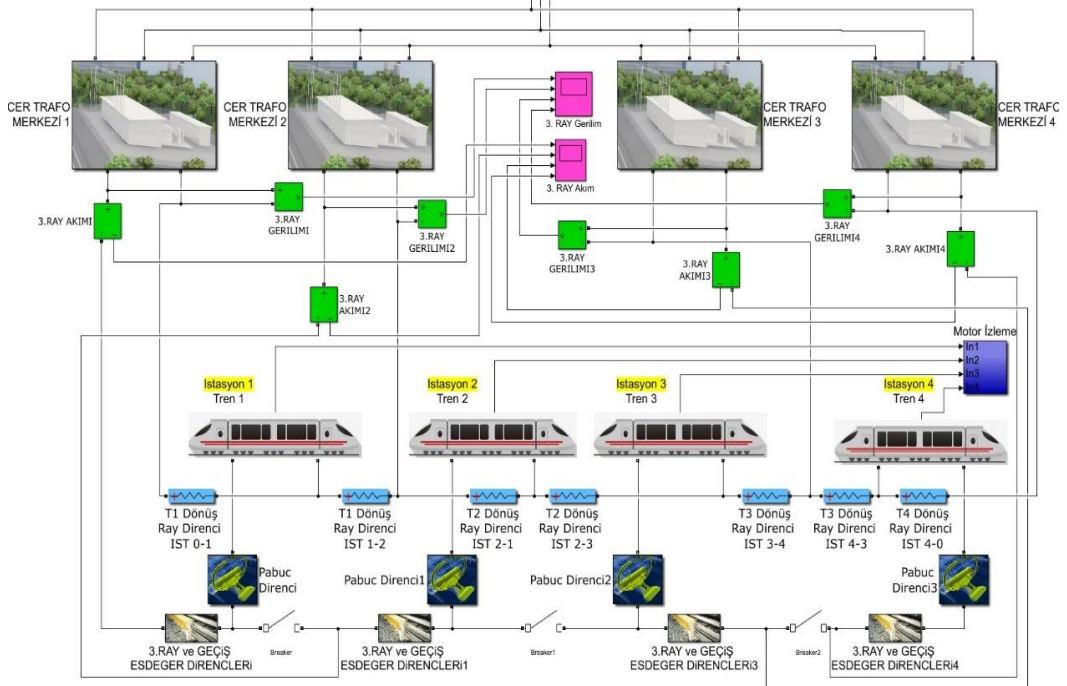
Birinci istasyondaki trende bulunan motor rotorlarının çektiği akım değeri maksimum yaklaşık 400A olmasına rağmen dördüncü istasyondaki trende bulunan motorlarının rotoru ancak maksimum 250A çekebilmektedir. Stator akımları ve elektromanyetik tork zaman grafiği de incelendiğinde benzer şekilde dördüncü tren motorları için değerler yetersiz kalmaktadır ve motor 50 saniye boyunca kararlı hal durumuna geçememektedir.

5.4 Dört Trenli Dört İstasyonlu Modellerin Analizi

Bu modelde 4 araçlı 4 tren kullanılmıştır ve sistemde 4 istasyon vardır. Trenler aralarında birer kilometre bulunan bu dört istasyonun birincisinden, ikincisinden, üçüncüsünden ve dördüncüsünden aynı anda kalkışlarını gerçekleştirmektedir. Mesafenin değişmesine bağlı olarak değişen ray ve geri dönüş dirençleri ihmal edilmiştir. İki cer trafo merkezli model ve dört cer trafo merkezli model analiz edilmiştir. Modellerden birinde Şekil 5.51'deki gibi iki cer trafo merkezi sistemi baştan ve sondan beslerken, diğer modelde Şekil 5.52'deki gibi sistem her istasyondan bir cer trafo merkezi ile beslenmektedir. Günümüzde metro sistemlerinde, aralarında 1-2 km mesafe bulunan istasyonların her birinden beslenen bu modeldeki yapı yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem gerilim düşümünden dolayı trenlerin çalışmasını engelleyecek durumun ortadan kaldırılması hem de arıza durumlarında birbirlerinin yedeği olabilecek cer trafo merkezlerine sahip bir sistem hedeflenmektedir. Modeller kalkış analizi için 30 saniye, harmonik analizi için ise 1.2 saniye çalıştırılmıştır.



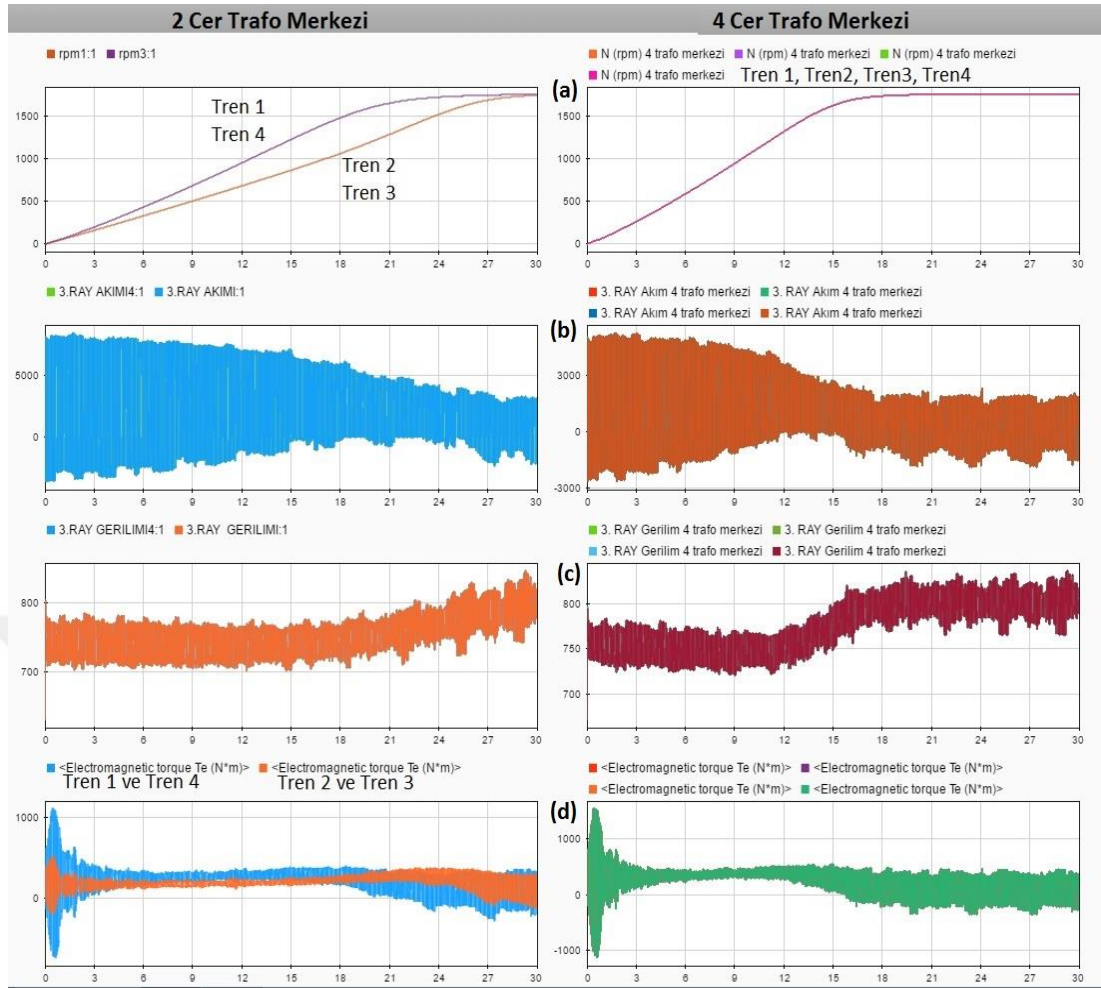
Şekil 5.51: 2 cer trafo merkezi 4 trenli 4 istasyonlu sistemi baştan ve sondan beslerken.



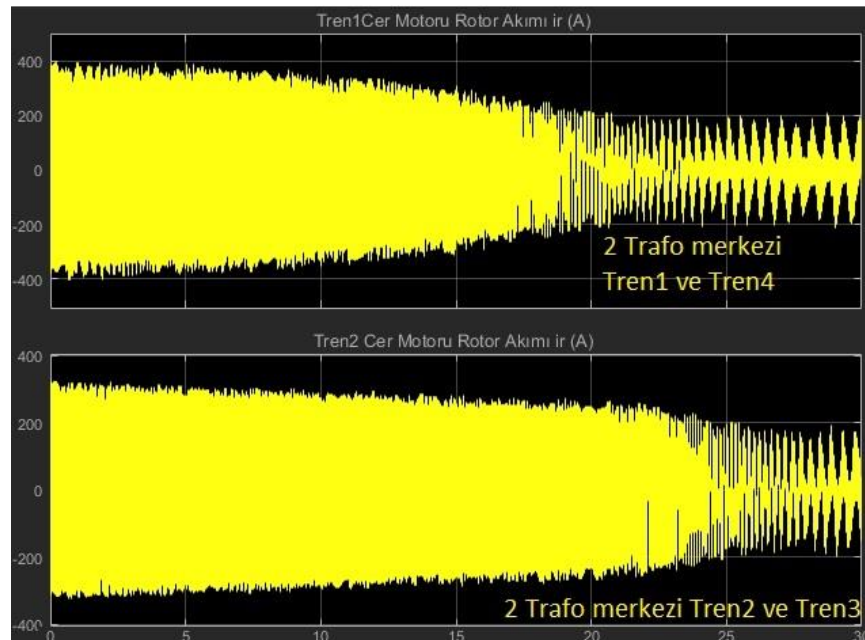
Şekil 5.52: 4 cer trafo merkezi 4 trenli 4 istasyonlu sistemi her bir istasyondan beslerken.

