



**RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN ÖRNEK BİR CER TRAFOSUNUN
ANALİZİ VE TASARIMI**

Merve MUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Merve MUN tarafından hazırlanan “RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN ÖRNEK BİR CER TRAFOSUNUN ANALİZİ VE TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mahir DURSUN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Murat Hüsnü SAZLI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 18/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Merve MUN

18/09/2019

RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN ÖRNEK BİR CER TRAFOSUNUN ANALİZİ VE TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Merve MUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Raylı sistemlerde fosil yakıt (motorin) kullanan lokomotiflerden elektrik enerjisi ile çalışan lokomotiflere ve tren setlerine geçilmesi ile birlikte, transformatör merkezleri bu sistemler için önemli enerji noktaları olmuştur. Yapısı nedeni ile çok korelasyona sahip raylı sistemlerin elektrifikasyonunda ve demiryolu taşıtlarının hareket etmesinde transformatörler önemli rol oynamaktadır. Mevcut çalışmada, öncelikle transformatörler hakkında temel bilgiler sunulduktan sonra, çeşitleri ve kullanım alanları detaylandırılmıştır. Öncelikle raylı sistemlerde özel ihtiyaçlara göre transformatörlerin hangi durumlarda ve nasıl kullanıldığı belirtilmiş ve örnek bir raylı sistem için uygun görülen 25 MVA'lık AC tipi bir transformatör dizayn edilerek Matlab Simulink ile elde edilen çıktılar, üretimi yapan firmanın test raporlarıyla aynı parametreler bazında karşılaştırılıp bu karşılaştırma sonucu verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada öncelik, raylı sistemin elektrifikasyon işlemlerinde seçilen transformatörün tasarım ve üretim özelliklerini, sistem üzerindeki işlev ve etkilerini ortaya koymaktır. Literatür taraması sonrası transformatör üreten bir kuruluştaki ortak çalışılarak teknik özellikler belirlenmiş ve transformatörü talep edip, kullanacak kuruluştan ilgili transformatör için spesifikasyonlar tespit edilerek, raylı sistemin ihtiyacı olan 25 MVA, 3Φ/1Φ 154/27.5 kV AC tipi transformatörün tasarım ve üretim kriterleri tamamlanarak 3Φ 154/1Φ 27.5 kV trafosunun Matlab modeli, prototip üretimi ve test neticeleri verilmiştir.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Raylı Sistemler, Enerji, Cer Trafosu, AC Güç Trafosu.

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

25 MVA TRANSFORMERS USED IN RAILWAY SYSTEMS

(M.Sc. Thesis)

Merve MUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

With the transition from locomotives using fossil fuel (diesel) to railway locomotives and train sets in rail systems which works with electricity, transformer technology became an important energy point for these systems. Transformers play an important role in the movement of railway vehicles and in the electrification of railway systems which have a high correlation due to its structure. In this work, after presenting the basic information about the transformers, their types and area of usages have been mentioned. Firstly, it is stated in which situations and how transformers are used according to special needs in rail systems and then, for an exemplary rail system, a suitable 25 MVA AC type transformer was compared with a transformer, that has the same power and meets the city needs on the same parameters. In addition, a comparison has been made with another transformer which is made of same material and has same power, on the basis of efficiency. In this study, the priority is to reveal the design and production characteristics of the selected transformer in the electrification process of the rail system and to determine the functions and effects on the system. After the literature review, technical specifications to be worked together were determined in a transformer producing company, and after getting the transformer which meets the demanding company's need, the design and production criteria of the 25 MVA, 3 Φ /1 Φ 154/27.5 kV AC type transformer that the rail system needs are completed and Transformer Matlab Modelling, 3 Φ 154/ 1 Φ 27.5 kV prototype production and test results are presented.

Science Code : 90513

Keywords : Railway systems, Energy, Cer Transformers, AC power transformers

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tezimin araştırma aşamasında, yön tayininde ve tamamlanmasında bana destek olan değerli hocam sayın Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na bana ayırdıkları değerli zaman ve sağladıkları destek için minnettarım. Tezimin başlangıcından bitimine kadar bana inanan, benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme ve asistan arkadaşım Arş. Gör. Mustafa SAKA'ya da teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Matlab Simulink uygulamasındaki desteklerinden dolayı Dr. Ali MAMİZEDE'ye, ASTOR Trafo A.Ş. Ar-Ge Merkezi Müdürü sayın Fatih IŞIK'a da öneri ve test işlemlerindeki desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. TRANSFORMATÖRÜN TANIMI VE KULLANIM AMAÇLARI	9
3.1. Transformatörlerin Çalışma Prensipleri.....	10
3.2. Transformatör Çeşitleri, Kullanım Alanları ve Amaçları.....	10
3.2.1. Nüve tipine göre.....	11
3.2.2. Kullanım amacına göre	13
3.2.3. Çalışma ortamına göre	15
3.2.4. Faz sayısına göre.....	15
3.2.5. Soğutma şekillerine göre transformatörler.....	16
4. RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN TRANSFORMATÖRLER..	21
4.1. Besleme Transformatörleri	21
4.1.1. Katener oto transformatörleri.....	22
4.1.2. Akım çekiş (cer sistem) besleyici transformatörler	24
4.2. Araç Üstü Transformatörler.....	25
4.2.1. Yardımcı transformatörler	25

4.2.2. İzolasyon transformatörleri.....	26
5. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ İLETİMİ	27
5.1. Akım Toplama Sistemleri.....	34
5.2. Standart bir katener sistemi	36
6. TÜRKİYE'DEKİ RAYLI SİSTEM BESLEME TRAFOLARI.....	45
6.1. Raylı Sistemlerde Geleneksel Transformatör Yapısı	45
6.2. Metro.....	45
6.3. YHT	46
6.4. İzban	46
7. RAY HATTINDA KULLANILAN CER SİSTEMLERİ VE MAKİNE ÖZELLİKLERİ.....	47
7.1. Raylı Sistemlere Uyumlu 25 MVA Transformatör Tasarımı ve Üretimi.....	49
7.2. Transformatörün Kayıpları	52
7.3. Transformatörde Eşdeğer Devrenin İndirgenmesi.....	54
7.3.1. Tek fazlı transformatörlerde kayıpları göz önüne almadan inceleme...	54
7.3.2. Tek fazlı transformatörlerde kayıpları göz önüne alarak inceleme	56
7.3.3. Transformatörlerde eşdeğer devre indirgemesi	57
7.3.4. Transformatörün tam eşdeğer devresi ve analizi	58
7.4. Transformatörlerde Güç ve Verim.....	61
8. UYGULAMA.....	63
8.1. 25 MVA Şehir Şebeke Transformatörü ile Tez Çalışmasında Gerçekleştirilen CER Transformatörünün Karşılaştırılması ve Tasarım Kriterlerinin Analizi.....	63
8.1.1. Boşta çalışma durumu ($pf=1$)	65
8.1.2. Yarı yükte çalışma durumu ($pf=1$).....	67
8.1.3. Tam yükte çalışma durumu ($pf=1$)	68
8.1.4. Yarı yükte çalışma durumu ($pf=0,8$).....	70

	Sayfa
8.1.5. Tam yükte çalışma durumu ($pf=0,8$)	72
8.1.6. Verim değerlerinin karşılaştırılması	73
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Vakum tipli AC kesici etiket bilgileri.....	34
Çizelge 5.2. 350 km/h hıza uygun seyir telinin karakteristikleri	41
Çizelge 8.1. $\cos\alpha=1$ için verim değerleri karşılaştırılması	73
Çizelge 8.2. $\cos\alpha=0.8$ için verim değerleri karşılaştırılması.....	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Basit bir transformatör sistemi.....	9
Şekil 3.2. Transformatör primer ve sekonder sargıları ve çekirdek.....	9
Şekil 3.3. Çekirdek tipi nüve gösterimi	12
Şekil 3.4. Mantel tipi nüve gösterimi.....	12
Şekil 3.5. Dağıtılmış tip sargılı trafonun temsili resmi.....	13
Şekil 3.6. Oto transformatör açık şeması.....	13
Şekil 3.7. İzolasyon (yalıtım) transformatörleri.....	14
Şekil 3.8. Düşük güçlü gerilim düşürücü transformatör	14
Şekil 3.9. Ölçü transformatörleri: (a) gerilim (b) akım trafoları.....	15
Şekil 3.10. Yer altı tipi transformatör	15
Şekil 3.11. Çok fazlı transformatör örneği.....	16
Şekil 3.12. Yağlı tip bir dağıtım trafosu	17
Şekil 3.13. Yağlı tip transformatör örneği	17
Şekil 3.14. Kuru tip trafo örnek resmi	18
Şekil 3.15. (a) ONAN soğutma (b) OFAN soğutma.....	19
Şekil 3.16. OFAF ve ODAF soğutma prensibi	19
Şekil 3.17. OFWF soğutma prensibi.....	20
Şekil 3.18. Bazı transformatör çeşitleri.....	20
Şekil 4.1. Katener sistem beslemesi.....	21
Şekil 4.2. Katener besleme sistemi.	22
Şekil 4.3. Yüksek hızlı trenlerde (tramvay) kullanılan besleme transformatörü.	25
Şekil 5.1. 25kV AC katener besleme sistemi.....	27
Şekil 5.2. Faz dengesizliği azaltmak için scott trafo kullanımı	28
Şekil 5.3. Üç transformatörlü AC sistem diyagramı.....	29
Şekil 5.4. 2 x 25kV AC oto transformatörlü besleme sistemi	30

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. 2 x 25kV AC AT besleme sistemi katener-ray bağlantısı	30
Şekil 5.6. 25kV AC BT tipli sistem	31
Şekil 5.7. Katener direği üzerine asılmış 1:1 yükseltici transformatör	32
Şekil 5.8. Tren akım toplama sistemleri çeşitleri	35
Şekil 5.9. Standart havai katener sistemi	38
Şekil 5.10. Basit katener direği montaj şeması	38
Şekil 5.11. (a) Basit katener sistemi, (b) Pandül (c) Taşıyıcı tel.	39
Şekil 5.12. Farklı tipte havai katener hatları	39
Şekil 5.13. Basit askı katener (üst) ve standart havai katener (alt)	40
Şekil 5.14. Seyir teli ve kesiti	40
Şekil 5.15. Seyir teli dezeksmanı	42
Şekil 5.16. Tipik havai katener sistemine ait FEA analizi sonucu	42
Şekil 5.17. Tren pantografinin seyir telinde oluşturduğu osilasyon	43
Şekil 5.18. (a) Ağırlık sistemi, (b) Sabit gergili, (c) Otomatik gergili sistem	44
Şekil 5.19. Otomatik gergi sistemi	44
Şekil 7.1. Çekirdek tipi bir fazlı transformatör	55
Şekil 7.2. Transformatörde akı çizgileri	56
Şekil 7.3. Transformatörün yüklü çalışmasında eşdeğer devre	57
Şekil 7.4. Sekonderin primere indirildiği tam eşdeğer devre	58
Şekil 7.5. Transformatör kısa devre eşdeğer devresi	60
Şekil 8.1. Benzetim çalışmalarında kullanılan benzetim şeması	64
Şekil 8.2. Boşta çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$)	65
Şekil 8.3. Boşta çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği ($pf=1$)	66
Şekil 8.4. Boşta çalışma durumunda verim grafiği ($pf=1$)	66
Şekil 8.5. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$)	67
Şekil 8.6. Yarı yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği ($pf=1$)	67

Şekil	Sayfa
Şekil 8.7. Yarı yükte çalışma durumunda verim grafiği (Yakınlaştırılmış) ($pf=1$)	68
Şekil 8.8. Tam yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$).....	68
Şekil 8.9. Tam yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği ($pf=1$)	69
Şekil 8.10. Tam yükte çalışma durumunda verim grafiği ($pf=1$)	69
Şekil 8.11. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$).....	70
Şekil 8.12. Yarı yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=0.8$ grafiği ($pf=1$)	71
Şekil 8.13. Yarı yükte çalışma durumunda verim grafiği ($pf=0.8$).....	71
Şekil 8.14. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=0.8$).....	72
Şekil 8.15. Tam yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=0,8$ grafiği ($pf=0.8$)	72
Şekil 8.16. Tam yükte çalışma durumunda verim grafiği ($pf=0.8$)	73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Gaz izoleli AC kesiciler	33
Resim 5.2. Hava izoleli AC kesiciler	34
Resim 5.3. Tipik bir pantografin parçaları	36
Resim 5.4. Trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

kW

Kilowatt

MW

Megawatt

α

Faz Açısı

R

Direnç

I

Akım

V

Gerilim

P_{in}

Giriş gücü

P_{out}

Çıkış gücü

Kısaltmalar

Açıklamalar

Cer

Çekiş trafosu

FEMM

Sonlu elemanlar metodu manyetik

RES

Elektrikli demir yolu sistemleri

1. GİRİŞ

Elektrikli demiryolu sistemleri (RES), dünya çapında yaygın bir toplu taşıma aracı olarak kullanılmaktadır. Büyük hızla tüm dünyaya yayılmıştır. Diğer birçok ülke gibi Türkiye de dünya çapında Yüksek Hız / Yüksek Kapasiteye sahip olmak için çok çalışmaktadır. AC güç kaynağı sistemini kullanan demiryolu hatlarında (HS / HC) çekiş güç kaynağı veya çekiş elektrik şebekesi, elektrikli demiryolu sisteminin güç ihtiyacını karşılayan bir elektrik şebekesidir. Demiryolu güç kaynağı sistemi, elektrikli trenleri sürmek için elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Elektrik çekiş sistemlerindeki gelişimler çok çeşitli ilkelere ilham veren çeşitli elektrifikasyon sistemleri üretti [1, 2].

Hiç şüphe yok ki, hükümetin mevcut demiryolu inşaat planı büyük önem taşımaktadır. Hükümet, demiryolu taşımacılığını ülkenin ulaşım sisteminde önemli bir alternatif olarak planlamaktadır. Demiryolu karayolu taşımacılığına göre daha fazla avantaja sahiptir. Demiryolları 250-300 km'den daha uzun mesafelerde yük taşımacılığı için daha uygundur. Demiryolu taşımacılığı yılda bir milyon tondan fazla taşınan ve bir milyon tona kadar olan kritik trafik rakamlarında daha ucuzdur ve devlet fonu olmadan ekonomik olarak geride kalabilir.

Son araştırmalarda, demiryollarının işletme maliyetlerini karşıladığı ve rekabetçi maliyetle normal sermaye getirisi elde ettiği gösterilmiştir. Enerji koşullarında demiryolu, kamyonlarla 24T / km'ye kıyasla litre başına 80T / km'yi alır ve demiryollarının elektrifikasyonu onu dizel trenden altı kat daha ucuz hale getirerek avantajını artırır [3].

Çekiş gücü besleme sistemi, en geniş haliyle geniş bir elektrik devresidir. Güç kaynağı, tekli veya çoklu kaynaklarda olabilir ve besleme düzenlemeleri farklı sistemlerde farklılık gösterir.

Çekiş gücü besleme sistemi, üç fazlı güç iletim sisteminden güç almak ve tek fazlı AC güç sistemi elektrikli demiryolunda sürülen tren için güç sağlamak için kullanılan elektrik şebekesidir. Traksiyon trafo merkezi, traksiyon şebekesi, ayırma trafo merkezi, şalter trafo merkezi ve diğer parçalardan oluşmaktadır. Çekiş gücü besleme sistemi birkaç besleme modu uygulayabilir; doğrudan güç modu (TR), geri dönüş teli modu (DR) ile doğrudan güç, trafo güç beslemesini (BT) artırın, otomatik trafo güç modunu (AT), gelişmiş iletken

besleme moduyla doğrudan güç ve benzeri. Geri dönüş teli ile doğrudan besleme sisteminin çekiş ağı basit ve güvenilir bir yapıya sahiptir, üstten geri dönüş telleri ray üzerinde paralel olarak bağlanır, bu da ray potansiyelini etkili bir şekilde azaltabilir ve iletişim hatlarına paraziti engeller. Basit ve güvenilir bir şekilde düşük işletme ve bakım ücretleri ile çalışabilir ve proje yatırımı ve inşaat maliyeti düşüktür. Çekiş trafo merkezinin farklı trafoların bağlantı şeması vardır; bunlar tek fazlı bağlantı, tek fazlı (3 faz) Vv bağlantı, 3 faz YNd11 (3 faz ve 2 farklı kapasiteye sahip 2 faz) bağlantı, Scott bağlantısı ve empedans eşleştirme balans bağlantısıdır. Bu nedenle, bu tez tek fazlı bağlantı trafo tipine [4] odaklanmaktadır.

Bu tezde giriş bölümünden sonra ikinci bölüm olarak literatür çalışması yapılmaktadır. Literatür çalışmasında son yıllarda bu alanda çalışılan makaleler incelenerek öncelikle, raylı sistemin elektrifikasyon işlemlerinde seçilen transformatörün tasarım ve üretim özellikleri, sistem üzerindeki işlev ve etkileri ortaya koyulmaktadır.

Üçüncü bölümde öncelikle transformatörler hakkında temel bilgiler sunulduktan sonra, çeşitleri ve kullanım alanları detaylandırılmaktadır.

Dördüncü bölümde raylı sistemlerde kullanılan transformatörlerden bahsedilerek, katener sistem üzerindeki işlev ve etkileri ortaya koyulmaktadır.

Beşinci bölümde raylı sistemlerde enerji iletiminden bahsedilecek sonraki bölümde ise Türkiye’deki raylı sistem besleme trafolarına geçiş yapılmaktadır.

Yedinci bölümde ray hattında kullanılan cer sistemleri ve makine özellikleri incelenerek, ilgili hattın şartnamesindeki bilgilere yer verilecek ve trafoda ihtiyaç duyulan özellikler belirlenmektedir. Bu bölümde boşa ve yükte kayıplar gibi özel durumlara değinilerek, trafo eşdeğer devresine ait temel bilgiler verilip kısa devre analizi için gereken matematiksel formülasyonlara yer verilmektedir. Burdan yola çıkılarak güç ve verim hesaplarının nasıl yapılacağı incelenmektedir.

Bir sonraki bölümde, simülasyon çalışmalarına geçilerek uygulama aşamasına geçilecek ve yedinci bölümde matematiksel formülasyonlarla tasarlanan analiz gerçekleştirilmektedir. Örnek bir raylı sistem için uygun görülen 25 MVA’lık AC tipi bir transformatör dizayn edilerek Matlab Simulink ile elde edilen çıktılar, üretimi yapan firmanın test raporlarıyla aynı

parametreler bazında karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucu verilerin birbirleriyle uyumlu olup olmadığı tablolar halinde ortaya konmaktadır.

Dokuzuncu bölümde sonuç ve önerilerden bahsedilecek, raylı sistemin ihtiyacı olan 25 MVA AC tipi özel bir transformatörün tasarım ve üretim kriterlerinin nasıl tamamlandığıyla ilgili nelere dikkat edileceği vurgulanmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

E. Pilo, ve arkadaşlarının (2003) yaptığı çalışmada, yüksek hızlı demiryolları için azaltılmış bir 2x25 kV elektrik sistemi modeli sunmaktadır. Önerilen indirgenmiş modelin ve 1x25 kV sisteminin yapısı benzerdir. Bu azaltılmış model, yüksek hızlı demiryolları güç kaynağı sistemlerinin tasarım optimizasyon programına dahil edilmek üzere geliştirilmiştir. Azaltılmış modelin doğruluğu, yüksek hızlı demiryolları için ayrıntılı bir güç kaynağı sistemi modeli ile kontrol edilir. Sonuç olarak, 2x25 kV sistemlerini daha basit 1x25 kV sistemine benzer şekilde modellemek için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Bu model, ikili sistem davranışını geleneksel modellerden daha kapsamlı hale getirir. Ayrıca, kalitatif ve kantitatif analiz, hassasiyetten ödün vermeden daha kolay yapılabilir [5].

Sisi Li (2010) çalışmasında, demiryolu elektrifikasyon sisteminin (RES) ve özellikle 2x25 kV demiryolu enerji sistemi için elektrik dağıtım sisteminin tasarımının özelliklerini tartışmaktadır. Demiryolu güç kaynaklarının (RSP) analizi, sabit hareketli yükleri, dinamik olarak değişen yük tiplerini (sabit akım / sabit güç) ve özel ağ yapısını içeren benzersiz bir yük akışı problemi sunmaktadır. Çalışılan sistem, çift izlemeli ototransformer güç kaynağı sistemleridir. Caltrain (California Banliyö Demiryolu) sistemin halihazırda mevcut olandan daha doğru bir elektrik modeli kullanılmaktadır. Çalışma, incelenen sistemdeki yük akış problemini modellemek ve çözmek için Matlab / Simulink tarafından sağlanan SimPower araç kutusunun kullanılmaktadır. Sonuç olarak, RES'in SimPower'da başarılı bir şekilde modellenebileceği ve çözülebildiği bulunmuştur [6].

Burak Kurdak (2010) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli demiryolu sisteminin tanıtılması ve 25 kV AC demiryolu sistemindeki güç kalitesinde karşılaşılan problemleri azaltmak amaçlanmıştır. Önerilen topolojinin güç şebekesine faydası olup olmadığı ve etkileri araştırılmıştır. Yöntemin farklı iki kısmı bulunmaktadır. İlki, reaktif ve harmonik akımı telafi edecek türden, EPLL tabanlı, tek fazlı aktif güç filtresidir. İkinci olarak, Scott trafonun ağdaki gerilim dengesizliğini azaltmasıdır. Bu yöntemin etkinliği ve performansı PSCAD / EMTDC tarafından çalışılan simülasyonlarla incelenmiştir [7].

Tayfun Aydın (2012) tarafından yapılan çalışmada, hafif raylı sistemlerde güvenilirlik analizi çalışılmış ve bu sistemlerin etkilendiği faktörler araştırılıp sunulmuştur. Çalışmanın amacı hafif raylı sistemlerdeki elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi yapıp bundan

sonraki tasarlanacak sistemlere bir kaynak referans oluşturmaktır. Habipler-Topkapı raylı sistem hattı örnek sistem olmak üzere seçilmiştir ve bu hattaki çekiş gücü sistemi için güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, örnek sistem için bir model oluşturulmuş ve analiz için kullanılması öngörülen veriler önceden belirlenmiştir. Sonuçta, güvenilirlik analizi yapılmış raylı sistemin bütünüyle enerjisiz kalma ihtimalinin son derece az olduğu görülmektedir [8].

Lars Abrahamsson (2012), tarafından yapılan çalışma, sabit sayıda güç sistemi düğümüyle tek bir optimizasyon probleminde Demiryolu güç kaynağı sistemlerinin (RPSS) optimum şekilde işletilmesi veya tasarlanmasının çeşitli yollarını özetlemektedir. Çalışma, daha kontrol edilebilir olmaları nedeniyle dönüştürücü beslemeli demiryollarına odaklanır ve gelecek için de daha yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmanın en uygun işletme kısmı temel olarak optimal güç akış kontrolleri ve HVDC beslemeli RPSS'lerde demiryolu dönüştürücü istasyonlarının birim taahhütleri ile ilgilidir. Modeller farklı beslemelere kolayca genelleştirilir ve rejeneratif frenlemeyle baş eder. Bu bölüm MINLP (karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama) problemlerini göz önünde bulundurur ve sorunun ana kısmı dışbükey olmayan doğrusaldır. Konsept bir makalede sunulmuştur. Problem formülasyonlarının nasıl modelleneyeceği konusu tek bir makalede tam olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak, demiryolu güç sisteminin daha iyi çalışmasıyla enerji tasarrufu potansiyelinin büyük olduğudur. Diğer bir sonuç, demiryolu güç sistemleri için yatırım planlama modellerinin yüksek gelişme potansiyeline sahip olmasıdır [9].

Milivoj Mandić, ve arkadaşlarının (2013) yaptığı çalışmada, Zagreb bölgesindeki elektrikli yolların bir kısmının güç beslemesi için öngörülen yeni inşa edilmiş çekiş trafo merkezinin tasarımı ve testinde uygulanan prosedürler açıklanmaktadır. Yeni çekiş trafo merkezinin güç kapasitesi, maksimum sefer zaman çizelgesi süresince yapılan yük akış hesabına göre belirlenmiştir. Test işletimi süresince, trafo merkezinin teknik performansını kanıtlamak ve çevre üzerindeki etkilerini doğrulamak için bir dizi ölçüm yapılmıştır. Çekiş sistemini besleyen elektrik şebekesinde güç kalitesinin ölçümü yapılmıştır. Ayrıca, çekiş istasyonunun içindeki ve çevresindeki elektriksel ve manyetik alanların ölçümleri yapılmıştır. Tasarım prosedüründeki bazı adımlar ve yeni bir çekiş istasyonunun test edilmesi çalışmada sunulmuştur. Güç yükü akışının simülasyonu için geliştirilen algoritma mevcut ağda test edilmiş ve daha sonra trafo ekipmanının derecelendirme parametrelerinin belirlenmesi için uygulanmıştır. Ayrıca, trafo merkezinin içindeki ve trafo merkezinin yakınındaki yolcu

istasyonundaki elektrik ve manyetik alanların ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler daha önce hesaplanan değerlerle iyi bir uyum göstermiştir [10].

Alan Župan ve arkadaşlarının (2013) yaptığı çalışmada, 110 kV iletim sisteminde elektrikli demiryolu sisteminin enerji kalitesi üzerindeki etkisi anlatılmaktadır. Diyet lokomotifli elektrikli demiryolu sistemi analiz edilerek ve EMTP-RV yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Akımlar ve gerilimler 110 kV ve 25 kV şebekelerine göre hesaplanmıştır. Ölçümler IEC 61000-3-6'ya göre analiz edilmiştir. Hesaplama sonuçları ve ölçümler, elektrik demiryolu sisteminin iletim sistemindeki güç kalitesi üzerindeki etkisinin özellikle demiryollarına özgü sıralı harmonikler şeklinde ifade edildiğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar diyet lokomotif modelinin deneysel olarak doğrulanması, tristör lokomotif modelinin geliştirilmesi ve iletim sistemindeki harmonik yayılımın analizine odaklanmaktadır [11].