5.4.1 Tren kalkış analizi

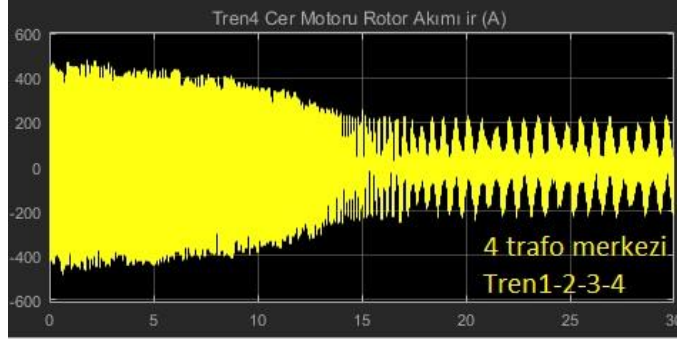
Dört istasyonlu, bir cer trafo merkezli ve iki trenli sistemde bile ikinci tren için yeterli güç sağlanamadığından dolayı bu dört istasyonlu ve dört trenli sistemde, bir cer trafo merkezli model kullanılmamış, sadece iki trafo merkezli ve dört trafo merkezli modeller karşılaştırılmıştır. Şekil 5.53'te verilen veriler incelendiğinde 2 cer trafo merkezli modeldeki 4 trenden ilk istasyonda ve son istasyonda bulunan iki tren 1750 rpm devir sayısına yaklaşık 30 saniyede ulaşırken, ikinci istasyonda ve üçüncü istasyonda bulunan diğer iki tren 30 saniye sonunda 1743 rpm devir sayısına ulaşır ancak hala kararlı hal durumuna ulaşamamışlardır. Dört cer trafo merkezli modelde ise tüm trenler yaklaşık 25 saniye sonra kararlı hal durumuna geçer. İki cer trafo merkezli modelde her bir trafo başlangıçta maksimum yaklaşık 8400A akım çekmektedir. Başlangıçta toplam maksimum yaklaşık 16800A akım çekilmektedir. Trafo merkezlerinden çekilen toplam akım yaklaşık 30 saniye sonra toplam 4000-6000A seviyelerine oturmaktadır. Dört cer trafolu merkezli modelde ise trafo merkezi başına başlangıçta yaklaşık 5300A çekilmekte ve yaklaşık 25 saniye sonra trafo merkezi başına yaklaşık 1500A-2000A akım çekecek şekilde kararlı hal durumuna geçmektedir. Üçüncü ray gerilimleri ise iki trafo merkezli modelde en düşük yaklaşık 630V seviyesine düşmekte, en yüksek yaklaşık 846V seviyesine çıkmaktadır ve kabul edilebilir aralıktadır. Dört trafo merkezli modelde ise en düşük yaklaşık 670V seviyesine düşmekte, en yüksek yaklaşık 836V seviyesine çıkmaktadır ve kabul edilebilir aralıktadır. Her iki modelin de elektromanyetik tork grafiği kabul edilebilir durumdadır. 2 cer trafo merkezli modelde elektromanyetik tork birinci ve dördüncü tren için yaklaşık 1100 Newton metre (N.m) seviyelerinden başlarken ikinci ve üçüncü tren için yaklaşık olarak 520 N.m seviyelerinden başlamaktadır. 4 cer trafo merkezli modelde ise elektromanyetik tork dört tren için de 1540 N.m seviyelerinden başlamaktadır. Şekil 5.54'te 2 cer trafo merkezli modelin rotor akımları verilmiştir ve Şekil 5.55'te 4 cer trafo merkezli modelin rotor akımları verilmiştir. 2 cer trafo merkezli modelde 1. tren ve 4. tren aynı karakteristiğe sahipken, 2. tren ve 3. tren de birbirleri ile aynı karakteristiğe sahiptir. 4 cer trafo merkezli modelde ise dört tren de aynı karakteristiğe sahiptir. 2 cer trafo merkezli modelde 1. ve 4. tren rotorları başlangıçta yaklaşık 400A tepe değerinde akım çekerken, 2. ve 3. tren rotorları ise başlangıçta yaklaşık 320A tepe değerinde akım çekmektedir. 4 cer trafo merkezli modelde ise dört trende başlangıçta yaklaşık 480A tepe değerinde akım çekmektedir.



. Şekil 5.53: 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 2 ve 4 cer trafo merkezli modelin grafikleri: (a) Devir sayısı. (b) Ray akım. (c) Ray gerilim. (d) Te.



Şekil 5.54: 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 2 cer trafo merkezli modelin rotor akımları.



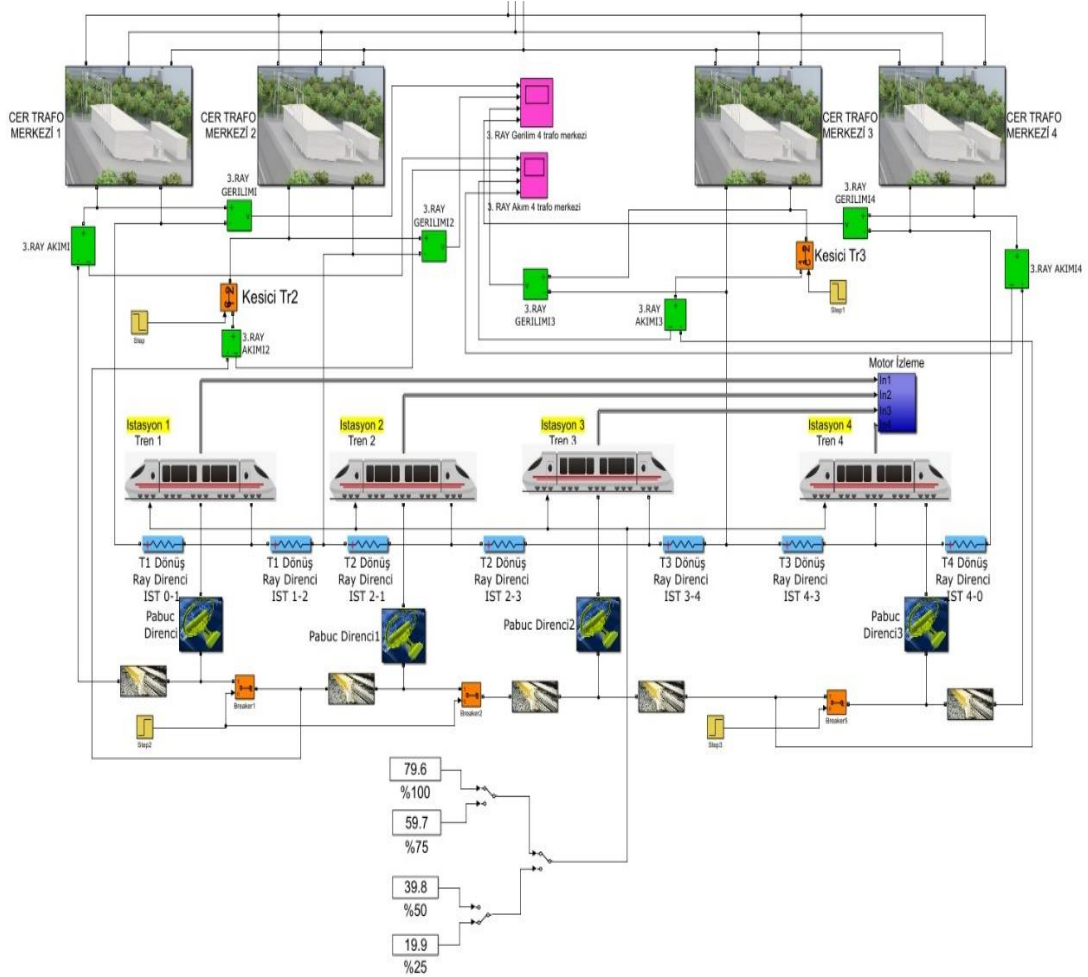
Şekil 5.55: 4 trenli 4 istasyonlu sistemde 4 cer trafo merkezli modelin rotor akımları.

5.4.2 Cer trafo merkezlerinin 3. ray beslemesinin kalkışta kesilmesi

Aynı anda dört istasyondan kalkan trenleri besleyen dört cer trafo merkezinden ikisinin 3. rayı besleyen hattının kesildiği senaryo Şekil 5.56’da gösterildiği gibi modellenmiştir. Bu analizde trenler %100 yüklenmiştir ve model 30 saniye çalıştırılmıştır. Cer trafo merkezi 2’nin 3. rayı besleyen hattı bir kesici ile kalkıştan 5 saniye sonra, cer trafo merkezi 3’ün 3. rayı besleyen hattı ise başka bir kesici ile kalkıştan 10 saniye sonra kesilmiştir. Böylelikle trenler kalkışını tamamlayamadan önce bir trafo merkezinin 3. ray beslemesi daha sonra başka bir trafo merkezinin 3. ray beslemesi devreden çıkartılmıştır. Trafo merkezi 2’nin 3. rayı besleyen hattının üzerinde bulunan kesici açtığı anda 1. istasyon ile 2. istasyonun ve 2. istasyon ile 3. istasyonun aralarında bulunan kesiciler kapatılmıştır. Trafo merkezi 3’ün 3. rayı besleyen hattının üzerinde bulunan kesici açtığı anda ise zaten 1. istasyon ile 2. istasyon ve 2. istasyon ile 3. istasyon arasında bulunan kesiciler kapalıdır. Bunlara ek olarak 3. istasyon ile 4. istasyon arasında bulunan kesici de kapatılmıştır. Böylece, trafo merkezi 2’nin 3. ray besleme hattı devre dışı kaldığında, 2. istasyondaki trenin hareketine devam etmesi için cer trafo merkezi 3’ün ve cer trafo merkezi 1’in istasyon 2’ye ait rayları da beslemesi sağlanmıştır. Aynı şekilde, trafo merkezi 3’ün de 3. ray besleme hattı devre dışı kaldığında, 2. ve 3. istasyondaki trenlerin hareketine devam etmesi için cer trafo merkezi 1’in ve cer trafo merkezi 4’ün aradaki rayları da beslemesi sağlanmıştır.

Trenlerin devir sayısı zaman grafikleri Şekil 5.57’de verilmiştir. Trafo merkezi 2’nin beslemesi 5 saniye sonra kesildiğinde trafo merkezi 1 ve trafo merkezi 3, tren 2’nin harekete devam etmesi için trafo merkezi 2’nin de görevini üstlenecektir. Trafo merkezi 4 ise sadece tren 4 için 3. rayı beslemeye devam edecektir. Bu sebepten dolayı kalkıştan 5 saniye sonra 2. trenin devir sayısı zamana göre daha eğik bir şekilde

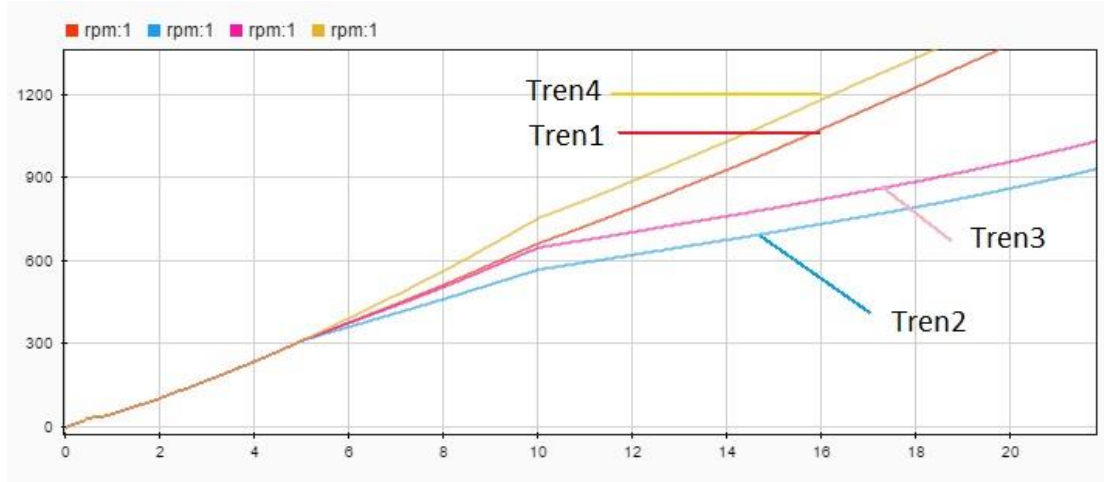
artmaya devam ederken, 1. ve 3. trenlerin devir sayısı zaman grafikleri de 4. trene göre daha eğik şekilde artacaktır. Kalkıştan 10 saniye sonra ise trafo merkezi 3'ün beslemesi de kesildiğinden dolayı, bu trafo merkezine en yakın olan tren 3'ün ve tren 2'nin devir sayısı zaman grafiği yine bir kırılıma uğrayıp daha da eğik olarak artmaya devam edecektir.