Ronny Skogberg (2013), tarafından yapılan çalışmada, trenle ilgili güç akış hesaplamaları için farklı statik modeller sunulmuş ve kullanılmıştır. Dönüştürücü istasyonları için kullanılan bir önceki model, ayrıca birden fazla dönüştürücünün farklı yapılandırmalarını işlemek için de genişletilmiştir. Malmabanan şehri boyunca demir cevheri taşımacılığında kullanılan meşhur IORE tren için, kullanılabilir modüllerdeki mekanik hesaplamalarda güç sistemleri performansının etkilendiği gözlenmektedir. Amaç hem motor hem de rejeneratif frenleme sırasında, tren dönüştürücülerinin kontrolü değiştirildiğinde, güç sistemlerinin performansındaki değişiklikleri incelemektir. Güç sistemi modelinin oluşturulmasını ve simülasyon ortamının uygulanmasını kolaylaştırmak için, demiryolu güç sisteminin statik parçaları için önerilen bir düğüm modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, normal koşullar altında, kullanılan tren tarifi için, voltaj değişiminin tren çekiş performansını kısıtlamaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, daha yüksek rejeneratif fren gücüne sahip daha optimize bir güç faktörü kontrolünün veya reaktif güç üretiminin, altyapı yatırımlarına olan ihtiyacı sınırlamak veya verilen bir sistem yerleşimi için trafiği artırmak için kullanılabileceği de görülmüştür [12].

Halil Yıldıztekin (2016), tarafından yapılan çalışmada, Banliyö Tren Sisteminden örnekler incelenmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında, Ankara'daki Banliyö Tren Sisteminin kapasite ve etkinliğini artırmaya yönelik bir model önerisi oluşturulmuştur. Bu öneri, durak yerlerinde yapılacak revize çalışması, istasyon ve peronların düzenlenmesi, işletme için

oluşturulan modeli, güzergahın geliştirilmesi ve veri tabanının yönetimi olacak şekilde beş temel bileşenden oluşmaktadır. Bu modelin önerisinden önce, Ankara’da yapılan yolculukların günde %0,6’sı banliyö trenleriyle yapılırken, bu modelin uygulanmasının ardından, çalışmanın kapsamında incelenen gelişmiş olan ülkelerin büyükşehirlerindeki taşıma oranı hedeflenerek, taşıma oranı %10’a çıkarılmıştır [13].

Darshit Patel ve arkadaşlarının (2017) yaptığı çalışmada, manyetik devre teorisi ve sonlu elemanlar metodu manyetik (FEMM) içeren bir dağıtım transformatörü tasarımını özetlemektedir. Dağıtım transformatörü, bu çalışmada 25 KVA, 11 / 0.433 kV ve 11 / 0.25 kV çıkış değerleri için tasarlanmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi Magnetics (FEMM), düşük frekanslı manyetik ve elektrostatiklerde 2B düzlemsel ve eksenel simetrik problemleri çözmek için sonlu bir eleman paketidir. Ayrıca, mühendislere tasarımdaki elektriksel gerilimi daha doğru bir şekilde ölçmek için önemli bir yol sağlamıştır. Sonlu elemanlar metodu manyetik (FEMM), önerilen transformatör tasarımında akım yoğunluğu gibi başlangıç varsayım verilerinin kontrol edilmesi ve temin edilmesi için analiz edilmiştir [14].

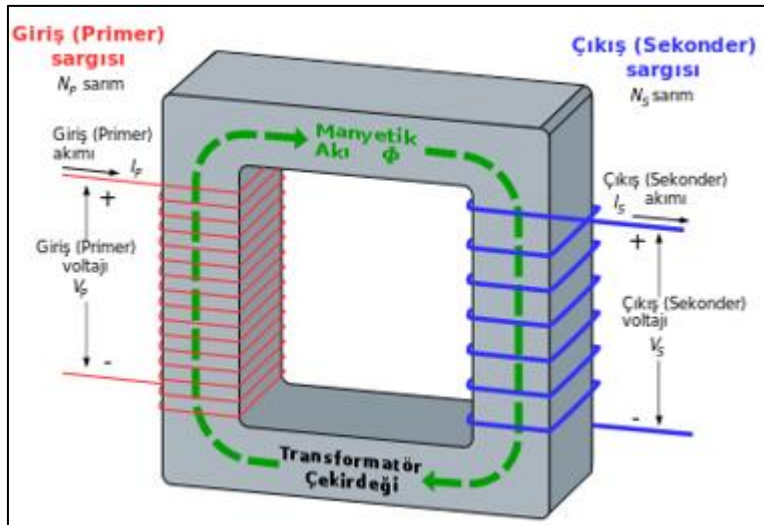
3. TRANSFORMATÖRÜN TANIMI VE KULLANIM AMAÇLARI

Transformatör, iki veya daha fazla devre arasındaki elektrik enerjisi aktarımını elektromanyetik indüksiyonla sağlayan bir elektrik makinasıdır. Transformatörler AC devrelerinde kullanılmakta olup, frekans değerini değiştirmeden, gerilim ve akım değerlerinde istenilen değişimi gerçekleştirirler [15].



Şekil 3.1. Basit bir transformatör sistemi [16]

Transformatörler; ince, silisli saclardan (silis: çakmaktaşı, kum, kuvars gibi silisyumun oksijenle bileşiminden oluşan ve çok dayanıklı malzemeler) oluşan kapalı bir manyetik gövde ile bunun üzerine sarılan yalıtılmış iletken sargılarından oluşur. Temelde transformatörde iki sargı bulunur. Bu sargılardan biri primer (birincil) sargı, diğeri ise sekonder (ikincil) sargıdır [16].



Şekil 3.2. Transformatör primer ve sekonder sargıları ve çekirdek [16]

Primer ve sekonder sargılarının, birbiriyle elektriksel bir bağlantısı yoktur. Transformatörlerin primer ve sekonder sargıları birbirlerinden elektriksel olarak yalıtıldıkları gibi nüveden de yalıtılmışlardır. Yalıtkan olarak presbant, kâğıt, mika, bazı plastik maddeler, çeşitli yağlar, pamuk reçine, ağaç takozlar ve pertinaks gibi bazı maddeler kullanılmaktadır.

Transformatörün temel çalışma ilkesini 1831 de Michael Faraday keşfetmiştir [17]. Faraday, demir bir halkanın çevresine iki yalıtkan tel sarmış ve sargılardan birinin ucunu güçlü bir bataryaya, diğer uçlarını da elektrik akımının algılanmasında kullanılan bir galvanometreye bağlamıştır. Faraday ne zaman bataryayı devreye alsa ya da devreden çıkarsa galvanometrenin göstergesinin hafifçe oynadığını, yani ikinci sargıdan anlık bir akım geçtiğini saptamıştır. Buradan esinlenerek ikinci sargıda anlık bir akım indüklediğini söylemiştir. Ayrıca, ikinci sargıdaki akımın ancak birinci sargıdaki akımın değişmesi durumunda indüklendiğini; bu akımın değişim göstermeden kesintisiz biçimde akması durumunda, ikinci sargıda herhangi bir akımın oluşmadığını ortaya koymuştur. Faraday'ın belirlediği bu olgu bütün transformatörlerin dayandığı ana ilkedir.

3.1. Transformatörlerin Çalışma Prensibi

Transformatörlerin çalışma prensibi, elektrik enerjisinin bir iletken den diğerine manyetik akım vasıtasıyla iletilmesinden meydana gelmektedir. Transformatörün yapısı en basit şekilde, iki bobinden ve nüveden oluşmaktadır. Nüvedeki bobinlerden birinin üzerinde gerilim uygulandığında nüve üzerinde bir manyetik akı oluşur. Oluşan manyetik akının yönü ve şiddeti sürekli değişir. Bu manyetik akı, çıkış (sekonder) bobini üzerinde bir gerilim indüklenmesini sağlar. Özetle, ilk bobine uygulanan gerilimden bir manyetik alan meydana gelir ve bu manyetik alan sayesinde diğer bobine enerji aktarımı gerçekleşir. Transformatördeki çıkış (sekonder) sarım sayısı giriş (primer) sarım sayısından fazla ise çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek olmaktadır. Ters durumda daha düşük olmaktadır.

3.2. Transformatör Çeşitleri, Kullanım Alanları ve Amaçları

Transformatör çeşitleri kullanım amaçlarına, nüve tipine, çalışma ortamına, faz sayısına, soğutma şekillerine göre çeşitlere ayrılmaktadırlar.

Nüve Tipine Göre:

- Çekirdek Tipi,
- Mantel Tip,
- Dağıtılmış Tip.

Kullanım Amacına Göre:

- Oto Transformatör,
- Yalıtım (İzolasyon) Transformatörleri,
- Alçaltıcı Transformatörler,
- Yükseltici Transformatörler,
- Ölçü Transformatörleri.

Çalışma Ortamına Göre:

- Yer altı tipi transformatörler,
- Su altı tipi transformatörler,
- İç mekân tipi transformatörler.

Faz Sayısına Göre:

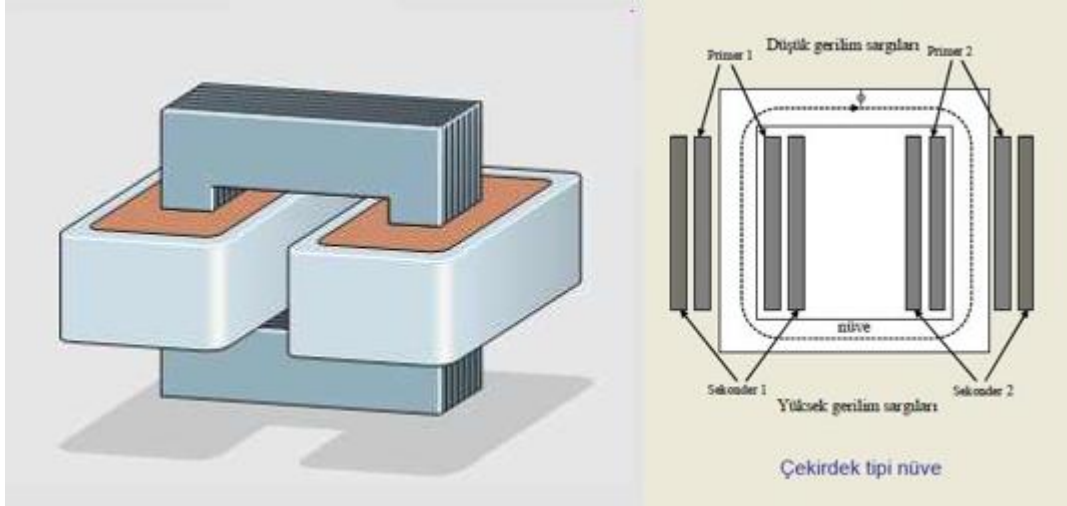
- Tek Fazlı Transformatörler,
- Çok Fazlı Transformatörler.

Soğutma Şekillerine Göre Transformatörler:

- Yağlı Tip Transformatörler,
- Kuru Tip Transformatörler.

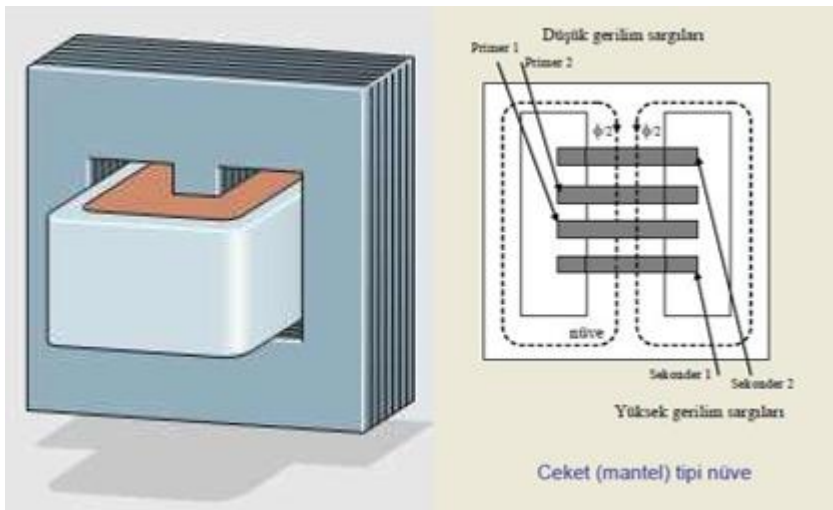
3.2.1. Nüve tipine göre

Nüve tipine göre trafolar üçe ayrılır: çekirdek tipi, mantel tipi ve dağıtılmış tip trafolar.



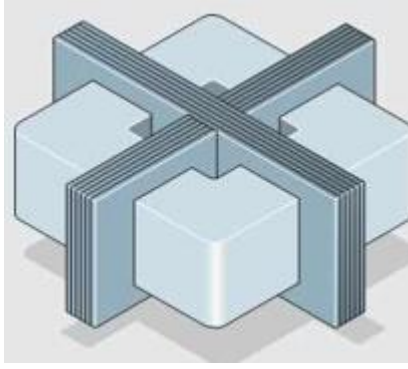
Şekil 3.3. Çekirdek tipi nüve gösterimi [18]

Çekirdek Tipi: Çekirdek tipi nüveler, sargıların yalıtımlarının daha kolay olması sebebiyle yüksek güçlü ve yüksek gerilime sahip transformatörlerde kullanılırlar. Çekirdek tipi nüve tek gözlüdür ve manyetik nüvenin kesiti her yerde aynıdır. Trafolarda manyetik nüveyi oluşturan sac parçalarının yerleşimi çok önemlidir, ek yerlerinin üst üste gelmemesine dikkat edilmelidir [18].



Şekil 3.4. Mantel tipi nüve gösterimi [18]

Mantel Tipi: Bu tip nüvelerde sargılar ortadaki bacağa sarılmıştır ve ortadaki ayak kesiti yandaki ayakların kesitlerinin iki katıdır. Çekirdek tipi nüvenin tersine, alçak gerilimli ve düşük güçlü transformatörlerde kullanılırlar.

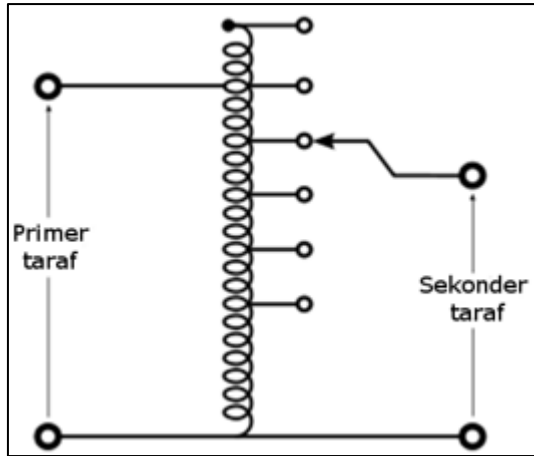


Şekil 3.5. Dağıtılmış tip sargılı trafonun temsili resmi [18]

Dağıtılmış Tip: ‘+’ şeklinde bir görüntüye sahiptirler. Sargılar orta ayağa sarılmıştır ve dört ayak tarafından kuşatılmışlardır. Bu tip nüvelerde kaçak akıların en alt düzeyde olması sebebiyle boşa çalışma kayıpları düşüktür.

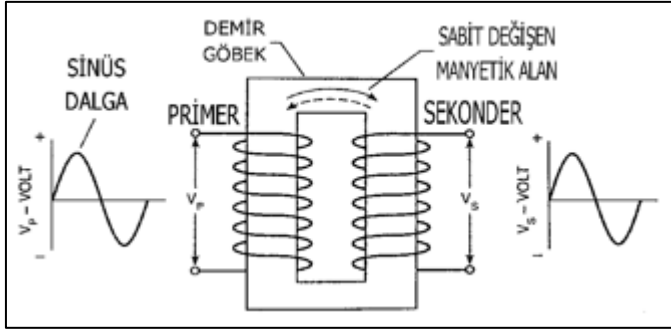
3.2.2. Kullanım amacına göre

Oto Transformatör: Oto transformatörlerde tek bir sargı hem primer hem sekonder olarak kullanılır. Daha küçük boyut ile daha yüksek verim elde edilir. Aynı zamanda bu transformatörler, ayarlanabilir gerilimli olduklarından varyak olarak da adlandırılırlar.



Şekil 3.6. Oto transformatör açık şeması [18]

Yalıtım (İzolasyon) Transformatörleri: Bu tip transformatörlerin amacı gerilim dönüşümü değil, iki devreyi birbirinden elektriksel yalıtmaktır.



Şekil 3.7. İzolasyon (yalıtım) transformatörleri [18]

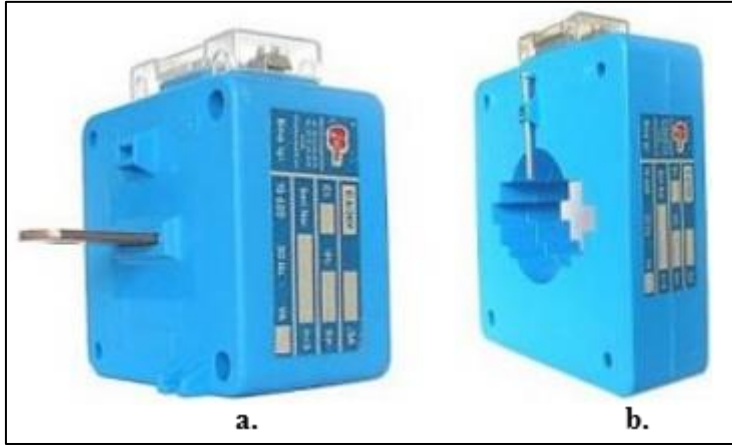
Alçaltıcı (Gerilim Düşürücü) Transformatörler: En yaygın kullanıma sahip transformatör tipidir. Sekonder sargının gerilimi primerdeki gerilimden düşük ise, yani çıkıştaki gerilim sinyali giriştekenden daha düşük ise bu tip transformatörlere alçaltıcı transformatörler denir. Cep telefonlarının şarj aletlerinde ve şarjlı süpürgelerde kullanılan trafolar bu tiplere örnek verilebilir.



Şekil 3.8. Düşük güçlü gerilim düşürücü transformatör [18]

Yükseltici Transformatörler: Sekonder sargının gerilimi primerdeki gerilimden yüksek ise, yani çıkıştaki gerilim sinyali giriştekenden daha yüksek ise bu tip transformatörlere yükseltici transformatörler denir.

Ölçü Transformatörleri: Akım ve gerilim seviyesinin yüksek olduğu yerlerde ölçüm yapılabilmesi için ölçü transformatörleri kullanılmaktadır. Bu trafoların sekonder sargılarında, yüksek akım ve gerilim değerleri, ölçü aletlerinin ölçebileceği seviyelere düşürülür. Bu sayede ölçümler kolay ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilir. Bu trafolar akım transformatörleri ve gerilim transformatörleri olarak ikiye ayrılır.



Şekil 3.9. Ölçü transformatörleri: (a) gerilim (b) akım trafoları

3.2.3. Çalışma ortamına göre

Transformatörler, elektrik enerjisinin bulunduğu neredeyse her yerde kullanıldıkları için çalışma ortamlarına göre çok çeşitliliğe sahiptirler. Ayrıca birçok boyutta transformatör çeşidi vardır. Çalışma ortamlarına göre soğuk veya sıcak hava şartları, su, basınç gibi faktörler baz alınarak transformatörler sınıflandırılmışlardır [16]. Bunlardan bazıları platform tipi transformatörler, yer altı tipi transformatörler, su altı tipi transformatörler ve iç mekân tipi transformatörler olarak sınıflandırılabilirler [16].

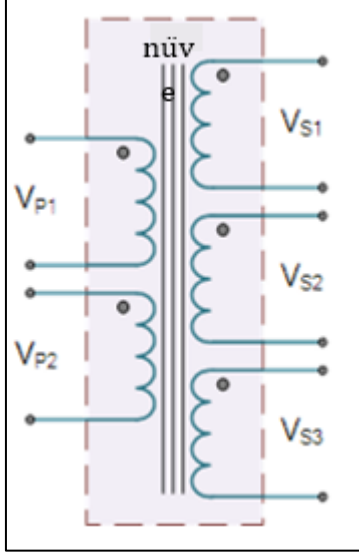


Şekil 3.10. Yer altı tipi transformatör [16]

3.2.4. Faz sayısına göre

Tek Fazlı Transformatörler: Tek fazlı transformatörlerde bir tane primer sargısı bulunur. Yani tek girişe sahiptir. Trafoda bulunan sekonder sargısı bir veya birden fazla olabilir.

Çok Fazlı Transformatörler: Çok fazlı transformatörlerde birden fazla primer sargısı bulunur, yani giriş sinyali iki veya daha fazladır. Genellikle sarılan faz sayısı üç olur. Bu tip transformatörler primer ve sekonder sayılarına göre sınıflandırılır. (Örnek: Üç fazlı transformatörler, on iki faza dönüştüren transformatörler) [16].



Şekil 3.11. Çok fazlı transformatör örneği [16]

3.2.5. Soğutma şekillerine göre transformatörler

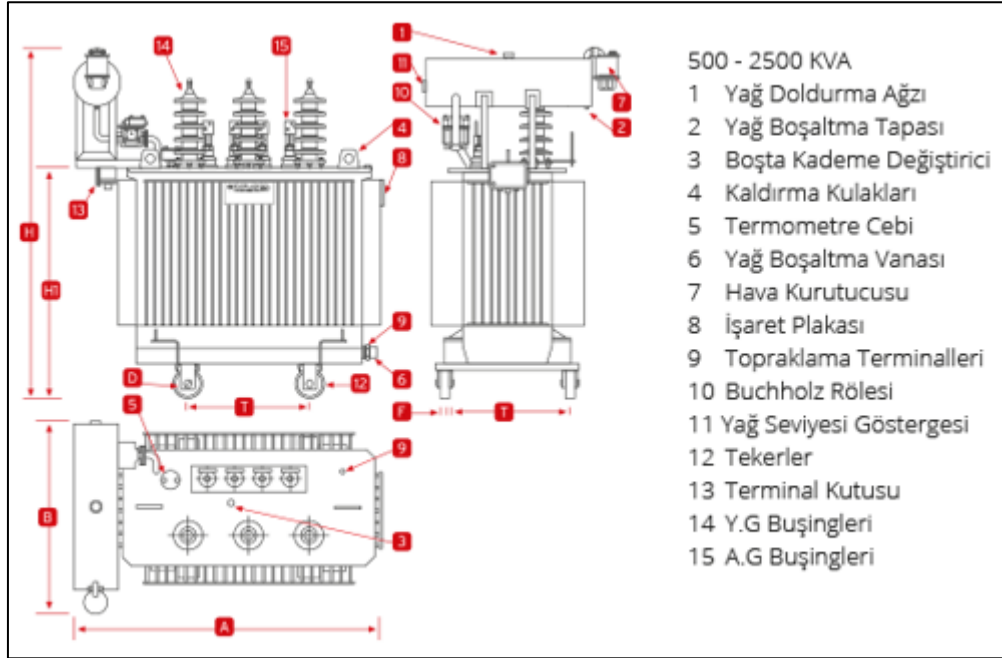
Transformatörler soğutma şekillerine göre genel olarak yağlı tip ve kuru tip transformatörler olmak üzere ikiye ayrılır.

Yağlı tip transformatörler

Yağlı tip trafolarının, kuru tip trafolardan farkı soğutma işleminin yağ ile yapılmasıdır. Kuru tip trafolarda ise soğutma fan ile gerçekleşir. Yağlı tip transformatörlerde ince sacların üzerine bakır ve alüminyum iletkenler sarılarak bobinler oluşturulur ve yağlı tip transformatörlerde bu bobinlerin nemden korunması için, yağ doldurulmadan önce, özellikle sargılara ve üzerlerindeki yalıtkan malzemelere fırınlama işlemi uygulanır.



Şekil 3.12. Yağlı tip bir dağıtım trafosu [19]



Şekil 3.13. Yağlı tip transformatör örneği [19]

Kuru tip transformatörler

Kuru tip transformatör bobinleri alüminyum ve bakır iletkenler sarılarak oluşturulmaktadır. Bu bobinler sarılırken cam elyaf kullanılmaktadır. Oluşturulan bu bobinler reçinelenmekte ve kalıplarlanarak fırınlarda kurutulmaktadır. Kurutulan bobinler kalıplardan çıkarılmakta ve yağlı tip trafoların aksine kuru tip trafoların çekirdeği boyanmaktadır. Kuru tip trafonun yağ içerisinde olmaması oksitlenme problemine yol açmaktadır. Bu sebeple boyanarak tedbir alınmaktadır.



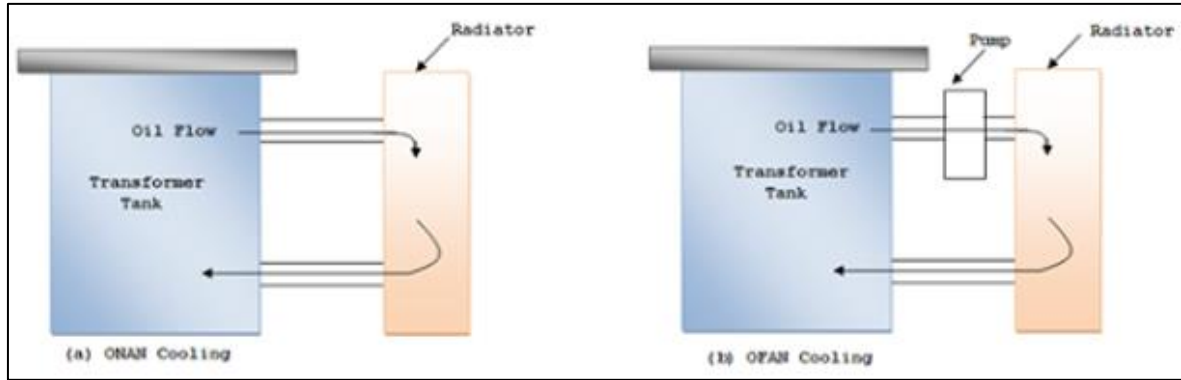
Şekil 3.14. Kuru tip trafo örnek resmi [19]

Transformatörlerin soğutulma yöntemleri

ONAN (Oil Natural Air Natural): Bu soğutma şeklinde fan kullanılmamaktadır. Isınan yağ kazanda yükselmekte ve oradan radyatörlere gitmektedir. Burada temas yüzeyi fazla olduğu için doğal soğutma gerçekleşmektedir.

OFAN (Oil Forced Air Natural): Bu yöntemde, bakır soğutma bobinleri trafo çekirdeğinin üzerine monte edilir. Bakır bobinler yağa tamamen batırılır. Yağın doğal soğutması ile birlikte, çekirdekten gelen ısı bakır bobinlerine geçer ve bakır bobin içindeki dolaşan su ısıyı alır. Bu yöntemin dezavantajı, trafo içine su girmesi sebebiyle her türlü sızıntının trafo yağını kirletmesidir.