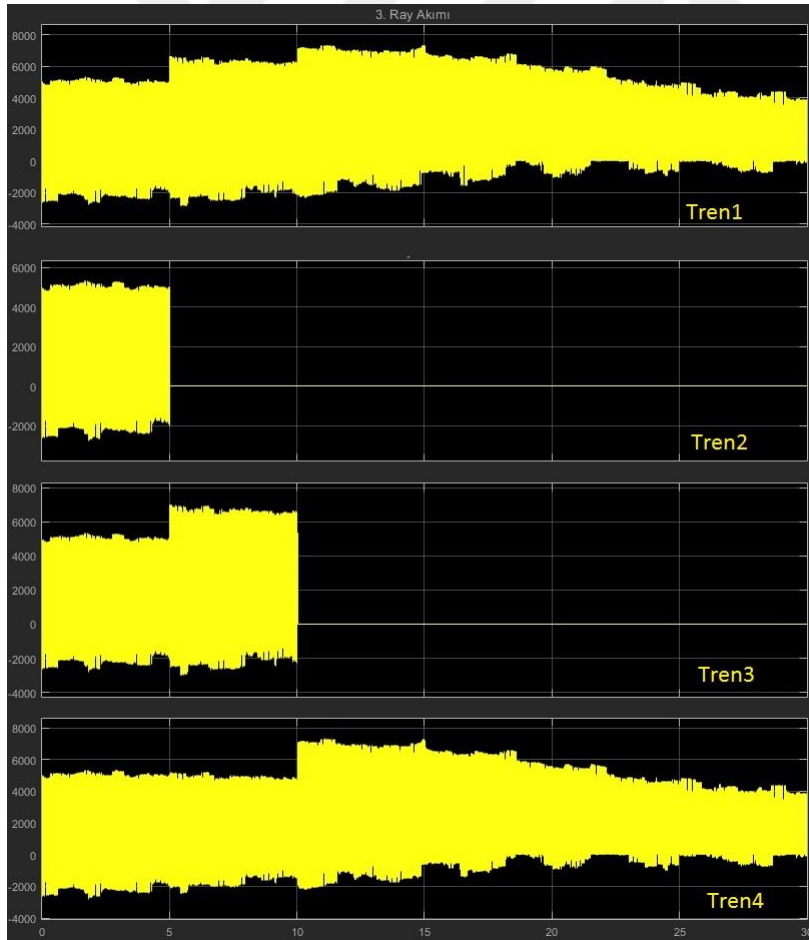
Şekil 5.56: Cer trafo merkezlerinin ikisinin 3. rayı besleyen hatlarının kalkışta kesildiği senaryo modeli.

Şekil 5.58'de trafo merkezlerine ait 3. ray akımları incelendiğinde başlangıç anında dört trafo merkezi de yaklaşık 5300A maksimum akım çekmektedir. 5 saniye ile 10 saniye arasında ise trafo merkezi 1 için ray akımı yaklaşık maksimum 6640A, trafo merkezi 2 için 0A, trafo merkezi 3 için yaklaşık maksimum 7000A ve trafo 4 için ise yaklaşık maksimum 5200A'dır. Yani 2. trafo merkezinin sağlaması gereken güç 1. trafo merkezi ve 3. trafo merkezi arasında dağıtılmıştır. 10 saniye ile 30 saniye arasında ise trafo merkezi 1 için ray akımı yaklaşık maksimum 7300A, trafo merkezi 2 için 0A, trafo merkezi 3 için 0A ve trafo 4 için ise yaklaşık maksimum 7300A'dır.

Şekil 5.59’da verilen trenlerin motorlarına ait rotor akımları da incelendiğinde, tren 4’ün en erken kararlı hal durumuna geçtiği, sonrasında ise tren 1’in kararlı hal durumuna geçtiği görülmektedir. Tren 2 ise en geç kararlı hal durumuna geçen trendir.

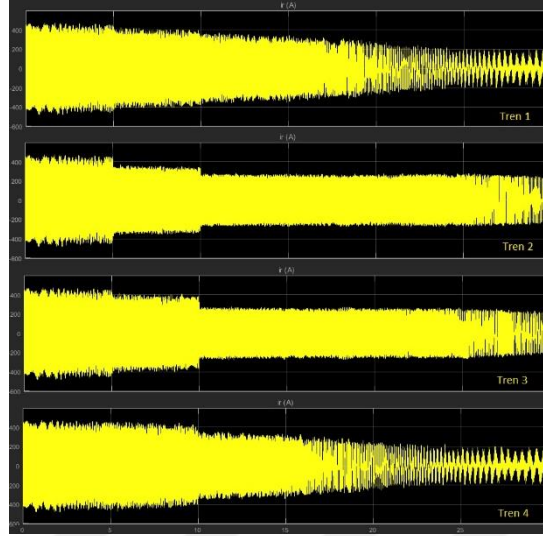


Şekil 5.57: 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trenlerin devir sayısı zaman grafikleri.

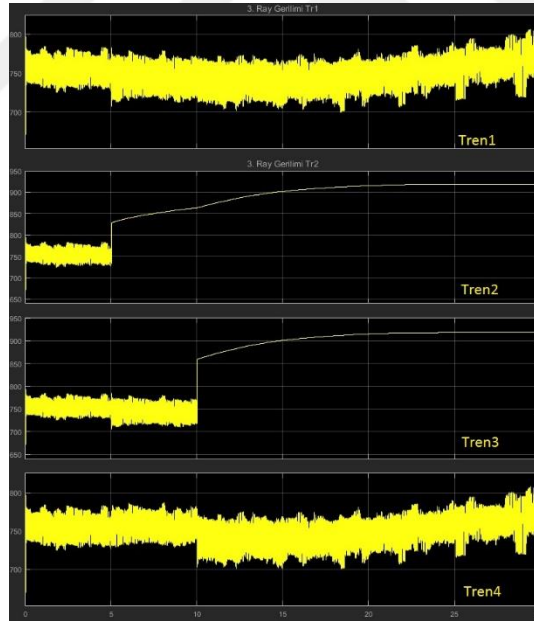


Şekil 5.58: 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trafo merkezlerine ait 3. ray akımları.

Trafo merkezlerinin 3. ray kalkış gerilimleri için grafikler Şekil 5.60’da verilmiştir. En düşük geçici gerilim yaklaşık 670V, en yüksek geçici gerilim ise yaklaşık 807V ölçülmüştür ve bu gerilimler kabul edilebilir seviyededir.



Şekil 5.59: 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda trenlerin motor rotor akımları.



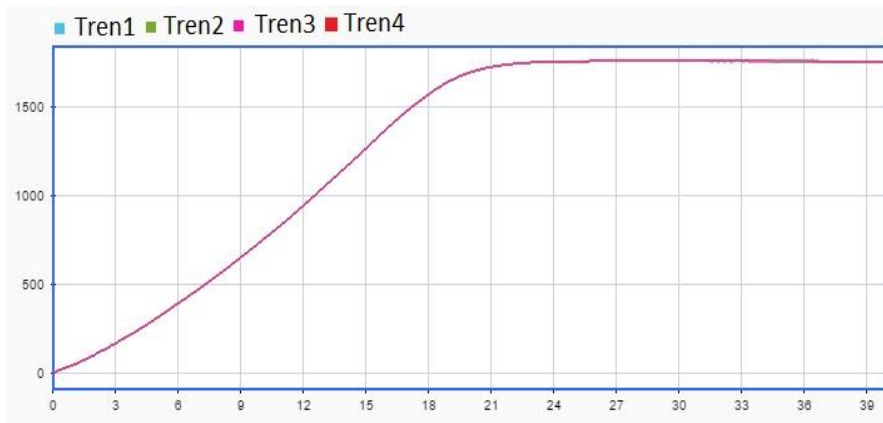
Şekil 5.60: 3. rayı besleyen hatların kalkışta kesildiği senaryoda ray gerilimleri.

5.4.3 Cer trafo merkezlerinin 3. ray beslemesinin kalkıştan sonra kesilmesi

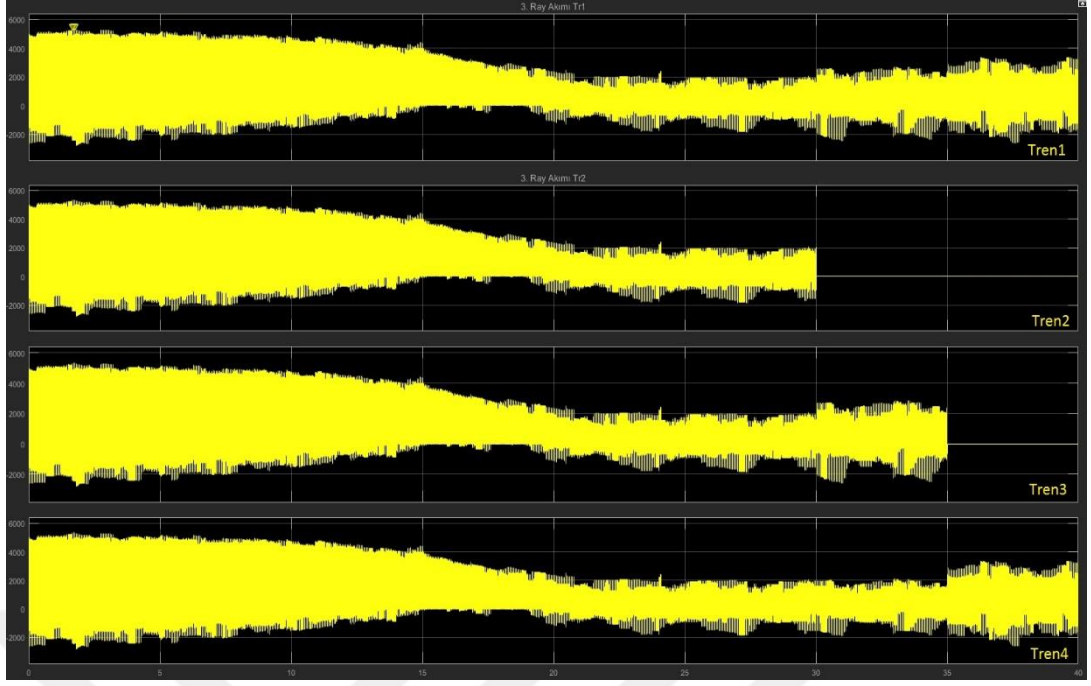
Cer trafo merkezi 2’nin 3. rayı besleyen hattı bir kesici ile kalkıştan 30 saniye sonra, cer trafo merkezi 3’ün 3. rayı besleyen hattı ise başka bir kesici ile kalkıştan 35 saniye sonra kesilmiştir. Böylelikle trenler kalkışını tamamladıktan sonra bir trafo merkezinin beslemesi, daha sonra başka bir trafo merkezinin beslemesi devreden çıkartılmıştır.

Trafo merkezi 2'nin 3. rayı besleyen hattının üzerinde bulunan kesici açtığı anda 1. istasyon ile 2. istasyonun ve 2. istasyon ile 3. istasyonun aralarında bulunan kesiciler kapatılmıştır. Trafo merkezi 3'ün 3. rayı besleyen hattının üzerinde bulunan kesici açtığı anda ise zaten 1. istasyon ile 2. istasyon ve 2. istasyon ile 3. istasyon arasında bulunan kesiciler kapalıdır. Bunlara ek olarak 3. istasyon ile 4. istasyon arasında bulunan kesici de kapatılmıştır. Bu analizde trenler %100 yüklenmiştir ve model 40 saniye çalıştırılmıştır. Böylece, trafo merkezi 2'nin 3. ray besleme hattı devre dışı kaldığında, 2. istasyondaki trenin hareketine devam etmesi için cer trafo merkezi 3'ün ve cer trafo merkezi 1'in istasyon 2'ye ait rayları da beslemesi sağlanmıştır. Aynı şekilde, trafo merkezi 3'ün de 3. ray besleme hattı devre dışı kaldığında, 2. ve 3. istasyondaki trenlerin hareketine devam etmesi için cer trafo merkezi 1'in ve cer trafo merkezi 4'ün aradaki rayları da beslemesi sağlanmıştır.

Trenlerin devir sayısı zaman grafikleri Şekil 5.61'de verilmiştir. Dört trenin de devir sayısı zaman grafikleri hemen hemen birbirinin aynısıdır. Şekil 5.62'deki 3. ray akım grafikleri incelendiğinde kalkış anında dört trafo merkezinin de başlangıçta yaklaşık maksimum 5350A çekildiği görülmektedir. Kalkış yaklaşık 27 saniye sonra gerçekleşmekte ve 27 saniye ile 30 saniye arasında dört trafo merkezinin de yaklaşık maksimum 2071A çekildiği görülmektedir. 30 saniye ile 35 saniye arasında ise trafo merkezi 1 için ray akımı yaklaşık maksimum 2706A, trafo merkezi 2 için 0A, trafo merkezi 3 için yaklaşık maksimum 2846A ve trafo 4 için ise yaklaşık maksimum 2108A'dır. 35 saniye ile 40 saniye arasında ise trafo merkezi 1 için ray akımı yaklaşık maksimum 3357A, trafo merkezi 2 için 0A, trafo merkezi 3 için 0A ve trafo 4 için ise yaklaşık maksimum 3357A'dır.

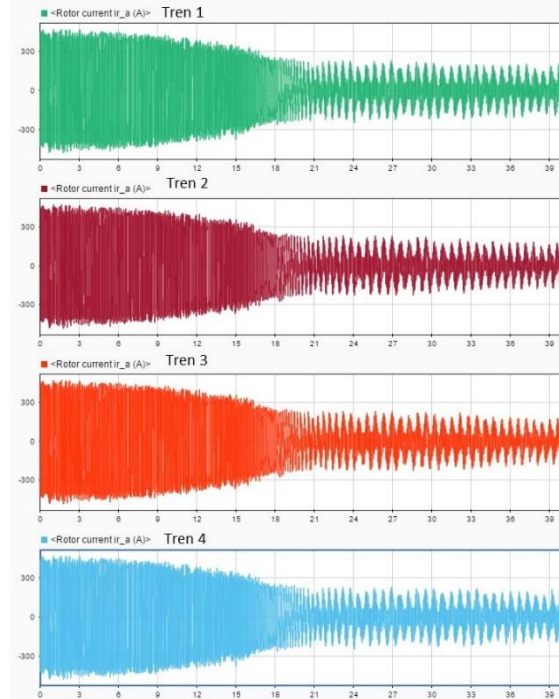


Şekil 5.61: 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin devir sayısı zaman grafikleri.

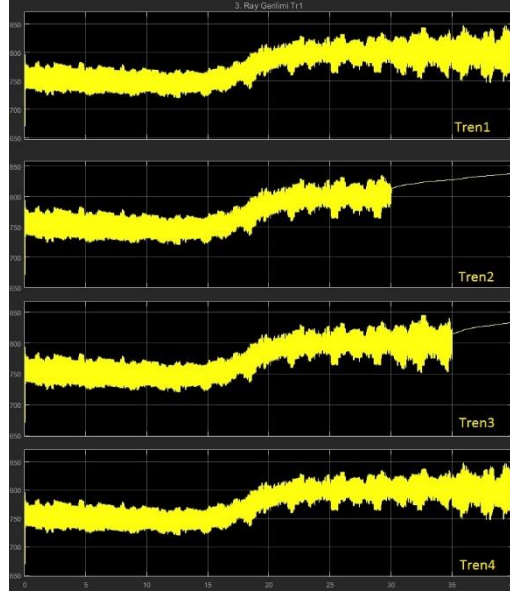


Şekil 5.62: 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin ray akımları.

Şekil 5.63’de verilen rotor akımları incelendiğinde zaten trenler kararlı hal durumuna geçtikten sonra trafo merkezleri çöktüğünden önemli değişiklikler görülmemektedir. Şekil 5.64’de verilen 3. ray gerilimlerinde en düşük geçici gerilim 670V, en yüksek geçici gerilim ise 848V ölçülmüştür ve bu değerler kabul edilebilir aralıktadır.



Şekil 5.63: 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin rotor akımları.



Şekil 5.64: 3. rayı besleyen hatların kalkıştan sonra kesildiği senaryoda trenlerin ray gerilimleri.

5.5 Modellerin Harmonik Analizleri

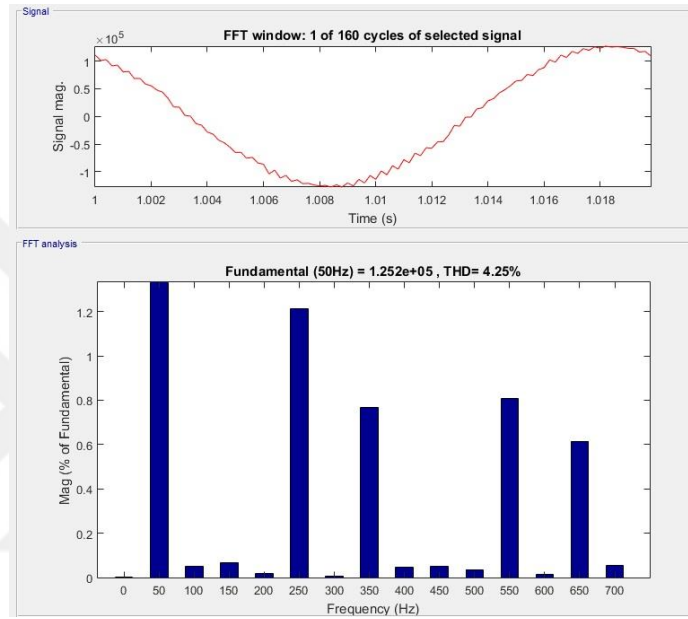
Harmonik analizleri Matlab/Simulink programında bulunan FFT analizi aracı ile yapılmıştır ve çeşitli durumlar incelenmiştir. 6, 12, 18 veya 24 darbeleri doğrultucular kullanıldığında, LC filtresinin değeri değiştirildiğinde, yüklenme durumu değiştirildiğinde, trafo sayısı, trafo tipi ve gücü değiştirildiğinde, FFT analiz aracının hesaplamasında kullanılan döngü sayısı değiştirildiğinde vb. durumlarda 154kV barada ölçülen akım ve gerilim dalgası için toplam harmonik bozunumunun (THD: Total Harmonic Distortion) nasıl değiştiği incelenmiştir. Çizelge 5.1’de IEEE-519 (Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Kontrol için Önerilen Uygulama ve Gereksinimler) standardının 2014 yılında yayınlanmış gerilime ait harmonik bozunum limitlerine göre 154kV bir şebekeye ait gerilim için toplam harmonik bozunum limitleri %2,5 altında olmalıdır [33].

Çizelge 5.1 : Çizelge 5.1: IEEE 519 2014 standardının gerilime ait harmonik bozunum limitleri.

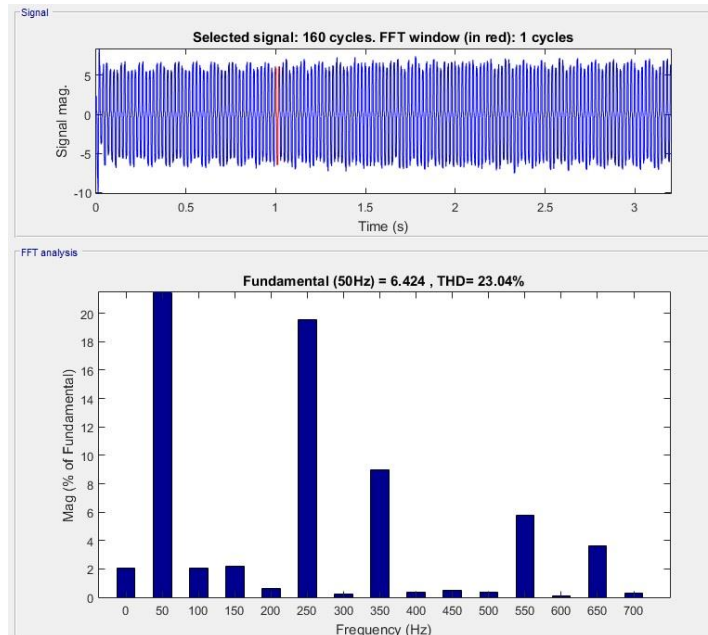
GERİLİM BOZUNUM LİMİTLERİ		
(PCC: point of common coupling) Ortak kublaj noktasında bara gerilimi	Tek harmonik değeri (%)	Toplam Harmonik Bozunum THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

5.5.1 Bir trenli bir istasyonlu modelde harmonik analizler

Gerilim dalgasının toplam harmonik bozunumu 6 darbeleri doğrultucu için Şekil 5.65'te verilmiştir ve %4.25 değere sahiptir. Akım dalgasının toplam harmonik bozunumu 6 darbeleri doğrultucu için Şekil 5.66'da verilmiştir ve %23.04 değere sahiptir. 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., ve 25. akıma ait harmonik alt bileşenler incelendiğinde ise temel bileşene göre yüksektir ve değerleri sırasıyla %19.53, %8.96, 5.80%, %3.61, %2.28, %1.66, %1.02 ve %0.88'dir.

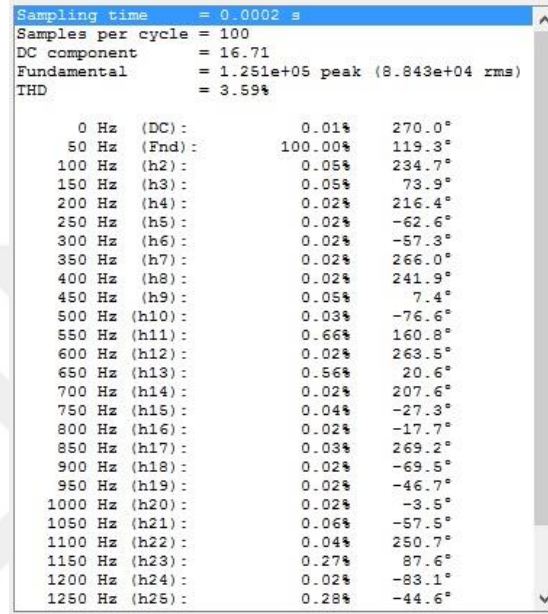


Şekil 5.65: 6 darbeleri doğrultucu için gerilimin toplam harmonik bozunumu.