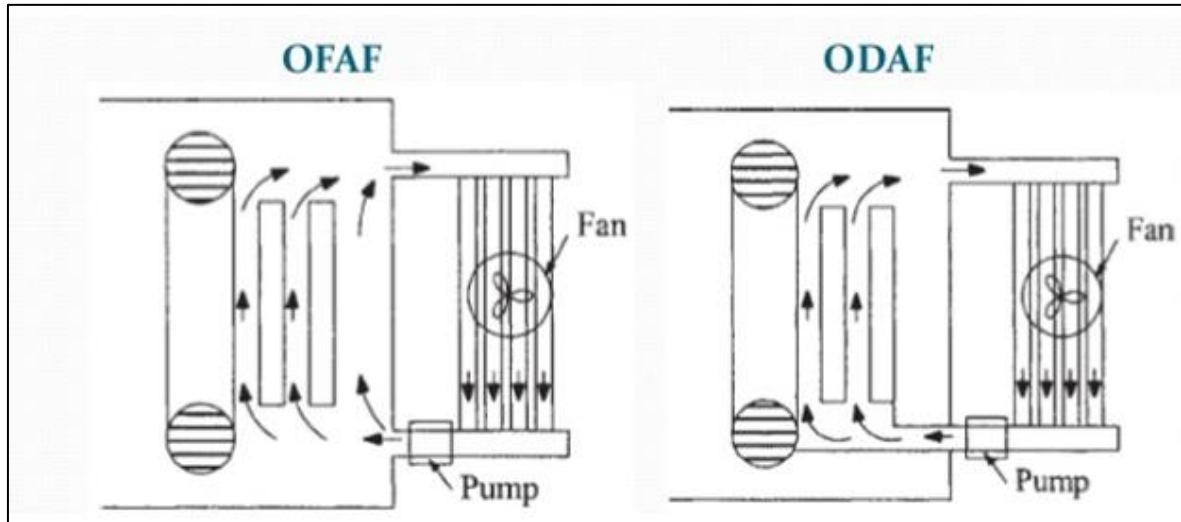
ONAF (Oil Natural Air Forced): Bu soğutmada fan kullanılmaktadır. Isınan yağ genişler ve radyatörlere gelir ve burada bulunan fanlar yardımıyla soğutma hızlandırılmaktadır.



Şekil 3.15. (a) ONAN soğutma (b) OFAN soğutma [19]

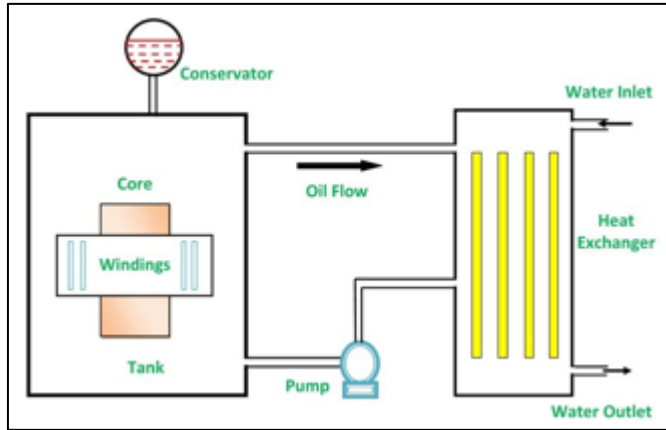
OFAF (Oil Forced Air Forced): OFAF soğutma çeşidinde yağ pompası ve fan kullanılır. Radyatörde fanlar ile soğutulan yağ kazan içine yağ pompası ile basınçlı bir şekilde pompalanır. Hava sıcaklığı yüksek olan ülkelerde kullanılır.

ODAF (Oil Directed Air Forced): ODAF soğutma çeşidinde içeriye pompalanacak yağ, iletim boruları sayesinde direkt olarak sargıların alt tarafına pompalanır. Böylece daha etkili soğutma yapılır. Ortalama sıcaklığı çok yüksek olan ülkelerde kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. OFAF ve ODAF soğutma prensibi [19]

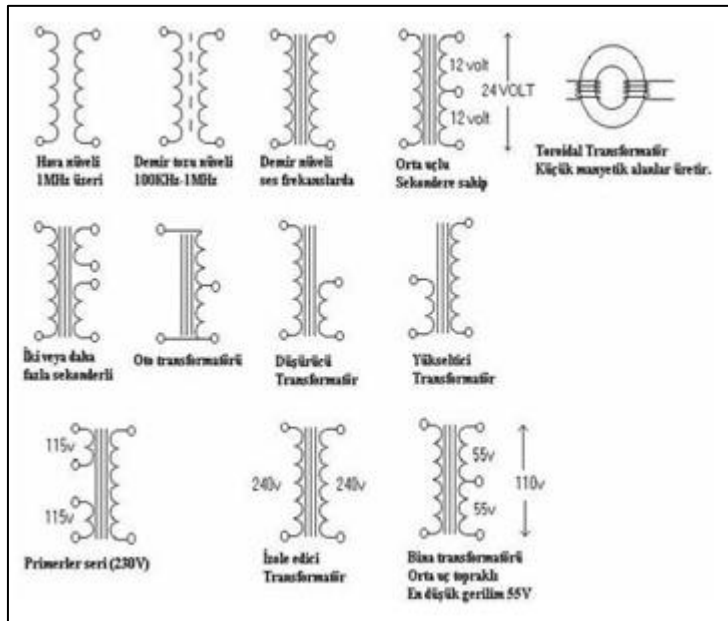
OFWF (Oil Forced Water Forced): Bu soğutma şeklinde ise radyatörün çevresinden soğutma kanalları geçirilmektedir. Bu kanallarla yağ soğutulmakta ve pompaların yardımıyla kazana pompalanmaktadır.



Şekil 3.17. OFWF soğutma prensibi [19]

Bir transformatörün soğutma şeklinin seçimi, trafuyu kullanan işletmeye göre değişiklik göstermektedir. Genellikle transformatörlerde soğutma şekli seçilirken; transformatörün çalışma yeri ve şartları, transformatörün ihtiyacı olan soğutma miktarı, transformatörün taşıma ve yapım zorluklarıyla işletme giderleri ve maliyet dikkate alınmaktadır.

Bahsedilen türlerin dışında hat transformatörü, empedans uygunlaştırma transformatörü gibi farklı çeşitler de bulunmaktadır [19].

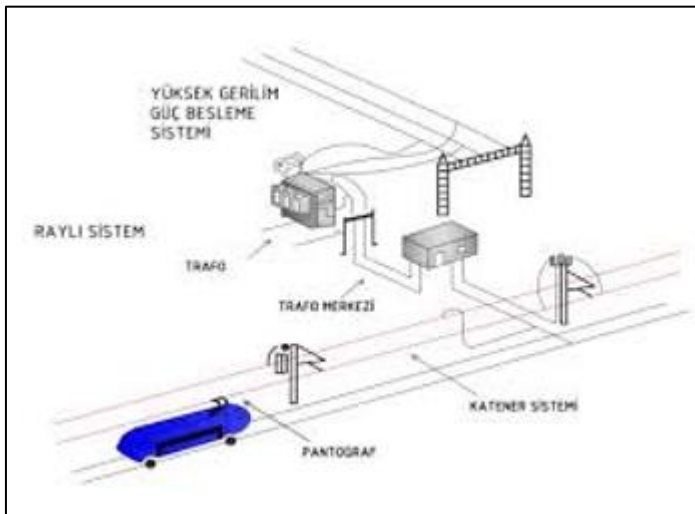


Şekil 3.18. Bazı transformatör çeşitleri [19]

4. RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN TRANSFORMATÖRLER

Elektrikli raylı sistemlerin önemli ana toplu taşıma sistemlerinden birisi olduğu şüphesizdir. Ancak bu sistemler, kullanım alanlarında tüketicileri ve ekipmanları olumsuz yönde etkileyebilecek güç kalitesi sorunlarına neden olabilmektedirler. Bu problemler arasında, tek fazlı çekme güç ve yüklerinden kaynaklanan önemli miktardaki negatif sekans akımı, kayda değer bir problemdir. Bu, güç ağını dengesiz hale getirir. Ayrıca çekiş lokomotiflerinin endüksiyon motorlarına sahip olduğu ve dolayısıyla çok büyük endüktif yük oluşturduğu dikkate alınırsa; bu dengesizliğin ne kadar kritik olabileceği anlaşılabilir. Katener sistemi, akım ve gücü çekiş güç kaynağı olan trafo merkezlerinden trene aktaran kontak tellerine sahiptir. Bu teller de endüktif reaktansa sahiptir. Sonuç olarak, çekiş beslemesinde tüketilen büyük miktarda reaktif güç, ağın güç faktörünü azaltır. Çekiş yükleri ayrıca lineer olmayan yükler olarak işlev gören ve sistemde çok çeşitli harmonikler üreten güç elektroniği dönüştürücülerinden oluşmaktadır. Yukarıda bahsedilen problemler, jeneratörlerde ani ve güçlü şoklar ve sesler ile trafo ve iletim hatlarında ısı ve enerji kayıplarına artışa, koruyucu sistemler üzerindeki kötü etkilere ve röle performansındaki başarısızlıklar gibi elektrik güç sistemlerinde istenmeyen etkilere neden olmaktadır. Bazı durumlarda, güç şebekelerinin kararsızlığı da gündeme gelebilir. Sonuç olarak raylı sistemler için daha etkin özellikli, özel tasarım transformatörler kullanılmaktadır.

4.1. Besleme Transformatörleri



Şekil 4.1. Katener sistem beslemesi [20].

4.1.1. Katener oto transformatörleri

Raylı sistemler için elektrik enerjisi, lokomotifler ve trenler tarafından kullanılacak demiryolu katener besleme istasyonlarına katener iletkenlerle yüksek gerilimle aktarılır.

Katener oto transformatörleri, orta noktası toprağa bağlı, 180° faz kayması ile iki fazla beslenen modern yüksek güçlü raylı katener sistemlerinde kullanılır. Tüm yeni yüksek hızlı tren sistemlerine bu tür trafolar uygulanmaktadır [20].



Şekil 4.2. Katener besleme sistemi [20].

Raylı sistemlerde elektrik akımı, enerjinin elektrik motorları tarafından kullanıldığı ve geri dönüş devresinin bir parçası olan toprak bağlantılı raylarla beslendiği katener iletkeninden lokomotiflere iletilir. İki fazlı beslemeli bir katener sisteminde, ray ve topraklı dönüş iletkeni, katener oto transformatörünün orta noktasına bağlanır.

Oto transformatörün bir kutbu katener fazına, diğeri ise negatif faz iletkenine bağlanır. Bu bağlantı ile güç, lokomotifin kendisinin gerilimiyle karşılaştırıldığında çift voltajla lokomotifleri besler. Oto transformatörlerin katener hattı boyunca görevi, katener ve toprak ile negatif faz iletkeni ve toprak arasındaki voltajları dengelemek ve daha sonra geri dönüş akımını iki faz arasında eşit olarak dağıtmaktır.

Bu bağlantı ile elde edilen avantajlar, tek fazlı besleme ve güç transformatörleriyle karşılaştırıldığında, amaçlara bağlı olarak aşağıdaki şekildedir:

- Yüksek gerilimden dolayı kayıpların önlenmesi,
- Katener besleyici trafo merkezleri arasında daha uzun mesafe

- Dönen başıboş akımların daha iyi toplanması,
- İletişim için azaltılmış girişim.

Katener oto transformatörleri temel olarak tek fazlı otomatik transformatörlerdir. Birincil sarım, iki faz ile katener faz ve topraklanmış dönüş iletkeni arasındaki ikincil sarım arasında bağlanır. Sekonder gerilim, toprağa karşı katener gerilimdir ve primer gerilim, bunun iki katıdır.

Elektrikli ray sistemlerinde kullanılan trafoların sistemleri zorlu ve özeldir. Oto transformatör empedansları çok düşüktür; Transformatörler oldukça yüksek geçici aşırı yüklenmeyi tolere edebilmeli ve çok sayıda kısa devreye karşı dayanıklı olmalıdır.

AC beslemeli elektrikli raylı sistemlerdeki frekanslar 16,67 Hz, 25 Hz, 50 Hz. veya 60 Hz’ dir ve güç değerleri 4-15 MVA arasındadır.

Transformatör tankları, sızdırmaz şekilde kapatılmış, oluklu ve esnek ya da sökülebilir radyatörler ve yağ koruyucular ile vakuma dayanıklı tiplerden olmalıdır.

Yükseltici transformatörler

Yükseltici transformatörler, elektrikli raylı sistemlerdeki katener besleyicilerinde, raylardan ve yerden dönüş iletkenine dönüş akımını toplamak için kullanılır.

Raylı Sistemlerde, elektrik akımının katener iletkeninden, enerjinin elektrik motorları tarafından kullanıldığı lokomotifte götürülmesi ve geri dönüş devresinin bir parçası olan toprağa bağlı rayları beslemesi gerekir. Bununla birlikte, raylardan, geri dönüş akımı, metal boru hatları, köprüler, iletişim kabloları, vs. gibi istenmeyen veya zararlı olabilecek yerlere sapabilir. Kaçak akımlar, geçen trenlerden dolayı iletişim sistemlerinde ve diğer elektronik cihazlarda parazite neden olur. Güçlendirici transformatörler, kaçak akımları ve rahatsızlıkları ortadan kaldırmak için kullanılır ve dönüş akımını dönüş iletkenine yönlendirmek zorundadır. Yükseltici transformatörlerin kullanımı, yeni EMC düzenlemeleri ve artan hassas elektronik cihazların miktarı nedeniyle artmaktadır. Yükseltici transformatörler genellikle eski raylı sistem besleyici sistemlerini iyileştirmek için kullanılır.

Yükseltici transformatörler giriş gerilimini yükselterek çıkışa veren tek fazlı transformatörlerdir. Düşük empedans değerlerine sahipler, ancak buna rağmen, kısa devre akımlarının gerilimlerini tolere etmek zorundalar. Birincil voltajlar tipik olarak 15 kV veya 25 kV olup, tüm dünyadaki raylı sistemlerdeki katener besleyicilerin normal voltajlarıdır. Nominal akım genellikle 200A ile 800 A arasındadır. Elektrikli raylı sistemlerdeki güçlendirici trafoların güç değerleri 100-800 kVA'dır.

Transformatör tankı hava sızdırmaz şekilde kapatılmış, oluklu ve sökülebilir olup, çalışma durumunda sıvı hacmi değişmesine izin verecek şekilde esnektir. Hidrofor transformatör tankı genellikle korozyon koruması için sıcak galvanize edilir. Sıvıya daldırılmış hidrofor transformatörü dış mekânda kurulum için tasarlanır. Genel kurulum şekli, katener ve geri dönüş iletkenlerinin yakınındaki katener destek çelik direklerine direk montajıdır.

4.1.2. Akım çekiş (cer sistem) besleyici transformatörler

Çekiş besleyici transformatörleri normal üç fazlı şebekeler ve tek fazlı katener sistemleri arasında kullanılır. Tek ve çift voltaj sistemleri, oto transformer ve booster transformatör uygulamalarında olduğu gibi kullanılmaktadır. Raylı sistem şirketleri kendi tek fazlı YG hatlarına sahiptir. Tek fazlı besleyici transformatörler de gerilimleri katener seviyesine düşürmek için kullanılır. Çekiş besleyici transformatörleri çoğunlukla yük kademe değiştiricisi ile donatılmıştır. Güçlü yapıları, operasyon sırasında elektrik demiryollarında yaygın olan tekrarlanan kısa devrelere karşı koymak için özel olarak tasarlanmıştır.

Çekiş besleyici trafolarının güç değerleri genellikle 7,5-25 MVA'dır (Orta Avrupa'da 60 MVA'ya kadar) ve yüksek gerilim 400 kV'a kadar çıkar.

Çekişli statik dönüştürücü transformatörler ve doğru akım çekiş besleyici transformatörleri

16,67 Hz ve 25 Hz sistemlerin akımları, sabit konvertörleri 50 / 16,67 Hz veya 60/25 Hz olan üç fazlı ticari akım sistemlerden temin edilir. Ağ tarafında, bu dönüştürücüler her zaman üç fazlı bir giriş dönüştürücüsü ve katener tarafında bir fazlı özel çıkış dönüştürücüsü içerir. Bu transformatörler, özellikle dönüştürücü teknolojisi için tasarlanmıştır ve değişken hızlı tahrik transformatörleri için geçerli olan ilkeleri takip ederler [20].

Doğru akım çekiş besleyici transformatörleri normal üç fazlı akım ağlarından besleyicileri beslemek için kullanılır. Doğrultucular, bir katener veya üçüncü raya doğru akımı sağlar.

Yüksek akımlar ve performans garantileri nedeniyle, doğru akım çekiş besleyici transformatörleri normalde redresörlerle yakından entegredir. Bu nedenle bağlantıları uygun olacak şekilde özel olarak tasarlanmış ve düzenlenmiştir.

Doğru akım çekiş besleyici transformatörlerinin güç değerleri 1000 kVA (tramvay beslemesi), 2000 kVA (metro beslemesi) ve 2000-8000 kVA (5000 A'ya kadar yüksek akımlara sahip tren beslemesi) arasındadır [20]. Tipik DC gerilimleri 3 kV, 1,5 kV ve 0,75 kV DC 'dir.

Doğru akım çekiş besleyici transformatörleri, sıkı bir şekilde bağlanmış seri veya paralel diyot köprüleri (IPT) için tasarlanmıştır ve 6-, 12 veya 24 darbeli bağlantılar için kullanılır [20].



Şekil 4.3. Yüksek hızlı trenlerde (tramvay) kullanılan besleme transformatörü [20]

4.2. Araç Üstü Transformatörler

4.2.1. Yardımcı transformatörler

Yardımcı transformatörler, raylar boyunca üç fazlı yardımcı ağlarda kullanılır veya aydınlatma ve diğer amaçlar için katenerden güç alır.

Yardımcı transformatörler, örneğin aydınlatma amacıyla, tren vagonlarını ısıtmak veya güvenlik sistemleri tedariki veya trafo merkezinin kendi tedariki için tek fazlı yardımcı üretmek için kullanılır.

Gerilim seviyeleri normal olarak 36 kV altındaki katener sistemlerini takip eder ve palet tarafı üç fazlı sistemler için güç değerleri 2 MVA'nın altındadır [20].

4.2.2. İzolasyon transformatörleri

İzolasyon transformatörleri, akım şebekesini raylarının yakınına, raylarının neden olduğu doğru akım kaçaklarını izole etmek için kullanılan özel transformatörlerdir [20].

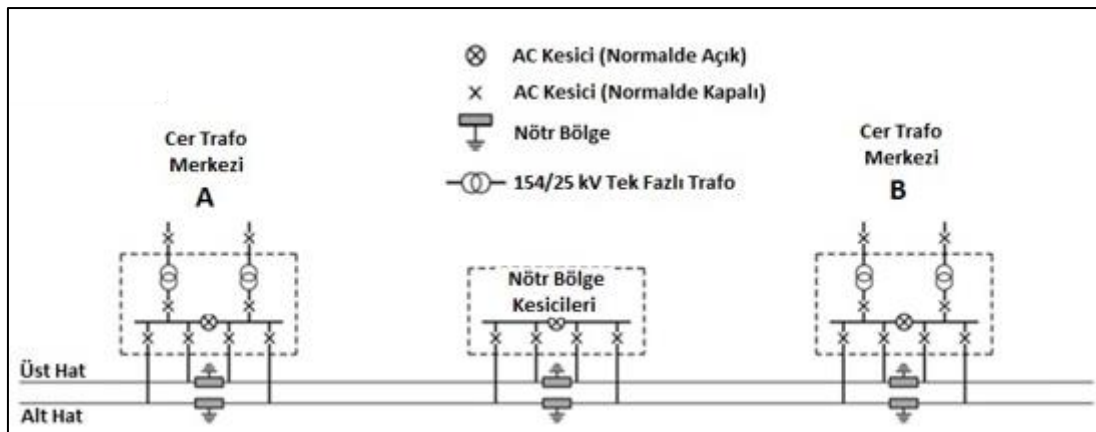
Bu transformatörler tipik olarak 25/25 kV veya 16/16 kV tek fazlı transformatörlerdir ve güç değerleri 10 MVA'ya kadar çıkar.

Doğru akım gereksinimleri nedeniyle, izolasyon transformatörlerinde hava boşluklu bir çekirdek tasarım gereklidir. Bu nedenle, fabrikada güçlü bir test sistemi gerekir. Örneğin yıldırım düşme testi her zaman rutin bir test olarak yapılır.

Aşırı gerilimler, hava boşluklu çekirdek ve tren enerji kesilen bölümlerden geçerken anahtarlama mevcut olan akımlar nedeniyle normalden daha yüksektir.

5. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ İLETİMİ

25kV AC 50 Hz sistemin basit bir şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir [1]. Çoğunlukla, cer sistemindeki bir trafo merkezinde yağlı tipte iki tane 154/25 kV değiştirme oranına sahip alçaltıcı tek fazlı trafo vardır. Çoğunlukla her cer sistemi trafosu AC kesici üzerinden geliş ve gidiş havai katener hattının sadece bir tanesini beslemektedir. Her cer sistemi trafosu 154 kV TEİAŞ yüksek gerilim iletim hattındaki 3 fazdan 2 tanesiyle beslenmektedir. Cer sistemi trafo merkezinde iki adet trafonun birincisi S ve R fazları ile diğer trafo ise T ve S fazları ile beslenmektedir. İstisnai olan bazı durumlarda demiryolu hattı, 34.5/25 kV dönüştürme oranı olan trafolar kullanılarak OG şebekesiyle de beslenebilmektedir. Ama bu, fazda dengesizlik yarattığı için çoğunlukla tercih bölgeyle birbirine bağlıdır. (Track section cabinet, TSC) Cer sistemi trafo merkezlerinde oluşabilecek bir güç kesintisi veya arıza halinde kesiciler kapatılmakta ve katener hattının enerjisiz kalması engellenmektedir. Bu gibi durumlar düşünülerek, AC cer sistemi trafo merkezleri planlanırken, trafoların büyüklükleri diğer trafoyu yedekleyebilecek güçte tercih edilmektedir. Hattaki gerilim yüksek olduğu için gerilim düşüşü belli aralıklar dahilinde tolere edilebilmektedir. AC sistemlerinde her trafonun girişinde ve çıkışında kesici konulması gerekmektedir. Bu kesicilerin aralarında kilitleme bulunmaktadır ve bu faz-faz çakışmalarına izin vermemektedir. Arıza bulunan trafonun katener hattını besleyen bütün kesiciler açılıp izole edilerek kesiciler kapatılmaktadır [21].

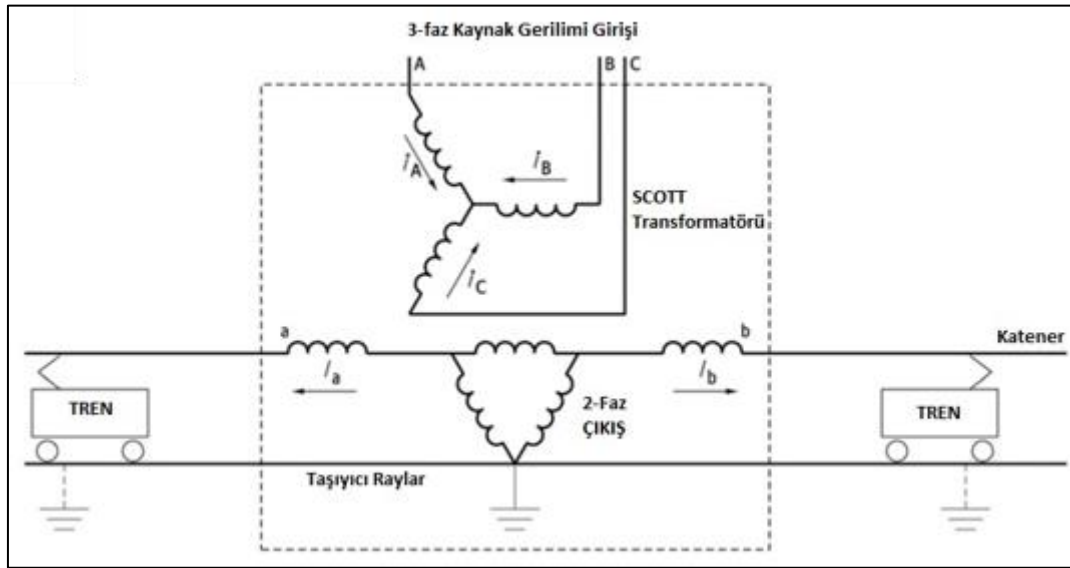


Şekil 5.1. 25kV AC katener besleme sistemi [21]

Ayrıca seksiyonman bölgede havai katener hattının geliş-gidiş hatlarını paralellemek ve hattın sonundaki gerilim düşüşlerini azaltmak için de kullanılmaktadır. Normal işletme halinde iki trafo merkezinin katener beslemesi ayrı fazlardan gerçekleştiği için hiçbir şekilde

birbirleriyle çakıştırılmamalıdır. Bu sebeple birbirlerine bitişik olan yerlerdeki faz çakışmalarını engellemek için enerjisiz ve nötr bölgeler oluşturulmalıdır. Aksi durumda trenin pantografı iki ayrı trafo merkezinin gerilimlerini kısa devre edebilmektedir. Nötr bölgeler en az 7 metrelik açıklıkta olmaktadır ve 2 tane Section Insulator (SI) ve kesiciler kullanarak oluşturulmalıdır. Kesicilerin arasında mekaniksel ve elektriksel kitlemeler mevcuttur ve normal işletme halinde herhangi bir anda 3 kesicinin daima 2 tanesi kapalı durumda bulundurulmalıdır. Bu sistemler çoğunlukla SCADA kontrollü olmaktadır. Mekaniksel ve elektriksel kitlemelerin yanında ayrıca yazılımsal olarak da kitlemeler mevcut olmalıdır [21].