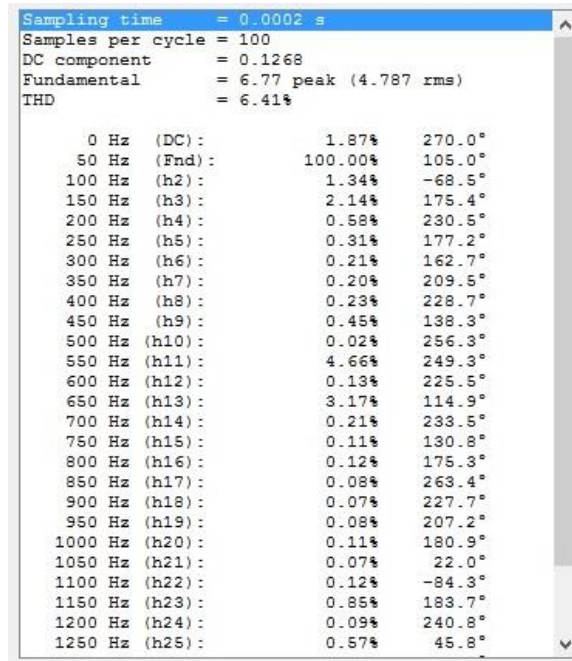


Şekil 5.66: 6 darbeleri doğrultucu için akımın toplam harmonik bozunumu.

Gerilim dalgasının toplam harmonik bozunumunun FFT analiz sonuçları 12 darbeli doğrultucu için Şekil 5.67’de verilmiştir ve %3.59 değere sahiptir. Akım dalgasının toplam harmonik bozunumunun FFT analiz sonuçları 12 darbeli doğrultucu için Şekil 5.68’de verilmiştir ve %6.41 değere sahiptir. 11., 13., 23., ve 25. harmonik bileşenler incelendiğinde ise temel bileşene göre yüksektir ve değerleri sırasıyla %4.66, %3.17, 0.85 ve 0.57’dir.



Şekil 5.67: 12 darbeli doğrultucu için gerilimin toplam harmonik bozunumu



Şekil 5.68: 12 darbeli doğrultucu için akımın toplam harmonik bozunumu

6, 12, 18 ve 24 darbeleri doğrultucuların bir trenli ve bir istasyonlu sistemde bir cer trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilim dalgasının ve akım dalgasının toplam harmonik bozunumunun FFT analiz sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde kullanılan doğrultucuların darbe sayısı arttıkça hem gerilime ait hem de akıma ait toplam harmonik bozunumlarının azaldığı görülmektedir. FFT analiz programı kullanıldığında analiz edilecek döngü sayısı ve zamanı seçilebilmektedir. Çizelge 5.2’de 1 döngü için 1. saniyedeki sonuçlar verilmiştir. 6 darbeleri doğrultucu için kullanılan üçgen yıldız bağlı doğrultucu trafosunun gücü 6.6 MVA’dır. 12 darbeleri doğrultucu için girişi üçgen, çıkışı ise üçgen ve yıldız olan trafolar kullanıldığından modellenirken trafo başına gücü 3.3 MVA’dır, toplamda ise yine 6.6 MVA’dır. 18 darbeleri doğrultucu için ise kullanılan 3 zigzag trafonun her biri 2.2MVA’dır, toplamda ise 6.6 MVA’dır. 24 darbeleri doğrultucu için ise kullanılan 4 zigzag trafonun her biri 1.65MVA’dır, toplamda ise 6.6 MVA’dır.

Çizelge 5.2: 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeleri doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	1 DÖNGÜ	
								1. Saniyedeki örnek	
								(Gerilim dalgasının) THD %	(Akım dalgasının) THD %
1	1	0	1	6,6	6	200	0.1	4,25	23,04
1	1	0	1	3,3	12	200	0.1	3,59	6,41
1	1	0	1	2,20	18	200	0.1	1,44	5,01
1	1	0	1	1,65	24	200	0.1	1,21	4,12

6, 12, 18 ve 24 darbeleri doğrultucular ile elde edilen akım dalgasına ait 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., ve 25. bileşenlerin yüzdelik değerleri Çizelge 5.3’te görülmektedir. 6 darbeleri doğrultucu kullanıldığında sistemde ölçülen tüm alt bileşenlerin değerleri temel bileşene göre yüksek çıkmaktadır. 12 darbeleri doğrultucu kullanıldığında, 11., 13., 23. ve 25. bileşen değerleri yüksek çıkmaktadır, diğer bileşenler ise %0’a yakındır. 18 darbeleri doğrultucu kullanıldığında, 17. ve 19. bileşen değerleri yüksek çıkmaktadır, diğer bileşenler %0’a yakındır. 24 darbeleri doğrultucu kullanıldığında ise 23. ve 25. bileşen değerleri yüksek çıkmaktadır, diğer bileşenler %0’a yakındır.

LC filtresi değerleri 18 darbeleri doğrultucular ve 24 darbeleri doğrultucular için değiştirilmiş ve FFT analiz sonuçları Çizelge 5.4’te verilmiştir. Kapasitör değerleri artırıldığında hem akım dalgasına bağlı THD değerleri, hem de gerilim dalgasına bağlı THD değerleri düşmektedir.

Çizelge 5.3: 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen alt bileşenlerin harmonik değerleri.

Doğrultucu darbe sayısı	1 DÖNGÜ							
	Akıma Dalgasına Ait Harmonik Bileşen (THD I)							
	5. Bileşeni %	7. Bileşeni %	11. Bileşeni %	13. Bileşeni %	17. Bileşeni %	19. Bileşeni %	23. Bileşeni %	25. Bileşeni %
6	19,53	8,96	5,8	3,61	2,28	1,66	1,02	0,88
12	0,31	0,2	4,66	3,17	0,08	0,08	0,85	0,57
18	0,1	0,32	0,21	0,08	3,36	2,5	0,04	0,01
24	0,65	0,31	0,38	0,29	0,12	0,06	1,99	1,82

Çizelge 5.4: 1 trenli, 1 istasyonlu, 1 trafo merkezli ve 18 ile 24 darbeli doğrultuculu modelde LC filtresi değerlerinin değiştirilmesi.

Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	5 DÖNGÜ	
								3. Saniyedeki örnek	
								(Gerilim dalgasının) THD %	(Akım dalgasının) THD %
1	1	0	1	2,2	18	200	0.1	1,52	6,43
1	1	0	1	2,20	18	150	0,15	1,48	5,77
1	1	0	1	1,65	24	200	0.1	1,17	5,35
1	1	0	1	1,65	24	100	0,20	1,12	4,46

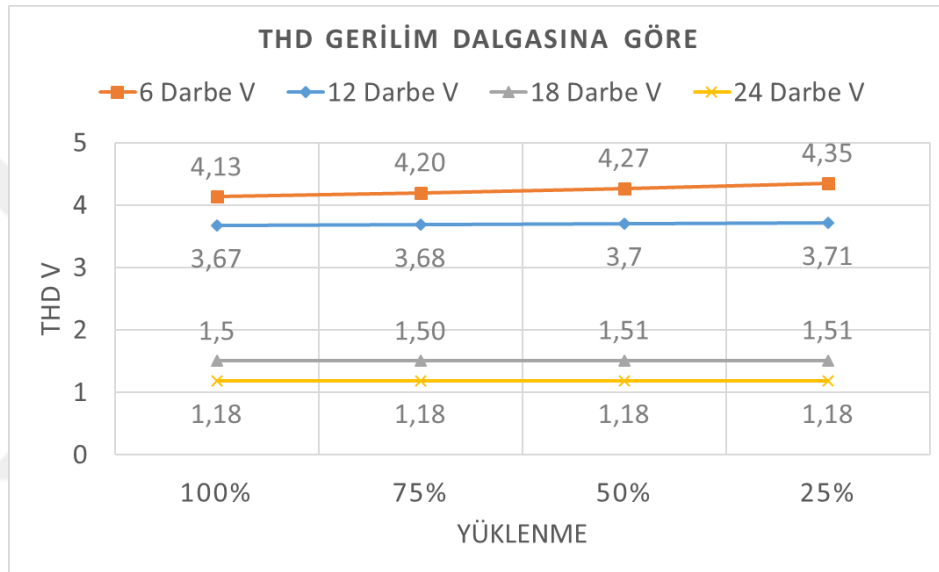
6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucu kullanan sistemde, trene ait motorların %25, %50, %75 ve %100 yüklendikleri zaman elde edilen akım dalgasına göre THD ve gerilim dalgasına göre THD değerleri, LC filtresinin her sistemde aynı seçildiği durumda Çizelge 5.5'te, LC filtresinin 18 ve 24 darbeli doğrultuculu sistem için farklı dizayn edildiği durumda ise Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Şekil 5.69'da motor rotorunun nominal yüklenme oranının azalmasıyla gerilim dalgasına ait THD değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 5.70'de ise nominal yüklenme oranının azalması durumunda, akım dalgasına ait THD değerinin düşüşü görülmektedir.

Çizelge 5.5: Trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular aynı LC filtresine sahipken elde edilen THD değerleri.

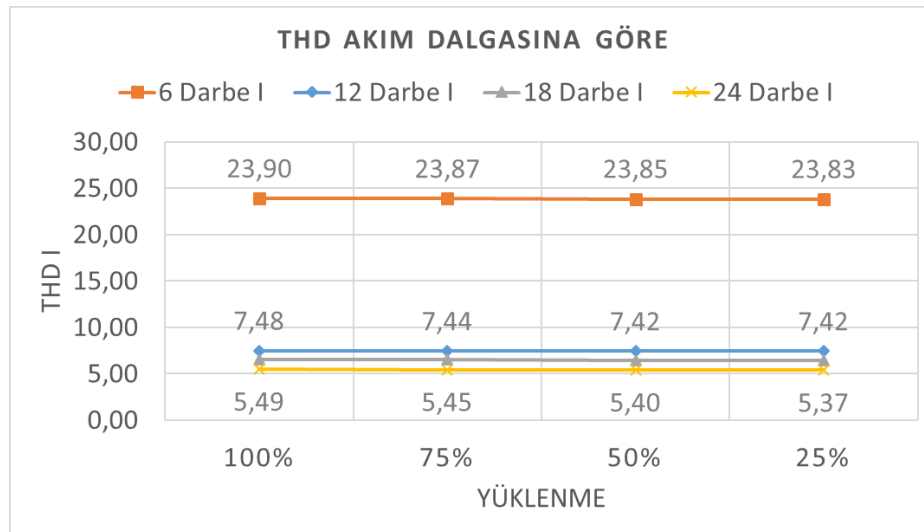
	Darbe Sayısı (3. Saniye, 5 Döngü)							
	6		12		18		24	
	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)
LC Filtre	200	0.1	200	0.1	200	0.1	200	0.1
Yüklenme	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %
100%	4,13	23,90	3,67	7,48	1,5	6,56	1,18	5,49
75%	4,20	23,87	3,68	7,44	1,50	6,52	1,18	5,45
50%	4,27	23,85	3,7	7,42	1,51	6,48	1,18	5,40
25%	4,35	23,83	3,71	7,42	1,51	6,45	1,18	5,37

Çizelge 5.6: Trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular farklı LC filtresine sahipken elde edilen THD değerleri.

	Darbe Sayısı (3. Saniye, 5 Döngü)							
	6		12		18		24	
	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)	L (μH)	C (F)
LC Filtre	200	0.1	200	0.1	150	0.15	100	0.20
Yüklenme	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %	THD V %	THD I %
100%	4,13	23,90	3,67	7,48	1,47	5,83	1,13	4,61
75%	4,20	23,87	3,68	7,44	1,48	5,81	1,13	4,57
50%	4,27	23,85	3,70	7,42	1,48	5,79	1,13	4,53
25%	4,35	23,83	3,71	7,42	1,49	5,77	1,13	4,48



Şekil 5.69: Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında gerilim dalgasına ait THD.



Şekil 5.70: Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında akım dalgasına ait THD.

On iki darbeli doğrultucu trafosu için birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları yıldız ve üçgen olan 3.3MVA trafolar yerine 30 derece faz açılı 3.3MVA zigzag trafolar kullanıldığında, Çizelge 5.7’de görüldüğü gibi, motorların rotorları %25, %50, %75 ve %100 nominal yük ile yüklenmeleri durumlarında, gerilim dalgasına ait THD değerinin düştüğü, akım dalgasına ait THD değerinin ise arttığı görülmektedir.

Çizelge 5.7: Tren motorlarının farklı yüklenme durumlarında ve farklı trafo kullanımında elde edilen THD değerleri.

Nominal Yüklenme	Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	5 DÖNGÜ			
								3. Saniyedeki örnek			
								Üçgen Yıldız Üçgen Trafo THD V (%)	Üçgen Yıldız Üçgen Trafo THD I (%)	Zigzag Trafo THD V (%)	Zigzag Trafo THD I (%)
100%	1	1	1	3,3	12	200	0.1	3,67	7,48	1,95	9,27
75%								3,68	7,44	1,95	9,25
50%								3,70	7,42	1,95	9,23
25%								3,71	7,42	1,96	9,22

5.5.2 İki trenli iki istasyonlu modelde harmonik analizler

İki trenli iki istasyonlu sistem için hem bir trafo merkezli durumda hem de iki trafo merkezli durumda trenlerin aynı anda kalkışları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, trenlere ait motorların shaftının yüklenme durumlarına göre karşılaştırmalar ve rotorun hızına göre yüklendiği durum için karşılaştırmalar yapılmıştır. Trenlerin aynı anda kalkış yaptığı durumlar için model 1.2 saniye çalıştırılmış ve 1. saniyeden 5 döngü ve 1 döngü örnekler alınmıştır. Çizelge 5.8’de gösterilen analiz sonuçları darbe sayısının artması ile gerilim ve akım dalgalarına ait toplam harmonik bozunumun azaldığını ortaya koymaktadır. İki trafo merkezli sistemde akıma bağlı toplam harmonik bozunum değerleri, bir trafo merkezli sistemdeki toplam harmonik bozunum değerlerinden fazladır. 18 ve 24 darbeli doğrultucularda gerilime bağlı toplam harmonik bozunum değerleri %2.5 altında iken 6 ve 12 darbeli doğrultucular için bir trafo merkezli sistemde %5 civarında, iki trafolu merkezli sistemde ise %6 civarındadır.

6, 12, 18, 24 darbeli doğrultucuların, %25, %50, %75 ve %100 yüklendikleri zaman elde edilen akım dalgasına bağlı THD ve gerilim dalgasına bağlı THD değerleri Çizelge 5.9’da gösterilmiştir. 1 ve 2 trafo merkezli durum için sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.8: 2 trenli 2 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nom. güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	5 DÖNGÜ		1 DÖNGÜ	
						1. Saniye örnek		1. Saniye örnek	
						THD V %	THD I %	THD V %	THD I %
2	2	0	1	6.6	6	5.78	22.29	3.95	21.57
				3.3	12	5.53	6.91	4.76	5.06
				2.20	18	1.71	6.40	1.72	4.57
				1.65	24	1.57	5.56	1.70	3.48
2	2	0	2	6.6	6	6.61	22.81	6.15	21.73
				3.3	12	6.17	7.24	5.55	5.79
				2.20	18	2.19	7.00	2.25	5.05
				1.65	24	1.92	6.19	1.85	3.28

6 darbeli doğrultucu için, modellemede 1 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %5 üzerindedir ve akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %22 üzerindedir. 2 trafo merkezli model kullanıldığında ise gerilime bağlı THD her yüklenme durumu için %6 üzerindedir ve akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %22 üzerindedir.

12 darbeli doğrultucu için, modellemede 1 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %5 üzerindedir. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %6.90 ile %7 arasındadır. 2 trafo merkezli model kullanıldığında gerilime bağlı THD her yüklenme durumu için %6 üzerindedir ve akıma bağlı THD değerleri ise 1 trafo merkezli sisteme göre fazladır ve %7.28 üzerindedir.

18 ve 24 darbeli doğrultucular için, modellemede 1 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %2.5 altındadır. Akıma bağlı THD değerleri 18 darbeli doğrultucuda her yük için %6.42 ile %6.44 arasında; 24 darbeli doğrultucuda ise her yüklenme durumu için %5.58 ile %5.60 arasındadır. 2 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri 18 ve 24 darbeli doğrultucular için her yüklenme durumunda %2.5 altındadır ve akıma bağlı THD değerleri 18 ve 24 darbeli doğrultucular için her yüklenme durumunda %6.2 ile %7.12 arasında ve 1 trafo merkezli modele göre fazla değerdedir.

2 trafo merkezli sistemde elde edilen akıma ve gerilime bağlı THD değerleri, 1 trafo merkezli sistemde elde edilen THD değerlerinden daha fazladır.

Çizelge 5.9: 1 ve 2 trafo merkezli modelde trene ait motorların farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Nominal Yük	Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	1 Trafo Merkezi THD V %	1 Trafo Merkezi THD I %	2 Trafo Merkezi THD V %	2 Trafo Merkezi THD I %
100%	2	2	0	1,65	24	200	0.1	1,56	5,60	1,92	6,34
75%								1,57	5,60	1,92	6,32
50%								1,57	5,59	1,92	6,29
25%								1,57	5,58	1,92	6,24
100%	2	2	0	2,2	18	200	0.1	1,71	6,44	2,19	7,12
75%								1,71	6,43	2,19	7,11
50%								1,71	6,43	2,19	7,08
25%								1,71	6,42	2,19	7,05
100%	2	2	0	3,3	12	200	0.1	5,53	6,97	6,14	7,38
75%								5,53	6,96	6,15	7,35
50%								5,52	6,95	6,15	7,32
25%								5,52	6,93	6,16	7,28
100%	2	2	0	6,6	6	200	0.1	5,78	22,29	6,51	22,87
75%								5,78	22,29	6,52	22,86
50%								5,79	22,29	6,54	22,84
25%								5,79	22,29	6,57	22,83

5.5.3 İki trenli dört istasyonlu modelde harmonik analizler

İki tren dört istasyonlu sistem için hem iki trafo merkezli durumda hem de dört trafo merkezli durumda trenlerin aynı anda kalkışları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerde yüklenme durumlarına göre karşılaştırmalar ve rotorun hızına göre yüklendiği durum için karşılaştırmalar yapılmıştır. Trenlerin aynı anda kalkış yaptığı durumlar için model 1.2 saniye çalıştırılmış ve 1. saniyeden 5 döngü ve 1 döngü örnekler alınmıştır. Çizelge 5.10’da gösterilen analiz sonuçları darbe sayısının artması ile gerilim ve akım dalgalarına ait THD’nin azaldığını ortaya koymaktadır. 18 ve 24 darbeli doğrultucularda gerilime bağlı THD değerleri %2.5 altında iken, 6 ve 12 darbeli doğrultucular için %6 üzerindedir.

Çizelge 5.10: 2 trenli 4 istasyonlu modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nom. güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	5 DÖNGÜ		1 DÖNGÜ	
						1. Saniye örnek		1. Saniye örnek	
						THD V %	THD I %	THD V %	THD I %
2	4	0	2	6.6	6	6.61	22.81	6.15	21.73
				3.3	12	6.17	7.24	5.55	5.79
				2.20	18	2.19	7.00	2.25	5.05
				1.65	24	1.92	6.19	1.85	3.28

6, 12, 18, 24 darbeli doğrultuculu sistemlerde, tren motorları %25, %50, %75 ve %100 nominal yük ile yüklendikleri zaman elde edilen akım dalgasına göre THD ve gerilim

dalgasına göre THD değerleri Çizelge 5.11’de gösterilmiştir. 2 trafo merkezli ve 4 trafo merkezli durum için sonuçlar elde edilmiştir.

6 darbeli doğrultucu için, modellemede 2 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %6.51 ile %6.57 arasındadır. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %22 üzerindedir. 4 trafo merkezli model kullanıldığında gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %6.26 ile %6.29 arasındadır. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %24 üzerindedir.

Çizelge 5.11: 2 trenli 4 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Nominal Yük	Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	2 Trafo Merkezli THD V	2 Trafo Merkezli THD I	4 Trafo Merkezli THD V	4 Trafo Merkezli THD I
100%	2	4	1,65	24	200	0.1	1,92	6,34	2,55	6,60
75%							1,92	6,32	2,55	6,60
50%							1,92	6,29	2,55	6,60
25%							1,92	6,24	2,55	6,58
100%	2	4	2,2	18	200	0.1	2,19	7,12	2,39	6,97
75%							2,19	7,11	2,39	6,98
50%							2,19	7,08	2,39	6,97
25%							2,19	7,05	2,39	6,96
100%	2	4	3,3	12	200	0.1	6,14	7,38	5,82	8,15
75%							6,15	7,35	5,82	8,14
50%							6,15	7,32	5,83	8,13
25%							6,16	7,28	5,84	8,10
100%	2	4	6,6	6	200	0.1	6,51	22,87	6,26	24,04
75%							6,52	22,86	6,27	24,04
50%							6,54	22,84	6,28	24,03
25%							6,57	22,83	6,29	24,02

12 darbeli doğrultucu için, modellemede 2 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %6.14 ile %6.16 arasındadır. ve akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %7.28 ile %7.38 arasındadır. 4 trafo merkezli model kullanıldığında gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %5.83 seviyesindedir. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %8’in üzerindedir.

18 ve 24 darbeli doğrultucular için, modellemede 2 trafo merkezi ve 4 trafo merkezi kullanıldığında elde edilen gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için, 18 darbeli modelde %2.5 değerinin altındadır; 24 darbeli modelde ise %2.55 değeri seviyesindedir. Akıma bağlı THD değerleri ise 2 trafo merkezi için %6.24 ile %7.12 arasında, 4 trafo merkezi için ise %6.58 ile %6.97 arasındadır.