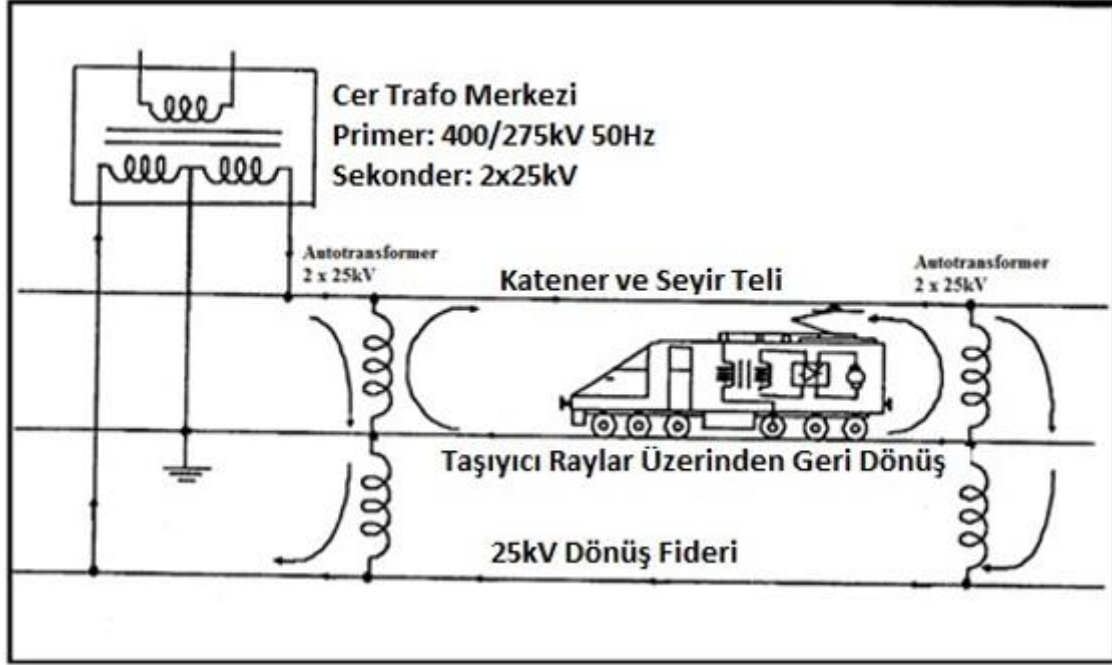
AC sistemlerdeki faz dengesizliği Şekil 5.2’de gösterildiği gibi Scott trafonun yardımıyla 120° faz farkına sahip 3 faz girişini, 90° faz farkına sahip 2 faz çıkışına dönüştürerek azaltılabilmektedir. Scott trafo basit olarak 2 faza sahip dengeli yükü 3 faza sahip dengeli bir yüke dönüştürmektedir ya da bunun tersini de yapabilmektedir. Bu bağlantı şekliyle ancak dengeli olan bir yük fazlar arasına eşit miktarda dağıtılabilmektedir. Eğer bu 2 fazlı yük dengesizse, Scott trafo bunu düzeltmeye yardımcı olamamaktadır [21].



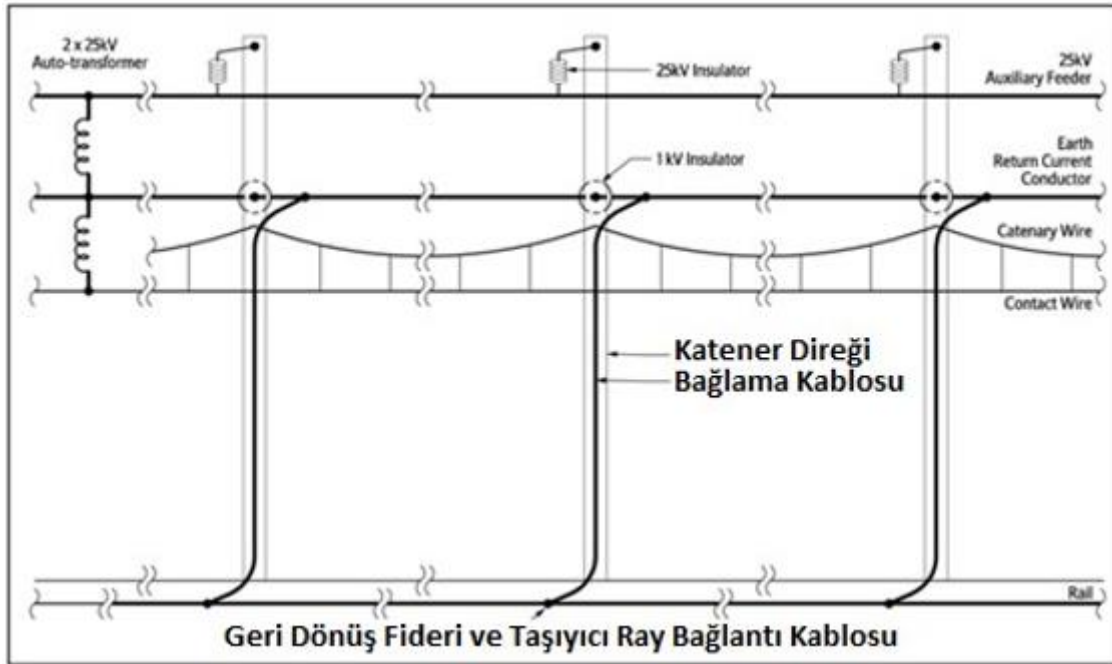
Şekil 5.2. Faz dengesizliği azaltmak için scott trafo kullanımı [21]

Bazen AC sistemlerde tren trafik yoğunluğunun fazla olduğu kritik kısımlarda Şekil 5.3’de görüldüğü üzere üçüncü bir cer trafosu gerekebilmektedir. Bu trafoya sıcak yedek trafosu denilmekte ve gereken durumlarda yükü o an üzerine alabilecek şekilde hazır

uzaklık gerilim değerinin ya da AT dönüştürme oranının artırılması ile daha fazla artırılabilir [24].

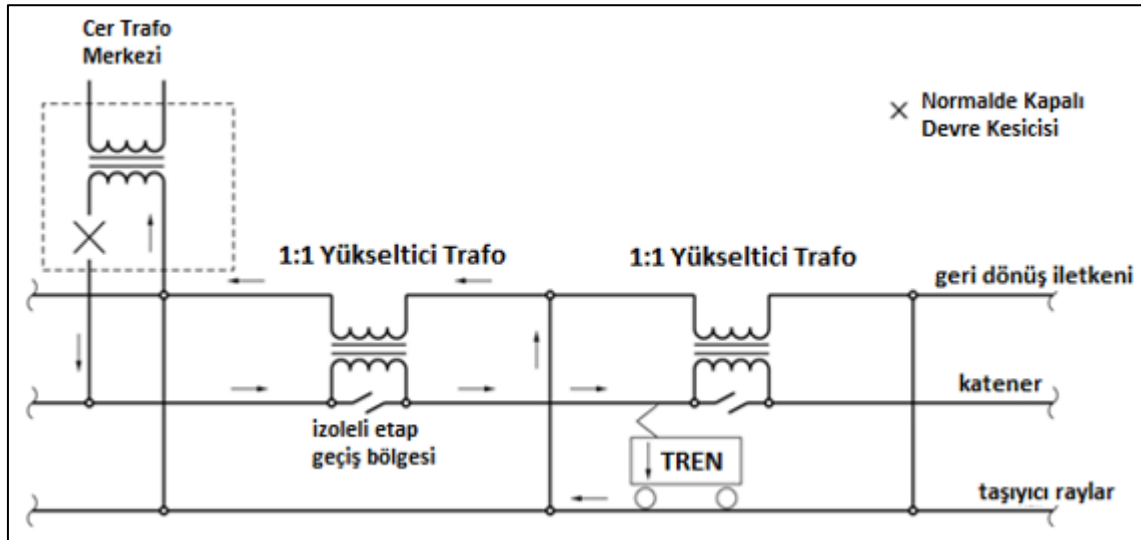


Şekil 5.4. 2 x 25kV AC oto transformatörlü besleme sistemi [24]



Şekil 5.5. 2 x 25kV AC AT besleme sistemi katener-ray bağlantısı [24]

AC sistemlerinde kullanılan bir diğer besleme şekli de yükseltici trafo (booster transformer, BT) kullanılarak yapılan besleme şeklidir. BT besleme kullanılan AC sistemler de temel olarak basit bir AC besleme sistemine oldukça benzemektedir. Yükseltici trafonun kullanılmasındaki sebep ise hat boyunca var olan sinyalizasyon ve haberleşme ekipmanlarıyla arasındaki elektromanyetik etkileşimi (EMI) en aza indirmesidir. AC sistemlerde kullanılmakta olan 25kV AC yüksek gerilim dolayısı ile EMI çok büyük sorun teşkil etmektedir [24]. Raylar tarafından taşınan yüksek geri dönüş akımının geçtiği basit bir AC sistemde, haberleşme için kullanılan kablo eğer rayların yakınına monte edilirse, haberleşme kablosunun üzerinde istenmeyen gerilimlerin indüklenmesi mümkün olmaktadır. Bu, uzun olan mesafelerde demiryolunun güvenliğini ilgilendiren kritik bir problem yaratmaktadır. Yükseltici trafolar bu nedenle katener hattı üstünde uygun görülen noktalara (çoğunlukla katener direğinin üzerine) Şekil 5.7’de görüldüğü şekilde yerleştirilmelidir. Tek faza sahip ve genelde 1:1 dönüştürme oranı olan bu trafolar raylardan gelen geri dönüş akımını toplayarak katener sistemdeki dönüş iletkenine akıtmaktadır. BT trafodaki birincil sargı Şekil 5.6’da gösterildiği şekilde seyir teline, ikincil sargı da dönüş iletkenine ve dönüş iletkeni ise belli aralıklar ile raylara bağlanmaktadır.



Şekil 5.6. 25kV AC BT tipli sistem [24]



Şekil 5.7. Katener direği üzerine asılmış 1:1 yükseltici transformatör [24]

Alışlagelmiş bir 25 kV AC gerçü tedarik sisteminde genel olarak transformatörler, kesici hücreleri ve AC kesiciler, kontrol ve kumanda ekipmanları kullanılmaktadır [24]. Sistemde

tek fazlı ve dengesiz olan yüklerin varlığı çok fazla olduğundan, ek olarak kompanzasyon sistemi de bu sıralamaya eklenebilmektedir. Böylece şebekeden fazlaca reaktif güç çekilmesi en aza indirgenmektedir. 25 kV AC kesicilerin çoğunlukla bakımı kolay, güvenilirliği yüksek ve ark seviyesi düşük olmaktadır [24]. Dolayısıyla vakumlu tip kesiciler daha çok tercih sebebidir. Ancak SF6 gazlı tip kesiciler de birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra gaz izoleli (GIS, Resim 5.1) ve hava izoleli (AIS, Resim 5.2) olmak üzere 2 farklı tipte şalt tesisi de raylı sistemlerin uygulamalarında kullanılmaktadır. Günümüzde GIS tipinde trafo merkezleri özellikle şehir içindeki raylı ulaşım hatlarında ve göreceli olarak daha yüksek gerilim seviyesindeki hatlarda kurulsa da bazen yüksek hızlı tren hatlarında AIS tipi trafo merkezleri de görülmektedir [24]. Raylı ulaşım sistemleri için üretilmiş olan AC kesicilerin teknik bilgileri Çizelge 5.1’de görülmektedir [24].



Resim 5.1. Gaz izoleli AC kesiciler [24]



Resim 5.2. Hava izoleli AC kesiciler [24]

Örneğin, İstanbul’da Sirkeci Halkalı ve Haydarpaşa-Pendik eski banliyö hatlarında AIS şalt merkezleri kullanılmaktaydı. Marmaray projesinde ise projede kurulmuş olan bütün cer trafo merkezleri yenileme sonrası GIS şalt merkezi şeklinde revize olmuştur.

Çizelge 5.1. Vakum tipli AC kesici etiket bilgileri [8]

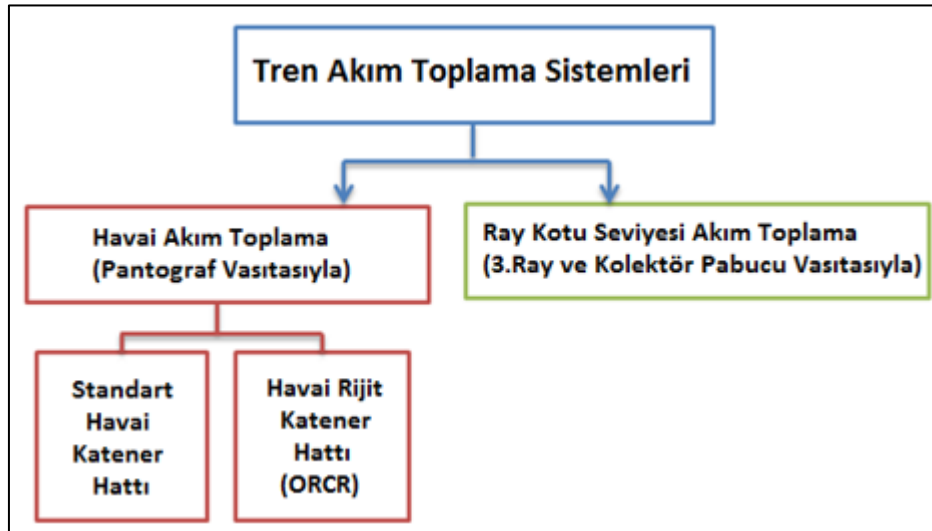
Frekans (Hz)	16.7	16.7	50 (60)
Nominal Gerilim (kV)	24	36	40.5
İşletme Gerilimi (kV)	17.5	17.5	27.5
Nominal Güç Frekansında Dayanma Gerilimi (kV)	50	70	95
Darbe Gerilimi Dayanmak Seviyesi	125	170	200
Nominal Akım (A)	2500	2500	2500
Kısa Devre Akımı (kA)	31.5	31.5	25
Kısa Zamanlı Maks. Kısa Devre (kA)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

5.1. Akım Toplama Sistemleri

Trenlerin hareketi için ihtiyaç duyulan elektrik gücü cer trafo merkezi üstünden hatta paralel şekilde aralıksız tesis edilen kontak iletkeni aracılığıyla iletilmektedir. Genel olarak akım toplama sistemlerinin ana tipte 2 çeşidi vardır (Şekil 5.8). Bunlardan biri havai katener hattı sistemi olup, akım trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf aracılığıyla havai hattın üzerinden tedarik edilmektedir. Diğeri ise, akımın taşıyıcı raylarla paralel şekilde kurulmuş ve taşıyıcı rayların seviyesindeki üçüncü bir ray üzerinden motor pabucu aracılığıyla tedarik edildiği 3. ray sistemleridir.

Havai katener hatları rijit (Overhead Rigid Conductor System, ORCR) ve esnek katener (veya standart katener de denilmekte) hattı olarak iki tipe ayrılmaktadır. İki sistemde de akımın trene iletilmesi Resim 5.3 ve Resim 5.4’de gösterilmekte olup, kompresörlü hava basıncıyla çalışan, trenin çatısına montelenmiş pantografin seyir teline (katener teli) alt taraftan baskı uygulamasıyla gerçekleşmektedir. Dünyada ekseriyetle 1950 mm veya 1600 mm genişlikteki pantograflar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Tek ve çift kollu şekilde üretilen pantograf başlıklarına ilâştirilen pantograf kömürleri karbon şeritler içermektedir. Sürtünme katsayısı düşüklüğü sayesinde katener iletkenindeki aşınmanın azlığı ile hafiflik pantograf kömürlerinin en büyük avantajıdır. Bunun yanı sıra karbon kömürünün termal ve elektriksel iletkenliği iyi olmakla beraber, erimemekte ve en önemlisi arklara karşı mükemmel direnmektedir.

Üçüncü ray sistemi ya da havai hattın ikisi de DC sistemlerde kullanılabilmesine karşın, havai hat göreceli daha kırılgan olmakla beraber çok yüksek hızlara (mesela 400km/h) ve çok yüksek gerilim düzeylerine olanak sağladığından, AC sistemlerde pantograf ve havai hat kullanılmaktadır. Rijit havai katener hattı kullanılan 1500 V DC sistemler pantografin sunmakta olduğı avantajlar nedeniyle metro projelerinde standart uygulama olmuş ve bu günümüzde yaygın bir duruma gelmiştir.

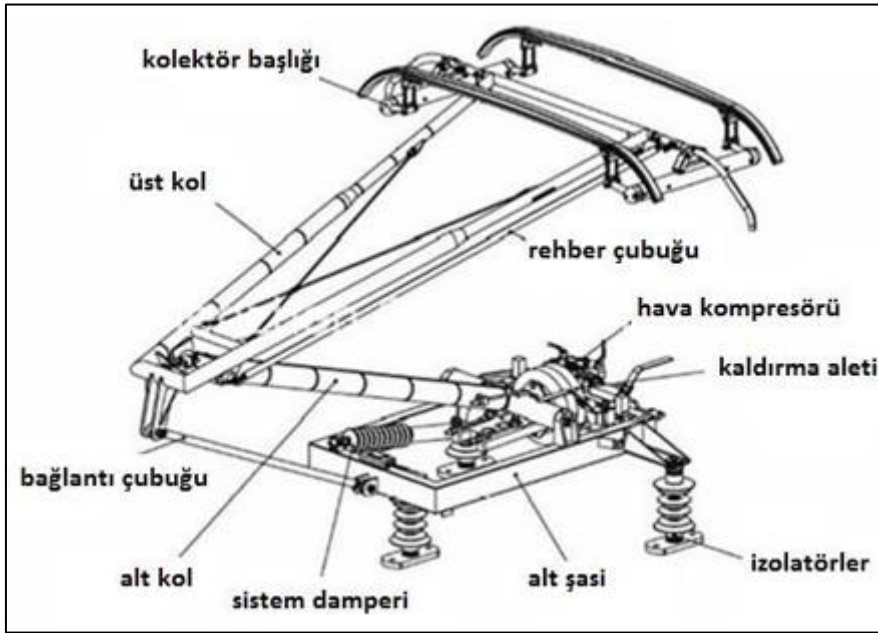


Şekil 5.8. Tren akım toplama sistemleri çeşitleri [24]

5.2. Standart bir katener sistemi

Aşağıda standart bir katener sistemi bölümleri gösterilmektedir:

- a) Seyir teli (pantografla temas halinde olan iletken), taşıyıcı tel ve pandül.
- b) İletken destek yapıları (konsolaban takımı, izolatörler, katener direği vs.).
- c) Gergi sistemleri (otomatik gergili, sabit gergili ya da karşı ağırlıklı).



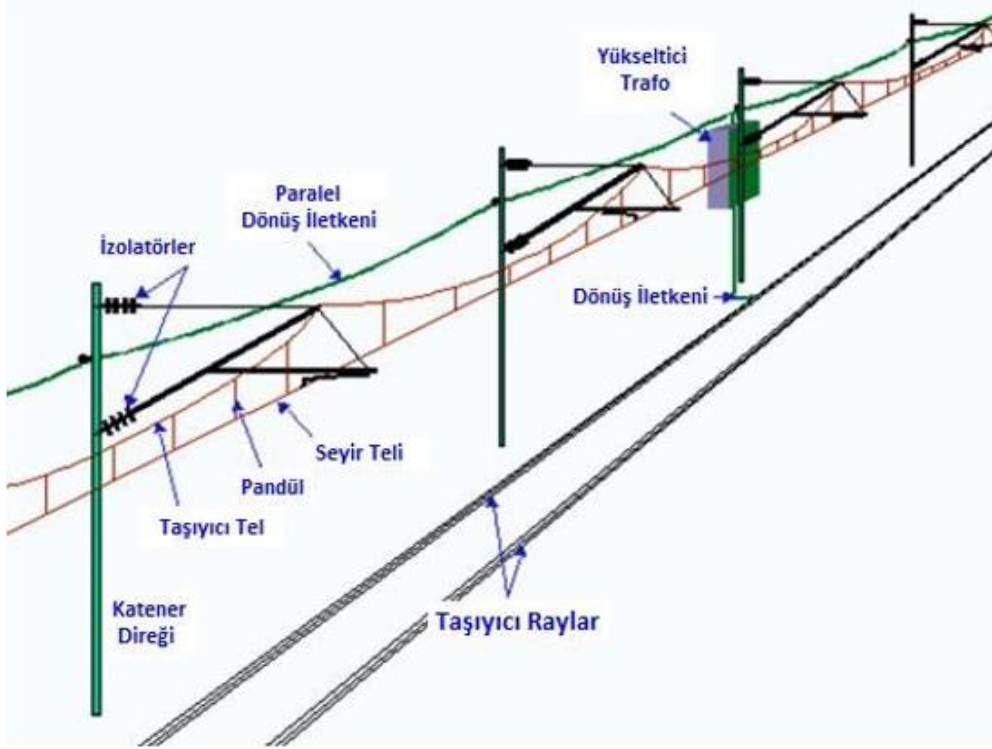
Resim 5.3. Tipik bir pantografin parçaları



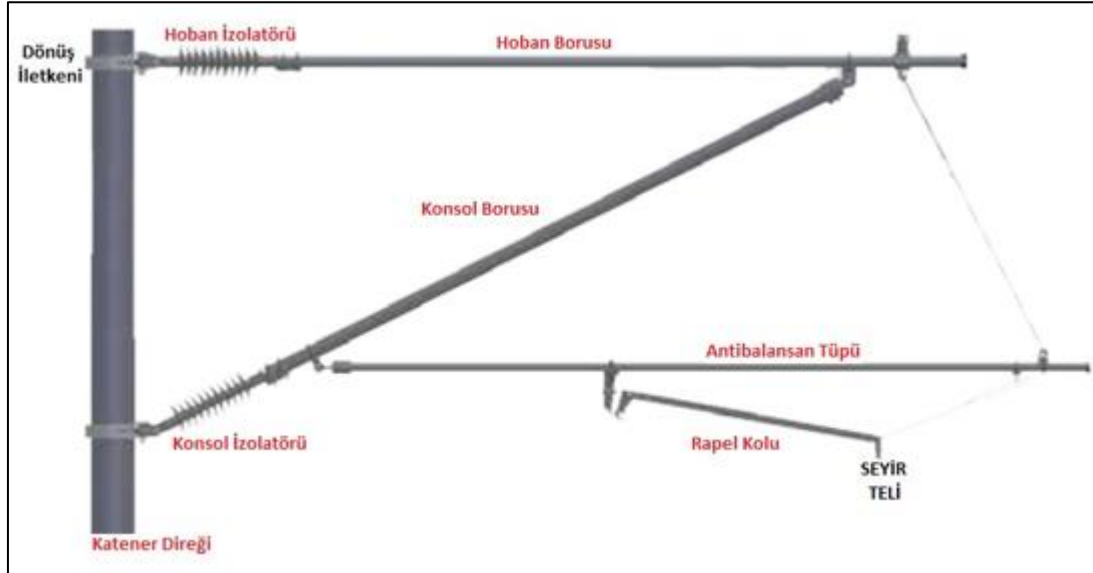
Resim 5.4. Trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf

Havai hatla pantograf arasındaki temasın sürekli ve iyi bir şekilde sağlanması çok önem arz eder. Aşırı temas bakır seyir telini ve pantograf kömürünü çok erken aşındırmakta ve hatta havai katener sisteminde kopmalara sebep olabilmektedir. Yeterli kurulmamış bir temas ise pantograf ile seyir teli arasında arklar oluşturacağından elektromanyetik girişime (EMI) ve aşınmalara neden olabilmektedir. Bununla beraber yetersiz bir temas, yüksek direnç gibi davranan bir alan oluşturacağından, fazladan güç kayıpları yaratmakta ve bu sebeple hattın enerji iletme verimini azaltmaktadır. Dolayısıyla pantograf ile seyir teli arasında kurulan kontağın miktarı özellikle yüksek hızlı trenlerde oldukça önemlidir. Yüksek hızlarda pantograf ile seyir teli arasında oluşan bu kontağın zorlaşması yüksek hızlı trenlerin 400km/h hızın üzerine çıkamamasına sebep olan en büyük unsurlardan biridir. Yüksek hızlı trenlerde pantograf tasarımı yapılırken aerodinamik kanunlar göz önünde bulundurulduğu için, pantograf başlığı seyir halinde oluşan rüzgâr sayesinde yukarı doğru açılarak temas şiddetini artırmakta ve dengeyi korumaktadır [21].

Seyir teli katener hat boyunca yeterince düz olursa seyir teli ile pantograf arasında verimli bir temas sağlanabilmektedir. Seyir telinin amaçlandığı şekilde düz olabilmesi için pandüller vasıtasıyla taşıyıcı bir tele asılmıştır. Seyir telinde meydana gelebilecek sehimler farklı uzunluklardaki pandül telleri kullanılarak en aza indirgenmektedir. Üç iletkenden oluşan bu sistem izolatör ve diğer destek araçları aracılığıyla belli aralıklarla katener direklerinin üzerine asılmaktadır. Bu katener direkleri arasındaki mesafeler 22-60 m arasında değişmekte olup, bu yolun düz ya da virajlı (Kurb bölgeler) olmasına bağlıdır [21]. Standart tipteki havai katener sistemi Şekil 5.9’da bütün olarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, katener direğinin donatısındaki parçalar Şekil 5.10’da görülmektedir.

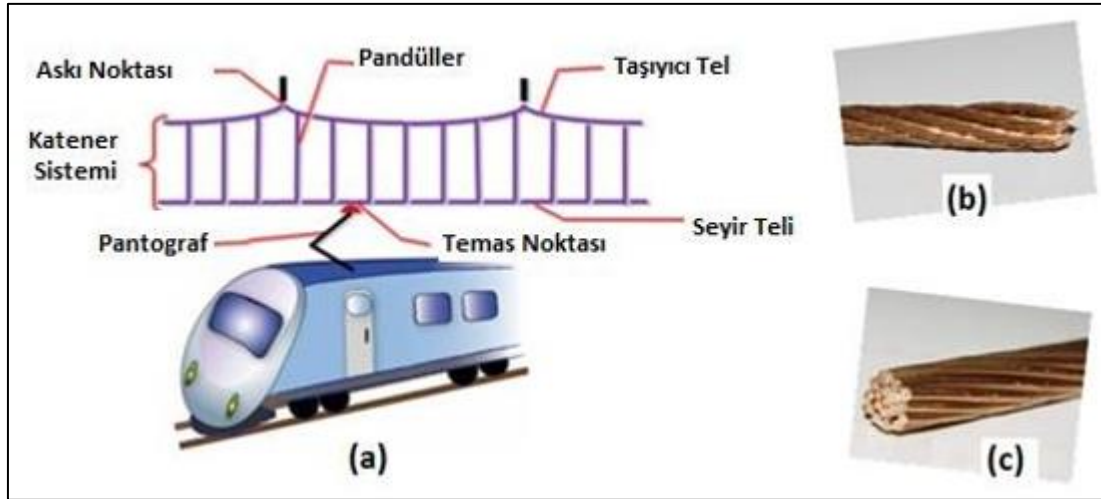


Şekil 5.9. Standart havai katener sistemi [24]



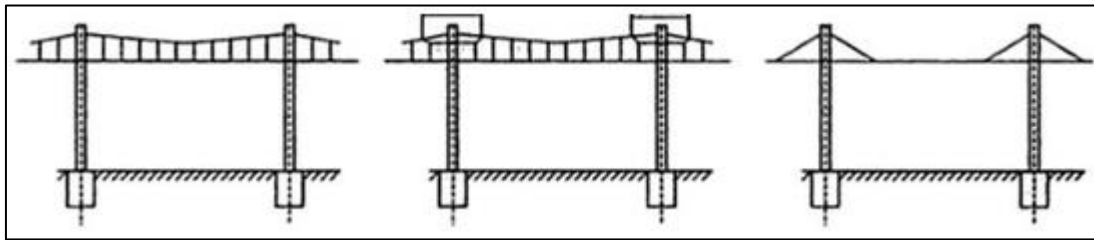
Şekil 5.10. Basit katener direği montaj şeması [24]

Taşıyıcı tel Şekil 5.11 (c)'de gösterilmektedir ve bu ikinci iletken Şekil 5.11 (a)'deki gibi iki direk arasında asılarak seyir telini desteklemesi amaçlanmaktadır. Telin ağırlığı sehim oluşmasına sebep olmaktadır. Farklı uzunluktaki pandüller aracılığıyla belli noktalardan taşıyıcı tele asılan seyir telinin dümdüz şekilde raylara paralel olması amaçlanmaktadır.

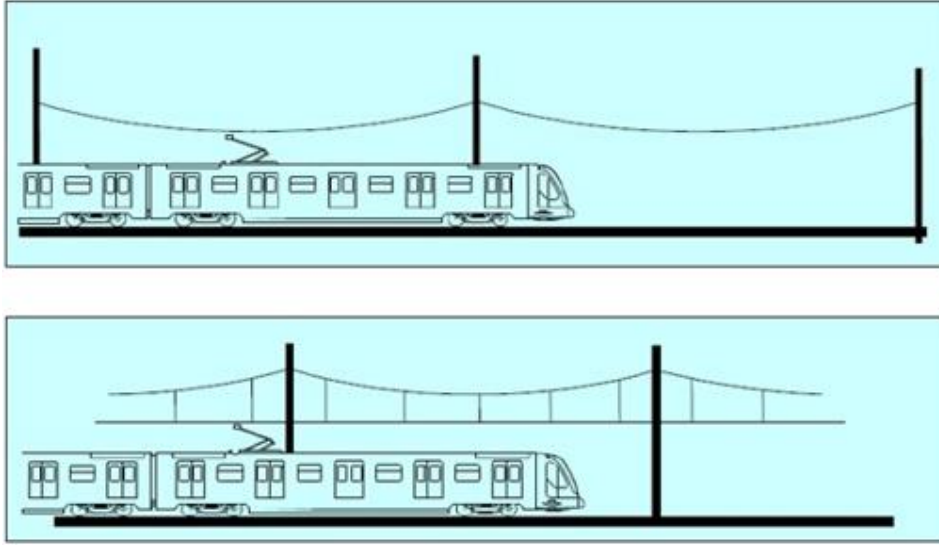


Şekil 5.11. (a) Basit katener sistemi, (b) Pandül, (c) Taşıyıcı tel [24]

Katener askı sistemleri çeşitlidir ve trenin hızı, iklim koşulları ile katener direkleri arasındaki mesafeye göre kurulmaktadır. Taşıyıcı tel ve pandüllerin kullanılmadığı basit askıda (trolley tipi askı) sadece seyir teli bulunmaktadır. Depo ve atölye bölgelerinde, park sahalarında, işletme hızının az olduğu hatlarda ucuz ve basit olması nedeniyle bu tip sistemler kullanılmaktadır. Pandül ve taşıyıcı telin olduğu katener tipi askı sisteminin kullanımı orta ve yüksek hızlı sistemlerde gereklidir. Standart katenerler çok yüksek hızlı trenlerde (>250 km/h) yeterli olmadığından Y tipi katener şeklinde özel modifikasyonlara (daha sık pandül yerleştirilmesi, daha kısa direk açıklığı ve Y tipi direk askısı gibi) ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de değişik tiplerde katener askı sistemi görülmektedir



Şekil 5.12. Farklı tipte havai katener hatları [22]



Şekil 5.13. Basit askı katener (üst) ve standart havai katener (alt) [22]

Şekil 5.14’de seyir teli ve kesiti gösterilmektedir. Seyir telinin karakteristik bilgileri de Çizelge 5.2’de verilmiştir. AC sisteme sahip raylı sistemlerde çoğunlukla, kesiti 150 mm^2 olan bakır seyir teli kullanılmaktadır. Raylı sistem uygulamalarında seyir teli kesit hesabı için yapılan analizlerde Sonlu Elemanlar Methodu (FEA) kullanılmaktadır. Seyir telinin kesiti tren pantografı ve trafo merkezi arasındaki gerilim düşüşünü en fazla %10’da tutacak şekilde seçilmelidir ayrıca seyir telinde oluşan ısınma miktarı, izin verilen aralıklar dahilinde tutulmalıdır. FEA sayesinde bu seyir telinin hat boyuncaki dinamik davranışı kolaylıkla çözümlenebilir [22]. FEA malzeme çeşidini, seyir teli karakteristik bilgilerini, pantografin seyir teline uyguladığı temas kuvvetini ve pantografin dinamik ağırlığını, hattın durumunu, pantografin oluşturduğu osilasyonu, hatta aerodinamik etkileri bile hesaplamada dikkate almaktadır [22]. Bu analizler EN 50163 Demiryolu Cer Trafo Merkezleri Gerilim Sistemleri, EN 50119 Havai Katener Sistemi ve EN 50149 Bakır Seyir Telleri standartlarına uygun şekilde yapılmalıdır [22].



Şekil 5.14. Seyir teli ve kesiti [24]

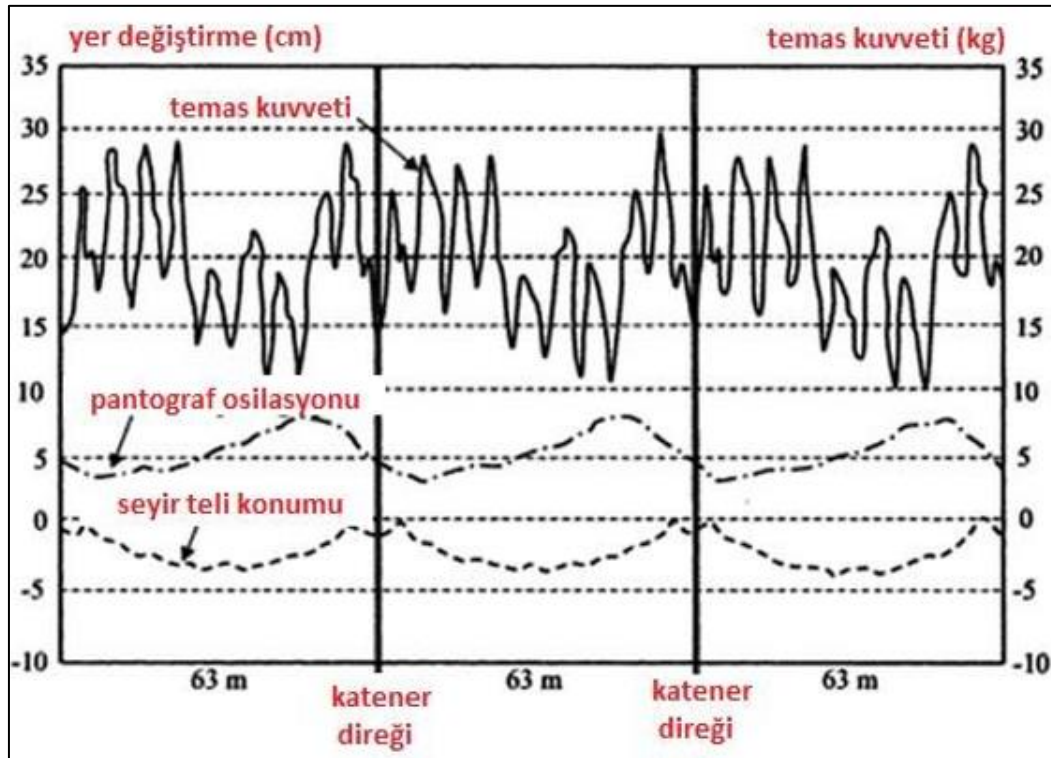
Çizelge 5.2. 350 km/h hıza uygun seyir telinin karakteristikleri [21]

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

Seyir teli ile pantograf arasındaki temasın iyi kurulması ne fazla ne de az ve kesliyen bir temas ya da hiç temas olmaması durumunun yaşanmaması, katener mühendisliğinde çok önemli bir konudur. Bu açıdan pantograf kömürü (pantograf üzerine yerleştirilen karbon şerit) epey bir önem arz etmektedir, kontrolleri ve bakımları düzenli olarak yapılmalıdır. Eğer aşınma belirli değerlerin üstüne çıktıysa hemen yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Aksi halde pantograf katenere ciddi derecede zararlar verebilir. Karbon şerit malzemenin sertliği bakır seyir teline göre daha az olduğu için çabuk aşınmaktadır. Katener iletken ile pantografin arasında kurulan temas aynı noktadan ve devamlı şekilde sağlanmamışsa pantograf kömürü eşit şekilde aşınmamakta ve şerit üzerinde katenere veya pantografa hasar verebilecek çentikler oluşmaktadır. Şekil 5.15'de görüldüğü gibi, pantograf kömürünün eşit şekilde aşınması için seyir teline ardışık iki katener direği arasında sürekli olarak sağa ve sola doğru zikzak (zigzagging ya da staggering) yaptırılır. Buna katener dezeksman ayarı denilmektedir. Bu ayar pantografin boşa çıkmasını önlemek amacıyla belli sınırlar içerisinde yapılmaktadır (yaklaşık ± 20 cm). 350 km/h yüksek hızlı bir trende seyir teline pantograf tarafından uygulanan temas kuvvetinin [kg] etkisi ve uygulanan bu temas kuvvetinin etkisiyle seyir telinde meydana gelen salınım [cm] Şekil 5.16'da gösterilmektedir [22]. Bu değerler sonlu elemanlar methodu analizi yapılarak elde edilmiştir.



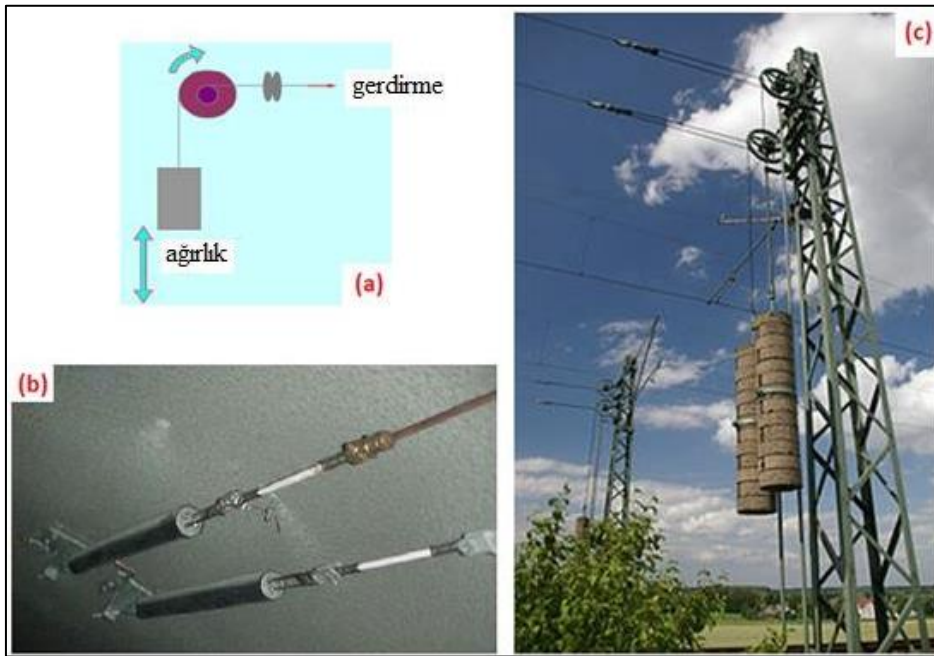
Şekil 5.15. Seyir teli dezeksmanı [24]



Şekil 5.16. Tipik bir havai katener sistemine ait FEA analizinin sonucu [22]

gergi için gereken kuvvet elde edilmektedir. Yaklaşık 10 ile 20 kN arasında bir gergi uygulanmaktadır (1-2 ton arasında). Rüzgârlı havalarda sallanmaması için bir tüp içerisinde geçirilerek sadece aşağı ve yukarı yönde hareket edebilen ağırlıklar sabit gergilerdeki gibi ortalama 800 m’de bir katener direklerine asılmaktadır.

İki tarafına da ağırlık uygulanan otomatik gergili sistemlerde bir diğer önemli husus ise menzilin tam ortasındaki noktadan sabitlenmesi zorunluluğudur. Yoksa, sıcaklık değişimleri nedeniyle uzamış olan katener hattı, güzergahı müddetince serbest şekilde hareket edebilmektedir. Ek olarak, katener hattının sadece bir tarafa sünmesini engellemek için taşıyıcı teli hoban takımına, seyir telini de taşıyıcı telin üstüne sabitlemek gerekir.



Şekil 5.18. (a) Ağırlık sistemi, (b) Sabit gergili sistem, (c) Otomatik gergili sistem

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

Şekil 5.19. Otomatik bir gergi sistemi [23]

6. TÜRKİYE'DEKİ RAYLI SİSTEM BESLEME TRAFOLARI

6.1. Raylı Sistemlerde Geleneksel Transformatör Yapısı

Raylı sistemlerde gelenekse olarak üç fazlı YG-OG (örneğin 154 kV - 27.5 kV) transformatör kullanılıp söz konusu üç faz transformatörün iki fazı tek faz bir indirici transformatörün primer sargısına bağlanmaktadır. Çekilen akım dengesiz ve 180 derece faz farkı ile olduğundan kayda değer seviyede OG hattında dengesizliğe yol açmaktadır.

Bu dengesizlik miktarı Raylı sisteminin yükü ile doğrudan ilişkilidir. İzban gibi büyük yüklerin etkisi daha fazladır.

Cer sisteminde kullanılacak transformatörler ayrıca özel olarak tasarlanmalıdır.

Geleneksel şebeke transformatörlerinde yıldız noktası iletken kesiti faz iletken kesitinin yarısı seçilmektedir. Fakat tek faz raylı sistemlerinde toprak noktası geleneksel transformatörlerden farklı olarak tasarlanıp seçilmelidir.

Tez konusu transformatör mevcut sistemlerden farklı olarak YG-OG indirici aşamasında tek faz olarak tasarlandığından OG kısmındaki şebeke de tek faz şebeke olacağından dengesizlik ve dengesizlikten doğan dezavantajlar OG şebekesinde giderilmiş olacaktır.

AG şebekesinin gücünün yanında Raylı sisteminin gücü düşük olacağından yarattığı dengesiz yüklenmenin de etkisi şebeke üzerinde az olmaktadır.

6.2. Metro

Metro hatlarının Katener sistemlerin enerji beslemesinde 600 V DC, 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 15 kV AC (16,7 Hz), ve 25 kV AC (50 Hz) gerilimler kullanılmaktadır. Metro hatlarında katener sistem olarak 3. Ray ve rijit katener sistemleri kullanılmaktadır. DC sistemlerde şebekeden gelen elektrik enerjisi 11 kV ya da 33 kV olacak şekilde yerel santralden ya da ulusal şebekeden alınmakta ve güzergah üzerinde konuşlandırılmış indirici merkezleri tarafından daha düşük bir gerilim seviyesine indirilmektedir. Bu indirici transformatör merkezleri çoğunlukla 2–7 km aralıklar ile güzergah mesafesince

kurulmaktadır. Gerilim, indirici merkezlerde uygun görülen bir miktara düşürüldükten sonra, doğrultulmakta ve katener hattına (ya da iletken raylara) verilmektedir.

DC ve AC elektrikleştirilme arasında bulunan temel ayrım, DC sistemlerde şebekeden gelen elektrik enerjisinin güzergah üzerinde konuşlandırılmış indirici merkezleri tarafından düşürülüp doğrultularak hatta iletilmesidir. AC sistemlerde indirici ve doğrultucular trenin üstünde bulunmaktadır.

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında:

1. Yoğunluğu ve kapasitesi yüksek, alçak hızlı sistemlerde dakikalık aralıklarla çalışan trenlerde, AC sistem DC sisteme göre daha masraflı olmaktadır [20].
2. Yüksek güçlü, yüksek hızlı, şehirler arası çalışan ve sıklıkları daha az olan trenlerde AC sistem DC sisteme göre daha ekonomik olmaktadır [20].

6.3. YHT

YHT sisteminde kullanılan transformatörler ulusal şebekeden aldığı 154 kV AC'lik enerjiyi 27,5 kV AC'a indirerek katener sistemine verir. YHT için kataner hat "havai hat" şeklindedir. Her merkezde 2 adet transformatör bulunur. Her transformatör 25 km'lik çift hat kesimini beslemekte ve gerektiğinde diğer transformatörün beslediği hat kesimini de enerjilendirebilmektedir.

Transformatörlerin konuşlandıkları merkezler arasındaki mesafe yaklaşık olarak 50 km'dir. Komşu iki merkez arasında yaklaşık 25 km mesafede nötr bölgeler bulunmaktadır. Hattaki trafik yoğunluğuna göre trafo kademesi ayarlanabilmekte, gerektiğinde hattın belli kısımları farklı bir merkezden beslenebilmektedir.

YHT Bölge Müdürlüğü sorumluluğunda bulunan trafo merkezlerinde bulunan güç transformatörleri 25 MVA gücündedir.

6.4. İzban

25 kV AC sistem Transformatör tercih edilmiştir.

7. RAY HATTINDA KULLANILAN CER SİSTEMLERİ VE MAKİNE ÖZELLİKLERİ

Elektrikle çalışan lokomotiflerin en önemli unsurları arasında invertör/konvertör birimi, Cer kontrol yazılımı, Cer motoru ve Cer trafosundan ibaret olan “Cer sistemi” yer almaktadır [25]. Genel olarak, lokomotif giderlerinin yarısı Cer ve lokomotif kontrol sistemlerinden kaynaklanmaktadır. TCDD tarafından kullanılan elektrikli lokomotiflerin Cer kontrol yazılımı ile Cer invertör/konvertör birimleri dünya üzerinde az sayıda şirket tarafından üretildiğinden, bu ürünlerin tedariki maliyet açısından sorun teşkil etmektedir. TÜBİTAK MAM ve TULOMSAŞ ortaklığıyla 2011 yılı TÜBİTAK 1007 Programı dahilinde 3 yıllık bir proje olan 1MW güce sahip “E1000 Tipi Elektrikli Lokomotif Geliştirilmesi Projesi” sayesinde, elektrikle çalışan lokomotifler için yerli bir Cer sistemi tasarımında önemli bir başlangıç yapılmıştır [25].

Bu proje kapsamında geliştirilecek Cer sistemi ile birlikte, 5 MW güce sahip yerli bir elektrikli lokomotif (E68000) imalatı amaçlanmaktadır [25]. Böylelikle, Cer sistemi haricindeki üretim ve lisans hakları TULOMSAŞ’a ait olan E68000 lokomotifi, dış kaynaklardan bağımsız bir şekilde, yüksek katma değerli alt sistemleriyle yurt içinde imal edilebilmekte ve ihraç edilebilmektedir.

Proje sonucunda, merkezî lokomotif kumanda sistemi ile yerli Cer tabanlı kontrol yapısının işler hale getirilmesi ve 5 MW güce sahip Cer elektrikli sistemin lokomotide entegrasyonu amaçlanmaktadır.

Yerli E68000 projesi kapsamında geliştirilmesi hedeflenen teknolojiler şunlardır:

5 MW düzeyinde Cer gücü destekleyecek çağdaş AC çekim teknolojisi,

Geri kazanım sağlayan IGBT temelli doğrultma devresi sistemi,

Üst düzey güce sahip Cer motor sürüşü teknolojisi,

AC’den AC’ye dönüşüm sistemleri,

IEC50155, IEC50121, EN50163, IEC61287 ve IEC61377 standartları kapsamında tasarlanan ve test edilen bir Cer sistemi.

TSI kriterlerine uyumlu ve güvenli donanım ve yazılım oluşturma teknolojileri,

Raylı araçlar için güvenli yazılım ve donanımların geliştirilmesine dair kriterlere uygun proje planlarının belirlenmesi ve uygulanması,

Donanım ve yazılımların güvenlik kriterleriyle uyumlu şekilde geliştirilmesi,

Güvenlik kriterlerini karşılayacak testlerin yapılması ve onay belgelerinin alınması.

Kızaklama ve kayma kontrolü teknolojileri,

Cer ve lokomotif kontrol sistemleriyle bir arada çalışan gerçek zamanlı kızaklama ve kayma kontrolü sistemi.

Lokomotifin test ve kabul süreci:

Türkiye'nin ilk yerli "Lokomotif Kontrol ve Cer Sistemi" ile entegrasyonu sağlanmış ana hat lokomotifinin testleri, EN50215 ve EN14363 standartları karşılanarak, onaylı (akredite) kuruluş denetimine ibraz edilmektedir.

Proje kapsamında geliştirilecek Sabit mıknatıs ve AC Cer motorları şu özellikleri taşıması öngörülmüştür:

- Üretilen motorun montajı, aktarma organları gereksizden doğrudan buji içine yapılabilmelidir,
- Sabit mıknatısların montajı, motorun iç tabakasına en yüksek relüktans torku faydası sağlayacak biçimde gerçekleştirilebilmelidir,
- Trenin saatte 350 km düzeyinde işletilmesine olanak sağlanmalıdır,
- Sürücü devrelerinin akım zayıflatma algoritmaları tüm gereksinimleri karşılayabilmelidir,
- Çeşitli işletme hızları ile yükleme koşullarında asgari akımla azami tork verebilecek bir kontrol algoritması inşa edilmelidir,

- Bakır kayıplarının en aza indirgenmesiyle yüksek motor verimliliği elde edilmelidir,
- Yaygın Cer sistemlerinde gözlemlenen yüksek hız tork dalgalanmalarının önüne geçilerek, yüksek sürüş güvenliği ve rahatlığı sağlanmalıdır,
- Daha az enerji tüketmeli ve yüksek verimlilikte işletilebilmelidir,
- Süspanse edilmeyen ve lüzumsuz ağırlıklarda azalma sağlayacak şekilde hafif olmalıdır,
- Sabit mıknatıs motorlu Cer sistemi rejeneratif frenleme olanağı sunmalıdır.

7.1. Raylı Sistemlere Uyumlu 25 MVA Transformatör Tasarımı ve Üretimi

Trafo merkezine tedarik edilecek güç transformatörleri, TCDD trafo şartnamesinde kullanılacak cihazlara dair belirtilen güç transformatörü spesifikasyonlarını karşılamalıdır [26]. Birincil ve ikincil buşingleri akım trafolarıyla donatılmalıdır. Transformatörün izin verilen kısa devre dayanma süresi IEC'ye göre (IEC50155, IEC50121, EN50163, IEC61287 ve IEC61377 standartları) 3 saniyeden az olmamalıdır [26].

Trafo ısınma değerleri, aşağıda belirtilen aşırı yük koşulları dahilinde çalıştırıldığında, IEC (IEC50155, IEC50121, EN50163, IEC61287 ve IEC61377 standartları) ve TSI tarafından verilen değerleri aşmamalıdır.

Çalışma Koşulları:

Trafolar, şartnamede aksi belirtilmediği sürece, şu ortam koşullarında çalıştırılmalıdır:

– Çevre sıcaklığı

- | | | |
|---|----------------------------|----------|
| o | günlük (maksimum) | : +45 °C |
| o | günlük (minimum) | : -25 °C |
| o | günlük ortalama (maksimum) | : +35 °C |
| o | yıllık ortalama (maksimum) | : +25 °C |

- Rüzgâr basıncı : 70 kg/ (yuvarlak yüzey)
- 120 kg/ (düz yüzey)

- Solar radyasyon (maksimum) : 500 watt/

- Buz yükü : 10 mm, sınıf 10
- Endüstriyel kirliliğe açıklık : Evet (yüksek kirlilik)
- Depreme maruz kalma
- o yatay ivme : 0,5 g (yer düzeyinde)
- o dikey ivme : 0,25 g

Ortam sıcaklığının yukarıda verilen normal işletme koşullarının önemli miktarda dışına çıkabildiği bölgelerdeki tesisler söz konusu olduğunda; tercih edilen minimum ve maksimum sıcaklık aralıkları, soğuk iklimlerde -50°C ile $+40^{\circ}\text{C}$, sıcak iklimlerde ise -5°C ile $+50^{\circ}\text{C}$ şeklinde olmalıdır [26].

Trafo, çalışma koşullarında belirtilen düşey ve yatay deprem ivmesi değerleri dahilinde, hiçbir biriminin zarar görmemesi sağlanacak biçimde tasarlanmalıdır. Trafonun çalışma yerine tesisi için gerekli resim, proje ve malzemeler ile depreme dayanıklılık ölçümleri gerçekleştirilmeli ve kurulumu yapacak olan sorumlu mühendis ve teknik elemanlar üstlenmelidir.

Yapısal Özellikler:

Gerçekleştirilecek sistemde, iki fazlı (154 kV/27,5 kV), yağlı ve klasik tip trafo merkezlerine yerleştirilecek güç transformatörlerinin temini ile koruma ve yönetim sistemleriyle birlikte servise alınma şartları sağlanmalıdır. Üstlenilecek işler, teknik şartnameye uygun olacak ve şu maddeleri içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Trafoların tasarımı ve imalatı,
- Trafo ve ilgili bileşenlerinin testlerinin yapılması ve test raporlarının sunulması,
- Yedek parçalar,
- Bakım ve montaj için gereken alet ve takımlar,
- Elektrik şemalarının, resimlerin ve trafoların işletme, montaj ve bakımı hakkındaki belgelerin onay için gönderilmesi,
- Trafo montajı sürecinde gözetmenlik hizmeti.

Aşağıda maddelenen işler kullanıcı tarafından karşılanmalıdır:

- Trafoların tesisi için gerekli, ray sistemiyle donatılmış betonarme temel ile diğer inşaat işleri,
- Topraklama sistemleri,
- Haberleşme, kumanda ve koruma sistemlerinin tesisi ve hizmete alınması,
- DC ve AC besleme sistemleri
- Uzak kumanda merkez bağlantıları için gereken tüm kurulum, donanım test ve hizmete alma,
- Şantiye içerisindeki montaj çalışmaları sürecinde bileşenler için uygun depolama,
- Yağ arıtımı için gerekli ekipman,
- Trafo montajı,
- Gerekli saha testleri,
- Hizmete alma.

Trafo merkezleri hakkında hazırlanmış olan bu şartnamede belirtilen işler konusu itibarıyla ekte sunulan birim-metraj listesindeki donanımın teknik ve amacına uygun biçimde tamamlanmıştır.

Aşırı Yük Şartları:

Nominal gücün % 75'i değerinde kesintisiz biçimde çalıştıktan sonra, % 150 yükü 15 dakika ve % 200 yükü 5 dakika olacak şekilde testler yapılmıştır.