5.5.4 Dört trenli dört istasyonlu modelde harmonik analizler

Dört tren dört istasyonlu sistem için trenlerin aynı anda kalkış yaptığı modelde harmonik analizler yapılmıştır. Bu analizlerde yüklenme durumlarına göre karşılaştırmalar ve rotorun hızına göre yüklendiği durum için analizler yapılmıştır. Trenlerin aynı anda kalkış yaptığı durumlar için model 1.2 saniye çalıştırılmış ve 1. saniyeden 5 döngü ve 1 döngü örnekler alınmıştır. Çizelge 5.12’te gösterilen analiz sonuçları darbe sayısının artması ile gerilim ve akım dalgalarına ait THD’nin azaldığını ortaya koymaktadır. 24 darbeli doğrultucuda gerilime bağlı THD değerleri 5 döngü analiz edildiğinde %3.09 iken, 18 darbeli doğrultucuda gerilime bağlı THD değerleri %2.87’dir. 6 ve 12 darbeli doğrultucular için %7 üzerindedir. Akıma bağlı THD değerleri incelendiğinde, 6 darbeli doğrultucu kullanılan modelin değerinin %20 üzerinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.12: 4 trenli 4 istasyonlu modelde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo merkezi sayısı	Trafo başına nom. güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	5 DÖNGÜ		1 DÖNGÜ	
						1. Saniye örnek		1. Saniye örnek	
						THD V %	THD I %	THD V %	THD I %
4	4	0	4	6.6	6	8.70	20.37	8.04	19.70
				3.3	12	7.29	6.03	6.87	4.50
				2.20	18	2.87	6.30	2.89	3.92
				1.65	24	3.09	5.61	3.14	2.49

6, 12, 18, 24 darbeli doğrultuculu sistemlerde, tren motorları %25, %50, %75 ve %100 yüklendikleri zaman elde edilen akım dalgasına göre THD ve gerilim dalgasına göre THD değerleri Çizelge 5.13’te gösterilmiştir.

6 darbeli doğrultucu için, gerilime bağlı THD değerleri her yük için %8.69 ile %8.70 arasındadır ve akıma bağlı THD değerleri ise her yük için %20 üzerindedir.

12 darbeli doğrultucu için, gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %7.23 ile %7.27 arasındadır ve akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %6.06 ile %6.12 arasındadır.

18 darbeli doğrultucu için, gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %2.5 üzerindedir. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %3.93 ile %3.95 arasındadır. 24 darbeli doğrultucu için, gerilime bağlı THD değerleri her yüklenme durumu için %3.10’dur. Akıma bağlı THD değerleri ise her yüklenme durumu için %5.65 ile %5.70 arasındadır.

Çizelge 5.13: 4 trenli 4 istasyonlu modelde trene ait motorlar farklı oranda yüklendiklerinde 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular ile elde edilen THD değerleri.

Nominal Yük	Tren sayısı	İstasyon sayısı	Trenler arası kalkış zamanı (Sn)	Trafo başına nominal güç (MVA)	Doğrultucu darbe sayısı	L (μH)	C (F)	5 Döngü THD V %	5 Döngü THD I %	1 Döngü THD V %	1 Döngü THD I %
100%	4	4	0	1.65	24	200	0.1	3.10	5.70	3.17	2.59
75%								3.10	5.70	3.16	2.58
50%								3.10	5.68	3.15	2.56
25%								3.10	5.65	3.15	2.53
100%	4	4	0	2.2	18	200	0.1	2.88	3.93	2.87	6.40
75%								2.88	3.94	2.87	6.39
50%								2.89	3.95	2.87	6.37
25%								2.89	3.95	2.87	6.34
100%	4	4	0	3.3	12	200	0.1	7.23	6.12	6.73	4.60
75%								7.24	6.10	6.75	4.59
50%								7.25	6.08	6.78	4.56
25%								7.27	6.06	6.82	4.54
100%	4	4	0	6.6	6	200	0.1	8.69	20.42	8.21	19.69
75%								8.69	20.41	8.17	19.69
50%								8.70	20.40	8.14	19.69
25%								8.70	20.39	8.09	19.70



6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, 750 V DC gerilim ile beslenen üçüncü raya sahip örnek bir metro sistemi, 154kV enerji iletim şebekesinden trenler üzerinde bulunan motorlarına kadar bir bütün olarak MATLAB ® Simulink programı ile modellenmiştir. Modelde bir trenli, iki trenli ve dört trenli metro sisteminin; bir istasyonlu, iki istasyonlu ve dört istasyonlu hatlar boyunca farklı senaryolardaki kalkış karakteristikleri ve toplam harmonik bozunumları incelenmiştir.

6.1 Kalkış Analizleri

Bir trenli, bir istasyonlu, bir cer trafo merkezli sistemde, tren kalkış yaptığında çok kısa bir süre için de olsa hat akımı tepe noktası değeri yaklaşık 5485A seviyelerindedir. %100 yüklenme durumunda ise yaklaşık 5550A seviyelerindedir.

İki trenli, iki istasyonlu sistemde, iki cer trafo merkezi kullanıldığında hat akımı tepe noktası çok kısa bir süre içinde her bir trafo için 5420A seviyelerindedir. Trenlerin kalkış süreleri arasında 20 saniye olduğu durumda, birinci trafonun maksimum akım değeri yaklaşık 3700A, ikinci trafonun ise maksimum yaklaşık 4100A'dır. Bu sistem için iki cer trafosu yerine bir cer trafosu kullanılırsa, trenlerin aynı anda kalkış yaptığı durumda hat akımı maksimum değeri yaklaşık 8500A seviyelerinde olur.

İki trenli, dört istasyonlu sistemde, iki cer trafo merkezi sistemi baştan ve ortadan besleyecek şekilde tasarlandığında; sistemi ortadan besleyen trafo merkezi için hat akımı çok kısa bir süre içinde yaklaşık 7200A tepe noktası değerine ulaşmaktadır. Sistemi baştan besleyen trafo merkezi için ise bu değer yaklaşık 3300A'dır. Bu sistemin baştan ve sondan beslendiği durum için ise her bir trafo için maksimum 5250A değeri görülmektedir. Trenlerin kalkış süreleri arasında 20 saniye olduğu durumda trafo başına maksimum değer yaklaşık 4300A kadardır.

Dört trenli, dört istasyonlu sistemde, iki cer trafo merkezi kullanıldığında hat akımı tepe noktası değeri çok kısa bir süre içinde her bir trafo için 8400A seviyelerindedir. Bu sistemde iki cer trafosu yerine dört cer trafosu kullanılırsa hat akımı maksimum

değeri her bir trafo için yaklaşık 5300A seviyelerinde olur. Trafo merkezlerinin besleme noktalarına yakın olan trenlerin daha çok akım çektiği ve bu trenlerin daha büyük tork ile kalkış yaptığı görülmektedir.

Kalkış anında çekilen bu akım değerleri kısa devre hata akımlarından daha büyüktür ve bu büyük akımların kısa devre hata akımı olarak algılanmaması için klasik hat koruma yöntemlerinden farklı yöntemler kullanılmalıdır.

Yapılan tüm analizlerde 3. ray gerilimi değerleri BS EN 50163 standardına göre belirlenen, geçici en düşük gerilimin 500V ve geçici en yüksek gerilimin 1000V olduğu gerilim aralıkları içerisinde kalmaktadır. LC filtresinin raylı sisteme uygun seçilmesinin 3. ray geriliminin kararlılığı açısından önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı darbe sayılarına sahip doğrultucuların, trenlerin 3. ray akımlarına, devir sayısı zaman karakteristiklerine çok fazla etkisi olmadığı ancak değişen darbe sayısına bağlı olarak doğrultucu trafosu tipi değiştirildiğinde, trenlerin devir sayısı zaman karakteristiklerinin etkileneceği anlaşılmıştır. Aynı tip doğrultucu trafoları kullanan 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucuya sahip sistemlerin 3. ray gerilim karakteristiklerinin birbirlerinden farkının az olduğu ancak doğrultucularda darbe sayısının artmasının reaktif gücü azalttığı görülmektedir.

Tren motor şaftlarına uygulanan nominal moment miktarı arttıkça, trenin kalkışını daha geç gerçekleştirdiği ve kalkıştan sonra da daha düşük devir sayısında seyrettiği görülmüştür.

Doğrultucu trafosu olarak birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları üçgen ve yıldız olan trafolar yerine zigzag trafolar kullanılması durumunda, trenlerin kalkışını daha geç tamamladığı, kalkış gerçekleşene kadar daha fazla 3. ray akımı çektiği, 3. ray geriliminin 750 V DC bandına çok daha yakın olduğu görülmüştür.

İki trenli, iki istasyonlu, bir cer trafo merkezli ve birinci istasyondan beslenen sistemde, trenlerden birinin birinci istasyondan diğerinin ikinci istasyondan kalktığı durumda, ikinci istasyondaki trenin kalkışını birinci trene göre biraz daha geç yaptığı ve iki istasyon arasındaki mesafenin artması ile artık ikinci trenin kalkışını 30 saniyede bile gerçekleştiremediği, yeterli rotor akımını çekemediği görülmektedir. Aynı şekilde, iki trenli, bir cer trafo merkezli sistem, iki istasyon ile modellendiğinde, tren motorları %25, %50, %75 ve %100 yüklendiğinde bile trenler aynı andaki kalkışlarını 40 saniyeden önce gerçekleştirebilmekte ancak sistem dört istasyon ile

modellendiğinde ve trenlerden biri 1. istasyondan diğeri 4. istasyondan hareket ettiğİ durumda, 4. istasyondaki tren sadece %25 yüklenme durumunda kalkışını 50 saniye içinde gerçekleştirebilmektedir. %50, %75 ve %100 yüklendiğinde ise 50 saniye içinde kararlı haline ulaşamamaktadır. Bu sebeplerle 750 V DC beslemeli raylı sistemlerde, cer trafo merkezlerinin 3. rayı besledikleri noktalar arasında 3 km'den fazla mesafe bulunmamalıdır

İki trenli, dört istasyonlu, iki cer trafo merkezli sistemde trafo merkezleri sistemi hem baştan ve sondan beslediğİ durumda hem de baştan ve ortadan beslediğİ durumda trenler kalkışlarını farklı karakteristikler ile yapsa da kabul edilebilir seviyeler ile seyirlerine devam etmektedir.

Dört trenli, dört istasyonlu, dört cer trafo merkezli sistemde, kalkış sırasında ve kalkışlarını tamamladıktan sonra, bazı cer trafo merkezlerinin 3. rayı besleyen hatlarının devre kesici ile kesilmesi modellenmiştir. Bu durumda trenlerin her birinin kesintisiz bir şekilde hareketlerini sürdürmesi önemlidir. Bu sebeple aralarında 1-2 km bulunan her istasyon, bir cer trafo merkezi ile beslenmelidir. Bu sayede hem gerilim düşümünden dolayı oluşabilecek problemlerin üstesinden gelinir hem de gerektiğİ zaman trafo merkezleri birbirlerinin yedeğİ olarak sistemi besleyebilir ve trenler kesintisiz olarak yolcu taşımalarına devam edebilir.

6.2 Harmonik Analizler

6 darbeli doğrultucu kullanılan modellerde gerilim dalgasına bağı toplam harmonik bozunum değeri hiç bir zaman %2.5 altına inmemiştir. Akıma bağı toplam harmonik bozunum değeri ise kullanılan her modelde %19 üzerindedir. Bu sebeple 6 darbeli doğrultucunun enerji kalitesine çok fazla fayda sağlamadığından raylı sistemlerde kullanımı uygun görünmemektedir.