Kademe değiştiricisine ait elle kumanda mekanizması üzerinde bir konum göstergesi bulunmaktadır ve gerilimin altı kademe değişimini engellemek üzere, kesicilere açma emri verilebilmesi için mekanizma miline eklenen ve milin hareketiyle anında kapanan bir kontak yer almaktadır. Güç trafosuna, her konumda kademeleri kilitlenebilen, 5 kademedен oluşan (30, 25- 28, 75- 27, 50 - 26, 125 - 24, 75 kV) boşta kademe değiştirme cihazı teçhiz edilmiştir.

Güç trafosunun üzerinde; fleksibl separatör, genişleme tankı, bucholz, sargı ve yağ sıcaklığı, kontak termometre ve yağ seviyesi ile gaz basıncı için öz koruma sistemleri yer almıştır.

Güç transformatöründe sargı ile gövde arası kaçak akımlara karşı tank kaçağı koruması bulunacağı için, trafonun alt tekerleriyle gövdesi arasında izolasyon uygulanmıştır.

Güç trafosunun öz koruma bağlantılarıyla buşing türü akım trafolarının ikincil sargı uçları, trafonun gövdesinde bağlantı kutusuna eklenmiştir. Donanım ile ilgili bütün kablolar çelik spiral içerisinden geçirilmiştir. Tüm akım taşıyıcı kabloların bağlantı kutusu içerisindeki terminalleri çiftli, klemensler ise otomatik şöntlemeli biçimde gerçekleştirilmiştir.

Güç trafosunun iki tarafındaki parafudurların koruma alanı sınırlı olduğun için, transformatörler koruma alanı içerisine konumlandırılmıştır.

Raya bağlı dönüş akım kabloları asgari 3 kV yalıtım değerinde olmuştur. Şalt alanında trafoların yerleştirileceği ray açıklığı, standart TCDD ray açıklığında (1435 mm) olacak ve transformatörün üretimi sırasında bu husus dikkate alınmıştır. Güç trafolarının altlarına konulan raylar bir topraklama ağına bağlanmıştır.

7.2. Transformatörün Kayıpları

Demir kayıpları

Transformatör kayıplarından biri olan demir kayıpları (boşta kayıplar) alternatif akım sırasında (frekansa bağlı olarak) oluşmaktadır. Bu alternatif akımın, bir periyotta iki sefer yön değiştirmesinin, iletken malzemeler üstünde iki çeşit etkisi oluşmaktadır. Bunlardan ilki “histerezis kaybı” diye adlandırılan manyetik bir etkidir. Akımın anlık değerinin değişmesiyle birlikte, amper sarımın anlık değerinin değişmesi ve dolayısı ile B manyetik alan yoğunluğunun da değişmesi şeklinde kendisini göstermektedir. İkincisi de, demir nüvenin elektrik akımına karşı gösterdiği dirençten kaynaklanan elektriksel etkidir. Malzeme iletken maddeye benzer özellik göstererek değişen akımın etkisinde kalmakta ve nüve üzerinde gerilim indüklenmektedir. Bu indüklenen gerilim sebebiyle malzemenin içerisinde akmakta olan akımlara Fuko-girdap (Foucault) akımları denilmektedir. Bu girdap akımlarının demir üzerinde serbestçe akması halinde demir malzemede ısı enerjisi açığa çıkmakta ve bu enerji “joule kayıpları” şeklinde tanımlanmaktadır.

Histerezis kaybı Eşitlik 7.1’de verilmiştir.

$$P_H = K_h x f x B_m^x \quad (7.1)$$

Transformatör kayıpları iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Boştaki kayıpların hemen hemen hepsi manyetik akı yoğunluğuna bağlı olan nüve kayıplarından oluşmaktadır. Yük kayıplarının bileşenleri aşağıda verilmektedir:

Rezistif kayıplar (RI^2)

Stray kayıplar, bu kayıplarda iki ayrı bileşenden oluşur:

- Sargılardaki girdap akım kayıpları
- Transformatörün metal aksamalarında oluşan stray kayıplar

Bu kayıpların toplamı yük kayıplarını oluşturmaktadır:

$$q_{load} = q_{cu-load} + q_{st-load} \quad (7.2)$$

Bu denklemde, $q_{cu-load}$, transformatör sargılarının rezistif kayıplarını ve $q_{st-load}$, transformatör sargılarının girdap akım kayıpları ile transformatörün metal aksamında (kazan, kapak, başlıklar, bağlantı saplamaları vb.) oluşan stray kayıplarının toplamını ifade etmektedir.

Rezistif kayıplar sargı kayıplarının ana kısmını oluşturmakta ve yük durumuna göre değişmektedir (RI^2). Denklemdaki R, transformatör sargılarının doğru akım (DA) direncidir. Bu direncin değeri sargıların sıcaklığıyla değişmektedir.

Sargı direncinin değişimi yağ sıcaklığına (θ_{oil}) bağlı olarak Eşitlik 7.3’te verilmektedir.

$$R_{\theta_{oil}} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \quad (7.3)$$

Bu denklemde, θ_0 sargı malzemesinin süper iletkenlik sıcaklığı olup bakır için 234.5 °C, elektrik amaçlı alüminyum (alüminyum EC) için 225 °C, elektriksel alüminyum alışımlı için 227 °C’dir.

θ_{oil} sıcaklığında, transformatörün rezistif kayıpları Eşitlik 7.4'ten hesaplanmaktadır.

$$I_{pu} = \frac{I_{load}}{I_{rated}} \quad (7.4)$$

$$q_{cu-load} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \times q_{cu-ref} \times I_{pu}^2 \quad (7.5)$$

Bu denklemde, q_{cu-ref} , transformatörün referans sıcaklığındaki anma bakır (rezistif) kayıplarıdır.

Transformatörün stray kayıpları da sargının sıcaklığıyla değişmektedir. Bu değişim Eşitlik 7.6'da gösterilmektedir.

$$q_{st-load} = \frac{(\theta_{ref} + \theta_0)}{(\theta_{oil} + \theta_0)} \times q_{st-ref} \times I_{pu}^2 \quad (7.6)$$

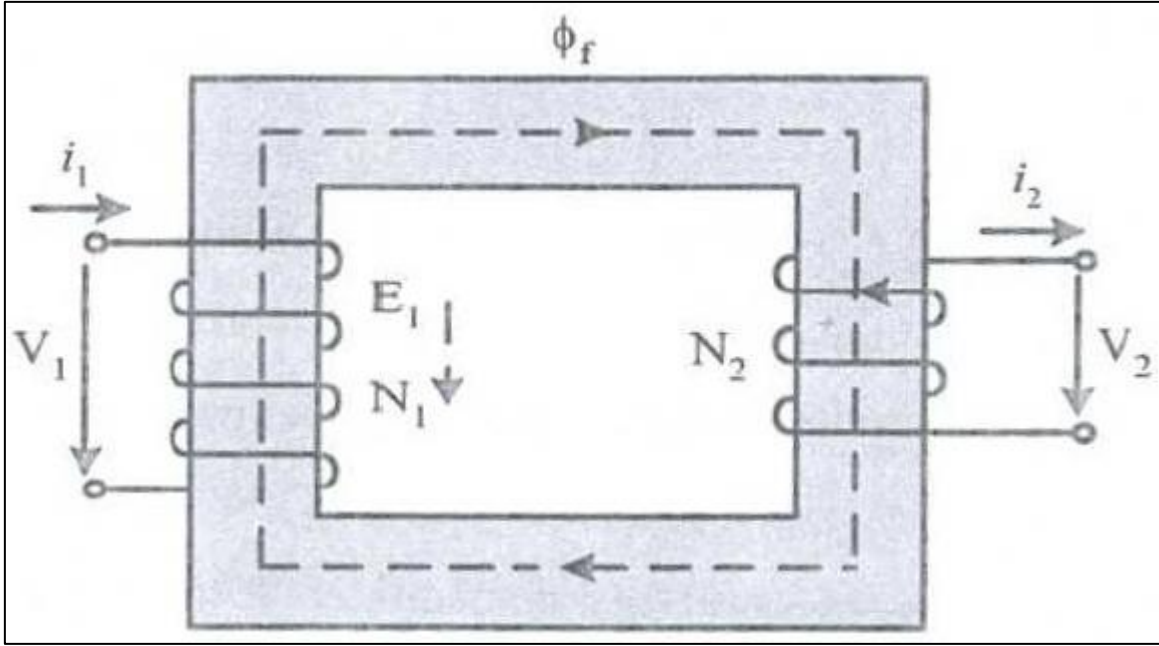
Bu denklemde, q_{st-ref} , transformatörün referans sıcaklıktaki anma stray kaybıdır. Transformatörün yük kayıplarının sıcaklıkla değişimi Eşitlik 7.7'de sunulmaktadır.

$$q_{load} = \left(q_{cu-load} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \times q_{cu-ref} + \frac{(\theta_{ref} + \theta_0)}{(\theta_{oil} + \theta_0)} \times q_{st-ref} \right) \times I_{pu}^2 \quad (7.7)$$

7.3. Transformatörde Eşdeğer Devrenin İndirgenmesi

7.3.1. Tek fazlı transformatörlerde kayıpları göz önüne almadan inceleme

Eğer bir iletken e.m.k indüklenecekse, iletkeni değişken bir manyetik alana maruz bırakmak transformatörlerin çalışma esasını oluşturmaktadır. Lenz kanununa göre değişen manyetik alan içinde transformatörde indüklenen e.m.k,



Şekil 7.1. Çekirdek tipi tek fazlı transformatör gösterimi

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7.8)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Şekil 7.1’de görüldüğü üzere teorikte birincil ve ikincil sargılar ayrı bacaklara sarılmış olduğundan iki tane devre oluşmaktadır. Fakat bu devreler arasındaki bağlantı elektriksel değil, indüksiyon yoluyla meydana gelen manyetik bir bağlantıdır. Transformatörü çalıştırmak için birincil sargıya alternatif bir gerilim $v_1(t)$ uygulanırsa, birincil taraftan $i_1(t)$ akımı geçtiği görülmektedir. İkincil sargıda $e_2(t)$ geriliminin indüklenmesi bu $i_1(t)$ akımının oluşturduğu ve çekirdeğin üstünden devresini tamamlayan Φ akısı sayesinde gerçekleşmektedir. İkincil tarafta bir yük olması halinde indüklenen $e_2(t)$ gerilimi sayesinde oluşan $i_2(t)$ akımı ve dolayısıyla $v_2(t)$ gerilimi yüke ve ikincil sargıya uygulanmış olmaktadır.

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (7.9)$$

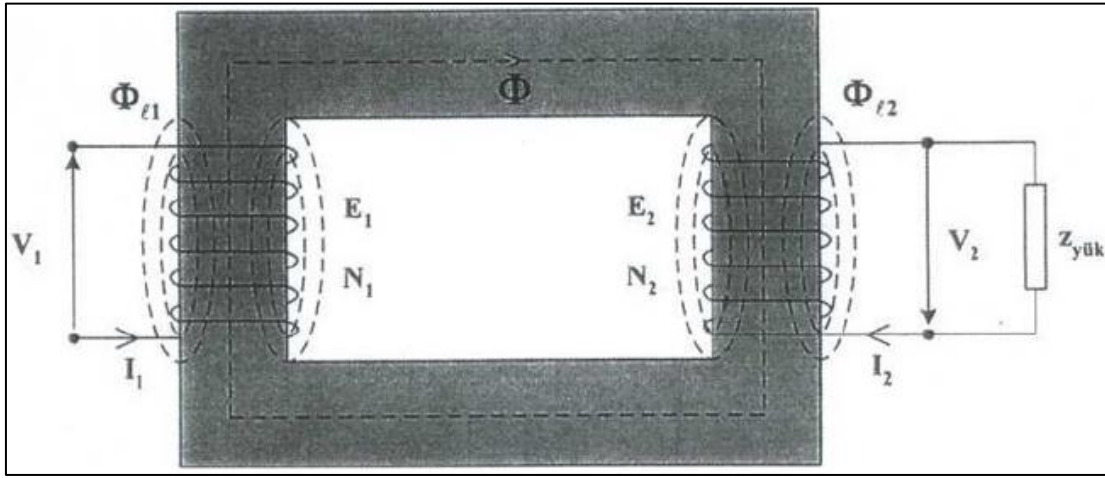
Sinüzoidal bir şekilde değişen gerilim ve akımların efektif değerleri ele alınacak olursa;

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (7.10)$$

eşitlikleriyle transformatörlerin dönüştürme oranı ' a ' bulunmaktadır. Kısaca; transformatör uçlarındaki gerilimlerin (V_1, V_2) oranı, indüklenen gerilimlerin (E_1, E_2) ve sarım sayılarının (N_1, N_2) oranları ile doğru, akımların (I_1, I_2) oranları ile ters orantılı olmaktadır. Bu dönüştürme oranı transformasyon olarak da tanımlanmaktadır.

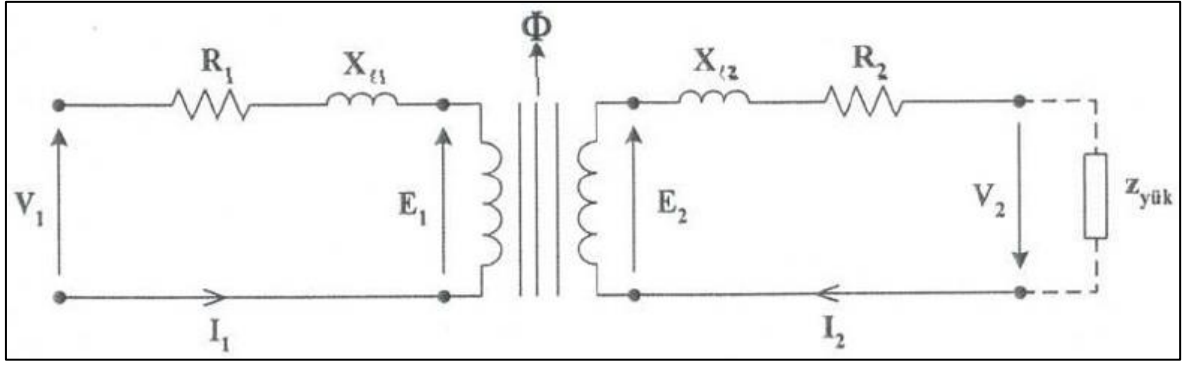
7.3.2. Tek fazlı transformatörlerde kayıpları göz önüne alarak inceleme

Bir devrenin manyetik karakteristiğine bakılacak olursa devrede oluşan bütün manyetik akının devrenin üzerinden geçmesi beklenmektedir. Fakat manyetik kuvvet vektörleri, manyetik devrenin relüktansı büyüdüğünde (yükli çalışma durumunda) ya da gidecek daha kısa bir rota bulduğunda, manyetik devreden ayrılıp bu kısa olan yoldan devrede ilerlemeye devam etmektedir. İlk manyetik rotadan ayrılıp, yollarını trafo bacaklarının iç ve dış yüzeyinden tamamlamakta olan bu akılar kaçak manyetik akılar olarak isimlendirilmektedir. Şekil 7.2 bir fazlı transformatör devresindeki bütün akı çizgilerini göstermektedir.



Şekil 7.2. Transformatörde akı çizgileri

Transformatörün yüklü çalışma durumundaki devre şeması Şekil 7.3'de gösterilmektedir. İdeal yapıdaki bir transformatörün birincil ve ikincil devrelerine ait ohmik dirençler ile bu dirençlere seri bağlanmış kaçak reaktanslar üzerinde iç gerilim düşümleri meydana gelir.



Şekil 7.3. Transformatörde yüklü çalışma durumunda eşdeğer devrenin şekli

Transformatörde indüklenen e.m.k'ler

$$E_1 = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad (7.11)$$

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad (7.12)$$

eşitliklerinde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

7.3.3. Transformatörlerde eşdeğer devre indirgemesi

Bilindiği gibi transformatörlerde birincil ve ikincil devreler arasındaki bağlantı fiziksel türden değildir. Transformatörlerle ilgili analizler sırasında hesaplama ve gösterim pratikliği açısından birincil ve ikincil taraftaki büyüklüklerin tek bir tarafa toplanması sıklıkla kullanılan bir yöntem olmakla beraber bu yöntemle transformatörlerde indirgenme işlemi denilmektedir ve hesaplama sırasında bir dönüştürme oranı 'a' kullanılmaktadır. Her iki taraftaki büyüklükler için de dönüştürülme yapılması mümkün olmakla beraber uygulama sırasında çoğu zaman ikincil sargı, birincil sargıya indirgenmekte ve indirgenmiş değerler (') işaretiyle gösterilmektedir. Aşağıdaki ifadeler ikincil büyüklüklerin birincil tarafa indirgenmesi sırasında kullanılan ifadelerdir.

$$E'_2 = aE_2 \quad V'_2 = aV_2$$

$$N'_2 = aN_2 \quad R'_2 = a^2 \cdot R_2$$

$$X'_{A2} = a^2 X_{A2} \quad I'_2 = I_2/a$$

Boşta çalışma kayıpları nominal (anma) kayıplarla kıyaslanırsa %25-30 miktarındadır. Boşta çalışma kayıplarında en çok yeri demir kayıpları tutmaktadır. İndüklenmekte olan E1 gerilimi ile verilen V1 gerilimi arasında bulunan δ açısı çok az olduğundan göz ardı edilebilmektedir. Bu halde $\varphi_0 = \delta + \psi_0$ eşitliğinde, $\varphi_0 \cong \psi_0$ olmaktadır. Başka bir deyişle, boşta çalışma halinde güç faktörünün açısıyla, demir açısı pratik hesaplama amacıyla eşit alınabilmektedir.

Boşta çalışma halinde gerçekleştirilen ölçümler baz alınarak R_{fe} , X_M , I_μ ve I_γ diye gösterilen eşdeğer devre parametrelerinin değerleri hesaplanmaktadır. Bu bahsedilen parametrelerin hesabı, boşta çalışma halinde $P_0 = P_{fe}$ olduğundan, aşağıda gösterilen eşitlikler yardımıyla yapılabilmektedir.

$$R_{fe} = \frac{P_0}{I_\mu^2} \quad (7.13)$$

$$I_\mu = I_{10} \sin \varphi_0 \quad (7.14)$$

$$I_\gamma = I_{10} \cos \varphi_0 \quad (7.15)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{V_1 \cdot I_{10}}$$

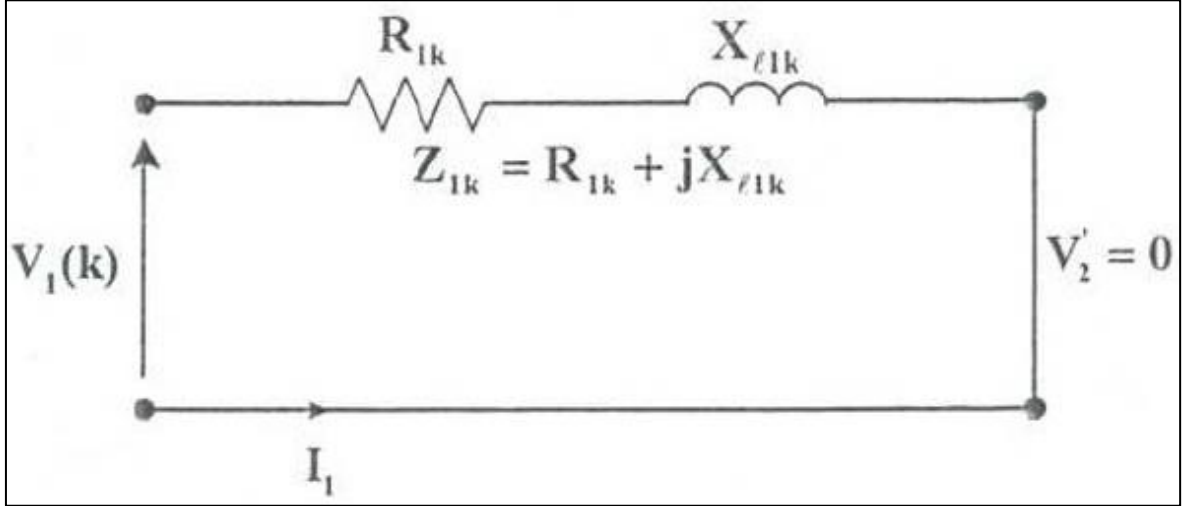
$$\sin \varphi_0 = \frac{Q_0}{V_1 \cdot I_{10}}$$

$$X_M = \frac{Q_0}{I_\mu^2} \quad (7.16)$$

$$I_{10} = \sqrt{I_\mu^2 + I_\gamma^2} \quad (7.17)$$

Transformatörün bu eşdeğer devresinde ikincil tarafa bağlanmış olduğu tasarlanan yük empedansının sıfıra eşit olması ($Z_y = 0$), transformatörü kısa devre etmekle aynı anlama gelmektedir. $Z_y = 0$ durumunda, çıkıştaki gerilim V' ise (yük uçlarındaki birincil tarafa indirgenen gerilim) 0 (sıfır) olmaktadır. Kısa devre durumundaki bir transformatöre ait eşdeğer devre Şekil 7.5'de verilmektedir. Kısa devre halinde anma (nominal) akımı ve anma (nominal) gerilimi uygulamak için iki çeşit uygulama bulunmaktadır. İlk uygulamada

birincil tarafa V_1 gerilimi verildiğinde oluşan akıma “kısa devre akımı” denilmektedir ve Eşitlik 7.11 ile gösterilmektedir.



Şekil 7.5. Transformatör kısa devre eşdeğer devresi

$$I_k = \frac{V_1}{Z_{1k}} \quad (7.18)$$

Genliği anma akımına göre çok fazla olan bu akım kısa devre akımı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca sargılarda oluşturacağı aşırı enerji kaybı sebebiyle çok büyük miktarlarda ısınmaya ve sonuçta çok az bir sürede yanmaya sebep olarak sargılara zarar vermektedir.

Bütün bunlar göz önüne alındığında, kısa devre deneyi sırasında transformatöre hasar vermemek adına ikinci çalışma daha yaygın kullanılmaktadır. Bahsedilen uygulama sırasında kısa devre akımı, sargıların hasar almayacağı nominal akım değerleriyle kısıtlanmaktadır. Bundan dolayı kısa devre halinde transformatörün birincil sargısına uygulanan gerilim kontrol altına alınarak, geçen akımın anma akımına göre büyük olmaması sağlanmaktadır. Bu kısa devre akımı I_1 , ayarlanan gerilim ise V_k ile gösterilmektedir.

$$V_k = I_1 \cdot Z_{1k} \quad (7.19)$$

Kısa devre halinde birincil tarafa bağlanan bir wattmetreyle ölçülen güç, pratik olarak transformatörün çalışma halindeki bakır kayıplarının toplamını göstermektedir ve bu güç kısa devre gücü olarak isimlendirilmektedir. Aşağıdaki eşitliklerde ikincil taraftaki empedansların toplamını gösteren Z_{1k} için “kısa devre empedansı”, R_{1k} için “kısa devre

direnci” ve X_{1k} içinse “kısa devre endüktansı” denilmektedir ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$R_{1k} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} \quad (7.20)$$

$$Z_{1k} = R_{1k} + jX_{l1k} \quad (7.21)$$

$$X_{l1k} = \sqrt{Z_{1k}^2 - R_{1k}^2} \quad (7.22)$$

7.4. Transformatörlerde Güç ve Verim

Elektrik makinelerinde verim ve güç konusunda çalışırken, makinelerde oluşan kayıpların ihmal edilemez bir gerçek olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Transformatörlerin hareketli bir parçaya sahip olmaması, verimi yükselten, kayıpları ise azaltan, bir etkidir. Kayıplar incelendiğinde bakır ve demir kayıpları olarak iki çeşit olduğu görülmektedir [27].

Transformatörde birincil ve ikincil sargı dirençlerindeki ısı kayıpları bakır kayıpları olarak isimlendirilmektedir. Demir kayıplarıysa Fukolt (Girdap) kayıpları ve Histerisiz olacak şekilde ikiye ayrılarak incelenmektedir. Fukolt kayıpları, değişen manyetik alan içerisindeki çekirdeğin üzerinde akımlar meydana gelmesiyle ve bu akımların ısı kaybı oluşturması sonucunda görülmektedir. Histerisiz kayıpları ise önceden de açıklandığı şekilde, alternatif akımın bütün periyotlarında karşılaşılan değişimin çekirdekteki parçacıkları tekrar baştan dizmesiyle açıklanmaktadır. Yukarıda da anlatıldığı gibi transformatörün kısa devre durumunda bakır kayıpları, boşa çalışma durumunda da demir kayıpları belirlenebilmektedir.

Enerji dönüşümünü sağlayan ve iş yapan güç aktif güç olduğu için, transformatörde giren ve çıkan aktif güçlerin oranlanmasıyla elde edilen değere “verim” denilmektedir. Sembol olarak “ η ” kullanılmaktadır ve yüzde ile yazılmaktadır.

$$\eta = \frac{P_C}{P_g} \cdot 100 \quad (7.23)$$

P_g : Transformatörün girişine şebekeden verilen giriş gücü

P_{ζ} : Transformatörden çıkışından şebekeye verilen çıkış gücü (etiket gücü)

P_k : Kayıp güçler

$$P_g = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 \quad (7.24)$$

$$P_{\zeta} = V_2' \cdot I_2' \cdot \cos \phi_2 \quad (7.25)$$

$$\eta = \frac{V_2' \cdot I_2' \cdot \cos \phi_2}{V_2' \cdot I_2' \cdot \cos \phi_2 + P_k} \quad (7.26)$$

$$\eta = \frac{S \cos \phi_2}{S \cos \phi_2 + P_k} \quad (7.27)$$

Eşitlik 7.26 ve 7.27’de verim denklemleri verilmektedir. Plaka üzerinde görünür güç için verilen değer (S), yalnızca transformatörden çekilebilen gücü göstermektedir.

8. UYGULAMA

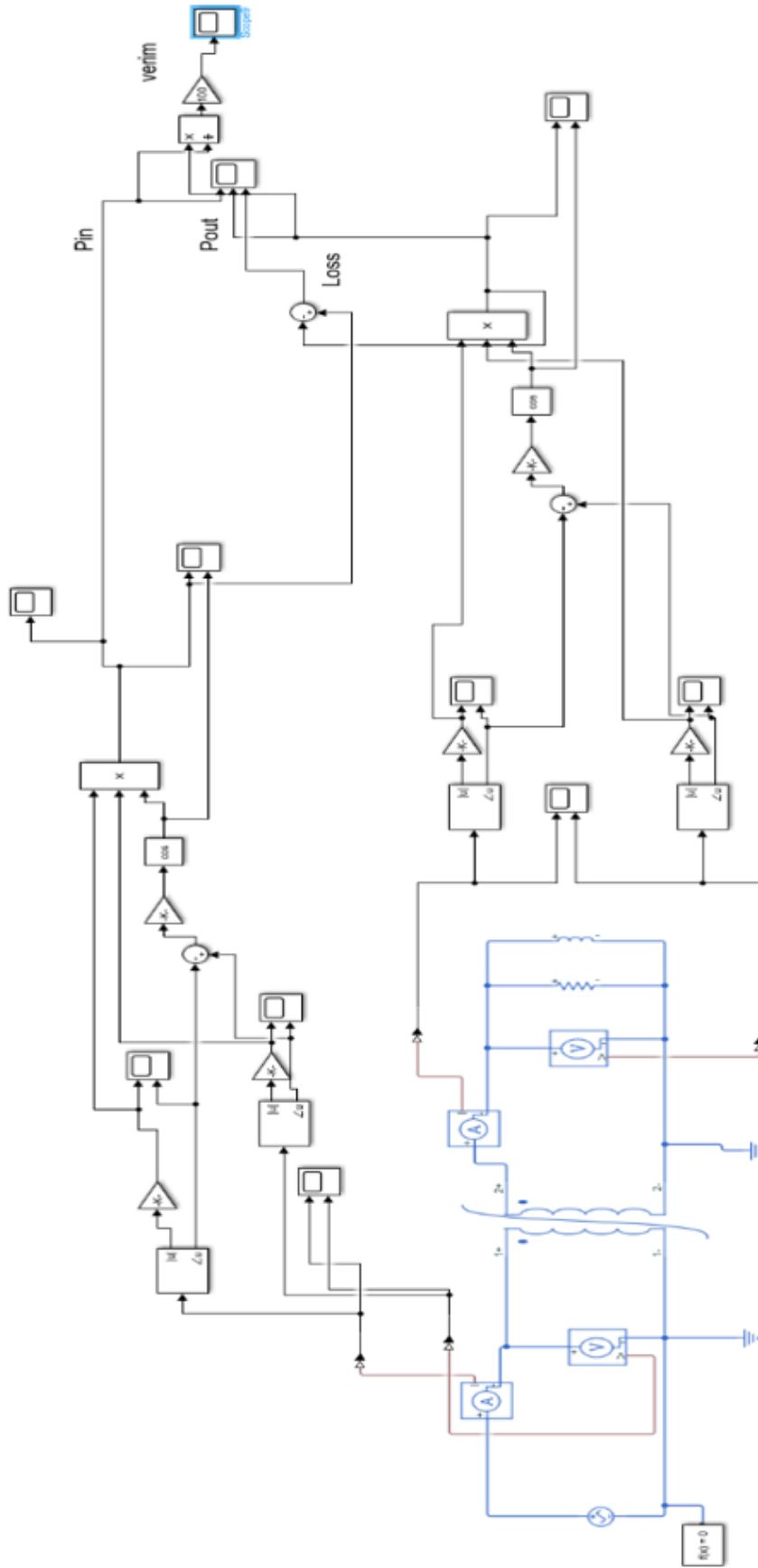
8.1. 25 MVA Şehir Şebeke Transformatorü ile Tez Çalışmasında Gerçekleştirilen CER Transformatorünün Karşılaştırılması ve Tasarım Kriterlerinin Analizi

Bu bölümde transformatöre ait farklı güç değerleri için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim çalışmalarında kullanılan dosya aşağıda gösterilmiştir.

Transformatorün aşağıdaki üç farklı güç durumu için sistem çalışması yapılmıştır:

1. Boşta çalışma durumu ($pf=1$ için),
2. Yarı yükte çalışma durumu ($pf=1$ ve $pf=0,8$ için),
3. Tam yükte çalışma durumu ($pf=1$ ve $pf=0,8$ için).

Bu çalışma durumlarına ait her bir Pin giriş gücü, Pout çıkış gücü ve verim grafikleri ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Benzetim çalışmalarında kullanılan benzetim şeması

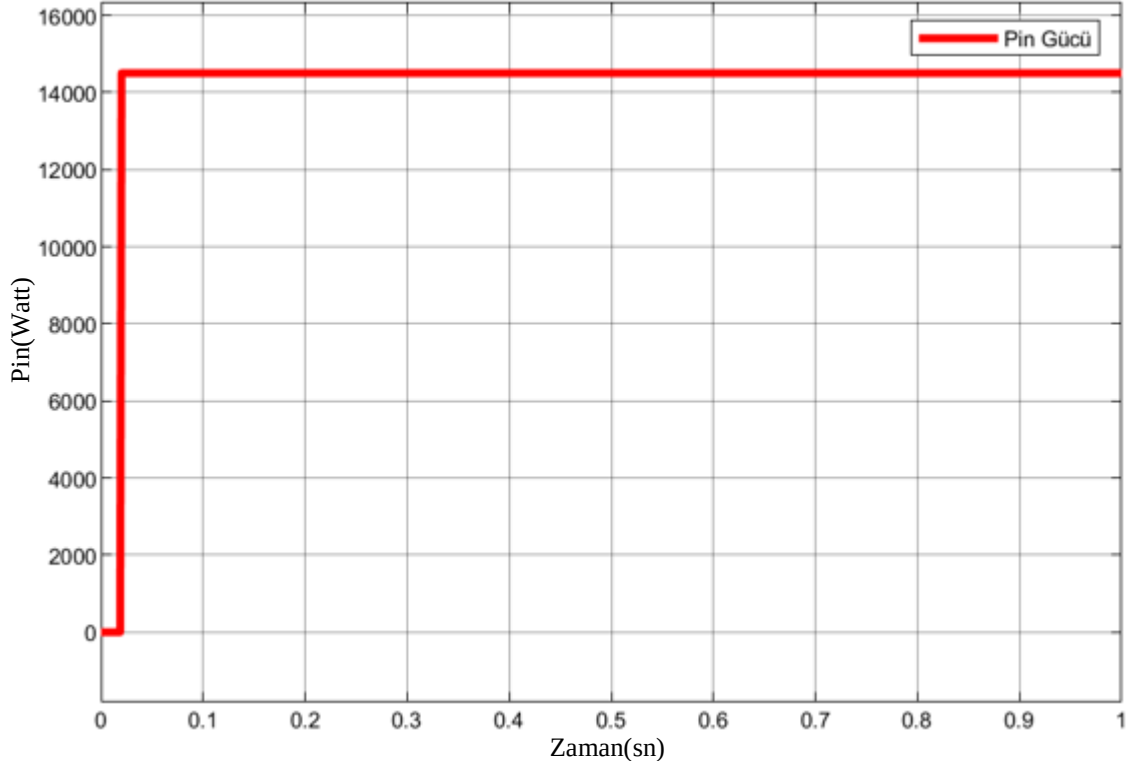
Gösterilen benzetim şemasında primer ve sekonder taraflara ait ayrı ayrı;

- Akım genliği ve rms değeri,
- Gerilim genliği ve rms değeri,
- Akım faz açıları,
- Gerilim faz açıları,
- $\cos \alpha$ değeri,
- Aktif giriş gücü değeri,
- Aktif çıkış gücü değeri,
- Verim

Değerleri hesaplanmıştır.

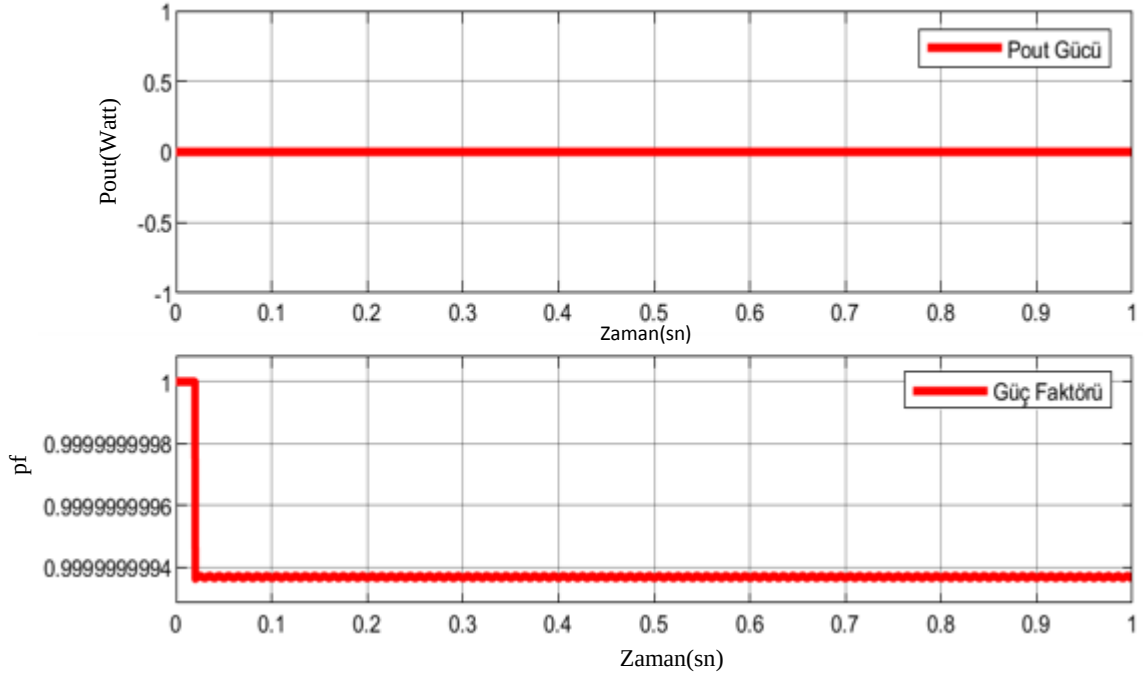
8.1.1. Boşta çalışma durumu ($pf=1$)

Aşağıdaki grafikte primer tarafa ait güç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.2. Boşta çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$)

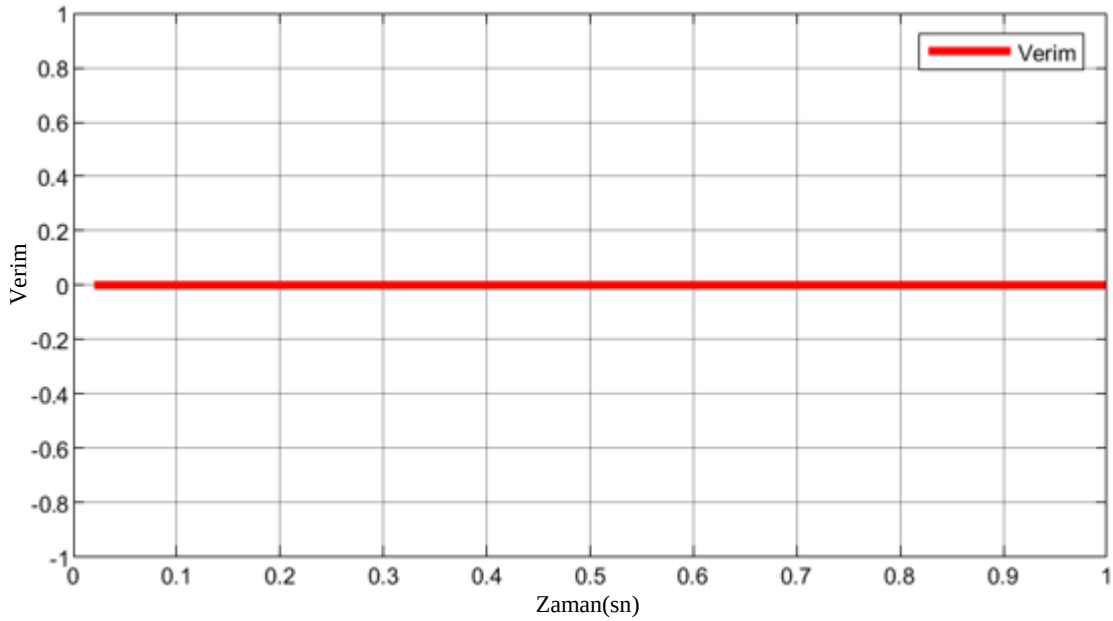
Pin gücü yaklaşık olarak 14,5 kW olarak bulunmuştur. Aşağıdaki grafikte sekonder tarafa ait güç ve $\cos \alpha$ grafiği ve gösterilmektedir.



Şekil 8.3. Boşta çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği ($pf=1$)

Transformatör boşta çalıştığından Pout gücü 0 W bulunmuştur ve $\cos\alpha$ değeri de yaklaşık 1'dir.

Aşağıdaki grafikte boşta çalışma durumu için verim grafiği ve gösterilmektedir.

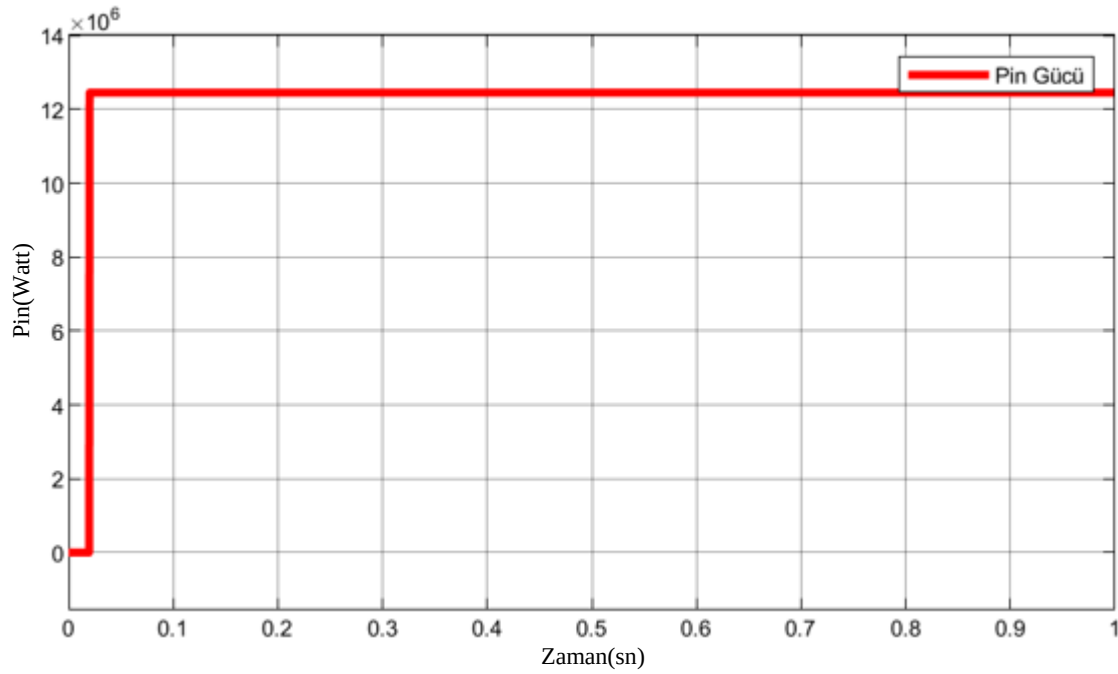


Şekil 8.4. Boşta çalışma durumunda verim grafiği ($pf=1$)

Transformatör boşta çalıştığından $P_{out}=0$ olduğu için verim değeri %0'dır.

8.1.2. Yarı yükte çalışma durumu (pf=1)

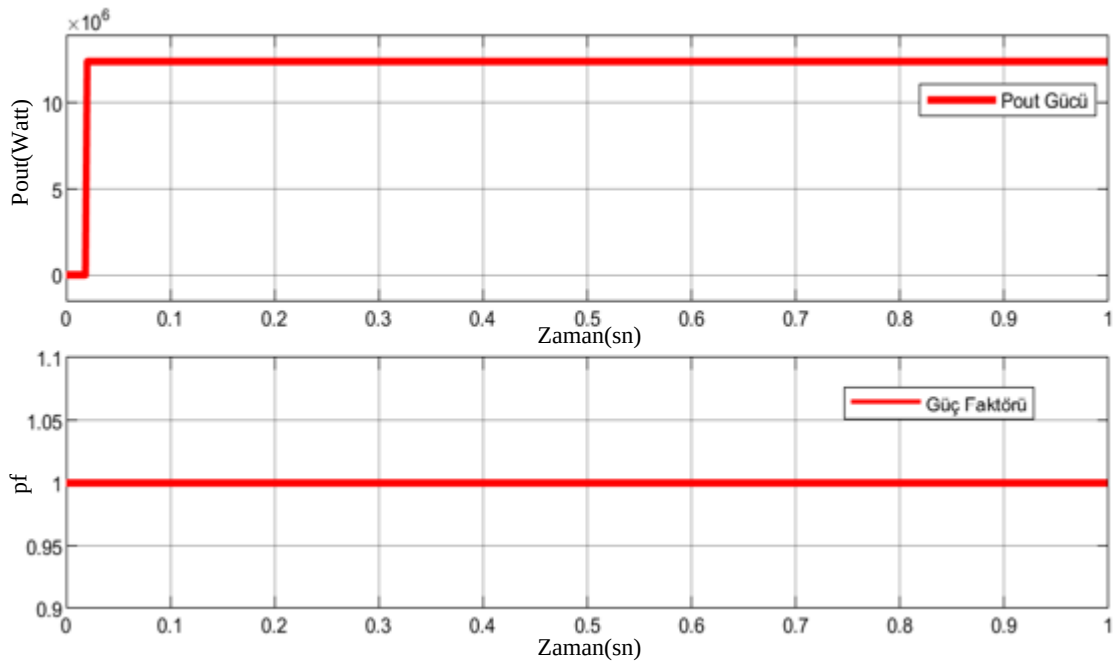
Aşağıdaki grafikte primer tarafa ait güç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.5. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği (pf=1)

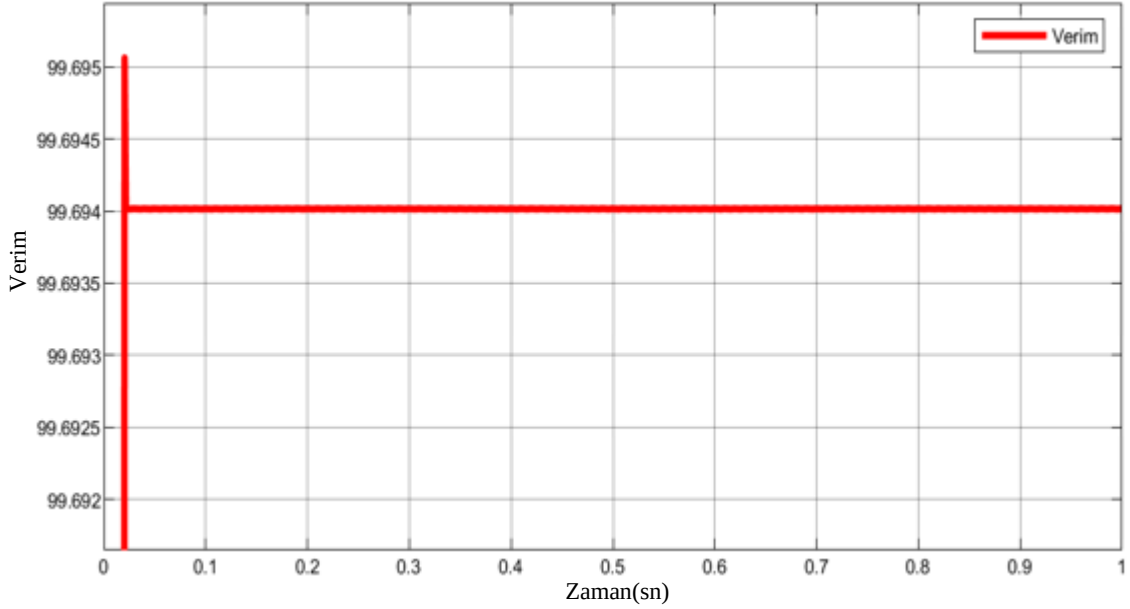
Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü yaklaşık olarak 12,49 MW olarak bulunmuştur.

Aşağıdaki grafikte sekonder tarafa ait güç ve $\cos\alpha$ grafiği ve gösterilmektedir.



Şekil 8.6. Yarı yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği (pf=1)

Yarı yükte çalışma durumunda $\cos \alpha=1$ değeri için P_{out} değeri, yaklaşık olarak 12,41 MW olarak bulunmuştur. Aşağıdaki grafikte yarı yükte çalışma durumu için verim grafiği gösterilmektedir.

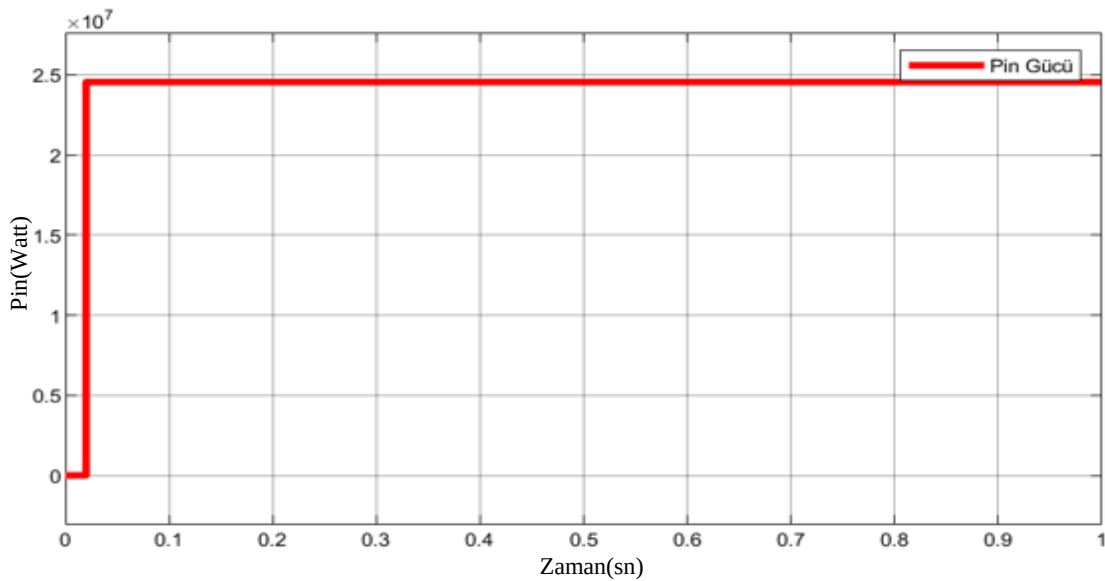


Şekil 8.7. Yarı yükte çalışma durumunda verim grafiği (Yakınlaştırılmış) ($pf=1$)

Yarı yükte çalışma durumunda verim değeri yaklaşık olarak %99,694 olarak bulunmuştur.

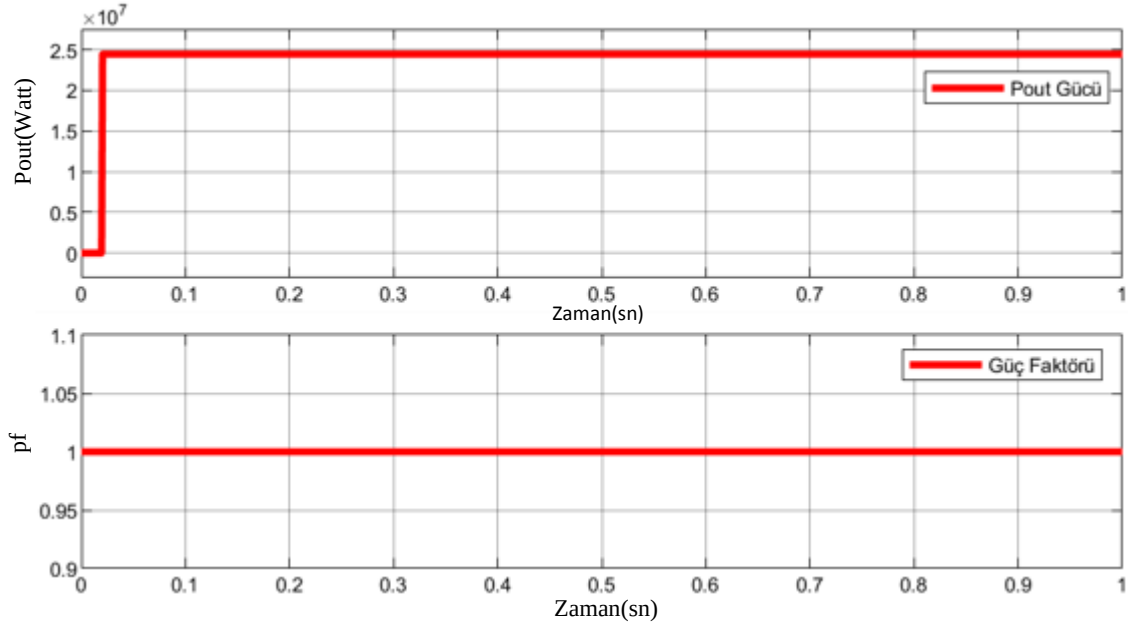
8.1.3. Tam yükte çalışma durumu ($pf=1$)

Aşağıdaki grafikte primer tarafa ait güç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.8. Tam yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$)

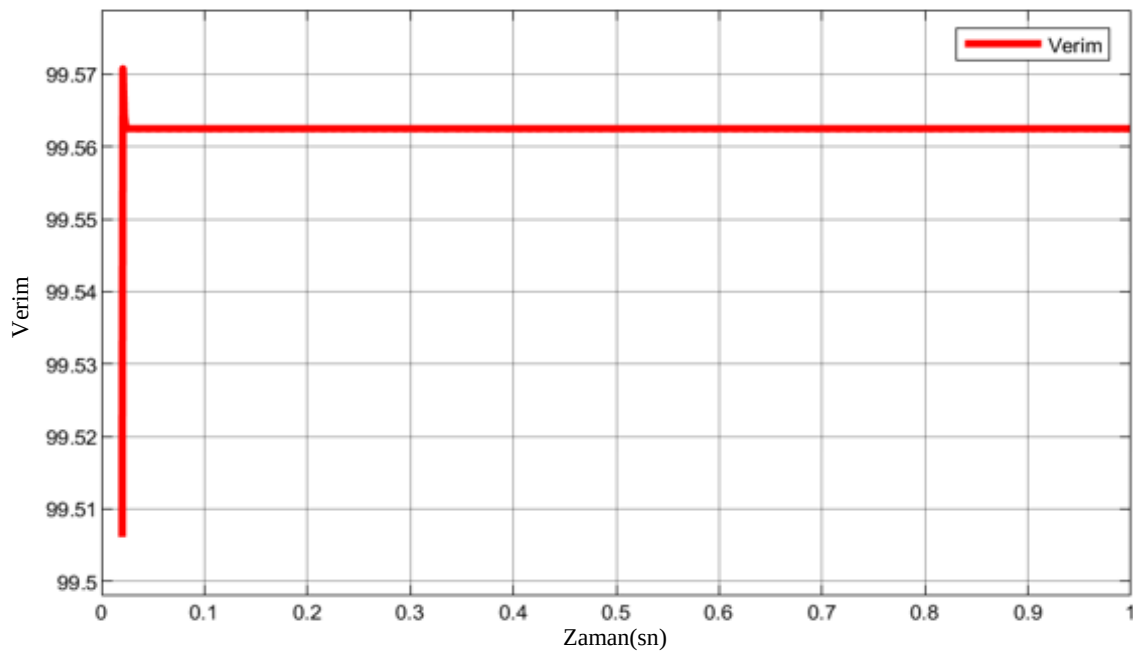
Tam yükte çalışma durumunda Pin gücü yaklaşık olarak 24,55 MW olarak bulunmuştur. Aşağıdaki grafikte sekonder tarafa ait güç ve $\cos\alpha$ grafiği ve gösterilmektedir.



Şekil 8.9. Tam yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=1$ grafiği (pf=1)

Tam yükte çalışma durumunda ve $\cos\alpha=1$ için Pout değeri yaklaşık olarak 24.45 MW olarak bulunmuştur.

Aşağıdaki grafikte tam yükte çalışma durumu için verim grafiği gösterilmektedir.

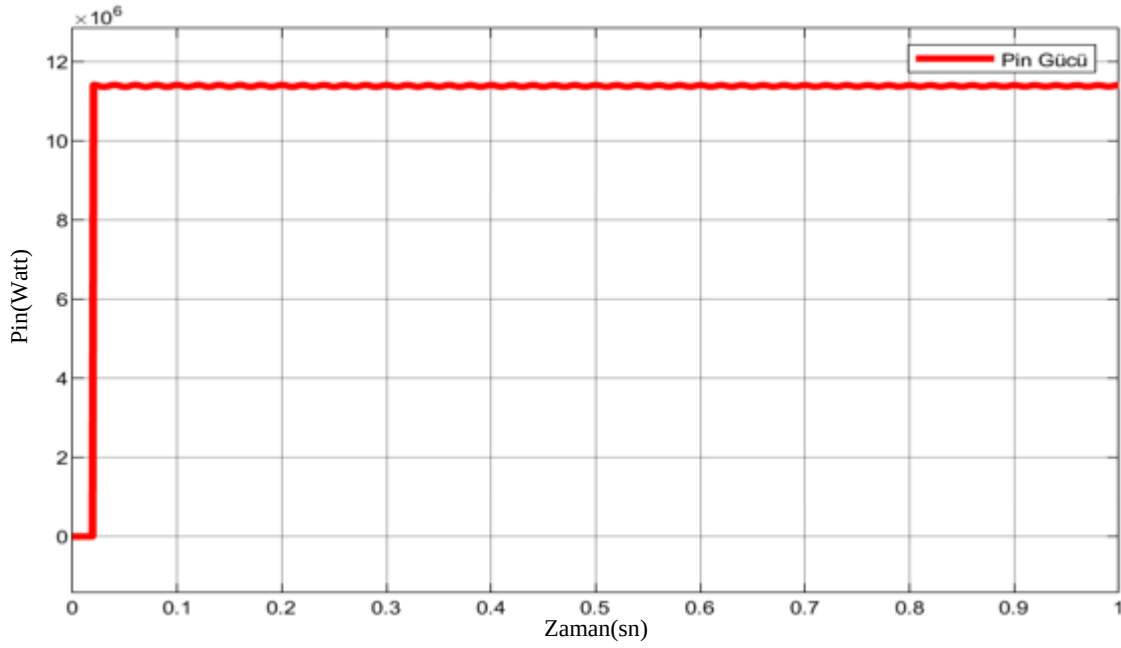


Şekil 8.10. Tam yükte çalışma durumunda verim grafiği (pf=1)

Tam yükte çalışma durumunda verim değeri yaklaşık olarak %99,562 olarak bulunmuştur.

8.1.4. Yarı yükte çalışma durumu ($pf=0,8$)

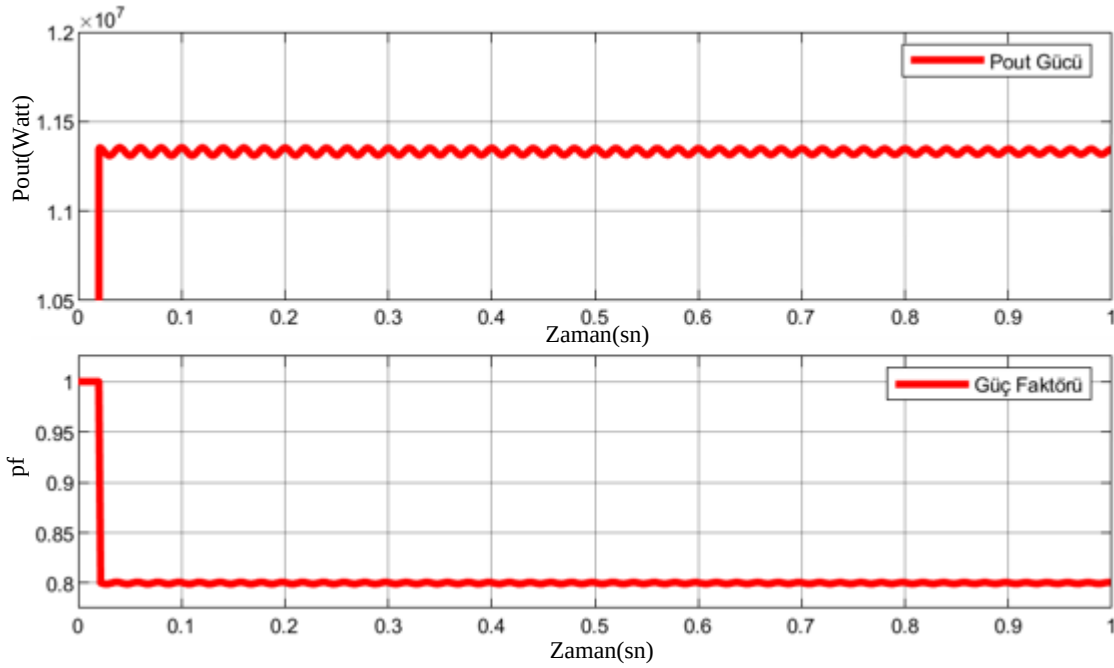
Aşağıdaki grafikte primer tarafa ait güç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.11. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=1$)

Yarı yükte çalışma ve $\cos\alpha=0.8$ için Pin gücü yaklaşık olarak 11.38 MW olarak bulunmuştur.

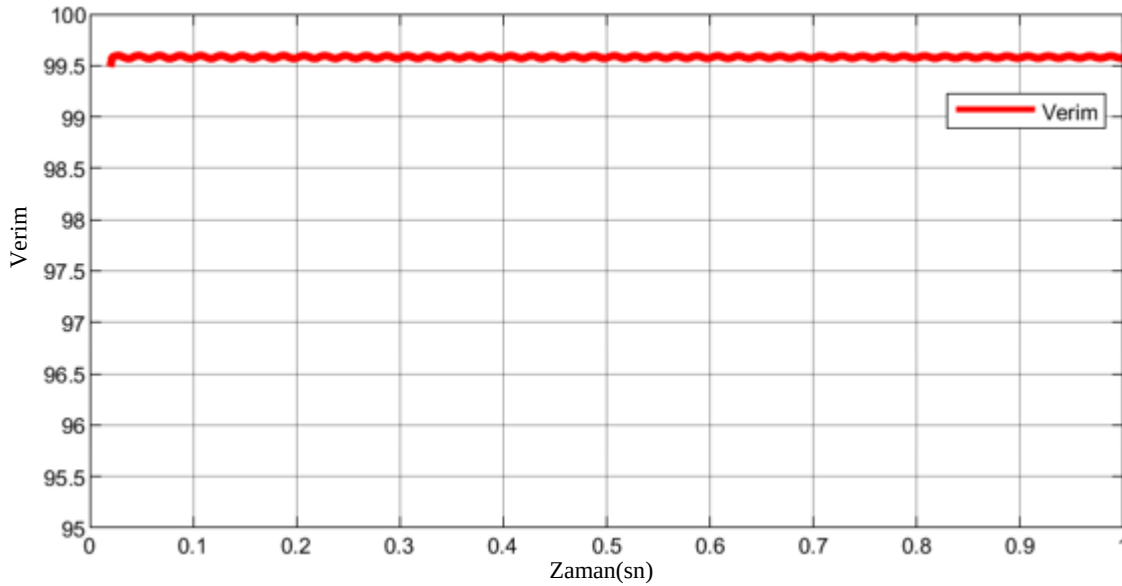
Aşağıdaki grafikte sekonder tarafa ait güç ve $\cos\alpha$ grafiği ve gösterilmektedir.



Şekil 8.12. Yarı yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=0.8$ grafiği (pf=1)

Yarı yükte çalışma ve $\cos\alpha=0.8$ için Pout gücü yaklaşık olarak 11.33 MW olarak bulunmuştur.

Aşağıdaki grafikte yarı yükte çalışma durumu için verim grafiği gösterilmektedir.

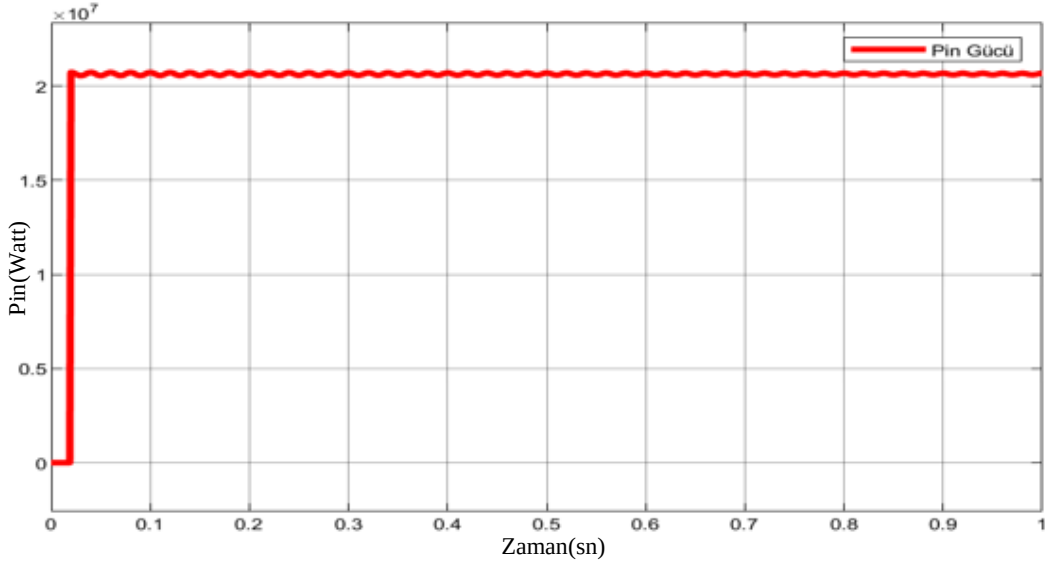


Şekil 8.13. Yarı yükte çalışma durumunda verim grafiği (pf=0.8)

Yarı yükte çalışma ve $\cos\alpha=0.8$ için verim yaklaşık olarak %99,58 olarak bulunmuştur.

8.1.5. Tam yükte çalışma durumu ($pf=0,8$)

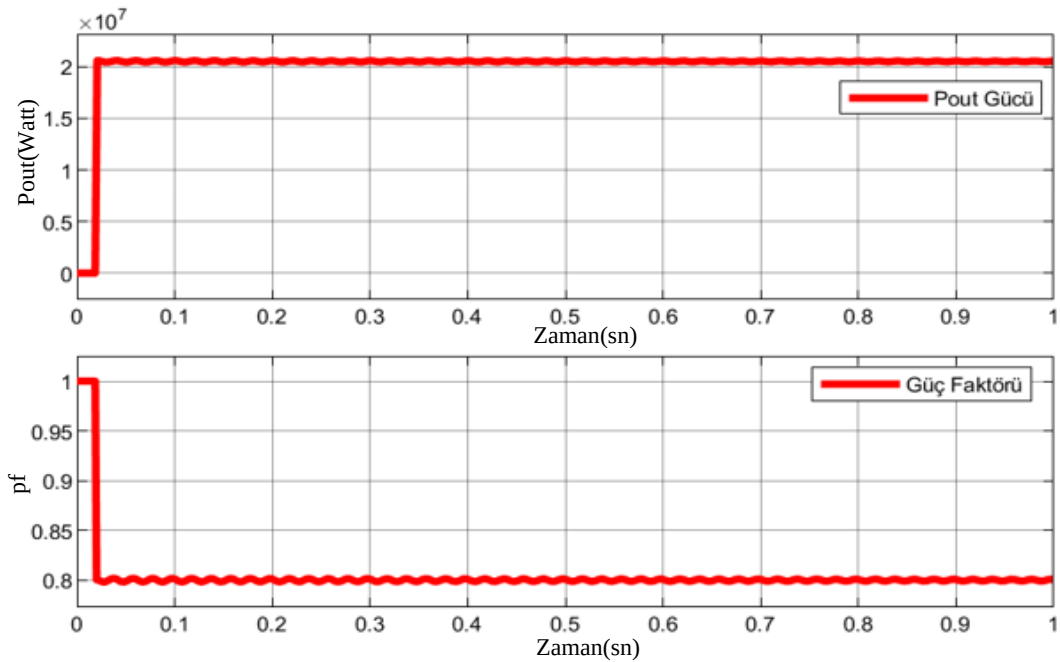
Aşağıdaki grafikte primer tarafa ait güç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.14. Yarı yükte çalışma durumunda Pin gücü grafiği ($pf=0.8$)

Tam yükte çalışma ve $\cos\alpha=0,8$ için Pin gücü yaklaşık olarak 20,64 MW olarak bulunmuştur.

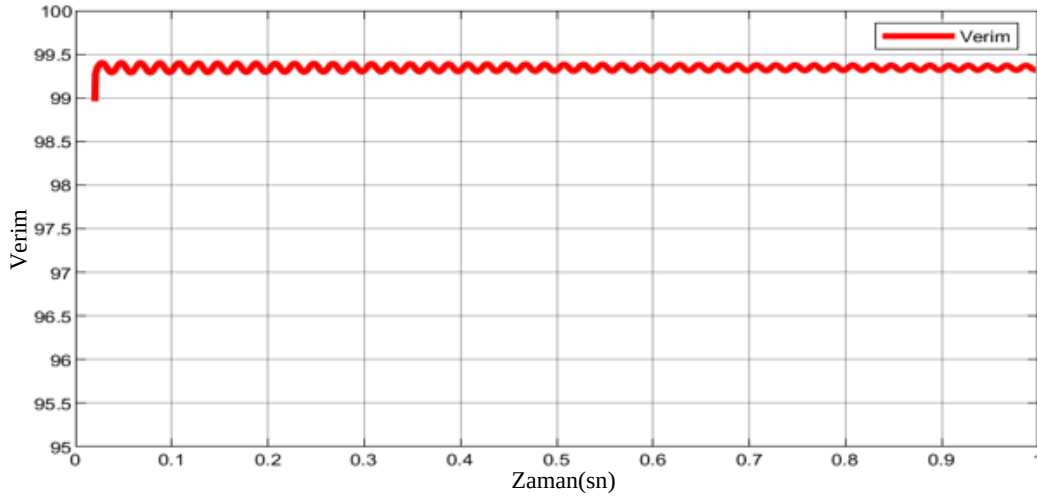
Aşağıdaki grafikte sekonder tarafa ait güç ve $\cos\alpha$ grafiği ve gösterilmektedir.



Şekil 8.15. Tam yükte çalışma durumunda Pout gücü ve $\cos\alpha=0,8$ grafiği ($pf=0.8$)

Tam yükte çalışma ve $\cos\alpha=0,8$ için Pout gücü yaklaşık olarak 20,50 MW olarak bulunmuştur.

Aşağıdaki grafikte tam yükte çalışma durumu için verim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 8.16. Tam yükte çalışma durumunda verim grafiği (pf=0.8)

Tam yükte çalışma ve $\cos\alpha=0.8$ için verim yaklaşık olarak %99,35 olarak bulunmuştur.

8.1.6. Verim değerlerinin karşılaştırılması

Aşağıdaki çizelgede transformatör verimine ait benzetim sonuçları ve test raporu sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. $\cos\alpha=1$ için verim değerleri karşılaştırılması

$\cos\alpha=1$	Yarı Yük Durumu	Tam Yük Durumu
Test Raporu	%99,727	%99,632
Benzetim Sonucu	%99,694	%99,562

Çizelge 8.2. $\cos\alpha=0.8$ için verim değerleri karşılaştırılması

$\cos\alpha=0.8$	Yarı Yük Durumu	Tam Yük Durumu
Test Raporu	%99,659	%99,540
Benzetim Sonucu	%99,580	%99,350

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Transformatörler çok farklı mühendislik probleminde çözüm olarak kullanılması gereken elektrik makinelerindendir. Uygulama yerine göre transformatör tasarımı oldukça kritik olmakla birlikte maliyetleri çok yüksek olan bu ürünlerin elektromanyetik analizleri önem arz etmektedir. Çalışmamızda endüstriyel uygulamalar içinde çok önemli yer tutan raylı sistemlerde kullanılan bir güç transformatörünün analizi, uygulaması ve test sonuçlarına yer verilerek çıkarımlarda bulunulmuştur. Ayrıca, tasarımda kullanılan en önemli dikkat edilecek hususlardan olan işletme koşulları çalışmamızda dikkate alınmıştır.

Transformatörler faz sayısına göre tek, üç veya çok fazlı transformatörler olarak sınıflandırılabilir gibi, nüvenin yapısına göre de çekirdek tipi, mantel tipi ve spiral çekirdek tipi olarak sınıflandırılabilirler. Çekirdek tipi transformatörlerde sargılar manyetik devreyi çevreleyecek şekilde, primer ve sekonder sargıların yarıları farklı iki bacak üzerine sarılır. Mantel tipi transformatörlerde ise alt ve üst gerilim sargılarının tamamı orta bacağına sarılmakta ve sağ sol bacaklar boş bırakılmaktadır.

Transformatörler ister bir, ister üç fazlı olsun izolasyon nedeniyle alçak gerilim sargısı çekirdek üzerine, yüksek gerilim sargısı ise alçak gerilim sargısının üstüne yerleştirilirler. Her iki sargı arasında bırakılan boşluk soğutma amacı içindir. Üç Fazlı transformatörlerde üzerinde aralarında 120°'lik faz farkı olan sargılar bulunur. Bazen üç fazlı transformatör yerine üç adet bir fazlı transformatör de kullanılır. Bir fazlı üç adet transformatör kullanımının en büyük avantajı faz sargılarından birinde bir arıza olduğunda yalnız o transformatörün onarılacak için devre dışı bırakılması diğer ikisinin çalışmasına devam etmesidir. Ancak bu avantajlara rağmen pahalıya mal olması ve fazla malzeme gerektirmesi bu yöntemin dezavantajlarıdır. Gerek sargı şeklinin gerekse nüve yapısının seçiminde önemli konulardan birisi de transformatördeki demir ve bakır kayıplarının azaltılmasıdır.

Transformatörlerde soğutma amacıyla hava, su veya yağ kullanılır. Dolayısıyla soğutma malzemelerine göre de transformatörler üç grupta toplanabilir. Küçük transformatörlerde soğutma aracı olarak hava kullanılır. Büyük güçlü trafolarda ise genellikle yağ kullanılır ve bu yağın izolasyonunu koruması kısa devrelerin oluşmaması açısından son derece önemlidir. Mevcut çalışmada, literatür taraması sonrası transformatör üreten bir kuruluştan ortak çalışarak teknik özellikler belirlenmiş ve transformatörü talep edip, kullanacak kuruluştan

ilgili transformatör için spesifikasyonlar tespit edilerek, raylı sistemin ihtiyacı olan 25 MVA AC tipi transformatörün tasarım ve üretim kriterleri tamamlanarak prototip üretimi ve test neticeleri verilmiştir.

Bu tez çalışmasının sonucunda, öncelikle raylı sistemlerde özel ihtiyaçlara göre transformatörlerin hangi durumlarda ve nasıl kullanıldığı belirtilmiş ve örnek bir raylı sistem için uygun görülen 25 MVA'lık AC tipi bir transformatör dizayn edilerek Matlab Simulink ile elde edilen çıktılar, üretimi yapan firmanın test raporlarıyla aynı parametreler bazında karşılaştırılıp bu karşılaştırma sonucu verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada trafolar hakkında genel bilgiler verildikten sonra, özel trafolar cinsinden Cer trafolarının tasarım ve imalat çalışmaları tez kapsamında ilgili şirkette bu elde edilen MATLAB Simulink neticeleri tasarım tamamlandıktan sonra 8. bölümde verildiği gibi ölçme değerlerinde karşılaştırılmış ve uygun olduğu gözlemlenmiştir. Çıktı olan ve tez çalışmasında hesaplamaları ve tasarımı yapılan trafo, firma tarafından üretildikten sonra İzmir Banliyö İşletmeleri (İZBAN)'da halen başarılı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma ticari bir trafo çalışmasını içerdiğinden, trafoya ait sarım sayısı, bakır iletken kesiti vs. gibi değerler gizli tutulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Proto, D. (2004). *Impact of innovation technology on complex systems: The electrified railway supply system*. Ph. D. Thesis, Università degli Studi Di Napoli, Via Claudio, 21-80125, Italy. 72-75.
2. Biru, S. (2014). *Power flow analysis of Sebeta to adama railway electrification power line with thyristor controlled series compensator*. Master Degree Thesis, Addis Ababa University, Ethiopia. 12-25.
3. İnternet: Berhane, D. (2012). Ethiopian railway project, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=danielberhane.com/ethiopia-railway-projects> role in the five year's transformation-plan, Son Erişim Tarihi: 02.10.2019.
4. Mintesnot, B. T. (2013). *Modeling and Simulation of AC traction Power Supply System*, Master Degree Thesis, Southwest Jiaotong University, China. 2013. 40-45.
5. Pilo, E., Rouco, L., and Fernández, A. (2003). *A reduced representation of 2/spl times/25 kV electrical systems for high-speed railways*. In Proceedings of the 2003 Institute of Electrical and Electronics Engineers/American Society of Mechanical Engineers Joint Railroad Conference, Chicago, Illinois, USA.
6. Li, S. (2010). *Power flow in railway electrification power system*, Master Degree Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA. 34-42.
7. Kurdak, B. (2010). *A single phase pll based active power filter solution for power quality problems in railway electrification systems using scott transformer*, Master Degree Thesis, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana.
8. Aydın, T. (2012). *Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Laury, J., Abrahamsson, L. and Östlund, S. (2012). *OPF for an HVDC feeder solution for railway power supply systems*. In The 13th International Conference on Design and Operation in Railway Engineering (Comrail 2012), The New Forest, UK.
10. Mandić, M., Uglešić, I. and Milardić, V. (2013). Design and testing of 25 kV AC electric railway power supply systems. *Tehnički Vjesnik: Znanstveno-Stručni Časopis Tehničkih Fakulteta Sveučilišta U Osijeku*, 20(3), 505-509.
11. Župan, A., Teklić, A. T. and Filipović-Grčić, B. (2013, July). Modeling of 25 kV electric railway system for power quality studies. In *IEEE EuroCon Congress*, Zagreb, Croatia, 844-849.

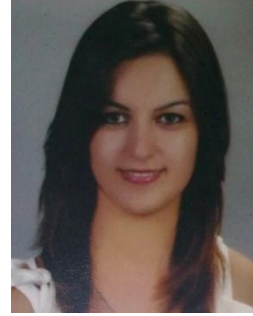
12. Skogberg, R. (2013). *Railway power supply system models for static calculations in a modular design implementation*, Master's Degree Project, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
13. Yıldıztekin, H. (2016). *Sürdürülebilir ulaşım modelleri içerisinde kent içi raylı sistem ve Ankara örneği*, ISBS 28-30 May 2015 2nd International Sustainable Buildings Symposium, Gazi Üniversitesi, Ankara.
14. Patel, D. and Rajput, D. (2017). Analysis & simulation of 25 KVA distribution transformer design using FEMM, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 6(3), 1279-1285.
15. Boduroğlu, T. (1988). *Elektrik makineleri dersleri*, İstanbul: Beta Yayınları, 55-62.
16. İnternet: Semiz, T. Y. (2018). Mekatronik Müh, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https:%3A%2F%2Fmaker.robotistan.com/transformator-nedir/LastAccess%2F3557717+&date=2019-09-17>, Son Erişim Tarihi: 20.05.2019.
17. Coltman, J. W. (1988). The transformer. *Scientific American*, 258(1), 86-95.
18. Milli Eğitim Bakanlığı (2011). *Elektrik Elektronik Teknolojisi - Bir fazlı transformatör sarımı*, Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları. 7-16.
19. İnternet: Osbert Joel C. (2018). Electrical Eng., Article, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https:%3A%2F%2Fowlcation.com/stem/Cooling-of-transformers%2F3557718+&date=2019-09-17>, Son Erişim Tarihi: 02.05.2019.
20. Bonnett, C. F. (2005). *Raylı sistemlerin temelleri - Practical Railway Engineering*, (çev. H. H. Erkaya), (Second edition), London: Imperial College Press, 72-85.
21. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. and Schneider, E. (2009). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance*. England: Publicis Publishing, 124-130.
22. Profillidis, V. A. (2000). *Railway Management and Engineering*. England: Ashgate Publishing, 90-92.
23. İnternet: Kentlerin Potansiyelini Açmak. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https:%3A%2F%2Fw3.usa.siemens.com%2F3557719+&date=2019-09-17>, Son Erişim Tarihi: 20.03.2014.
24. Özmen, İ. (2014). *750 V DC CER gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellemesi, benzetimi ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

25. İnternet: 2015 Yılı Desteklemede Öncelikli Ar-Ge Konuları. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https:%3A%2F%.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/ar_ge_projeleri/oncelikli_arge_konulari.pdf?Mobile=1&Source%3D1, Son Erişim Tarih: 20.09.2018.
26. TCDD Şartnamesi, (2012). *Çiğli trafo merkezi ile iki adet nötr bölge yapımı ve telekomand uyarlamaları*, Sözleşme, Yüklenici Aykon Elektrik Taahhüt San. ve Tic. Ltd. Şti., İzmir.
27. İnternet: Güven, A. F., URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https:%3A%2F%afguven.com/depo/ESM210/emds-bolum-2%2Fpdf%2F3557854+&date=2019-09-17>, Son Erişim Tarih: 20.04.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MUN, Merve
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 22.07.1988, İzmir
 Medeni hali : Bekar
 E-mail : merve_mun@hotmail.com
 Tel : 0554 383 93 66



Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2011
Lise	İzmir Atatürk Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011	Es-emas Asansör Eskişehir	Elektrik Mühendisi
2013	Ceren-as Asansör Eskişehir	Elektrik Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Latin dansları, bahçe ve çiçek tasarımı



GAZİ GELECEKTİR...