12 darbeli doğrultucu kullanılan modellerde gerilim dalgasına bağı toplam harmonik bozunum değeri bir trenli, bir istasyonlu sistemde rotor hızına bağı yüklenme durumunda %3.59 değerindedir. Motorların sabit değeri ile yüklenmesi durumunda da %2.5 altına inmemiştir. İki trenli, iki istasyonlu sistemde 1 cer trafosu kullanılması durumunda gerilime bağı toplam harmonik bozunum değeri %5.53 iken 2 cer trafo merkezi kullanılması durumunda %6.17 değerine ulaşmaktadır. İki trenli, dört istasyonlu, iki cer trafo merkezli modelde değeri %6 üzerindedir. İki trenli, dört

istasyonlu, dört cer trafo merkezli modelde değerler %5.8 üzerindedir. Dört trenli, dört istasyonlu modelde ise her durumda %6 üzerindedir. Raylı sistemlerde, 12 darbeli doğrultucular, aktif veya pasif filtre gibi ekipmanlar ile kullanıldığında, toplam harmonik bozunumu kabul edilebilir seviyelere indirilebilmektedir. Ancak bu ekipmanlar sistemin hacmini ve ağırlığını arttırmaktadır.

18 darbeli ve 24 darbeli doğrultucu kullanılan modellerde (dört istasyonlu ve dört trafo merkezli modeller hariç) gerilim dalgasına bağlı harmonik bozunum değerleri %2.5'in altındadır. 24 darbeli modellerde akıma bağlı harmonik değerleri, 6 darbeli, 12 darbeli ve 18 darbeli modellerin akıma bağlı harmonik değerlerine göre oldukça düşüktür.

6 darbeli doğrultucu kullanan sistemler 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25... harmonik bileşenlerini üretmekte, 12 darbeli doğrultucu kullanan sistemler 11., 13., 23., 25... harmonik bileşenlerini üretmekte, 18 darbeli doğrultucu kullanan sistemler 17., 19... harmonik bileşenlerini üretmekte, 24 darbeli doğrultucu kullanan sistemler ise 23., 25... harmonik bileşenlerini üretmektedir.

18 darbeli ve 24 darbeli modellerde, LC filtresinin C değeri arttırılırken, L değeri aynı oranda azaltıldığında, hem gerilim dalgasına ait toplam harmonik bozunum değerlerinin düştüğü, hem de akım dalgasına ait toplam harmonik bozunum değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Trenlere ait her bir motorun şaftı nominal yükün %25'i, %50'si, %75'i ve %100'ü oranında yüklenmiştir. Uygulanan nominal yük oranı arttıkça gerilim dalgasına bağlı toplam harmonik bozunum değerleri azalmakta, akıma dalgasına bağlı toplam harmonik değerleri ise artmaktadır.

Bir trenli, bir istasyonlu, 12 darbeli modelde, doğrultucu trafosu olarak birincil sargısı üçgen, ikincil sargıları üçgen ve yıldız olan trafolar yerine zigzag trafolar kullanılması durumunda, gerilim dalgasına ait toplam harmonik bozunum değeri, motor rotorlarının %25, %50, %75 ve %100 yüklenme durumlarının her birinde düşmektedir, akım dalgasına ait toplam harmonik bozunum değerleri ise her yüklenme durumunda yükselmektedir.

6 darbeli doğrultucuya göre kıyaslandığında 12 darbeli doğrultucu yaklaşık 1.5 ile 2 katı, 18 darbeli doğrultucu yaklaşık 3 katı ve 24 darbeli doğrultucu ise yaklaşık 3.5 katı hacim yer kaplar ve doğrultucuların darbe sayısı arttıkça ilk yatırım maliyetleri de artmaktadır.

6.3 Gelecek Çalışmalar

Geliştirilen bu MATLAB/Simulink modelini, trenlere ve sisteme ait birçok analizi yapabilmek için daha da geliştirmek mümkündür. Rayların eğimlere sahip olması, mesafe alındıkça değişen hat empedansları, trenlerin farklı özelliklerdeki ekipmanlar ile donatılmış olması, kompanzasyon sistemi vb. gibi bu çalışmada ihmal edilen özellikler ve sistemler modele dâhil edilebilir. 750 V DC besleme yerine 1500 V DC, 3000 V DC veya başka gerilimlerdeki sistemler mevcut olan parametreler değiştirilip modellenebilir. Oluşturulacak bu modeller ile enerji kalitesi, enerji verimliliği, gerilim düşümü, ray akım kapasitesi, kısa devre veya başka arıza durumları ve bunlar gibi sistemi ilgilendiren birçok durum için analizler yapılabilir.

Toplam harmonik bozunumların istenen seviyelere indirilmesi için 6, 12, 18 ve 24 darbeli doğrultucular yerine 36 darbeli doğrultucu gibi farklı darbe sayısına sahip doğrultucular ile pasif ve aktif filtreler ile modellemeler yapılabilir.

Son yıllarda hızla gelişen güç elektroniği teknolojisinin raylı sistemler üzerinde etkisinin oldukça fazla olduğu bu tez çalışmasında gözler önüne serildi. Silisyum Karbür (SiC: silicon carbide) ve Galyum Nitrit (GaN: gallium nitride) gibi malzemelerin güç elektroniği teknolojisini ileriye taşıdığı bugünlerde, bu ve benzeri yeni teknolojilerin raylı sistemlerde kullanılması durumunda ne gibi kazançlar sağlayabileceği üzerine araştırmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Pektaş, İ.** (2017). *Raylı Ulaşım Sistemleri Sektör Analizi*. Erişim tarihi: 30.3.2018, erişim adresi: <http://www.anadoluraylisistemler.org/>
- [2] **Özmen, İ.** (2014). *750 V DC Cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellenmesi, benzetimi ve analizi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. ve Schneider, E.** (2009). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance*. England: Publicis Publishing.
- [4] **Arlı, V.** (t.y.). *Kent içi raylı sistemler*. Erişim tarihi: 19 Mart 2018, erişim adresi: http://www.emo.org.tr/ekler/2c1c8c7efa8da3f_ek.pdf?dergi=629
- [5] **Aydın, T.** (2012). *Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **İmrak Erdem, C. ve Salman, Ö.** (t.y.). *Füniküler sistemler ve Türkiye’de kullanımı*. Erişim tarihi: 19 Mart 2018, erişim adresi: http://www.emo.org.tr/ekler/de14944130a1206_ek.pdf
- [7] **Açıkbaş, S., Turan Söylemez, M.** (t.y.). *Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation*. Erişim tarihi: 20 Mart 2018, erişim adresi: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR04/CR04095FU.pdf>
- [8] **Gamit, K. J., Chaudhari, K.** (2016). Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its thd comparison for power quality issues, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 03 (1), e-ISSN: 2395 -0056.
- [9] **Alvaro, O. M., Le-Huy, H. ve Lavoie, C.** (t.y.). Modeling and simulation of a 24-pulse transformer rectifier unit for more electric aircraft power system. Erişim tarihi: 17 Aralık 2017, erişim adresi: theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/30250/30250_anxA.pdf
- [10] **Oura, Y., Mochinaga, Y. ve Nagasawa, H.** (t.y.). *Railway electric power feeding systems*. Erişim tarihi: 21 Mart 2018, erişim adresi: http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr16/pdf/f48_technology.pdf.
- [11] **Cotton, I., Charalambous, C., Aylott, P., ve Ernst, P.** (2005). Stray current control in dc mass transit systems. *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 54, no. 2.
- [12] **Mergen, F. ve Zorlu S.** (2009). *Elektrik Makineleri II, Asenkron Makineler*. İstanbul: Birsan Yayınevi

- [13] **Nostaljik tramvay hakkında.** (t.y.). Erişim tarihi: 17 Mart 2018, erişim adresi: <http://www.iETT.istanbul/tr/main/pages/nostaljik-tramvay-hakkinda/92>
- [14] **Sarah, E. B.** (t.y.). *Maglev train*. Erişim tarihi: 24.03.2018, erişim adresi: <https://www.britannica.com/technology/maglev-train>
- [15] **Monoray inceleme raporu.** (t.y.). Erişim tarihi: 19 Mart 2018, erişim adresi: http://www.ubak.gov.tr/BLSM_WIYS/DLH/tr/DOKUMAN_SOL_MEN_U/Rayli_Sistem_Kriterleri/20140228_153201_10288_1_10315.pdf
- [16] **What is high speed rail.** (t.y.). Erişim tarihi: 24 Mart 2018, erişim adresi: <https://uic.org/highspeed#What-is-High-Speed-Rail>
- [17] **World high speed rolling stock.** (t.y.). Erişim tarihi: 20 Mart 2018, erişim adresi: https://uic.org/IMG/pdf/20180129_data_of_hs_trains.pdf
- [18] **Url-1** <<https://www.toshiba.co.jp/>>, erişim tarihi: 31.03.2018.
- [19] **Bert, H.** (t.y.). *Medium voltage switchgear for a sustainable industry*. Erişim tarihi: 20 Mart 2018, erişim adresi: <http://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/rail/whitepaper/medium-voltage-switchgear-for-a-sustainable-industry.pdf>
- [20] **British Standards EN 50163.** (2007). *Railway applications – Supply Voltages for Traction Systems*. British Standard Institution.
- [21] **IEC 60850.** (2007). *Railway Applications – Supply voltages of traction systems, 3rd edition*. International Standard.
- [22] **Url-2** <<https://www.metro.istanbul/>>, erişim tarihi 20.03.2018.
- [23] **Url-3** <<https://www.powellind.com/>>, erişim tarihi: 20.03.2018.
- [24] **Akira, H., Hiroaki, M. ve Atsushi, S.** (t.y.). *New type feeding transformer for ac traction*. Erişim tarihi: 23 Mart 2018, erişim adresi: https://uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/I.3.3.6.4.pdf
- [25] **Url-4** <<https://tr.mersen.com/>>, erişim tarihi: 20.03.2018.
- [26] **Url-5** <<http://www.em.com.tr/>>, erişim tarihi: 23.03.2018.
- [27] **DC current.** (t.y.). Erişim tarihi: 23 Mart 2018, erişim adresi: <http://www.railssystem.net/stray-dc-current>
- [28] **Chengtao, W., Wei, L., Yuqiao, W., Shaoyi, X. ve Mengbao, F.** (2017). *Stray current distributing model in the subway system: A review and outlook*. Erişim tarihi: 23.03.2018, erişim adresi: <<http://www.electrochemsci.org/papers/vol13/130201700.pdf/>>
- [29] **Electric Traction Control.** (t.y.). Erişim tarihi 24.03.2018, erişim adresi : <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/train-equipment/electric-traction-control-d.html>
- [30] **Url-6** <<http://www.alstom.com/>> erişim tarihi 30.03.2018.
- [31] **Url-7** <<https://www.siemens.com/>>, erişim tarihi 30.03.2018.
- [32] **Bogies.** (t.y.). Erişim tarihi: 31.03.2018, erişim adresi: <<http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/bogies.html>>
- [33] **IEEE Standard 519™.** (2014). *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. International Standard.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ulaş CİHANGİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 1982, İskenderun
E-posta : ulascihangir@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2002 – 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

Yüksek lisans: 2007 – 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı