



**KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ İÇİN 4 BÖLGELİ DOĞRULTUCU
TASARLANMASI**

Mehmet Akif ÖZDEMİR

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

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.

Mehmet Akif ÖZDEMİR

09/11/2021

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ İÇİN 4 BÖLGELİ DOĞRULTUCU TASARLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Akif ÖZDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Doğru akım (DA) raylı sistemlerinden toprağa sızan kaçak akımlar yakınlarındaki düşük dirençli akım yolunu temsil eden boru hattı gibi metal yapılar üzerinden devresini tamamlaması sonucu katodik koruma sistemlerinin işleyişini olumsuz yönde etkilemekte ve boru hatlarını korozyona karşı savunmasız kılmaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında raylı sistemlerde kaçak akımların oluşmasına neden olan ray potansiyelinin, topraktaki dağılımı ve boru hattı üzerinde oluşturduğu potansiyel farkı incelemek adına ray hattı, boru hattı ve toprak direnç ağı olarak modellenmiştir. Oluşturulan model yakınsamalı bir yöntem ile çözülüp tren konumunun ve ray topraklama çeşitlerinin, boru hattının potansiyeline etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan ray ile boru hattı arasına rayda oluşan potansiyele ters bir potansiyel oluşturularak boru hattına doğru olan kaçak akımların yönünü değiştirmeyi amaçlayan özgün bir yöntem önerilmiştir. Tren konumunun 2 farklı senaryosunda oluşan ray potansiyelinin tersini oluşturmak için ray ve boru hattı arasına doğru akım kaynağı veya kaynaklarının anot ve katotları 29 farklı dizilimde yerleştirilmiştir. Her bir senaryo ve dizilim için boru hattı ile toprak arasındaki potansiyeli minimuma indiren kaynak akım ve gerilimleri optimizasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile elde sonuçlardan uygun anot katot diziliminin, ray potansiyelinin boru ile toprak arasında oluşturduğu gerilimi %80 üzerinde azaltabildiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında gerekli akım ve gerilim değerlerini hızlı bir şekilde verebilen iki aşamalı 4 bölgeli doğrultucu tasarlanmıştır. Doğrultucunun ikinci aşamasında kullanılan tam köprü dönüştürücünün hem kesikli iletim modunda hem de sürekli iletim modunda hızlı tepki vermesi gerektiğinden dönüştürücünün 4 çalışma bölgesindeki küçük işaret devreleri iki iletim modu için de elde edilmiştir. Elde edilen devrelerden transfer fonksiyonları türetilmiş ve kontrolü etkileyen parametreler analiz edilmiştir. Bu parametreler ile 'katsayıları yüke bağlı değişen ardışık (kaskat) PI kontrolcü tasarımı' özgün yöntemi sunulmuştur. Önerilen kontrolcü ile ardışık PI kontrolcü PLECS benzetim ortamında karşılaştırılmıştır. Son olarak önerilen kontrolcü yöntemi 100W'lık prototip üzerinde uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin etkinliğini kanıtlamıştır.

Bilim Kodu : 90522
Anahtar Kelimeler : Katodik koruma, raylı sistemler, gömülü boru hatları, 4 bölgeli doğrultucu, ardışık kontrolcü
Sayfa Adedi : 105
Danışman : Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

DESIGN OF FOUR-QUADRANT RECTIFIER FOR CATHODIC PROTECTION SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Akif ÖZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

Metallic structures such as pipe lines near the direct current (DC) railway systems provide low resistance paths to stray currents. These stray currents adversely affect the operation of cathodic protection systems and leave the pipelines defenseless against corrosion. At the first stage of this thesis running rail, pipeline and the earth have been modelled as a resistive network to investigate the potential distribution created by the rail on the ground and over the pipeline. This model has been analyzed by using a converging method to investigate how the position of trains and running rail grounding schemes affect the potential over pipelines. Using the results of this, a novel method that diverts the stray currents away from the running rails by generating a potential which opposes the potential between the rail and pipeline. Twenty-nine different layouts of anodes and cathodes of the dc sources have been tested for two different train position scenarios to observe this reverse potential. Source current and voltages to minimize the potential difference between the pipeline and the ground have been obtained by using an optimization method for each case. The results show that the proposed method reduces the potential difference more than 80% with a proper anode-cathode layout. At the second part of the thesis a two-stage four-quadrant rectifier that can provide the required currents and voltages in a very short time was designed. The full-bridge converter at the second stage of the rectifier needs to respond fast both at continuous and discontinuous conduction mode, and therefore an adequate controller design is necessary. For that, the small signal models in each quadrant for both types of operation have been obtained. Transfer functions have been developed based on these models and parameters that affect the control have been analyzed. A novel method to design a cascade PI controller with load dependent coefficients has also been developed in the thesis. The proposed controller has been compared to the classical cascade PI controller in PLECS simulation environment. Finally, the proposed method has been implemented on a 100W prototype. The experimental results prove the effectiveness of the proposed method.

Science Code : 90522

Key Words : Cathodic protection, railways, buried pipelines, four-quadrant rectifier, cascade controller

Page Number : 105

Supervisor : Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans eğitimim ve bu tezin hazırlanması sırasında kıymetli vaktini ayıran, gerekli desteği ve tecrübeyi veren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım. Sektörde edindiği tecrübeler ile çalışmalarına katkı sunan saygıdeğer Oğuz ŞİMŞEK Bey'e ve patronu olduğu 4Z Elektronik firmasının çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Bu noktaya gelmemde büyük rol oynamış, maddi ve manevi hiçbir desteği esirgememiş sevgili aileme ve bu süreçte yanımda olan sevgili eşim Maşide ÖZDEMİR'e sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca bu süreçte gözlerini dünyaya açarak bana babalığın tatlı telaşlarını yaşatan kızım Hafsa ÖZDEMİR'e sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA KOROZYON VE KATODİK KORUMA	5
2.1. Korozyon.....	5
2.2. Katodik Koruma.....	6
2.2.1. Katodik koruma yöntemleri	6
2.3. Gömülü Boru Hatlarında Katodik Koruma Kriterleri.....	9
2.4. Gömülü Boru Hatlarında Katodik Koruma Sistemlerini Etkileyen Faktörler	10
2.4.1. Toprak yapısı.....	10
2.4.2. Tellürik akımlar.....	11
2.4.3. Girişim.....	11
2.4.4. Kaçak akımlar	11
3. RAYLI SİSTEMLERİN GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODELLENMESİ, UYGUN REDRESÖR SAYISI VE PROB KONUMLARININ BELİRLENMESİ	13
3.1. Giriş.....	13
3.2. DA Kaçaklarının Sebep Olduğu Gerilim Dağılımının Modellenmesi.....	17

Sayfa

3.3. Topraklama, Besleme ve Tren Konumlarının Potansiyel Dağılımına Etkileri ..	21
3.4. Uygun Redresör Konumlarının ve Sayısının Belirlenmesi	24
3.5. Benzetim Sonuçları	25
4. KATODİK KORUMA REDRESÖRÜ İÇİN GENİŞ YÜK ARALIĞINDA ÇALIŞABİLEN TAM KÖPRÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ .	59
4.1. Giriş.....	59
4.2. Dönüştürücünün Küçük İşaret Devre Modelleri	66
4.2.1. SİM’deki transfer fonksiyonlarının elde edilmesi.....	73
4.2.2. KİM’deki transfer fonksiyonlarının elde edilmesi	75
4.2.3. Elde edilen transfer fonksiyonlarının doğrulanması	78
4.3. Katsayıları Yüke Bağlı Değişen Ardışık PI Kontrolcü Tasarımı.....	82
4.4. Benzetim ve Deney Sonuçları	88
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Benzetimde kullanılan direnç değerleri.....	20
Çizelge 3.2. Topraklama biçimine göre ray potansiyeli ve kaçak akım düzeylerinin karşılaştırılması	22
Çizelge 3.3. Tek redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları	55
Çizelge 3.4. İki redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları	55
Çizelge 3.5. Üç ve beş redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları.....	56
Çizelge 3.6. Tren pozisyonu ve yerleşime göre redresör çıkış akım ve gerilimleri.....	56
Çizelge 4.1. Anahtar ve diyot ikilisinin iki portlu küçük işaret devre modeli parametreleri	72
Çizelge 4.2. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün SİM için bütün çalışma bölgelerinde elde edilen TF'leri.....	76
Çizelge 4.3. KİM'deki bütün çalışma bölgeleri için Eş. 4.29 ve Eş. 4.32'deki formata G_{do} ve ω_{do} değerleri.....	78
Çizelge 4.4. Dönüştürücü parametreleri	88
Çizelge 4.5. Birinci yük senaryosunda benzetimde elde edilen sonuçlardan akım döngülerinin performansları.....	91
Çizelge 4.6. İkinci yük senaryosunda benzetimde elde edilen sonuçlardan akım döngülerinin performansları.....	95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Korozyon hücresi.....	5
Şekil 2.2. a) KA yöntemi, b) DAK yöntemi	7
Şekil 3.1. Kaçak akımların izlediği yol.....	13
Şekil 3.2. Toprağın direnç ağ modeli.....	17
Şekil 3.3. Ray ve boru hattının modele eklenmesi.....	18
Şekil 3.4. Tren akımı ve raydan dönüş akımları	18
Şekil 3.5. Direnç ağına akımın girdiği nokta	19
Şekil 3.6. a) İletkenlik matrisi ile çözüm, b) Yakınsama yöntemi ile çözüm	20
Şekil 3.7. Benzetimde kullanılan tüm uzay ve çözüm uzayının gösterimi	21
Şekil 3.8. a) Rayın parça parça topraklandığı ve b) topraklanmadığı durumdaki potansiyel dağılımında c) RP dağılımı, d) BTG dağılımı	23
Şekil 3.9. Tren pozisyonuna göre BTG dağılımları, a) Enerji akışı katenerden raya, b) Enerji akışı katenerden raya	24
Şekil 3.10. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimleri	26
Şekil 3.11. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	27
Şekil 3.12. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	28
Şekil 3.13. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	29
Şekil 3.14. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	30
Şekil 3.15. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	31
Şekil 3.16. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	33
Şekil 3.18. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	34
Şekil 3.19. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	35
Şekil 3.20. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	36
Şekil 3.21. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	37
Şekil 3.22. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	38
Şekil 3.23. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	39
Şekil 3.24. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	40
Şekil 3.25. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	41
Şekil 3.26. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	42
Şekil 3.27. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	43
Şekil 3.28. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	44
Şekil 3.29. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	45
Şekil 3.30. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	46
Şekil 3.31. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	47
Şekil 3.32. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 3.33. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	49
Şekil 3.34. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	50
Şekil 3.35. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	51
Şekil 3.36. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	52
Şekil 3.37. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	53
Şekil 3.38. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi.....	54
Şekil 4.1. Tristörlü doğrultucu	60
Şekil 4.2. Redresör için seçilen topoloji	60
Şekil 4.3. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün çalışma bölgeleri.....	61
Şekil 4.4. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün a) I. Bölgede Buck veya Senkron Buck olarak çalışma b) II. Bölgede Boost veya Senkron Boost olarak çalışma c) III. Bölgede Buck veya Senkron Buck olarak çalışma d) IV. Bölgede Boost veya Senkron Boost olarak çalışma durumları	62
Şekil 4.5. İndüktör akımının a) sürekli olduğu ve b) kesikli olduğu iletim durumları ...	63
Şekil 4.6. TAM kontrolcü anahtarlama prensibi.....	64
Şekil 4.7. Buck dönüştürücünün a) anahtarının iletimde olduğu, b) anahtarının tıkalı olduğu durumdaki devre şeması.....	67
Şekil 4.8. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün SİM'deki a) Buck ve Senkron Buck modundaki küçük işaret devre modeli b) Boost ve Senkron Boost modundaki küçük işaret devre modeli.	70
Şekil 4.9. a) Anahtar ve diyot b) anahtar ve diyotun kayıpsız direnç ve bağımlı güç kaynağı ile modellenmesi (Ericson, 2004).....	70
Şekil 4.10. KİM'deki dönüştürücülerin kayıpsız direnç devre modelleri a) Buck b) Boost	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Anahtar ve diyotun iki portlu küçük işaret eşdeğer devre modeli	72
Şekil 4.12. Buck dönüştürücünün küçük işaret eşdeğer devresinde kontrol sinyaline bağlı kaynaklar harici diğer kaynakların devre dışı bırakılmış hali.....	74
Şekil 4.13. Boost dönüştürücünün küçük işaret eşdeğer devresinde kontrol sinyaline bağlı kaynaklar harici diğer kaynakların devre dışı bırakılmış hali.....	74
Şekil 4.14. Buck modu için KİM'deki anahtar ve diyotun küçük işaret eşdeğer devresine filtre elemanları ve yük eklenip kontrol sinyali hariç diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığı devre şeması	76
Şekil 4.15. Boost modu için KİM'deki anahtar ve diyotun küçük işaret eşdeğer devresine filtre elemanları ve yük eklenip kontrol sinyali hariç diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığı devre şeması	77
Şekil 4.16. Dönüştürücünün SİM'deki TF denklemlerinin bode diyagramlarının benzetim sonuçları karşılaştırılması. a) I. Bölge'de birinci, b) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu, c) I. Bölge'de senkron çalışma, d) II. Bölge'de normal, e) II. Bölge'de senkron çalışma durumları için kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF'lerin ve f) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin doğrulaması.....	80
Şekil 4.17. Dönüştürücünün KİM'deki TF denklemlerinin bode diyagramlarının benzetim sonuçları karşılaştırılması. a) I. Bölge'de birinci, b) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu, c) II. Bölge'de çalışma durumları için kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF'lerin ve d) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin doğrulaması.....	81
Şekil 4.18. İdeal ve ideal olmayan dönüştürücünün TF'lerinin bode diyagramları.....	83
Şekil 4.19. a) Köşe frekansında genlik artışı sebebiyle genlik eğrisinin çoklu sıfır kesimi b) çoklu kesim durumunda adım cevabı	84
Şekil 4.20. Eş. 4.40'taki değişkenleri hesaplamak için baz alınan sıfır kesim noktaları	86
Şekil 4.21. Sıfır yerleşiminin bode diyagramına etkisi.....	87
Şekil 4.22. Önerilen kontrolcünün akış şeması.....	88
Şekil 4.23. a) SİM'de tasarım yapılan yük dirençlerinde, b) KİM'de farklı yüklerde kontrolcü ile birlikte dönüştürücünün açık çevrim bode diyagramları.....	89

Şekil	Sayfa
Şekil 4.24. Birinci yük senaryosunda akım döngüsündeki PI ve önerilen kontrolcünün farklı yüklerdeki $t=0.1s$ 'de %10'luk referans değişimine tepkileri.....	90
Şekil 4.25. Önerilen kontrolcünün uygulandığı deney düzeneği.....	91
Şekil 4.26. Yukarıdan aşağıya $2,5\Omega$, 22Ω ve 210Ω çıkış yükü için önerilen akım kontrolcüsünün referans değişimindeki tepkilerinin osiloskop görüntüleri (mavi çizimler çıkış gerilimini turkuaz çizimler ise çıkış akımını göstermektedir).....	92
Şekil 4.27. Önerilen akım kontrolcüsü ile gerilim kontrolcüsünün farklı yüklerde referans değişimine tepkilerinin osiloskop görüntüleri. a) $2,5\Omega$, b) 22Ω , c) 210Ω	93
Şekil 4.28. Önerilen kontrolcünün yük değişine karşı tepkisi a) 10Ω 'dan 60Ω 'a b) 60Ω 'dan 10Ω 'a.....	94
Şekil 4.29. İkinci yük senaryosunda akım döngüsündeki PI ve önerilen kontrolcünün farklı yüklerdeki $t=0.1s$ 'de %20'luk referans değişimine tepkileri	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

v_g	Giriş gerilimi
v_o	Çıkış gerilimi
v_r	Ray tarafından oluşturulan eşdeğer gerilim
V_D	Diyot ileri gerilim düşümü
i_g	Giriş akımı
i_o	Çıkış akımı
i_L	İndüktör akımı
V_D	Diyot ileri gerilim düşümü
C_f	Filtre kapasitörü
R_{eq}	Dönüştürücünün gördüğü eşdeğer direnç
R_e	Kayıpsız direnç
R_t	Toprak direnci
R_r	Ray direnci
R_{rt}	Raydan toprağa geçiş direnci
R_b	Boru iç direnci
R_{bt}	Borudan toprağa geçiş direnci
R_{top}	Topraklama direnci
r_{on}	Anahtar iletim direnci
r_L	İndüktör iç direnci
r_D	Diyot iletim direnci
r_{esr}	Kapasitör iç direnci
T_s	Anahtarlama periyodu
f_s	Anahtarlama frekansı
D	Doluluk oranı
M	Dönüştürme oranı
Q	Kalite faktörü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA	Alternatif Akım
ADD	Analog Dijital Dönüştürücü
AMK	Akım Modlu Kontrolcü
BO	Bastırma Oranı
BTG	Boru Toprak Gerilimi
DA	Doğru Akım
DAD	Dijital Analog Dönüştürücü
DAK	Dış Akım Kaynağı
ED	Elektrik Devresi
GMK	Gerilim Modlu Kontrolcü
İDM	İndirici/Doğrultucu Merkez
KA	Kurban Anot
KİM	Kesikli İletim Modu
KK	Katodik Koruma
KP	Koruma Potansiyeli
OAM	Ortalama Akım Modu
RP	Ray Potansiyeli
SİM	Sürekli İletim Modu
TAM	Tepe Akım Modu
TF	Transfer Fonksiyonu

1. GİRİŞ

Endüstrinin her dalında metal kullanımı yıldan yıla artmaktadır. Demir ve çeliğin büyük bir kısmı her yıl korozyon sonucu kaybedilmekte veya kullanılamaz hale gelmektedir. Korozyon sonucu kaybedilen metal, kendi maliyetinin çok üstünde ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Diğer taraftan korozyon kayıpları yalnız demir ve çelik endüstrisinin değil, yapılmakta olan bütün yatırımların verimini etkilemekte ve ülke ekonomisini olumsuz yönde etkileyen önemli bir unsur haline gelmektedir (Koç ve Yalçın, 1995). NACE tarafından 2016 yılında yayımlanan rapora göre korozyon nedeniyle küresel olarak yıllık kayıp 2013 yılında 2.5 trilyon ABD Doları düzeyine ulaşmıştır. Bu da küresel gayri safi hasılanın %3.4'ü kadardır. Korozyon kaynaklı kayıplar ABD'de gayri safi milli hasılanın %2.7'si, Çin'de %4'ü, Arap ülkelerinde %5'i, Avrupa Birliği'nde %3.8'i civarındadır (Koch ve diğerleri, 2016). Türkiye için de bu değer %4-5 aralığında olduğu tahmin edilmektedir (Bilgiç, 2008).

Dünya genelinde artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte su, petrol, doğalgaz ve türevlerine olan ihtiyaç da her geçen gün artmaktadır. Bu ürünlerin çıkarıldığı veya işlendiği merkezlerden son tüketiciye ulaşması tankerler veya boru hatları vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Lojistik maliyetler göz önünde bulundurulduğunda uzun mesafelere bu ürünleri tankerlerle taşımak boru hatlarıyla iletmekten daha maliyetli olmaktadır . Bu sebeple her geçen gün tesis edilen boru hatlarının sayısı artmaktadır. Fakat bu hatlarda gerekli önlemler alınmadığından her yıl ülkemizde büyük boyutlarda korozyon kayıpları meydana gelmektedir. Ülkemizde korumasız olarak kullanılan ve yıllardır şehirlere su taşıyan boru hatları delinmekte ve en az % 50 oranında su kaçağına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra bu suyu pompalamak için harcanan elektrik enerjisi yıllık 1.5 Milyar kW-saati bulmaktadır. Korozyon sonucu ortaya çıkan ve metal kaybı gibi açıkça görülmeyen çeşitli kayıplar da söz konusudur. Örneğin su, akaryakıt, gaz vb. maddelerin taşındığı boru hatları korozyon sonucu delinerek çevreye zarar vermekte veya ürün kayıplarına neden olmaktadır (Koç ve diğerleri, 1995).

Boru hatlarında korozyondan korunmanın ilk aşaması boru hattını bulunduğu ortamdan izole etmektir. Bunun için boru hattının dış yüzeyi iletilen malzemenin muhteviyatına göre çeşitli malzemeler ile kaplanmaktadır. Fakat büyük yapıların kurulumu esnasında parçalar sahada

birleştirildiğinden fiziksel etkilerle kaplamada delinmeler veya yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Bu delinme ve yırtılma noktalarında korozyon hızı artmakta ve boru hattı daha çabuk delinmektedir (Yu ve diğerleri, 2019) . Bu sebeple metal yapıların korozyona karşı korunmasında kaplamayla beraber katodik koruma (KK) yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemler kurban anot (KA) yöntemi ve dış akım kaynağı (DAK) yöntemi olmak üzere iki çeşittir.

Yer altı boru hatlarındaki KK sistemleri toprak yapısındaki değişiklikler, tellürik etkiler, girişim etkisi ve kaçak akımlar nedeniyle yetersiz veya işlevsiz kalabilmektedir. Bu etkilerden toprak yapısındaki değişiklikler, KK yönteminin değiştirilmesi veya sayısının artırılması, girişim ve tellürik etkiler ise boru hattının alternatif akım süzgeçleri ile topraklanması yoluyla giderilebilmektedir. Profili belirli olan kaçak akımlar için lokal çözümler sunulsa da özellikle raylı sistemlerin neden olduğu profili düzensiz kaçak akımlar boru hatlarının korozyona karşı korumasında büyük problem oluşturmaktadır.

Problem durumu / Konunun tanımı

Tren, metro ve tramvay benzeri elektrikli ulaşım araçlarında katenerden gelen elektrik akımı fazladan iletken kullanmak yerine halihazırda bulunan iletken ray hattı üzerinden devresini tamamlamaktadır. Rayın iç direncinin etkisiyle akımın raya girdiği ve raydan çıkıp besleme noktasına geri döndüğü noktalar arasında potansiyel fark oluşmaktadır. Bu fark raydan toprağa kaçak akımların akmasına neden olmaktadır. Boru hattı gibi toprağa gömülü herhangi bir metalik yapı, düşük dirençli akım yolunu temsil ettiğinden kaçak akımlar boru hattı üzerinden geçerek besleme noktasına tekrar dönüş yapar. Akımın boru hattından ayrıldığı noktada korozyon meydana gelmektedir. Tren konumu ve çektiği akım sürekli değişkenlik gösterdiğinden boru hatlarının mevcut KK yöntemleri ile korunması mümkün olmamaktadır.

Raydan sızan kaçak akımları azaltmak için ray direncinin azaltılması, ray güzergahı altına akım toplayıcı mat yerleştirilmesi ve çeşitli topraklama yöntemleri önerilmektedir. Fakat bu yöntemlerden topraklama haricindekilerin sonradan tesis edilmesi mümkün olmamaktadır. Topraklama çeşitleri ise lokal çözümler sunmaktadır. Ayrıca değerlendirme, analiz, ölçme ve iyileştirme çalışmalarında ‘kim kimin alanına sonradan giriyorsa o sorumludur’ ilkesi

gözetildiğinden boru hattı sonradan tesis ediliyorsa kaçak akıma karşı önlem almak boru hattı işletmesine düşmektedir.

Araştırmanın amacı

Araştırmanın amacı ilk aşamada raydaki potansiyel farkın topraktaki dağılımı ile oluşan boru toprak gerilim (BTG) farkını azaltmak amacıyla ray ve boru hattı arasına çeşitli konum ve sayıda redresör yerleştirilerek ray potansiyelinin topraktaki dağılımına ters bir potansiyel oluşturmaktır. Oluşturulan bu ters potansiyel sayesinde BTG farkının düşürülmesi ve boru hattına doğru olan kaçak akımların yönünün değiştirilmesi amaçlanmıştır.

Tren konumu ve çektiği akım hızlı bir biçimde değiştiğinden ray potansiyelinin topraktaki dağılımı da hızla değişmektedir. Oluşturulan ters potansiyelin de aynı hızda adaptif bir şekilde değişmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için de redresör çıkış geriliminin geniş ölçekte değişmesi ve hızlı bir şekilde istenilen referansa oturması gerekmektedir. Bu sebeple araştırmanın ikinci aşamasında geniş çıkış yük ve gerilim aralığında hızlı tepki verebilen redresör tasarlanması ve kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır.

Tezin yapısı

Tezin 2. Bölümünde korozyon, KK ve KK yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. İlk önce korozyona neden olan olgulara değinilmiştir. Daha sonra KK'nın prensiplerinden, KK yöntemlerinin kullanım alanlarından, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Gömülü boru hatlarındaki KK kriterleri ulusal ve uluslararası standartları ile birlikte verilmiştir. Son olarak gömülü boru hatlarında KK sistemlerini etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir.

Yukarıda verilen birinci amaca yönelik Tezin 3. Bölümünde raylı sistemlerin gömülü boru hatları üzerindeki etkilerini araştırmak adına literatürdeki mevcut modeller incelenmiş ve literatürdeki modellere benzer şekilde bir direnç ağı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan direnç ağı modelinin sayısal çözümü için yakınsamalı bir yöntem kullanılmıştır. Geliştirilen model ve çözüm yöntemiyle tren konumu ve ray topraklama çeşitlerinin BTG dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre en kötü durum senaryoları belirlenerek bu senaryolarda önerilen yöntemin BTG dağılımına etkisi araştırılmıştır. Bunun

için örnek bir uzay oluşturulmuş, ray hattı ile boru hattı arasına 29 farklı senaryoda redresör veya redresörler yerleştirilmiştir. Her yerleşim senaryosunda BTG farkını minimuma indiren redresör çıkış gerilim ve akımları optimizasyon yoluyla elde edilmiştir. Böylece hangi yerleşim senaryosunun BTG farkını daha çok minimize ettiği araştırılmıştır.

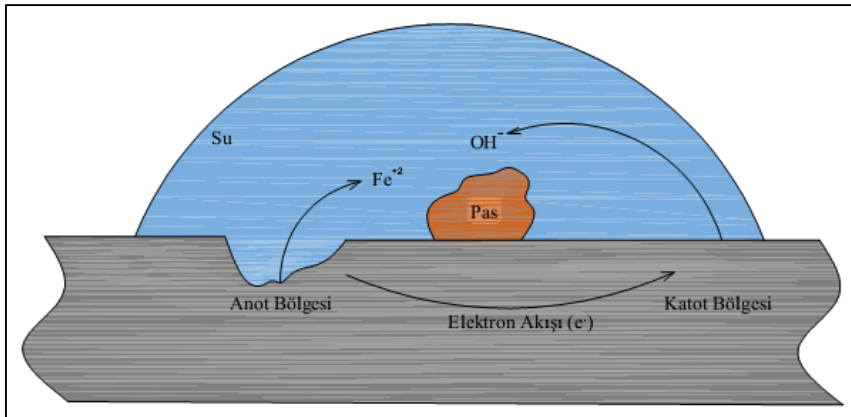
Optimizasyon sonucunda elde edilen redresör akım ve gerilim değerleri önerilen yöntemde kullanılacak redresörün hem iki polaritede çıkış gerilimi sunması hem de çift yönlü çıkış akımı sunması gerektiğini göstermiştir. Bu bağlamda tezin 4. Bölümünde ilk olarak KK'da kullanılan redresör topolojileri incelenmiştir. Mevcut redresör topolojileri tek polaritede gerilim ve tek yönlü akım verebildiğinden redresörün DA/DA dönüştürücü kısmı için Tam Köprü DA/DA dönüştürücünün kullanılması uygun görülmüştür. Tezin ikinci amacı olan kontrolcü tasarımına yönelik literatürde yapılan kontrol çalışmaları incelenmiştir. Daha sonra Tam Köprü DA/DA dönüştürücünün çalışma bölgeleri analiz edilip bu çalışma bölgelerindeki sürekli iletim modu (SİM) ve kesikli iletim modu (KİM) transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonları irdelenip sistem cevabını etkileyen değişkenler belirlenmiştir. Bu değişkenler göz önünde bulundurularak katsayıları yüke bağlı değişen ardışık PI kontrolcü yöntemi önerilmiştir. Önerilen kontrolcünün performansı her iki iletim modu için PLECS benzetim ortamında test edilmiştir. Daha sonra 100W'lık bir prototip üzerinde denenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Son olarak tezin 6. Bölümünde daha önceki bölümlerde bulunan sonuçlar özetlemiş, değerlendirmeleri yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

2. GÖMÜLÜ BORU HATLARINDA KOROZYON VE KATODİK KORUMA

2.1. Korozyon

Korozyon en basit tabiriyle bir metalden çıkıp bir ortamdan geçen ve farklı bir noktada metale geri dönen akım nedeniyle malzemede oluşan kayıp olarak tanımlanabilir. Korozyonun oksitlenme, paslanma, kimyasal veya bakteri reaksiyonları gibi farklı isimleri ve formları olsa da her tür korozyon elektrik akımı ile sonuçlanmaktadır (Durham ve Durham, 2005). Akımın metalden ayrıldığı nokta anot olarak adlandırılır ve bu noktada Eş. 2.1’de verilen metal çözeltisinde oksitlenme reaksiyonu gerçekleşir. Metalden çıkan akım ile zamanla metalde oluşan kayıp arasında doğrudan bir ilişki vardır. Akımın metale girdiği nokta ise katot olarak adlandırılır ve bu noktada Eş. 2.2’de verilen oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşir (Adedeji ve diğerleri, 2015). Korozyon hücresine ait görsel Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Korozyon hücresi

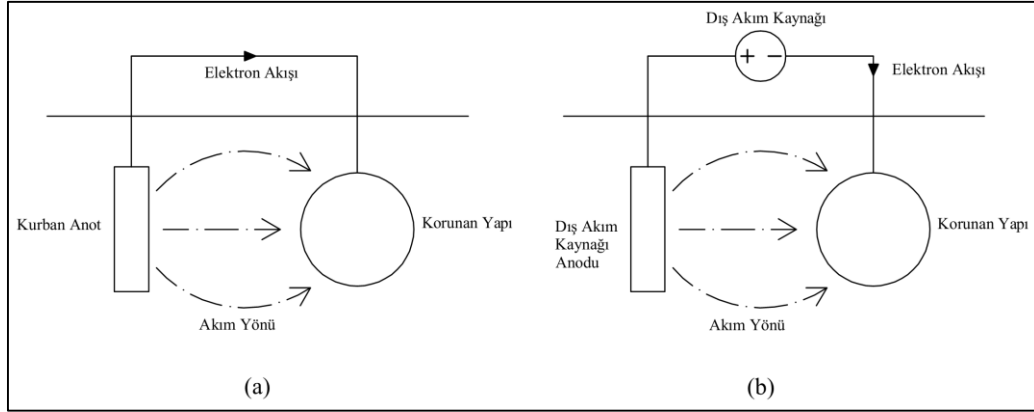
2.2. Katodik Koruma

KK anot ve katot arasındaki potansiyel farkı en aza indirerek korozyonu azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Katodik bölgelerin açık devre potansiyelleri anodik bölgelerin açık devre potansiyellerine polarize edildiğinde yapının korozyonunun tamamen ortadan kaldırıldığı anlamına gelir (Basham ve diğerleri, 2003).

KK'nın prensibi, korunacak metale harici bir anot bağlanması ve metal yüzeyin tüm alanlarının katodik hale gelmesi ve dolayısıyla korozyona uğramaması için DC bir elektrik akımının geçmesidir. Örneğin, bir demir malzeme ile temas eden alüminyumda korozyon oluşacaktır. Alüminyumun elektronegatifliği 1.61 V iken çeliğin elektronegatifliği 1.83 V'tur. Yani, alüminyum molekülleri çelikten daha negatif olan iyonik yüklere sahiptir ve iki metal arasında elektrokimyasal bir çekim olur. Alüminyum molekülleri alüminyumdan çıkıp, elektrolit içerisinden geçerek çelik üzerinde birikirler. Bu kavram, alüminyum tüketimi göz önüne alınarak çelik malzemeyi korumak için kullanılabilir. Bir dış enerji kaynağı yardımıyla alüminyum çelikten daha negatif potansiyelde olmaya zorlanırsa, çelik molekülleri ters yönde hareket eder ve alüminyum üzerinde birikir. Dolayısıyla, KK, bir metali doğal halinden daha negatif olmaya zorlayan bir işlemdir. Metal yeterince negatif olmaya zorlanırsa korozyon duracaktır (Durham ve Durham, 2005).

2.2.1. Katodik koruma yöntemleri

KK yöntemleri basitçe iki sınıfa ayrılırlar: İlk yöntem, literatürde kurban anotlu (KA) KK yöntemi olarak geçmekte olup yukarıda da belirtilen anot kullanım yöntemidir. Şekil 2.2 (a)'da görseli verilen bu yöntemde herhangi bir dış kaynak kullanımına gerek olmayıp, anot malzemesinin tüketimi ile koruma yapılır. İkinci yöntem ise Şekil 2.2 (b)'de görseli verilen dış akım kaynaklı (DAK) KK olarak isimlendirilir ve dış kaynak kullanımını gerektirir. Dış kaynak, anottan korunacak yapıya doğru, elektrolit çözelti (toprak, su vb.) içerisinden geçen pozitif bir akım akmasına yol açar. Böylece yapı katodik olarak kutuplanmış olur ve pozitif akım devre üzerinden güç kaynağına geri döner. Bu sistemde, yardımcı elektrot ve korunacak yapı elektrolitiğin içinde ve elektriksel temasta olmalıdır (Bashi ve diğerleri, 2003).



Şekil 2.2. a) KA yöntemi, b) DAK yöntemi

KA yönteminde kullanılan anotların akım sağlama kapasiteleri genellikle miliamper seviyelerindedir. Bu sebeple, KA yöntemi toprağa maruz kalan sınırlı yüzey alanına sahip, topraklama sistemlerinde veya diğer daha büyük, çıplak metalik yapılardan elektriksel olarak izole edilebilen yapılar için kullanılır. Genel kullanım alanları;

- İyi kaplanmış doğal gaz boru hatları
- Buhar dağıtım kanalları
- Kaplamalı ve elektriksel olarak izole edilmiş küçük yakıt depolama tankları
- Kaplamalı ve izole petrol hatları olarak sıralanabilir.

KA yönteminde kullanılan anot malzemeleri çinko, magnezyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Çinko anot kullanımı genellikle deniz suyu, tuzlu su, deniz çamuru ve direnci 1500 Ohm.cm'nin altında olan toprakta sınırlıdır. Magnezyum ise tatlı sularda ve direnci 10,000 Ohm.cm'nin altında olan toprakta kullanılır. Alüminyum ise çok daha düşük akım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. KA yönteminin avantajları;

- Dış akım kaynağı gerektirmemesi
- Kurulumunun kolay olması
- Katodik girişimlerinin az olması
- Anotların kolay eklenebilir olması
- Bakım gerekliliklerinin az olması
- Akım dağılımının düzenli olması
- Koruma akımının verimli kullanılması

- Eğer yapım aşamasında tesis edilirse kurulumlarının ucuz olması olarak sıralanabilir.

KA yönteminin dezavantajları ise;

- Sınırlı potansiyel fark üretmesi
- Sınırlı akım sağlaması
- İyi kaplanmamış yapılarda çok sayıda anot kurulumu gerektirmesi
- Yüksek dirençli topraklarda etkisiz kalması
- Yapım aşamasından sonra tesis edilmesi durumunda kurulumlarının pahalı olması olarak sıralanabilir (Klechka, 2004).

DAK yönteminde korunacak yapı ile bulunduğu ortam arasında koruma potansiyeli (KP) olarak adlandırılan bir gerilim farkı olması gerekmektedir. Korunacak yapının cinsine bağlı olarak bu KP değeri değişmektedir. Yapının yakınlarına yerleştirilen referans elektrot yardımıyla yapının bulunduğu ortama göre potansiyeli ölçülür ve kapalı çevrim kontrol ile DAK çıkış gerilimi ayarlanarak yapı KP değerinde tutulur. Referans elektrot olarak kullanılan malzeme gümüş/gümüş klorür veya bakır/bakır sülfat olabilmektedir. DAK yönteminde doğru akım güç kaynağı olarak çıkış gerilimi ve akımı ayarlanabilir redresörler (doğrultucu) veya güneş enerjili güç kaynakları kullanılabilir (Oh ve diğerleri, 2004). DAK yönteminin akım kapasitesi KA yöntemine göre çok daha fazla olduğundan, büyük ölçekli yapılarda, etkili bir şekilde kaplanmamış yapılarda veya topraklama hatlarından izole edilemeyen yapılarda kullanılmaktadır. Genel kullanım alanları;

- Çıplak boru hatları
- Elektrik dağıtım kabloları-yakıt sistemlerinin bakır eş merkezli nötr noktaları
- Büyük yakıt depolama tankları
- Büyük gemiler
- Su depolama tankları
- Atık su işleme ekipmanları
- İskele, rıhtım, gemi bölmesi gibi kıyı yapıları olarak sıralanabilir.

DAK yönteminin avantajları;

- Geniş gerilim ve akım aralığı için tasarlanabilmesi
- Tek kurulum ile geniş alanların korunabilmesi
- Değişken gerilim ve akım çıkışının olması
- Yüksek dirençli ortamlarda uygulanabilir olması
- Kaplanmamış veya kötü kaplanmış yapıların korunmasında etkili olması olarak sıralanabilir.

DAK yönteminin dezavantajları ise;

- Katodik girişim sorunlarına neden olabilmesi
- Elektrik enerjisine bağımlı olması
- Periyodik muayene ve bakım gerektirmesi
- Dış güç kaynağı gerektirdiği için enerji maliyetinin olması
- Aşırı koruma potansiyellerinde kaplamaya zarar vermesi olarak sıralanabilir (Heidersbach, 2010).

2.3. Gömülü Boru Hatlarında Katodik Koruma Kriterleri

TS EN 12954: ‘Katodik koruma - Gömülü veya suya daldırılmış metalik yapılar için - Boru hatları için genel prensipler ve uygulama’ başlığı altında gömülü veya suya daldırılmış boru hatlarındaki KK kriterleri ve uygulama esasları yer almaktadır. Bu standarda göre bakır sülfat elektrot ve çelik boru hattı için koruma potansiyeli -0.4V olarak verilmektedir. Ayrıca aşırı koruma potansiyeli adında bir terim de tanımlanmaktadır. Çelik yapının potansiyeli belirli bir seviyenin altına düştüğünde kaplama ile boru hattı arasında hidrojen gazı oluşmaya başlamakta ve bu oluşan gaz kaplamaya zarar vermeye başlamaktadır. Bu sebeple boru potansiyelinin aşırı koruma potansiyelinden daha yüksek olması gerekmektedir. Standartta bu değer çelik yapılar ve bakır sülfat elektrot için -1.2V olarak verilmektedir.

TS EN 50162: ‘Doğru akımlı sistemlerden gelen parazit akımla korozyona karşı koruma’ başlığı altında raylı sistemlerden sızan kaçak akımların katodik koruma için kullanılmasına yönelik uygulama esaslarını içermektedir.

2.4. G6m6l6 Boru Hatlarında Katodik Koruma Sistemlerini Etkileyen Fakt6rler

G6m6l6 boru hatlarında KK sistemlerini etkileyen fakt6rler, toprak yapısı, tell6rik akımlar, girişimler ve kaçak akımlardır. Bu fakt6rlerden toprak yapısı ve tell6rik akımlar doğal etkiler iken girişimler ve kaçak akımlar ise insan yapımı harici etkilerdir.

2.4.1. Toprak yapısı

Toprak direnci

Korozif 6zelliği birbirinden farklı 50 çeşit toprak tipi bulunmaktadır. Bu toprak tiplerinin direnci farklılık g6stermekle birlikte katodik koruma y6ntemleri tasarımında en temel etkenlerden birisidir. Toprak direncinin 25Ohm.m'den k66k olduğu yerlerde metaller için ciddi anlamda korozif etki oluştururken toprak direncinin 100Ohm.m'den k66k olduğu yerlerde korozif etki azdır. Toprak direnci KA y6nteminde anot malzeme seçimini ve ne kadar miktarda kullanılacağını belirlerken, DAK y6nteminde redres6r tasarımı için de hesaplamaların temelini oluşturan etkenlerdendir.

Topraktaki nem içerięi

Bir boru farklı nem içeriğine sahip iki t6r toprağa g6m6l6rse, borunun ıslak toprakla temas eden alanı paslanırken, kuru toprakla temas eden boru paslanmayacaktır. Borunun kuru toprakla temas eden alanı katot gibi davranırken, ıslak toprakla temas eden alanı ise anot gibi davranmaktadır.

pH değeri

Bir elektrokimyasal korozyon h6cresindeki toprak veya su elektrolitinin pH değeri, anot ve/veya katottaki kimyasal reaksiyonları hızlandırarak veya yavaşlatarak korozyon hızını etkilemektedir. Bir elektrolitin pH'ı temel olarak hidrojen iyonlarının konsantrasyonunu belirler. 4'6n altındaki pH için çeliğin korozyon hızı artar ve pH 3'te muazzam bir seviyeye ulaşır (Bashi, 2003).

2.4.2. Tellürik akımlar

Dünyanın manyetik alanındaki bozulmalar ve okyanus dalgaları boru hatlarında akım indüklenmesine sebep olmaktadır. Bu akımın boruyu terk ederek toprağa girdiği noktada korozyon meydana gelir. Özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte yeni yapılan boru hatlarında kaplama direnci artmıştır. Bunun sonucu olarak eski boru hatlarındakine göre daha büyük boru-toprak gerilim farkı (BTG) salınımları oluşmaktadır (Boteler, 2004). Tellürik akımların etkileri öncelikle okyanuslara yakın bölgelerde görülse de, ülkemizde yer alan doğalgaz boru hatlarında varlığı da bilinmektedir (Demirel ve Yalçın, 2013).

2.4.3. Girişim

Enerji nakil hatlarının gömülü boru hatları ile kesiştiği veya paralel seyrettiği durumlarda enerji nakil hatlarından geçen alternatif akımın elektromanyetik etkisiyle indüktif bağlaşım sonucu boru hatlarında gerilim indüklenmektedir. Yapılan modelleme çalışmaları ve saha ölçümlerinde indüklenen bu gerilimlerin ciddi seviyelere ulaşabileceğini göstermiştir. Örneğin boru hattı ve enerji nakil hattının 20km boyunca aynı koridoru paylaştığı benzetim çalışmasında indüklenen gerilim sonucunda BTG farkının 300V'a kadar çıkabileceği gösterilmiştir (Wang ve diğerleri, 2020). Bu etkinin gözlemlendiği yerlerde boru hattı bir alternatif akım süzgeci devreleriyle topraklanarak bu etki minimuma indirilir. Kullanılan bu süzgeç alternatif akımı geçirirken doğru akımı geçirmemektedir (Nagat ve diğerleri, 2015). Tellürik etkiler de alternatif akım etkilerine benzerlik gösterdiğinden aynı yöntem tellürik etkileri azaltmak için de kullanılır.

2.4.4. Kaçak akımlar

Boru hatlarının yakınlarından geçen tren, metro ve tramvay gibi ulaşım araçlarının raylarından sızan kaçak akımların boru hattına bir noktadan giriş yaparak başka bir noktadan çıkış yapısı sonucu KK sistemleri olumsuz yönde etkilemektedir. Alternatif akım kaçaklarının boru hattı üzerindeki etkisi yine alternatif akım süzgeçleri ile elimine edilebilmektedir. Doğru akım kaçakları için ray hattının yapımı sırasında ray güzergahına döşenen kaçak akım toplayıcı matlar sayesinde bu etki azaltılabilmektedir (Charalambous ve diğerleri, 2008). Ancak ray hattının yapımı sırasında mat döşenmemiş ise sonradan tesis edilmesi mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda doğru akım kaçakları boru hattının

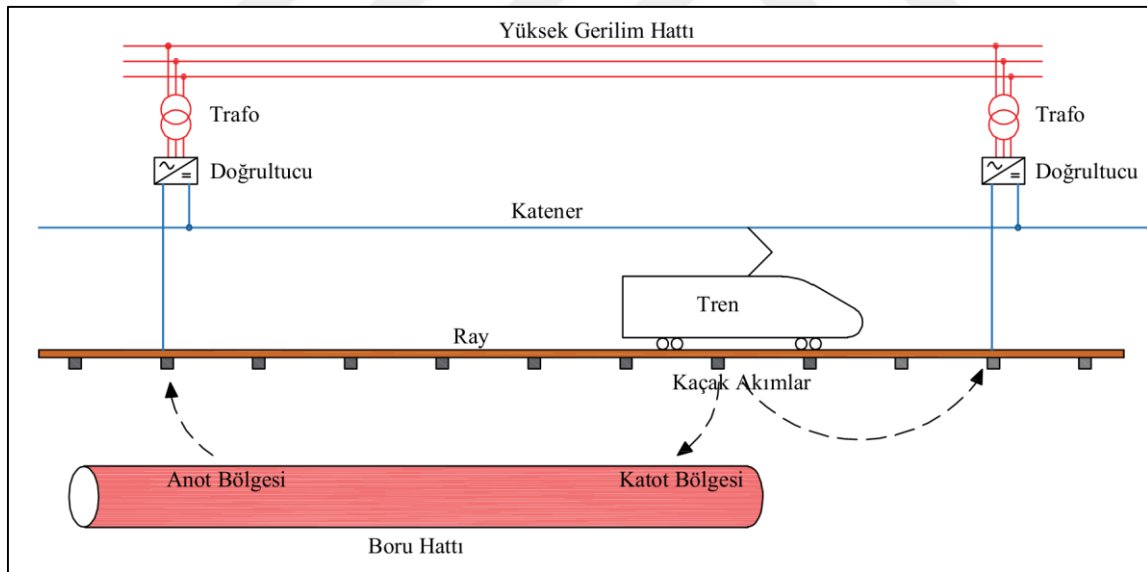
lokal bölgeleri için topraklama yoluyla giderilebilmektedir ancak borunun tamamında bir koruma sağlayamamaktadır.



3. RAYLI SİSTEMLERİN GÖMÜLÜ BORU HATLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODELLENMESİ, UYGUN REDRESÖR SAYISI VE PROB KONUMLARININ BELİRLENMESİ

3.1. Giriş

Tren, metro ve tramvay benzeri elektrikli ulaşım araçlarında katenerden gelen elektrik akımı fazladan iletken kullanmak yerine halihazırda bulunan iletken ray hattı üzerinden devresini tamamlar. Rayın iç direncinin etkisiyle tren pozisyonuna ve çektiği akıma bağlı olarak akımın raya girdiği ve raydan çıkıp besleme noktasına geri döndüğü noktalar arasında potansiyel fark oluşur. Bu potansiyel ile toprak potansiyeli arasındaki fark ray potansiyeli (RP) olarak adlandırılır ve raydan toprağa kaçak akımların akmasına sebep olur (Xu ve diğerleri, 2013). Boru hattı gibi toprağa gömülü herhangi bir metalik yapı, düşük dirençli akım yolunu temsil ettiğinden kaçak akımlar metalik yapı üzerinden geçerek besleme noktasına Şekil 3.1'deki görselde verildiği gibi tekrar dönüş yapar.



Şekil 3.1. Kaçak akımların izlediği yol

DA kaçaklarının modellenmesi üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar alan yaklaşımı ve elektrik devresi (ED) yaklaşımı olmak üzere iki farklı kategoride yapılmıştır. Alan yaklaşımı daha çok, gömülü metalik yapı üzerinde meydana gelen elektrokimyasal polarizasyonu modellemek için kullanılmıştır. Geniştirilmiş yapıların (boru hatları, kablolar vb.) modellenmesi için daha uygun olan toprak dönüş devresi teorisine

dayanan ED yaklaşımında, polarizasyon olgusu dikkate alınmaz (Ogunsola ve diğerleri, 2012).

Kaçak akımı değerlendirmek için ilk ayrıntılı analiz yöntemi McCollum tarafından sunulmuştur. ED yaklaşımının kullanıldığı yöntemde topraklanmış ve topraklanmamış DA raylı sistemlerinin kaçak akım miktarı hesaplanmıştır. Kaçak akım faktörü adı verilen bir değişken tanımlanmış ve toplam kaçak akımları azaltmak için bu faktörün mümkün olduğunca küçük olması gerektiği öne sürülmüştür (McCollum ve Logan, 1916).

Schwalm ve Scandor, rayların topraktan yalıtılmadığı durum için dönüş akımının bir kısmının toprağa akması ve iletkenlik sağlayan civardaki herhangi bir metalik yeraltı yolunu kullanması durumunu modellemiştir (Schwalm ve diğerleri, 1969). Baeckman ve Hu tren pozisyonu ile raydan toprağa, raydan boru hattına ve topraklama noktasına dönen kaçak akımları formüle etmiştir. Analizleri, ray ve toprak arasındaki yalıtımın homojen olduğu durumda ray direnci ve raydan toprağa geçiş direncinin sürekli olduğu modele dayanmaktadır. (Baeckman ve diğerleri, 1999).

Yu ve Goodman, çalışmalarında ray direncinin ve raydan toprağa geçiş direncinin homojen olduğunu varsaymıştır. Bu yaklaşımla, rayı sonlu sayıda parçaya bölerek oluşturduğu modelde düğüm gerilimlerini ve akımlarını iletkenlik matrisi yöntemiyle çözmüştür. Bu yöntemin doğruluğu parça sayısına, sonlandırma dirençlerine ve ray uzunluğuna bağlıdır. Bu model kullanılarak ray potansiyeli, kaçak akım yoğunlukları, toplam kaçak akım ve maksimum ray potansiyeli elde edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, raydan toprağa geçiş direnci arttıkça kaçak akımların azaldığı ve topraklamanın kaçak akımları arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Yu ve Goodman, 1992). Cai ise Yu'nun analiz yöntemini kullanarak π -tipi modeli geliştirmiştir. Çalışmada farklı şekillerde yapılmış topraklamanın ray potansiyeline etkisi incelenmiştir kaçak akımlarla ilgili bir çalışma yapılmamıştır (Cai ve diğerleri, 1995).

Pham ve Thomas toprakla yalıtımı iyi olan ray sisteminde herhangi bir noktada meydana gelen yalıtımdaki delinme sonucu oluşan kaçak akım noktasını yarım daire elektrot olarak tanımlamıştır. Daha sonra sınır koşullarını ve alan teorisini kullanarak, topraktaki gerilimin gradyanını, toplam kaçak akımı ve boru hattındaki korozyon akımlarını hesaplamıştır. (Pham ve Thomas, 2001).

Cao ise elektrik alanın indüklenme teorisine dayalı bir modelle kaçak akım dağılımlarını hesaplamıştır. Düzgün kalınlıktaki iletkenin sürekli akım geçtiğinde, iletken yüzeyinde bir yüzey yükü olacaktır. İletkendeki yüzey yükü sayesinde indüktif elektrik alan üretilecek ve bu alan dış ortamda gerilim gradyanının oluşmasına sebep olacaktır. Böylece kaçak akımlar hesaplanabilecektir (Cao, 2010).

Ogunsola'nın yaptığı çalışmada direnç modeli geliştirilerek boru hattının kaplamasında bir delinme olması durumunu modellemiştir. Bu modelde, toprak ile uzun boru hatlarının arasındaki geçiş direncini, kaplamada oluşan deliklerin geçiş direncini, kaçak akım toplayıcı matların dirençlerini ve kaplama kalınlıklarını hesaba katarak analitik olarak hesaplamıştır. Hesaplanan bu değerler direnç modeline yeni katmanlar olarak eklenmiştir. Böylece tren pozisyonunun BTG farkına etkisi detaylı bir şekilde analiz edebilmiştir. (Ogunsola ve diğerleri, 2012).

Jabbehdari'nin yaptığı çalışmada ise toprak sonlu sayıda hücelere ayrılmış ve 3 boyutlu direnç ağı şeklinde modellenmiştir. Her düğümdeki akım ve gerilim değerlerini, düğüm gerilim ve akım yöntemleri kullanarak Tableau metoduyla çözülmüştür (Jabbehdari ve diğerleri, 2015).

DA kaçaklarının modellenmesinde analitik yöntemlere ek olarak benzetim programlarından da yararlanılmaktadır. Charalambous'un CDEGS ve MATLAB kullanarak yaptığı çalışmada çok katmanlı direnç modelini kullanmıştır. Modeldeki geçiş dirençlerini CDEGS programında sınır elemanları yöntemini kullanarak hesaplamıştır. Daha sonra bu direnç değerlerini iletim matrisinde yerine koyarak farklı senaryolar için BTG farklarını MATLAB yardımıyla hesaplamıştır (Charalambous ve diğerleri, 2008).

Diğer benzetim araçlarından birisi de ANSYS'dir. Özellikle karmaşık ve homojen olmayan yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmesine olanak sağlamaktadır. Hill yaptığı çalışmada sonlu elemanlar analizi kullanarak DA raylı sistemlerindeki elektromanyetik alanları incelemiştir. Ray hattını toprağa gömülü yarım silindir olarak, toprağı ise onu çevreleyen çok katmanlı yarım silindir olarak modellemiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elektrik alan yoğunluğunu ve gerilimin gradyanını hesaplatmış, bu sonuçlardan eşdeğer iletim hattı parametrelerini elde etmiştir. Daha sonra üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak DA taşıtlarının trafo merkezlerinin yakınlarındaki

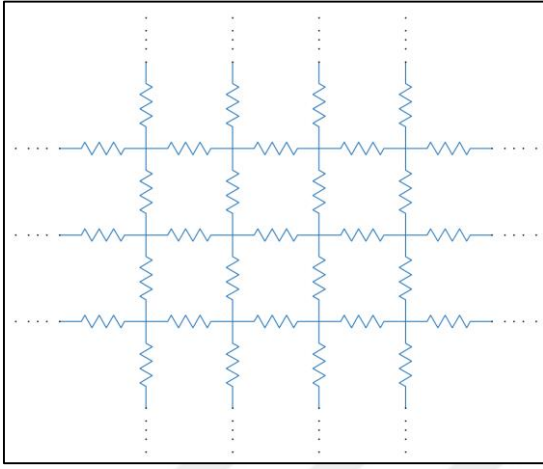
akımlarını ve elektromanyetik girişimlerini hesaplamıştır (Hill ve diğerleri, 1999). Bu iki uygulama kaçak akımların dağılımının sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması konusunda ufuk açıcı olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi küçük yapılarda daha iyi sonuçlar verdiği için bu alandaki çalışmalar genelde kaçak akımların metro tünellerine etkileri ile sınırlı kalmıştır (Brenna ve diğerleri, 2010; Dolara ve diğerleri, 2012; Wang ve diğerleri, 2014).

Literatüre geçmiş çalışmalara bakıldığında çalışmaların çoğu raydan sızan kaçak akım miktarına odaklanmış ve kaçak akımı etkileyen ray-toprak arası yalıtım, ray topraklama çeşitleri, toprak direnci, ray direnci ve kaçak akım toplayıcı matların kaçak akım üzerine etkileri analiz edilmiştir. Nadir birkaç çalışmada kaçak akımların boru hatları gibi üçüncül yapılara etkileri araştırılmıştır. Literatürde bulunan kaçak akımları azaltmaya yönelik öneriler ise ray direncinin azaltılması, kaçak akım toplayıcı mat kullanımı, ray-toprak arası yalıtımın artırılması, besleme istasyonlarının gerilimlerinin artırılması, istasyonlar arasındaki mesafenin azaltılması, dönüş akımını paylaşması için fazladan ray eklenmesi ve kaçak akımları azaltmaya yönelik topraklama çeşitleri gibi pasif yöntemlerdir (Charalambous, 2005). Fakat bu yöntemler yeni tesis edilecek raylı sistemler için büyük öneme sahip olsa da hali hazırda bulunan raylı sistemler için pek anlam ifade etmemektedir çünkü topraklama çeşitleri dışındaki önerilerin mevcut sistemlere uygulanması çok zordur.

Literatür taraması sonucu kaçak akımların boru hatlarına etkisini azaltacak veya önleyecek hiçbir aktif yöntemin bulunmadığı görülmüştür. Bu sebeple, çalışmanın bu kısmında ray ve boru hattı arasına yerleştirilecek redresörler sayesinde raydan sızan DA kaçaklarının toprak üzerinde oluşturduğu potansiyel gradyanına ters yönde bir gradyan oluşturarak boruya doğru yönelen kaçak akımların yönünün değiştirileceği ve BTG geriliminin düşürüleceği böylece boru hatlarının aktif bir şekilde korunacağı hipotezi ortaya atılmıştır. Daha sonra toprak yapısı 2 boyutlu bir direnç ağı yapısıyla modellenmiş ve ray ile boru hatları modele birer katman olarak eklenmiştir. Oluşturulan model yardımıyla boru hattı ve ray arasına çeşitli kombinasyonlarla redresör problemleri yerleştirilmiş ve BTG dağılımı üzerindeki etkilerinin sonuçları elde edilmiştir.

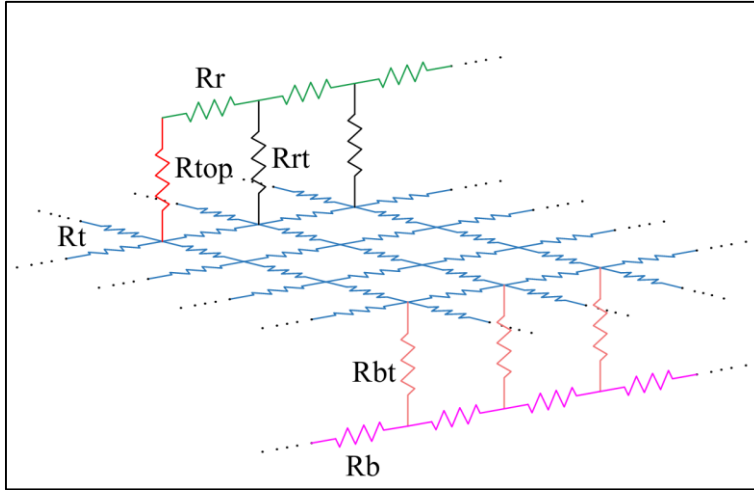
3.2. DA Kaçaklarının Sebep Olduğu Gerilim Dağılımının Modellenmesi

Literatürdeki modeller incelendiğinde çoğu çalışmada yapılar arasında toprak direnci boylamsal olarak tek dirence indirgenmiş ve bunun üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemde ise ray ve boru hattı arasına redresör yerleştirileceğinden Jabbehdari'nin çalışmasında yaptığı gibi toprak Şekil 3.2'deki görselde görüldüğü üzere tek katmanlı direnç ağı şeklide modellenmiştir (Jabbehdari ve diğerleri, 2015).



Şekil 3.2. Toprağın direnç ağı modeli

Ray ve boru hattı ise Şekil 3.3'te görüldüğü üzere toprak modelinin üzerine ve altına birer katman olarak eklenmiştir. Görseldeki R_t toprak direncini, R_r ray direncini, R_{rt} raydan toprağa geçiş direncini, R_b boru hattının direncini, R_{bt} borunun yalıtım direncini ve R_{top} rayın topraklandığı noktadaki geçiş direncini temsil etmektedir. Bu çalışmada toprak yapısının homojen olduğu, ray altına kaçak akım toplayıcı mat yerleştirilmediği ve boru hattının kaplamasında herhangi bir delinme olmadığı durum için analizler yapılmıştır. Fakat her ne kadar dirençlerin homojen olduğu durumda analizler yapılmış olsa da farklı toprak yapılarının bulunduğu, ray-toprak arasındaki yalıtımın delindiği veya boru hattının yalıtımın delindiği durumlar da bu modelle araştırılabilir.

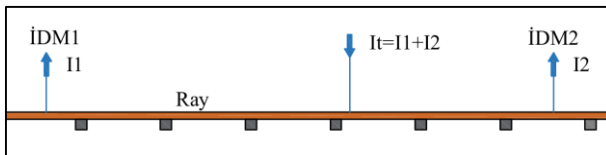


Şekil 3.3. Ray ve boru hattının modele eklenmesi

Modeldeki düğüm noktalarının gerilimleri ve düğümler arasındaki akımlar Y_u 'nun kullandığı iletkenlik matrisi yöntemiyle çözülebilir. Daha çok güç sistemlerinde bara gerilimlerinin hesaplandığı bu yöntemde ilk önce her düğüm noktasının çevresindeki düğüm noktaları ile arasındaki iletkenlik ilişkisi iletkenlik matrisine girilir ve daha sonra bu iletkenlik matrisinin tersi alınarak empedans matrisi elde edilir. Düğüm noktalarının gerilimini bulmak için empedans matrisi, düğüm noktalarına giren akımların bilindiği akım matrisi ile Eş. 3.1'deki gibi çarpılır.

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (3.1)$$

Trenin katenerden çektiği akım Şekil 3.4'de görseli verildiği üzere, akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bu akım trenin bulunduğu noktadan raya girmekte ve besleme istasyonuna geri dönmektedir. Dolayısıyla tren konumu ve akımı bilindiği takdirde akım matrisi kolay bir şekilde oluşturulabilir.

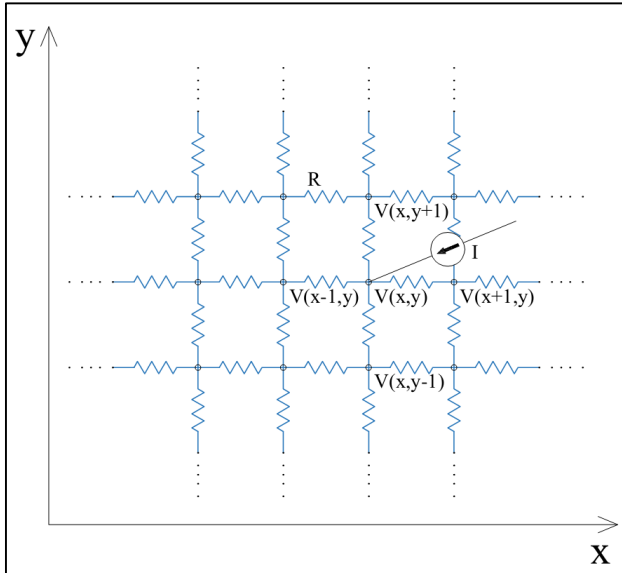


Şekil 3.4. Tren akımı ve raydan dönüş akımları

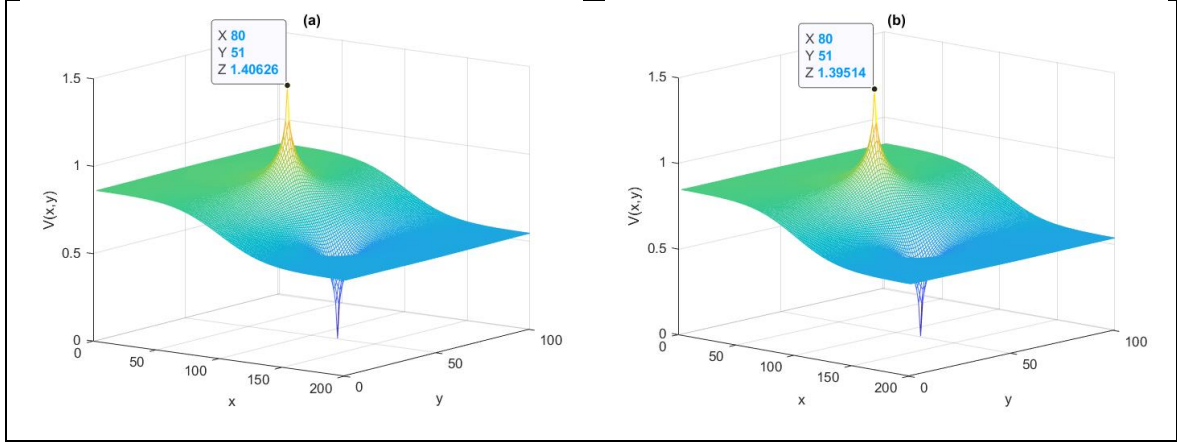
Bu modelde hata payını asgariye indirmek için direnç ağı sayısını arttırmak gerekmektedir. Ağ sayısını arttırdıkça düğüm sayısı da artmaktadır. Düğüm sayısı, $n \times n$ boyutunda bir ağ için n^2 'dir. Her düğümün diğer düğümlerle olan iletkenliği matrise girildiğinde (direk bağlantılı olmayan düğümlerin iletkenliği 0 girilmektedir), iletkenlik matrisinin boyutu $n^2 \times n^2$ olmaktadır. Büyük boyutlardaki direnç ağlarını çözmek bu sebeple zorlaşmaktadır. Örneğin 200×200 'lük bir direnç ağı için iletkenlik matrisinin boyutu bilgisayar RAM'inde 12GB'lık alan kaplamaktadır. Fakat büyük yapıları hassas bir şekilde modellemek için bundan çok daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, büyük direnç ağlarını çözmek için kesin çözüme belli bir hata oranıyla yakınsayan yinelemeli bir çözüm yöntemi bu çalışmada kullanılmıştır. Şekil 3.5'te verilen devrede A noktasının düğüm analizi,

$$\frac{V(x,y)-V(x-1,y)}{R} + \frac{V(x,y)-V(x+1,y)}{R} + \frac{V(x,y)-V(x,y-1)}{R} + \frac{V(x,y)-V(x,y+1)}{R} - I = 0 \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. İlk adımda bütün düğümlerin gerilimi 0 kabul edilirse A noktasının gerilimi $I \cdot R/4$ olmaktadır. Eş. 3.2'deki denklem bütün düğümlere uygulandığında, her adımda A noktasının çevresindeki gerilimler artarak düğüme giren akım ile düğümden çıkan akımlar eşitlenmeye başlayacak ve gerçek çözüme yaklaşılabacaktır.



Şekil 3.5. Direnç ağına akımın girdiği nokta



Şekil 3.6. a) İletkenlik matrisi ile çözüm, b) Yakınsama yöntemi ile çözüm

İletkenlik matrisi çözümü ile yakınsama yöntemini karşılaştırmak adına 200×101 'boyutunda bir direnç ağı oluşturulmuş ve belirli noktalara aynı potansiyel fark uygulanmıştır MATLAB ortamında elde edilen sonuçlar Şekil 3.6'daki görselde sunulmuştur. İki çözüm yönteminde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup yakınsama yöntemindeki hata payı %0.8 olarak gözlemlenmiştir.

Sunulan modelde, uzayın sonlandırıldığı kenar noktalarında doğru sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebeple, 550×450 'lik bir direnç ağı oluşturulmuş ve x yönünde kenarlardan 50 düğüm, y yönünde kenarlardan 100 düğüm noktası marj bırakılarak 450×250 'lik alandaki sonuçlar baz alınmıştır. Her iki düğüm arası mesafe 10m alınmış ve bu durum için direnç değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Benzetimde kullanılan direnç değerleri

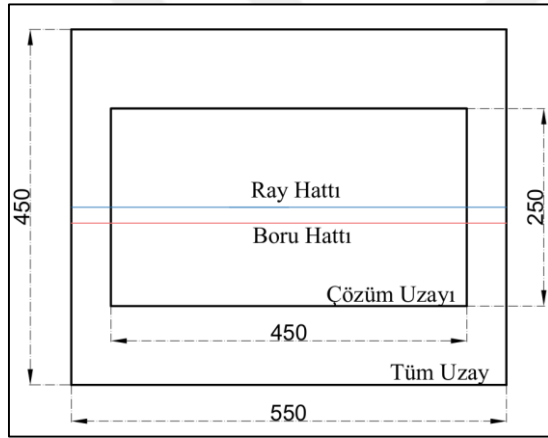
	10m için hesaplan değeri (Ω)
Toprak direnci (R_t)	5
Ray direnci (R_r)	300μ
Raydan toprağa geçiş direnci (R_{rt})	1k
Boru iç direnci (R_b)	1m
Borudan toprağa geçiş direnci (R_{bt})	1M
Ray topraklama direnci (R_{top})	2

Modelleme çalışmasında;

- Toprak direncinin her noktada aynı olduğu

- Ray direncinin her noktada aynı olduğu
- Boru hattının topraktan kusursuz bir şekilde yalıtıldığı
- Boru yalıtım direncinin her noktada aynı olduğu
- Boru hattının direncinin her noktada aynı olduğu

varsayılmıştır. Tren hattının çözüm yapılan kısmının uzunluğunun 1.5km olduğu (enerji akışının iki istasyon arasında olması sebebiyle), boru hattı ile aynı koridoru paralel bir şekilde paylaştığı ve aralarındaki mesafenin 200m olduğu kabul edilmiştir. Tüm uzayı, esas alınan çözüm uzayını, ray ve boru hattının yerleşimleri kuşbakışı olarak Şekil 3.7'deki görselde sunulmuştur.



Şekil 3.7. Benzetimde kullanılan tüm uzay ve çözüm uzayının gösterimi

3.3. Topraklama, Besleme ve Tren Konumlarının Potansiyel Dağılımına Etkileri

DA beslemeli raylı sistemlerde, Şekil 3.1'de de görüldüğü üzere yüksek gerilim ilk önce indirici trafo merkezlerinde daha düşük gerilimlere indirilir ve doğrultularak katener sistemi beslenir. Kateneri besleyen bu indirici/doğrultucu merkezler (İDM), istasyonlar arasındaki mesafeye bağlı olarak her istasyonda, iki istasyonda bir veya üç istasyonda bir katener sistemini beslemektedir. Örnek olarak 16 istasyonlu İstanbul M5 sürücüsüz metro hattında İDM her iki istasyonda bir yerleştirilmiş olup toplam 9 İDM bulunmaktadır. 16 istasyonlu Nanjing metro hattında ise İDM her iki veya üç istasyonda bir yerleştirilmiş olup toplamda 7 İDM bulunmaktadır (Ölmez ve diğerleri, 2020),(Xu ve diğerleri, 2013). Literatürdeki çalışmalara bakıldığında trenin çektiği akımın tren konumuna bağlı olarak arasında bulunduğu iki İDM tarafından paylaşıldığı görülmektedir (Xu ve diğerleri, 2013;

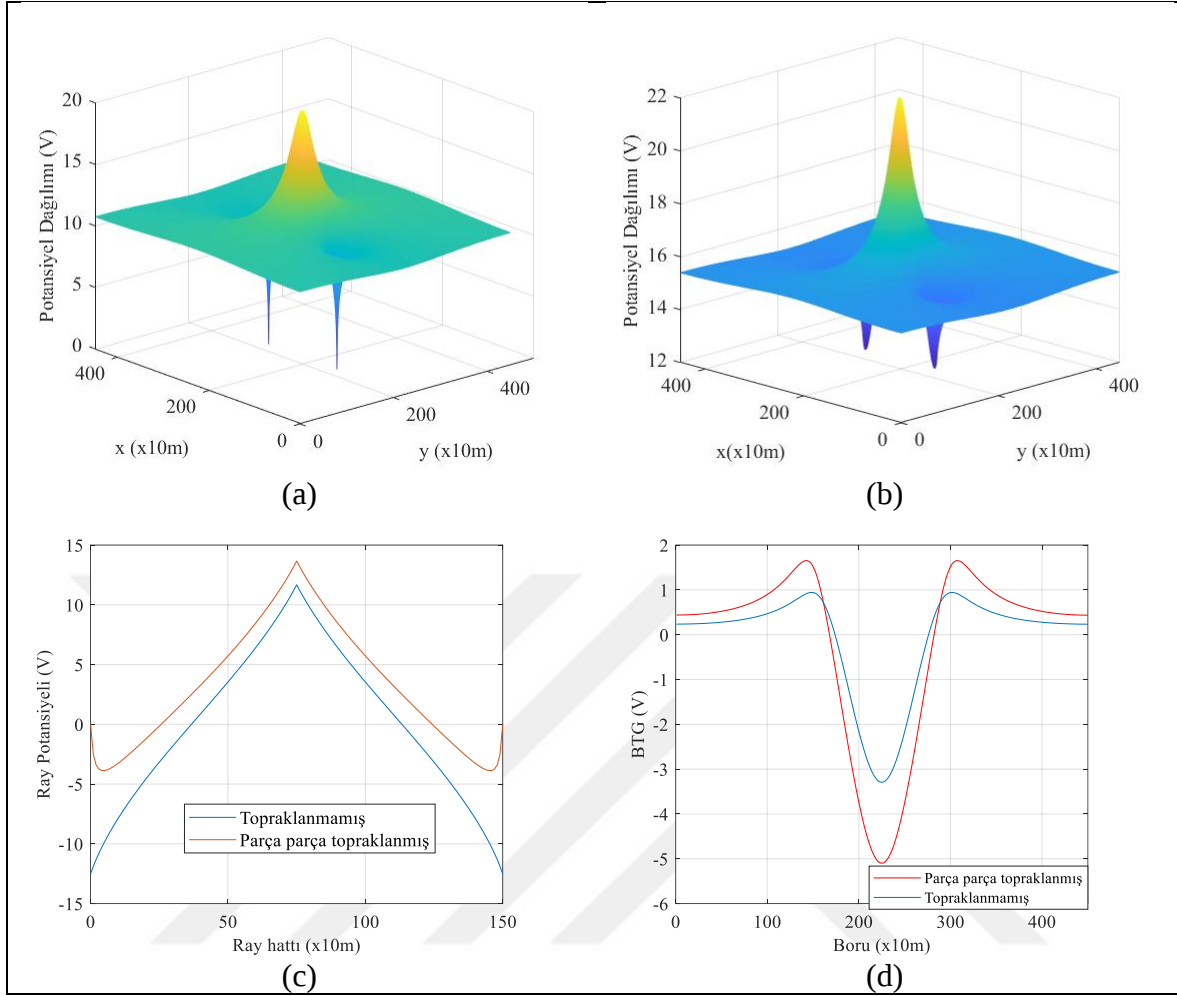
Charalambous ve diğerleri, 2008; Ogunsola ve diğerleri, 2012). Ayrıca geri kazanımlı (rejeneratif) raylı sistemlerde, frenleme esnasında trenin kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu enerji hatta geri verilir. Bu sebeple enerji akışı hem katenerden trene doğru hem de rejeneratif frenleme esnasında trenden katenere doğru olmak üzere iki yönlü gerçekleşebilmektedir.

Ray hatlarının topraklama biçimleri, topraklanmamış, parça parça topraklanmış, diyot ile topraklanmış ve aşırı gerilim koruyucu hücreler ile topraklanmış olmak üzere 4 farklı sınıfta toplanabilir (Xu ve diğerleri, 2013). Paul'un yaptığı çalışmada bu topraklama şekilleri RP ve kaçak akım düzeyleri açısından karşılaştırılmış sonuçlar Çizelge 3.2'de sunulmuştur (Paul ve diğerleri, 2001). Benzer çalışma parça parça topraklanmış ve topraklanmamış ray hattı için önerilen model ile gerçekleştirilmiş, BTG, RP ve topraktaki potansiyel dağılımları Şekil 3.8'deki görselde sunulmuştur. Her iki durumda da trenin iki istasyonun tam ortasında olduğu ve anma akımını (3kA) çektiği varsayılmıştır. Şekil 3.8 (a)'da rayın parça parça topraklandığı durum için topraktaki potansiyel dağılımı Şekil 3.8 (b)'de ise topraklanmadığı durum için potansiyel dağılımları verilmiştir. Şekil 3.8 (c)'da ray topraklandığında RP'nin düştüğü, Şekil 3.8 (d)'de ise BTG'nin arttığı görülmektedir.

Parça parça topraklamanın BTG gerilimini arttırdığı ve boru hattında olası bir delime olduğunda BTG farkından dolayı boru hattının korozyona karşı daha savunmasız kalacağı gözlemlenmiştir. Diyot ile topraklanmış raylı sistemler ise enerji akışının katenerden trene doğru olduğu durumda diyot iletime geçmekte ve ray topraklanmaktadır, enerji akışının trenden katenere doğru olduğu durumda diyot kesime gitmekte ve topraklanmamış ray gibi davranmaktadır. Aşırı gerilim koruyucu hücreler ile topraklamada RP belli bir değerin üzerine çıktığında çift yönlü tristörler tetiklenerek ray hattı topraklanmaktadır. Bu yöntem de hem topraklanmış hem de topraklanmamış ray özelliği göstermektedir.

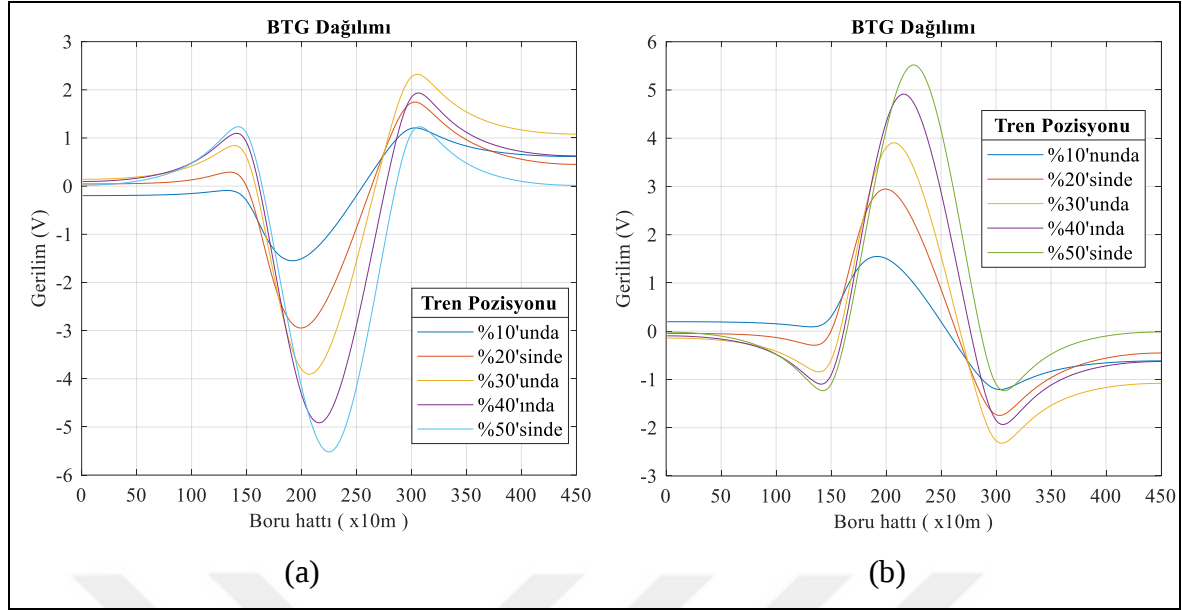
Çizelge 3.2. Topraklama biçimine göre ray potansiyeli ve kaçak akım düzeylerinin karşılaştırılması

Topraklama Biçimi	Ray Potansiyeli	Kaçak Akım Düzeyi
Parça Parça Topraklanmış	Düşük	Yüksek
Diyot ile Topraklanmış	Orta/Düşük	Orta/Yüksek
Tristör ile Topraklanmış	Orta/Yüksek	Orta/Düşük
Topraklanmamış	Yüksek	Düşük



Şekil 3.8. a) Rayın parça parça topraklandığı ve b) topraklanmadığı durumdaki potansiyel dağılımında c) RP dağılımı, d) BTG dağılımı

Trenin iki istasyon arasındaki konumunun %10, %20, %30, %40 ve %50 olduğu ve nominal akımı çektiği durumlar önerilen modelle gerçekleştirilmiştir. Normalde trenin çektiği akım hareket profiline göre değişmektedir fakat en kötü durum senaryosundaki etkilerin araştırılması adına trenin her konumda nominal akımı çektiği varsayılmıştır. Tren pozisyonunun ve enerji akış yönünün, parça parça topraklanmış ray için BTG üzerine etkileri Şekil 3.9 (a) ve (b)'deki görselde sunulmuştur. Şekil 3.9 (a)'da enerji akışının katanerden trene doğru olduğu, Şekil 3.9 (b)'de ise trenden katanere doğru (rejeneratif frenleme anı) olduğu durum için BTG dağılımı verilmiştir. Tren istasyona yaklaştıkça BTG üzerine etkisi azalmaktadır. Bunun sebebi ray hattındaki $I \cdot R$ gerilim düşümünün azalmasıdır. Rejeneratif frenlemede elde edilen sonuçlar ise enerji akışının trene doğru olduğu durumdaki BTG dağılımının 0 potansiyele göre simetriğidir.



Şekil 3.9. Tren pozisyonuna göre BTG dağılımları, a) Enerji akışı katenerden raya, b) Enerji akışı raydan katenera

3.4. Uygun Redresör Konumlarının ve Sayısının Belirlenmesi

Bir önceki bölümde elde edilen sonuçlar ışığında kaçak akımların oluşturduğu BTG farkının redresörler yardımıyla ters yönlü bir potansiyel dağılım oluşturularak azaltılabileceği kanısına varılmıştır. Fakat yerleştirilecek redresör konumu ve sayısının incelenmesi gerekmektedir. Mümkün olduğunca az sayıda redresör kullanmak hem maliyetleri azaltacak hem de uygulanabilirliği atıracaktır. Redresör prob yerleşimi de oluşturulacak ters potansiyeli doğrudan etkileyeceği için konumlarının araştırılması gerekmektedir. Yerleştirilecek redresörlerin akım ve gerilimlerinin ne olacağı ise araştırılması gereken diğer bir konudur.

En kötü durum senaryosu, bir önceki bölümde görüldüğü üzere ray hattının parça parça topraklandığı ve trenin anma akımını çektiği durumdur. Bu bağlamda ilk adımda önce boru hattı ile ray hattı arasına belirli sayı ve konumda redresörler yerleştirilmiştir. Redresör akımlarının hangi noktadan toprağa gireceği ve hangi noktadan topraktan çıkacağı modele işlenmiştir. Daha sonra MATLAB kütüphanesinde bulunan türevsiz çok değişkenli fminsearch fonksiyonu ile hangi redresör akımında BTG farkının minimuma indirildiği bulunmuştur. BTG geriliminin maksimum noktası ile minimum noktası arasındaki fark objektif fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Böylelikle hangi prob yerleşiminin en iyi sonucu

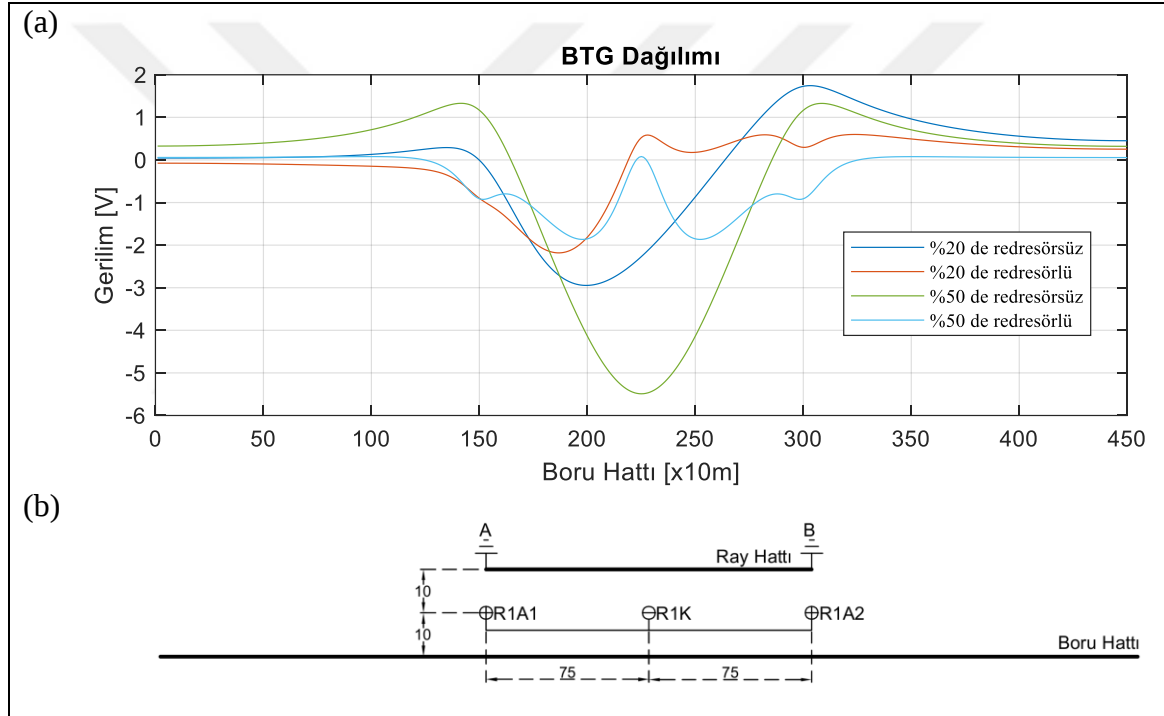
verdiği araştırılmıştır. Başlangıçta anot veya katot olarak belirlenen akım noktaları optimizasyon sonucuna göre değişim gösterebilmektedir. Bu işleme ilk önce tek redresörden başlanmış, prob noktaları farklı yerlerde konumlandırılıp boru hattına ve raya yaklaştırılarak etkileri gözlemlenmiştir. Daha sonra redresör sayısı arttırılarak maliyet/fayda açısından optimum redresör sayısı belirlenmeye çalışılmıştır.

3.5. Benzetim Sonuçları

Trenin ray üzerindeki pozisyonu ve çektiği akım BTG dağılımını doğrudan etkilediğinden tren pozisyonunun iki farklı konumda olduğu senaryoda, prob yerleşimlerinin BTG dağılımına etkisi optimum olacak şekilde incelenmiştir. Bu tren konumlarının ilki A ile B istasyonları arasında tam ortada yani yolun %50'sinde iken ikincisi ise A ile B istasyonları arasında A istasyonuna 300m mesafede iken yani yolun %20'sinde iken ki konumlarıdır. Bu tren konumlarının baz alınmasındaki neden ise trenin hızlanma profilinde en yüksek akımları çektikleri olası noktalar olmasıdır. İki durum için de trenin anma akımını (3kA) çektiği varsayılmıştır. İncelenen prob yerleşimleri sırasıyla sunulmuştur. Problemlerin anot isimleri RxA ve $RxAy$ şeklinde ifade edilmiştir. Buradaki x kaçınıcı redresör olduğunu y ise çoklu anot yerleşiminde kaçınıcı anot olduğunu temsil etmektedir. Katot problemleri RxK ve $RxKy$ olarak benzer şekilde isimlendirilmiştir.

1.Yerleşim

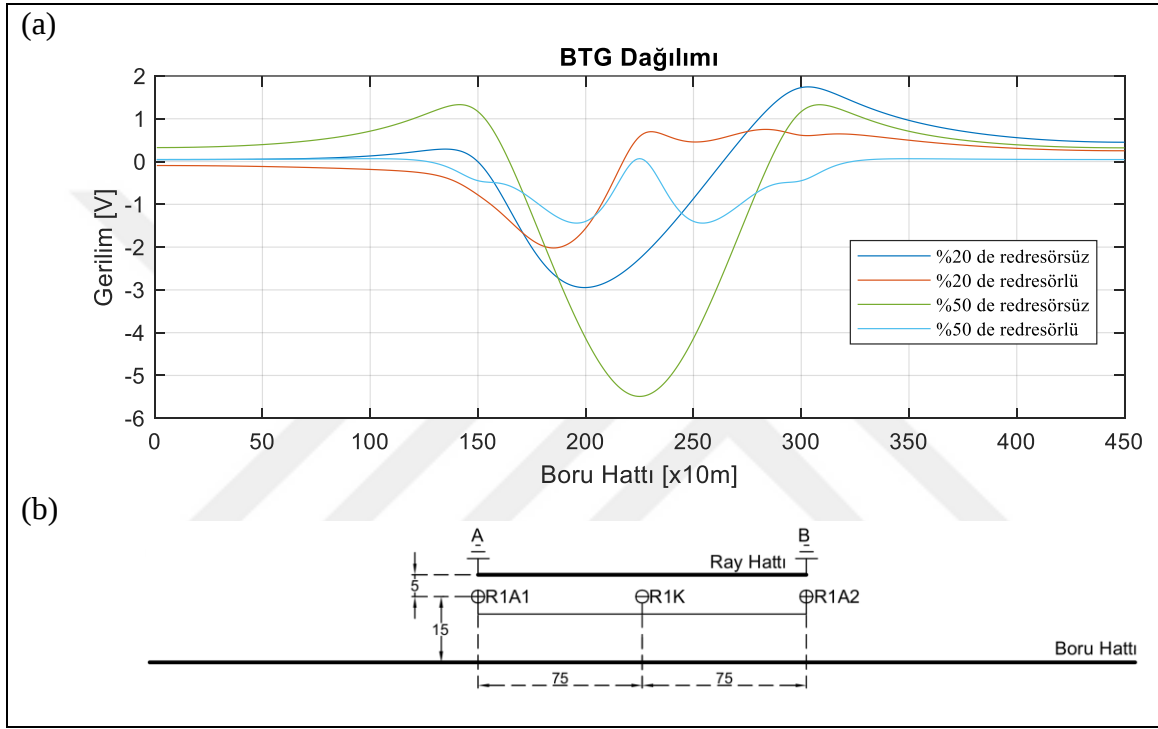
Boru hattı ile ray hattı arasına tek redresör yerleştirilmiş olup anot ikiye bölünmüştür. İlk anot ray hattının topraklandığı A noktasının, ikinci anot ise ray hattının topraklandığı B noktasının hizasına Şekil 3.10 (b)'deki gibi yerleştirilmiştir. Katot ise bu ikisinin tam ortasına yerleştirilmiştir ve BTG dağılımındaki maksimum ile minimum noktaların farkını en aza indirilecek şekilde akım uygulanmış, sonuçları Şekil 3.10 (a)'deki görselde verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %71,3 ve %38 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.10. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimleri

2.Yerleşim

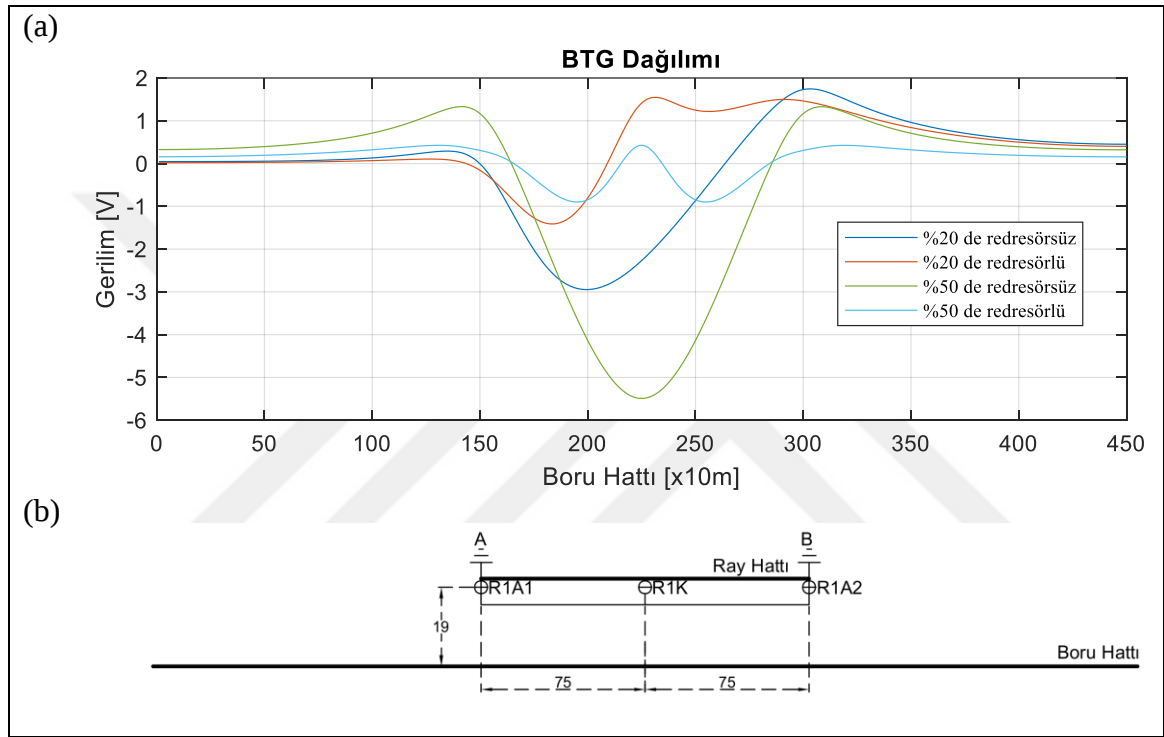
Birinci yerleşimden farklı olarak redresör problemleri ray hattına Şekil 3.11 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 50m yaklaştırılmıştır. Sonuçları Şekil 3.11 (a)'deki görselde verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %77,8 ve %39 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.11. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

3.Yerleşim

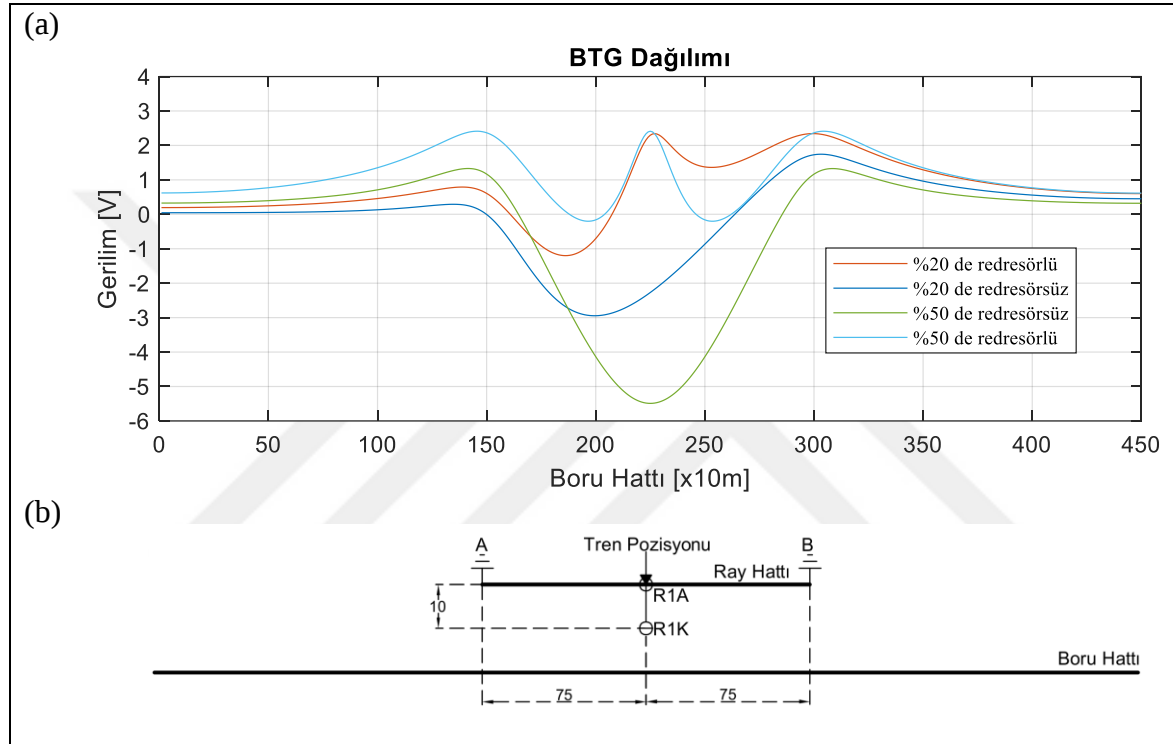
İkinci yerleşimden farklı olarak redresör problemleri ray hattına Şekil 3.12 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %79,6 ve %36,2 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.12. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

4.Yerleşim

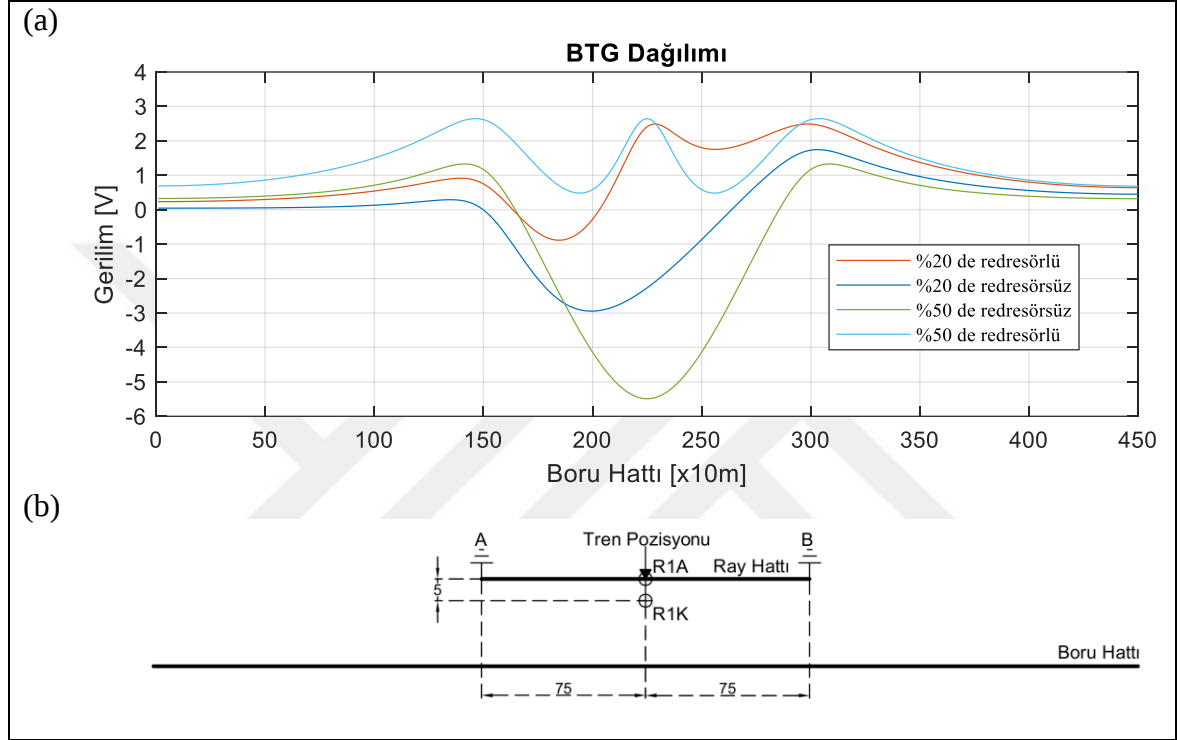
Bu yerleşimde anot olarak belirlenen prob ray hattına bağlanmış, katot olarak belirlenen prob ise Şekil 3.13 (b)'deki görselde görüldüğü üzere ray ve boru hattının tam ortasına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %61,5 ve %24,4 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.13. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

5.Yerleşim

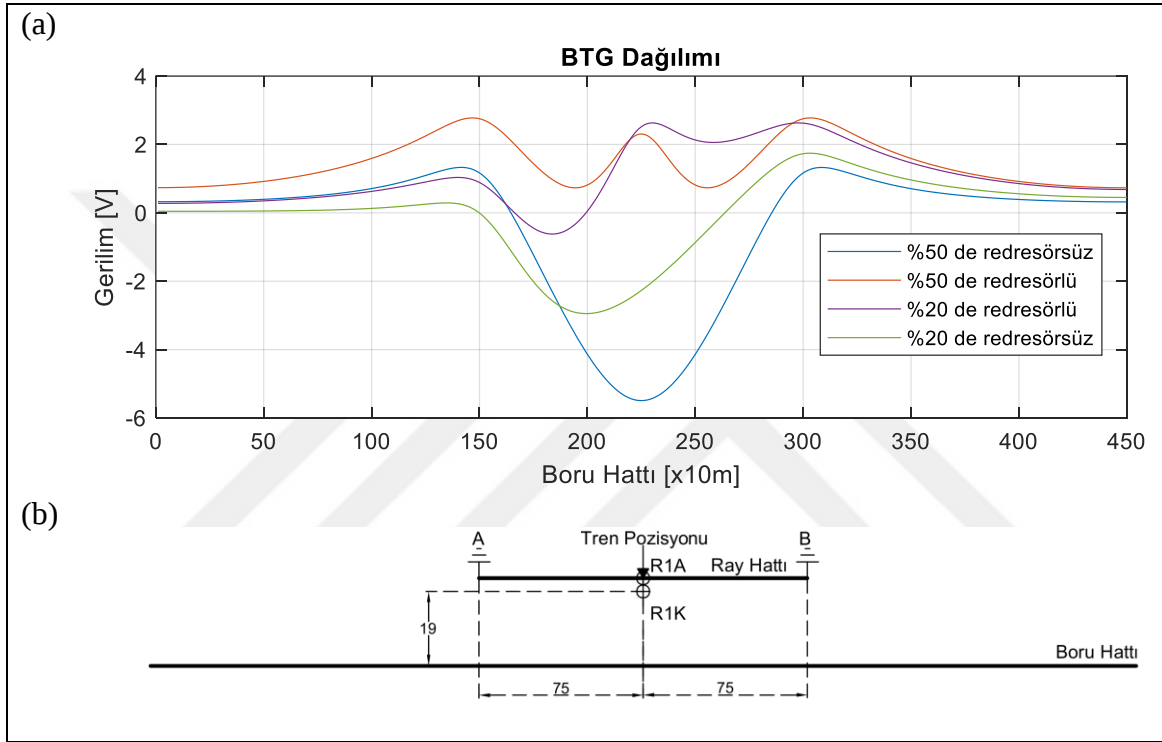
Dördüncü yerleşimden farklı olarak katot olarak belirlenen prob Şekil 3.14 (b)'deki görselde görüldüğü üzere raya 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %68,2 ve %28 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.14. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

6.Yerleşim

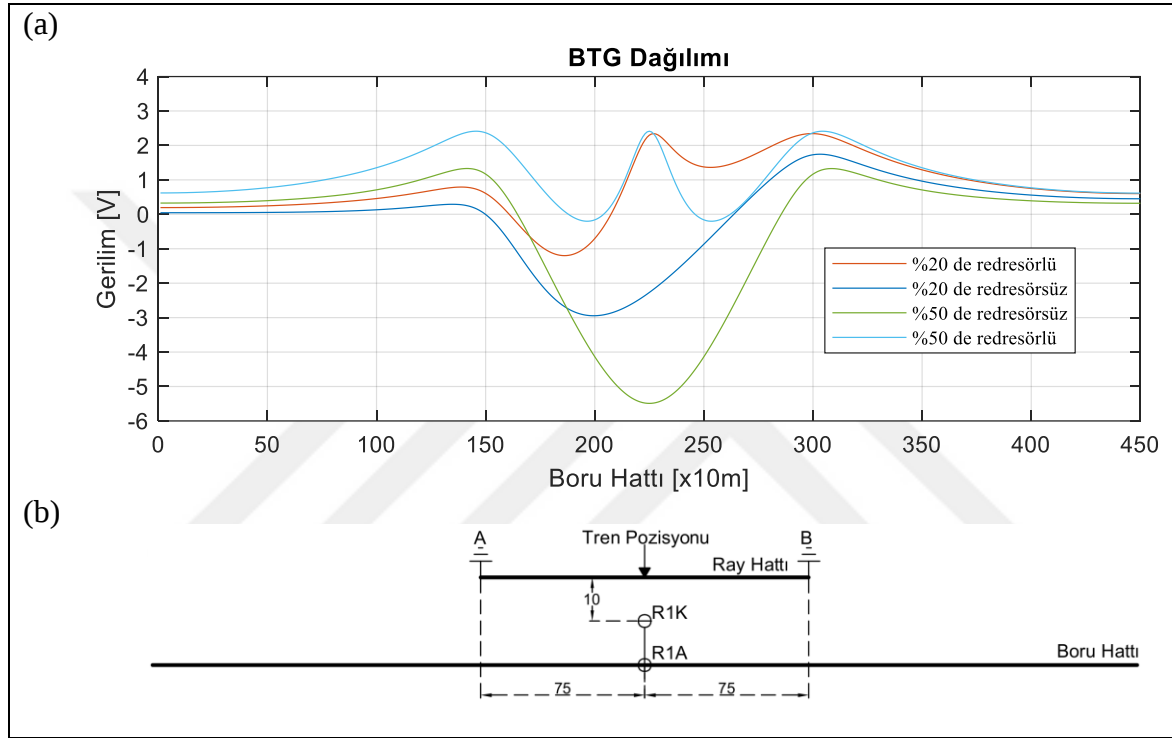
Beşinci yerleşimden farklı olarak katot olarak belirlenen prob Şekil 3.15 (b)'deki görselde görüldüğü üzere raya 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %69,9 ve %30,6 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.15. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

7.Yerleşim

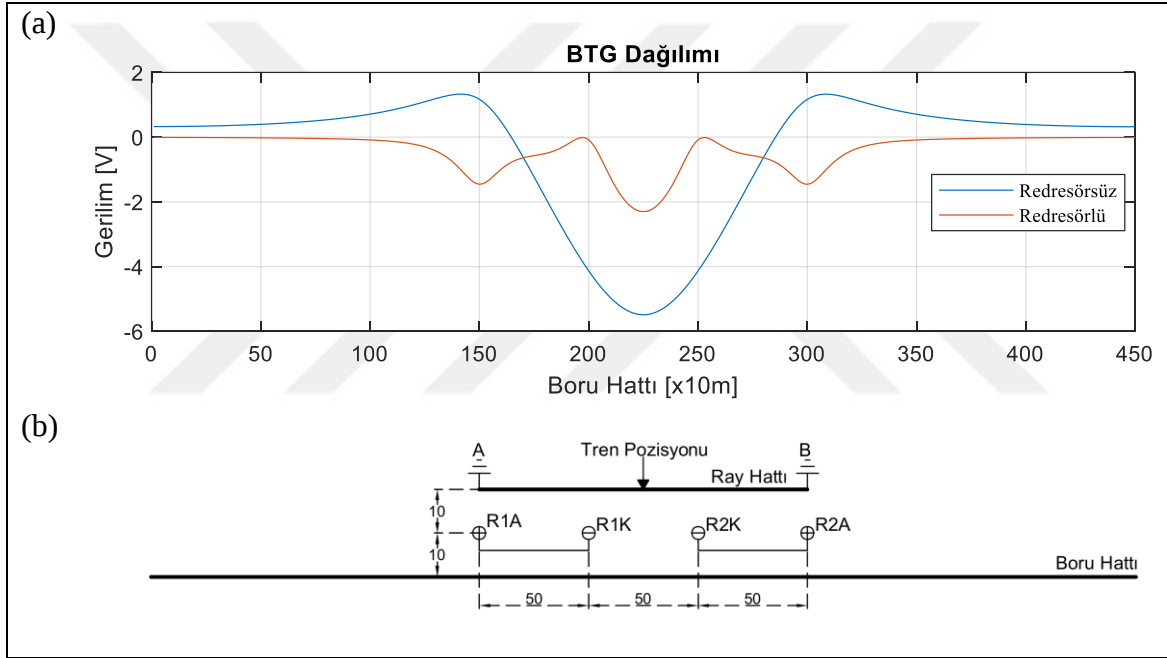
Bu yerleşimde katot olarak belirlenen prob boru hattına bağlanmış, anot olarak belirlenen prob ise Şekil 3.16 (b)'deki görselde görüldüğü üzere ray ve boru hattının tam ortasına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %61,5 ve %24,4 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.16. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

8.Yerleşim

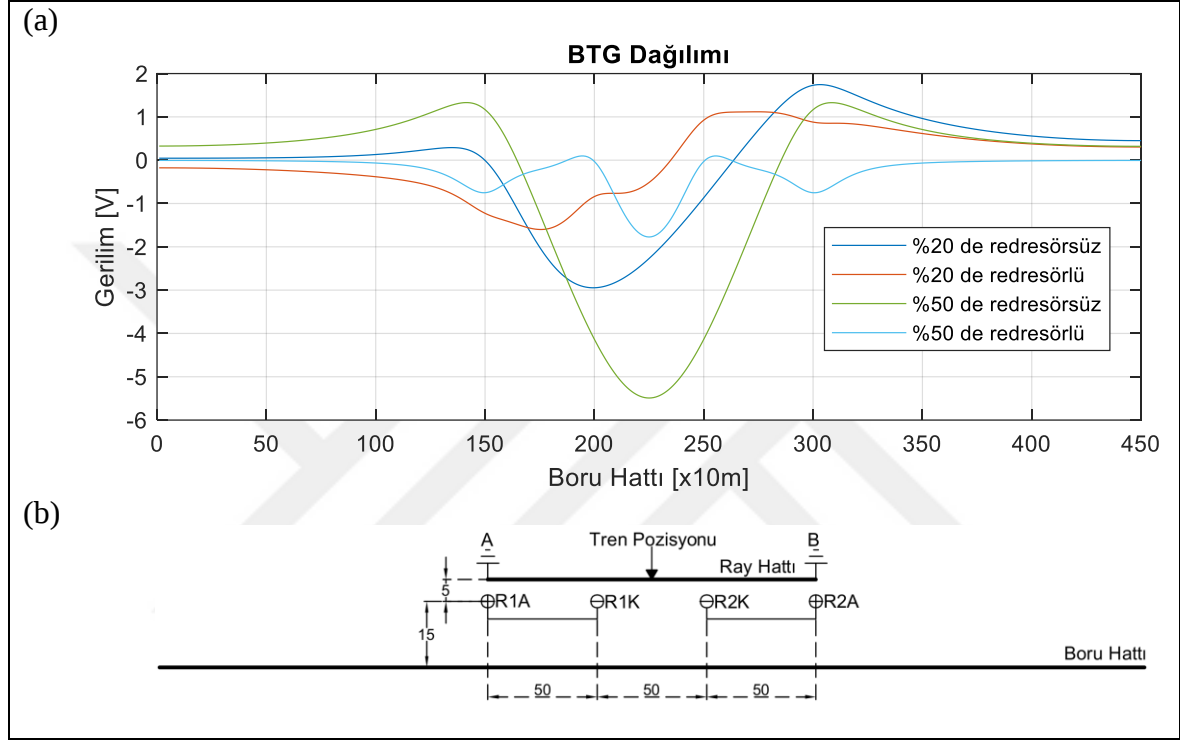
Trenin iki istasyonun tam ortasında olduğu yerleşim için iki farklı redresörün problemleri Şekil 3.22 (b)'de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Redresörlerin anot olarak belirlenen noktaları ray topraklama noktalarının hizasına yerleştirilmiş katot noktaları ise A ve B noktaları arasının üç eşit parçaya bölecek şekilde yerleştirilmiştir. Optimizasyon çıktısı Şekil 3.22 (a)'daki görselde verilmiştir. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %66,2 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.17. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

9.Yerleşim

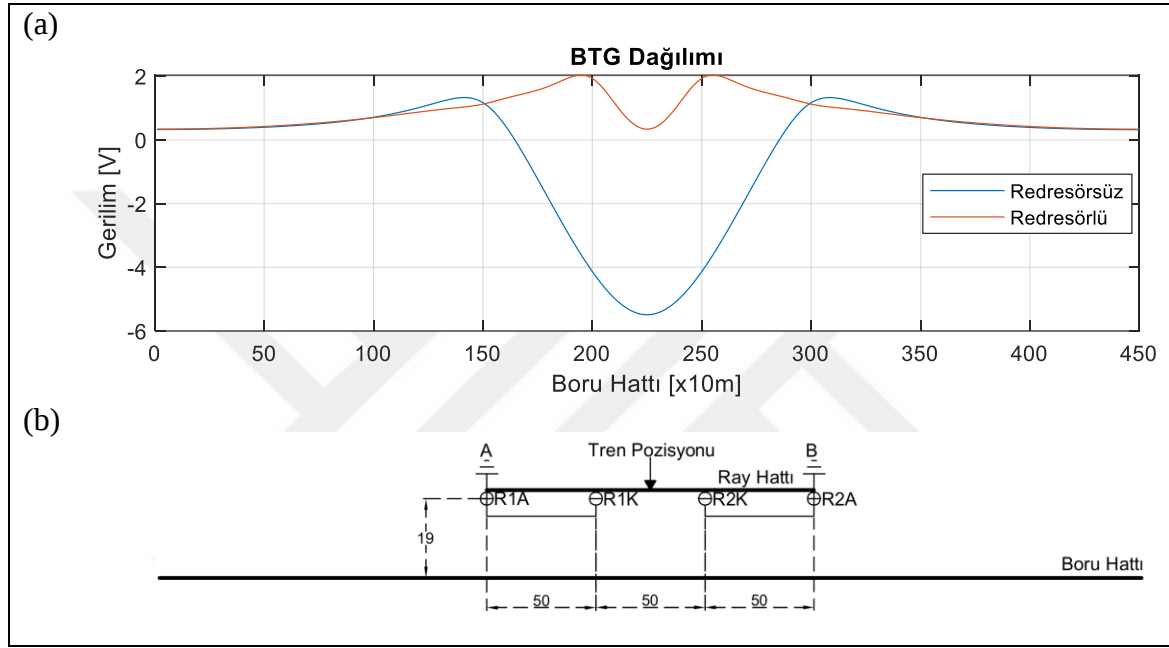
Sekizinci yerleşimden farklı olarak bu yerleşimde problemler ray hattına Şekil 3.19 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %72 ve %42 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.18. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

10.Yerleşim

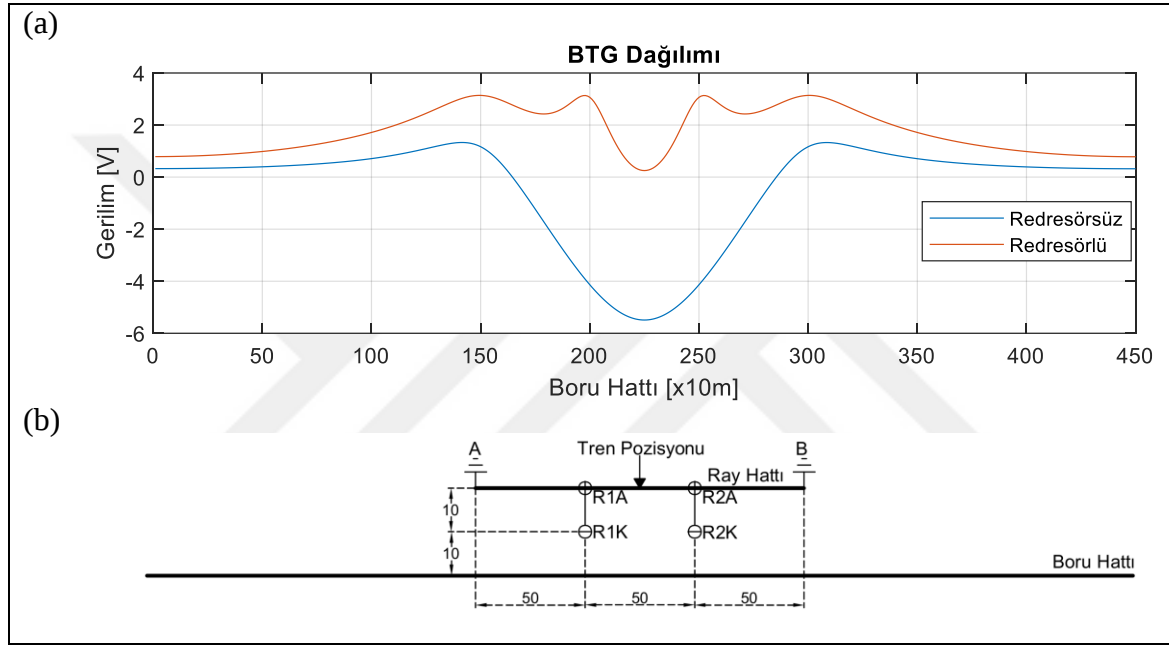
Dokuzuncu yerleşimden farklı olarak bu yerleşimde problemler ray hattına Şekil 3.20 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşimde için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %75 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.19. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

11.Yerleşim

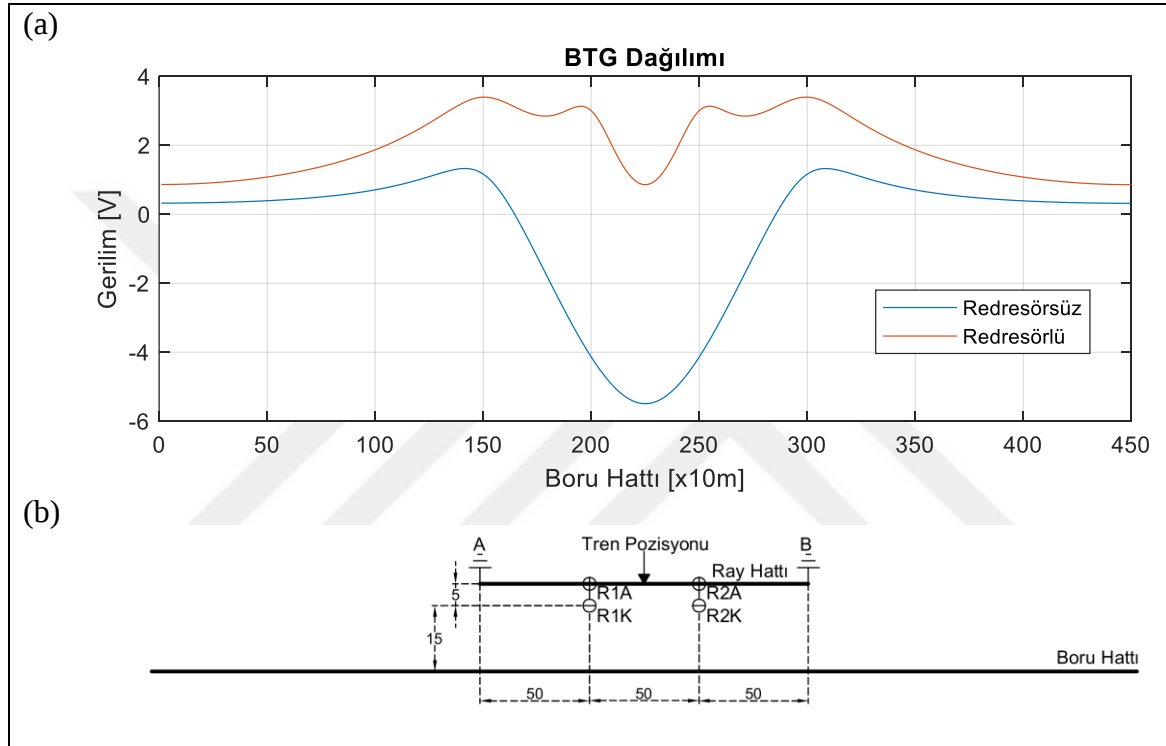
Bu yerleşimde Şekil 3.21 (b)'deki görselde verildiği üzere iki redresörün de anot olarak belirlenen uçları raya katot uçları ise ray ve boru hattının tam ortasına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %57 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.20. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

12.Yerleşim

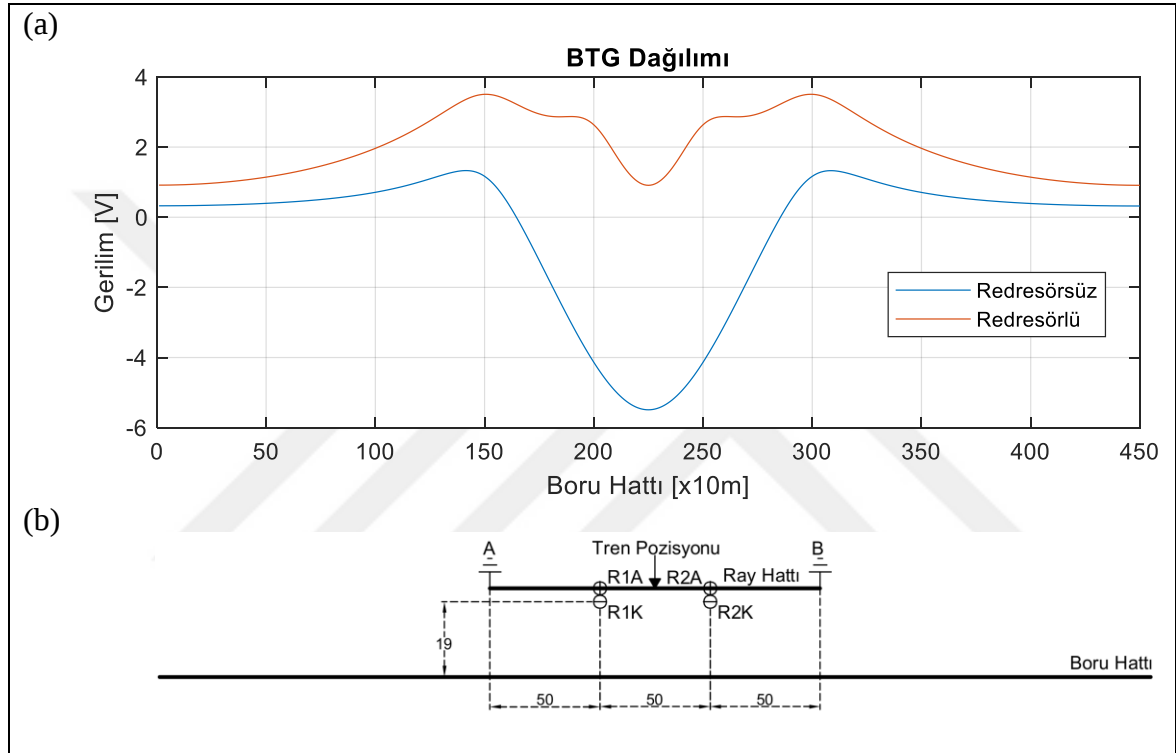
On birinci yerleşimden farklı olarak bu yerleşimde problar ray hattına Şekil 3.22 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %61,7 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.21. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

13.Yerleşim

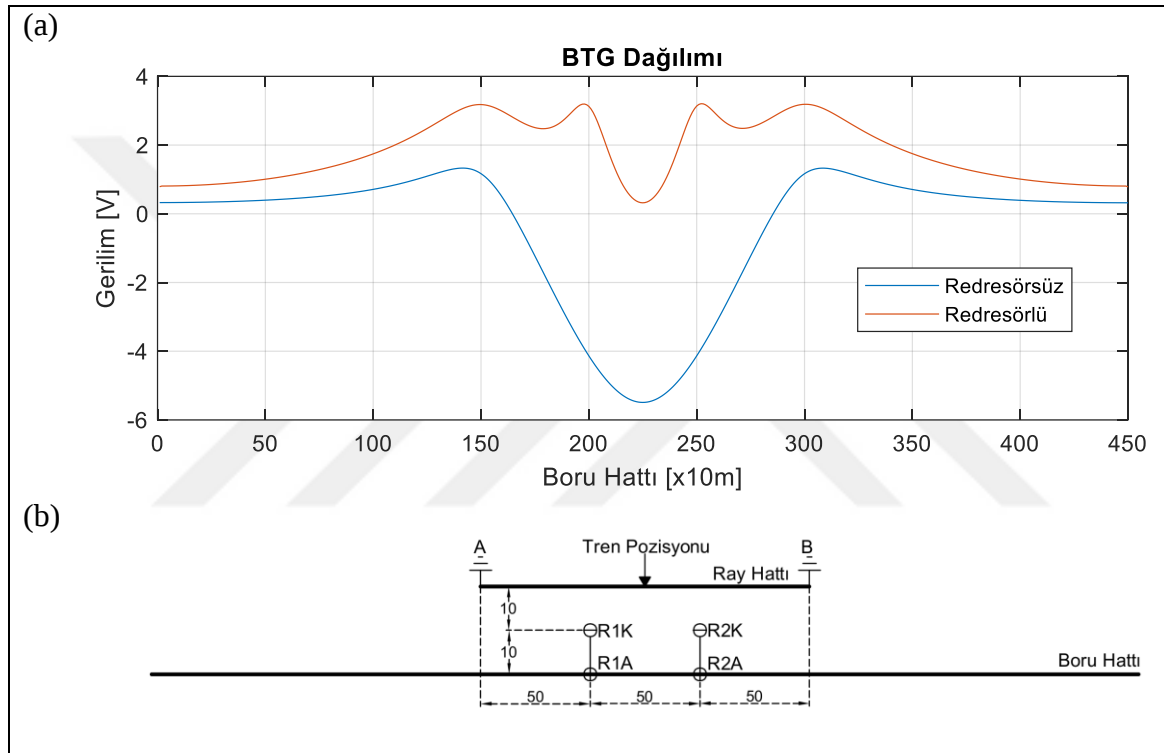
On ikinci yerleşimden farklı olarak bu yerleşimde problar ray hattına Şekil 3.22 (b)'deki görselde görüldüğü üzere 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %61,8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.22. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

14.Yerleşim

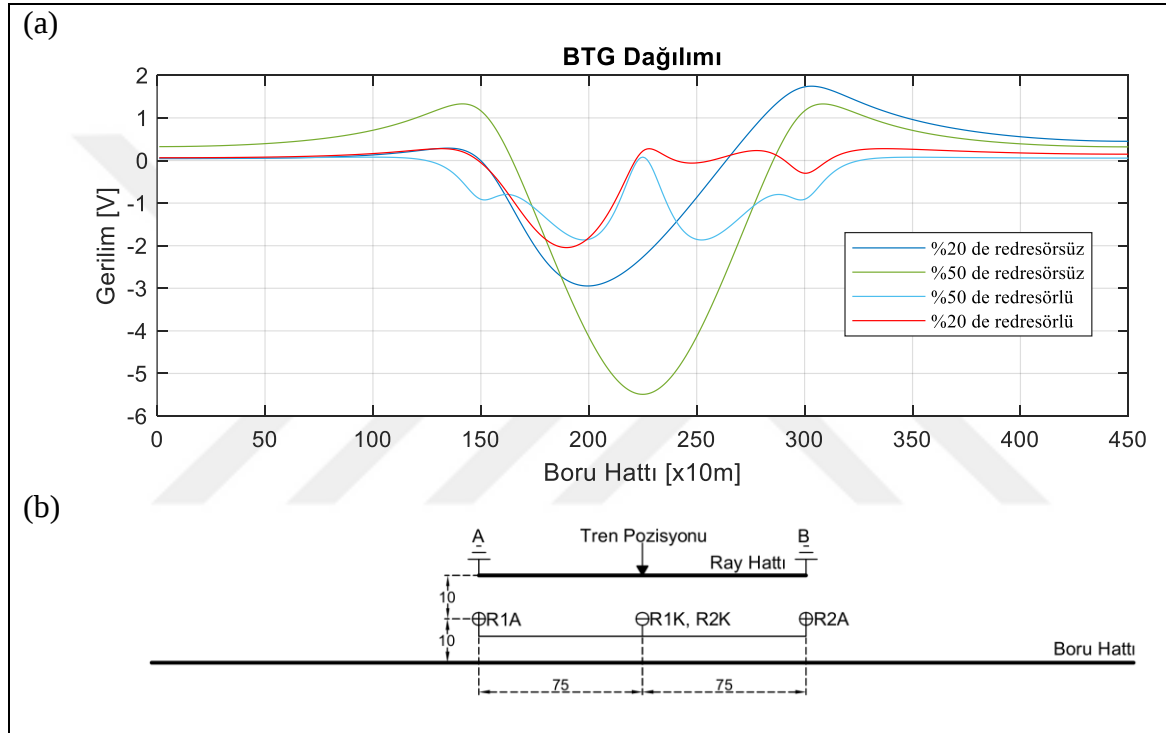
Bu yerleşimde Şekil 3.24 (b)'deki görselde verildiği üzere iki redresörün de anot olarak belirlenen uçları boruya katot uçları ise ray ve boru hattının tam ortasına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %57,5 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.23. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

15.Yerleşim

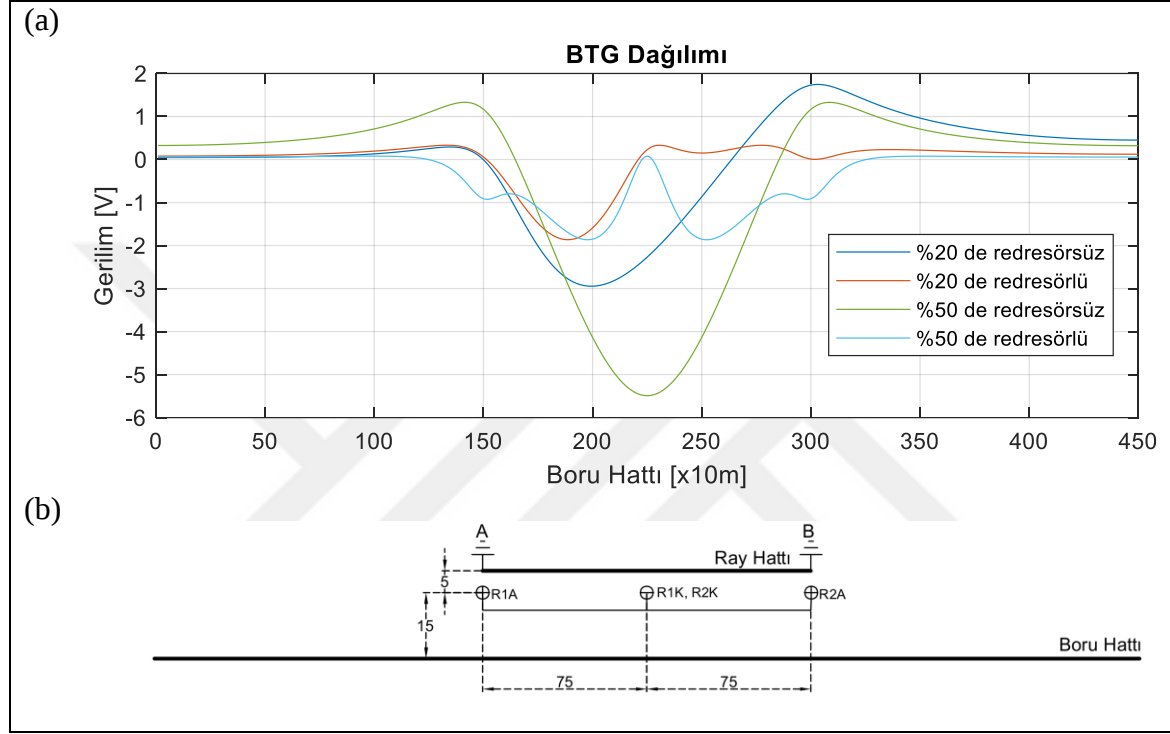
Bu yerleşimde iki farklı redresör kullanılmış ve anot olarak belirlenen problemler Şekil 3.25 (b)'deki görselde görüldüğü üzere topraklama noktalarının hizasına ve ray ile boru hattının tam ortasına yerleştirilmiştir. Katot problemleri ise anot problemlerinin tam ortasına ve aynı noktaya yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %71,3 ve %50 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.24. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

16.Yerleşim

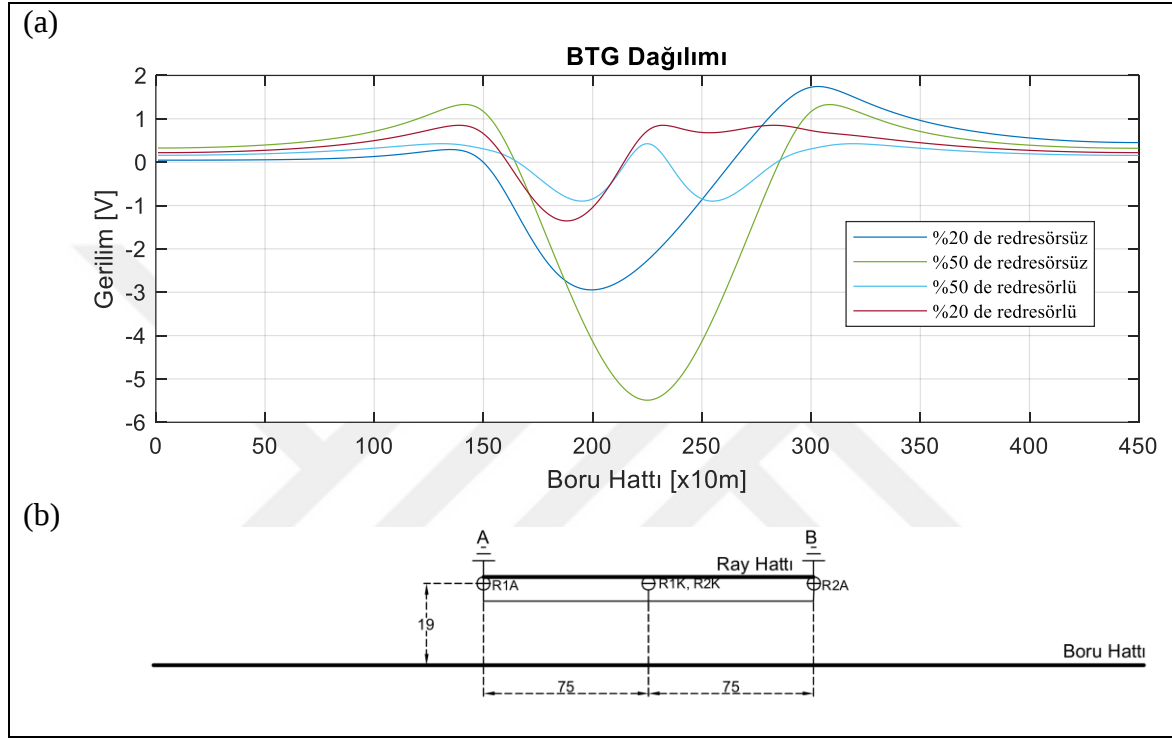
Yerleşim on beşten farklı olarak prob noktaları Şekil 3.26 (b)'deki görselde verildiği üzere raya 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %77,8 ve %53 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.25. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

17.Yerleşim

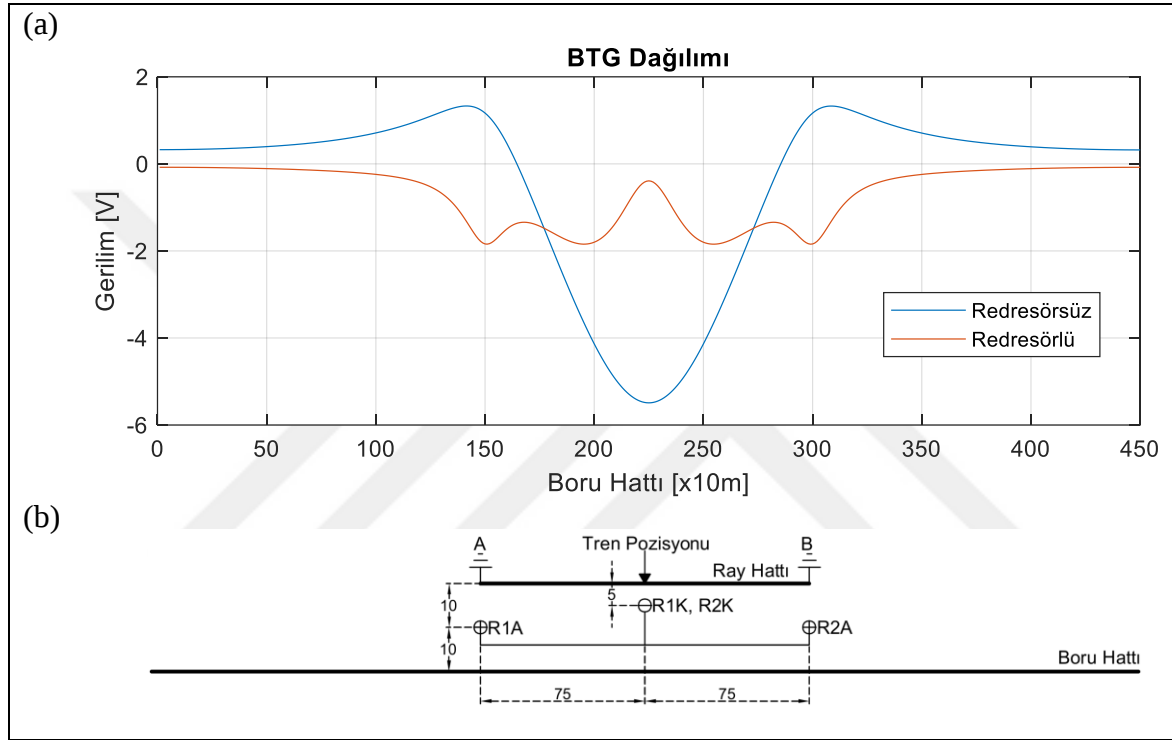
Yerleşim on altıdan farklı olarak prob noktaları Şekil 3.26 (b)'deki görselde verildiği üzere raya 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %79,6 ve %53 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.26. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

18.Yerleşim

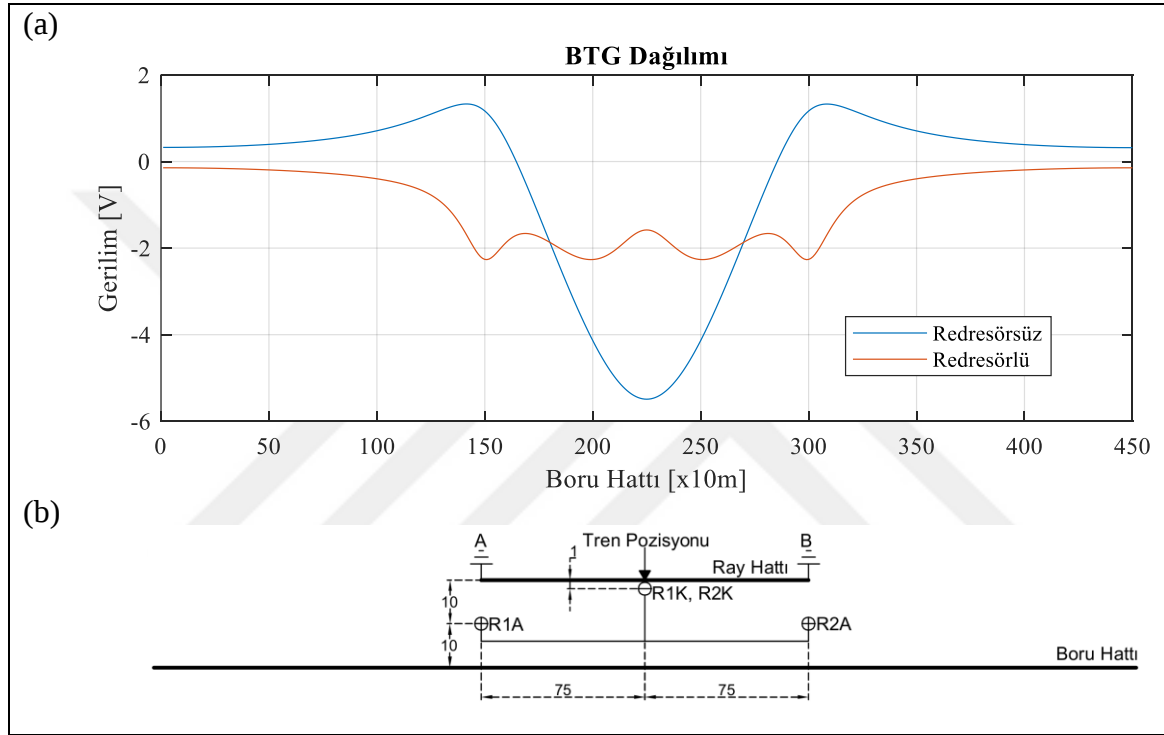
Yerleşim on beşten farklı olarak katot noktaları Şekil 3.26 (b)'deki görselde verildiği üzere raya 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %74 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.27. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

19.Yerleşim

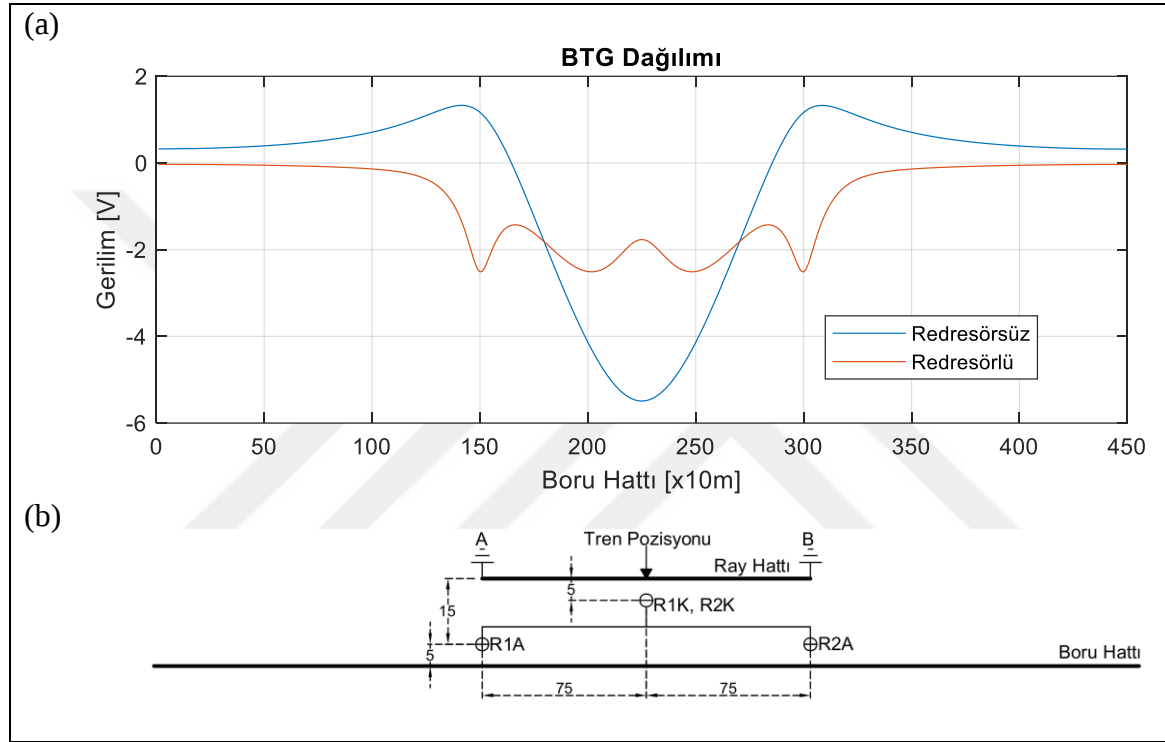
Yerleşim on altıdan farklı olarak katot noktaları Şekil 3.27 (b)'deki görselde verildiği üzere raya 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %68,8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.28. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

20.Yerleşim

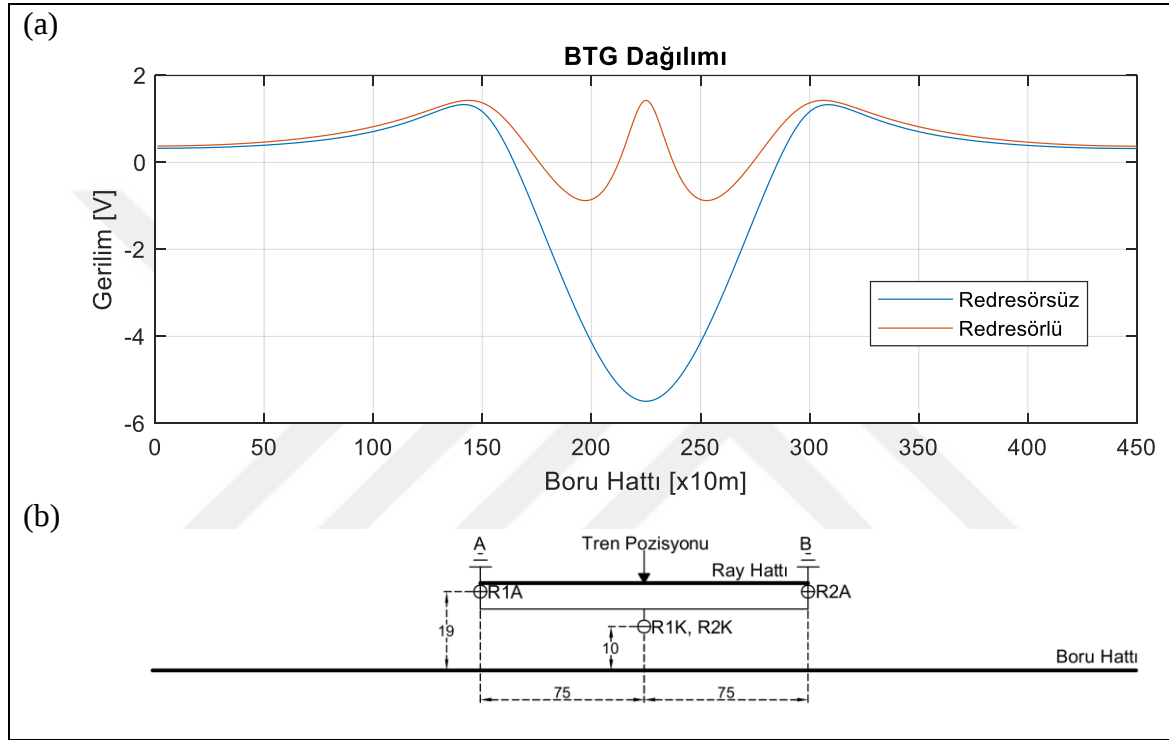
Yerleşim on beşten farklı olarak anot noktaları Şekil 3.28 (b)'deki görselde verildiği üzere boruya 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %63,4 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.29. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

21.Yerleşim

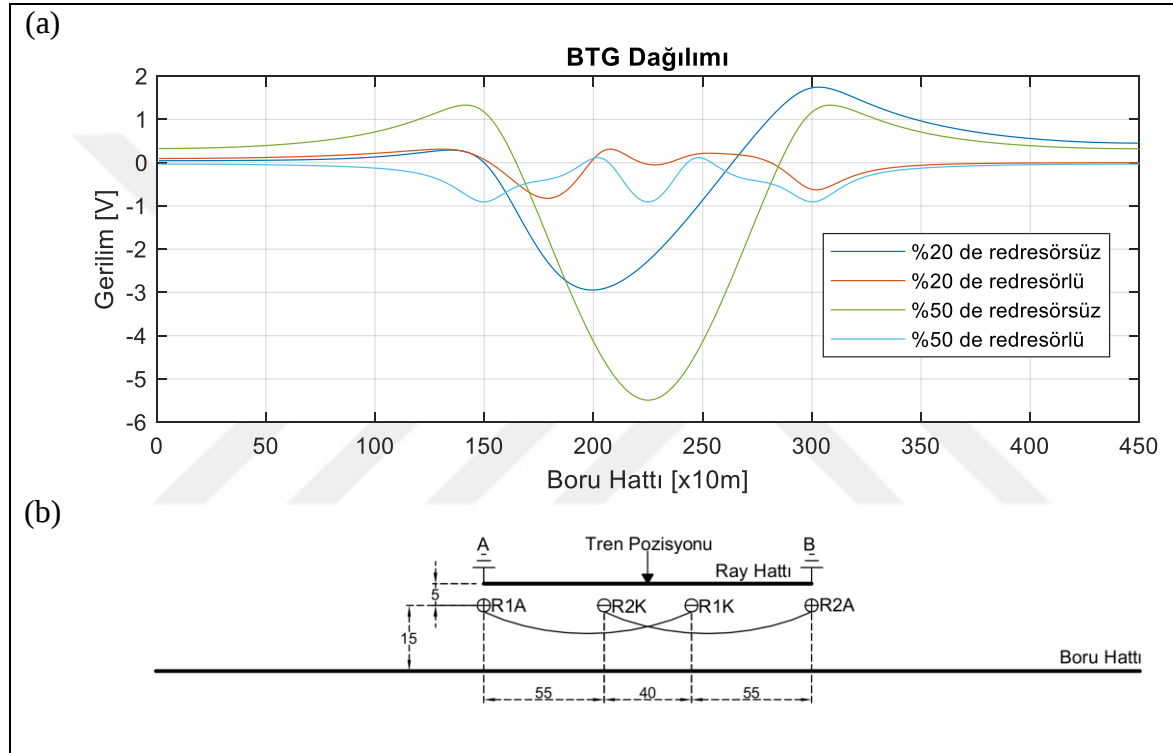
Yerleşim on beşten farklı olarak anot noktaları Şekil 3.29 (b)'deki görselde verildiği üzere raya 90m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim için tren pozisyonunun %20'de olduğu senaryo çalışılmamıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50'de olduğu durum için bastırma oranı %66 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.30. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

22.Yerleşim

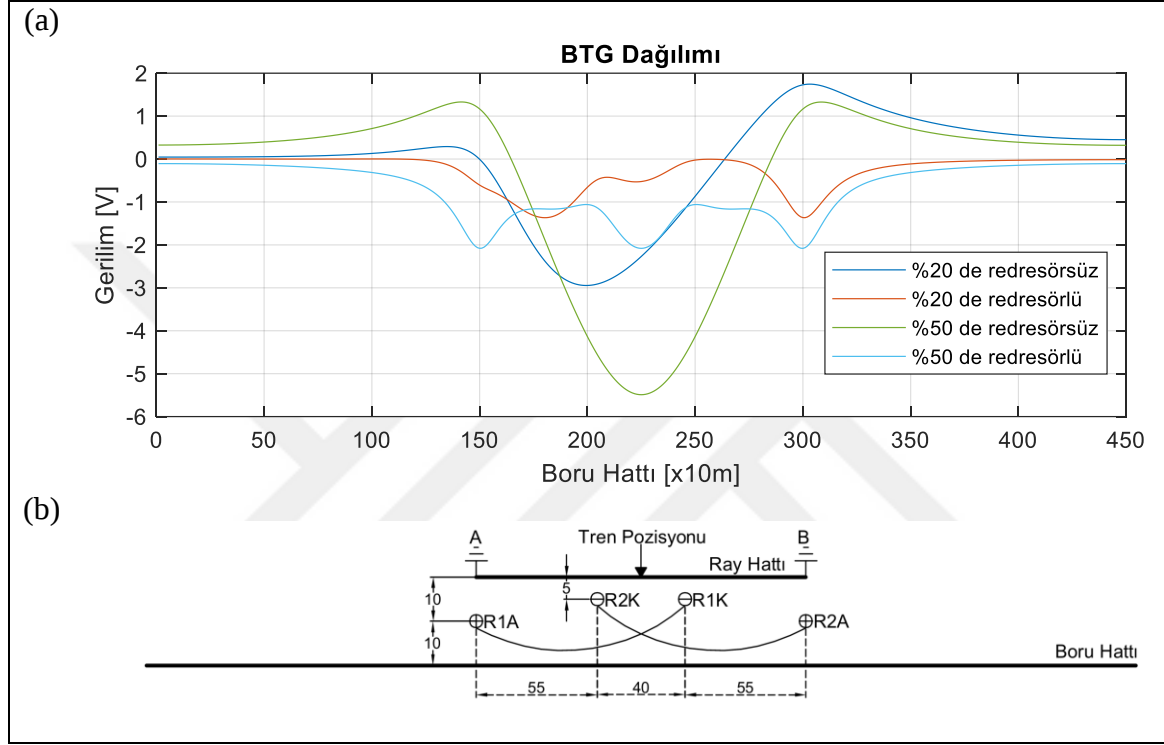
Bu yerleşimde Şekil 3.30 (b)'deki görselde verildiği üzere redresör problemleri raya 50m mesafede yerleştirilmiş olup anot olarak belirlenen problemler rayın topraklandığı noktanın hizasına yerleştirilmiş katot problemleri ise anot noktalarına 950m mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %85 ve %75,7 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.31. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

23.Yerleşim

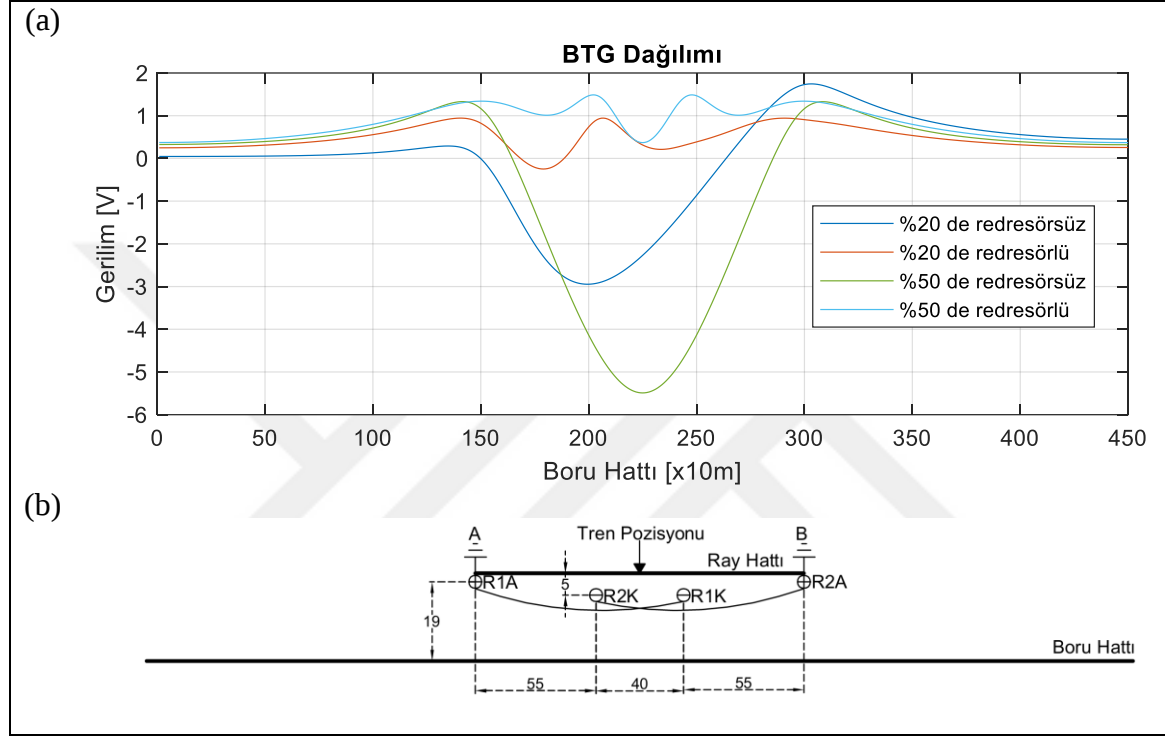
Bu yerleşimde yirminci yerleşimden farklı olarak anot olarak belirlenen prop noktaları boruya 50m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20’de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %70,9 ve %70,75 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.32. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

24.Yerleşim

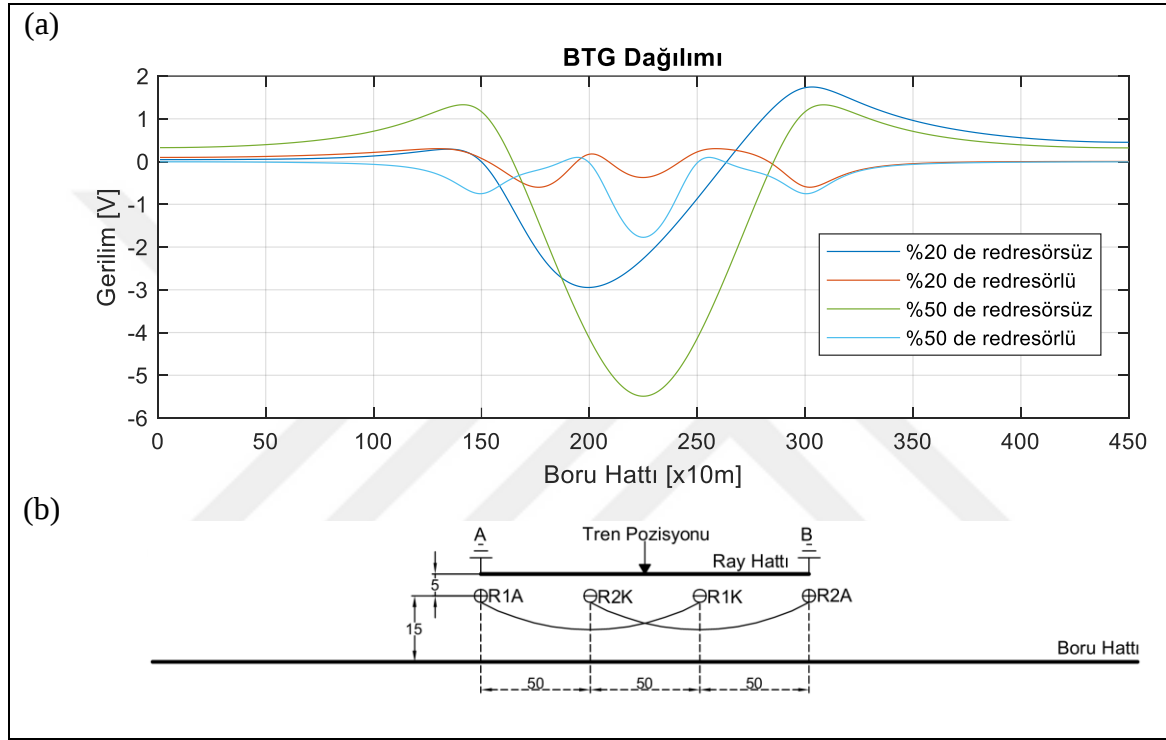
Bu yerleşimde yirminci yerleşimden farklı olarak anot olarak belirlenen prop noktaları raya 40m yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20’de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %83,5 ve %74,75 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.33. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

25.Yerleşim

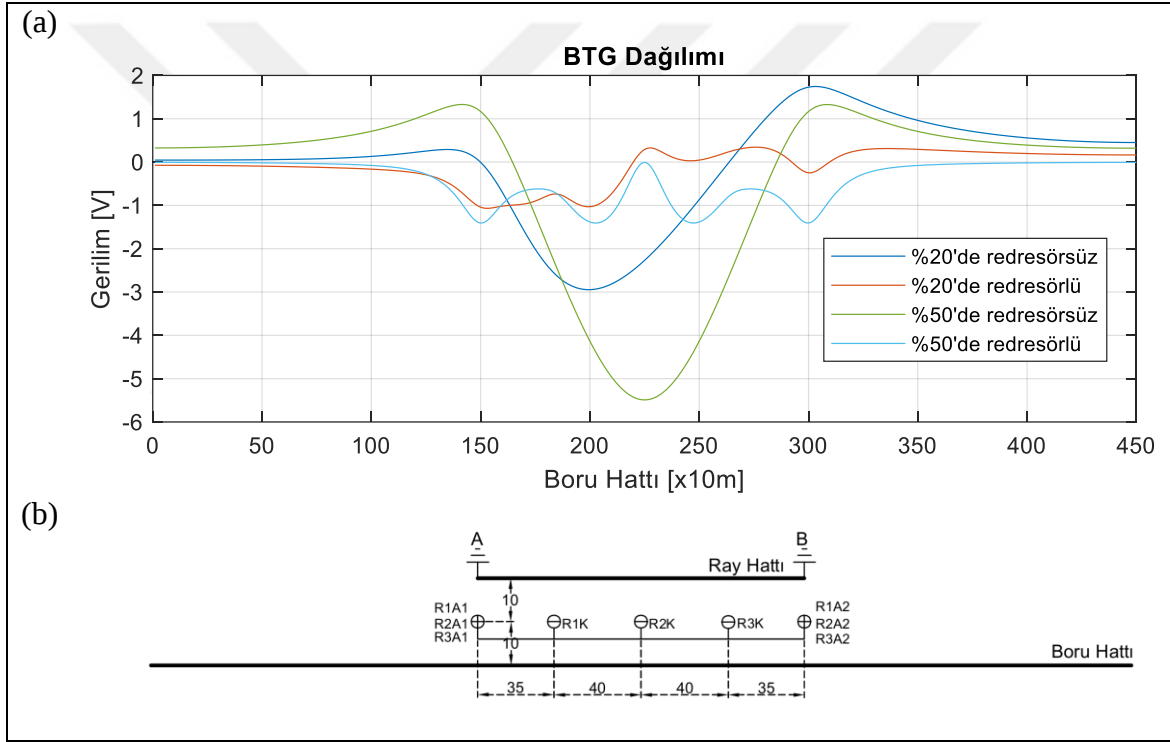
Bu yerleşimde yirminci yerleşimden farklı olarak katot olarak belirlenen prop noktalarının arasındaki açıklık Şekil 3.33 (b)'de görseli verildiği üzere 500m'ye çıkarılmıştır. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %72 ve %80,7 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.34. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

26.Yerleşim

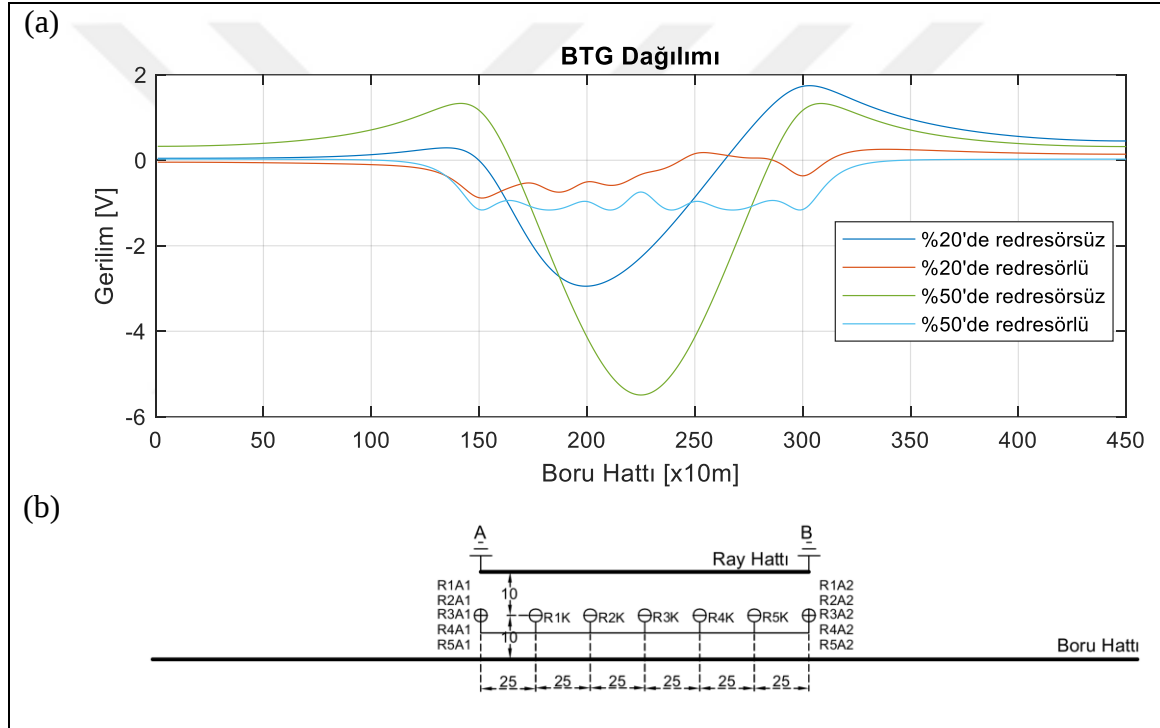
Bu yerleşimde tren ve ray hattı arasına 3 adet redresör yerleştirilmiştir. Redresörlerin anot olarak belirlenen probları ikiye ayrılmış ve rayın topraklandığı noktaların hizasına yerleştirilmiştir. Katot olarak belirlenen prob noktaları ise Şekil 3.35 (b)'deki görselde verildiği gibi yerleştirilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de ve %20'de olduğu yerleşimler için optimizasyon çıktıları 3.35 (a)'da verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %79 ve %67,2 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.35. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

27.Yerleşim

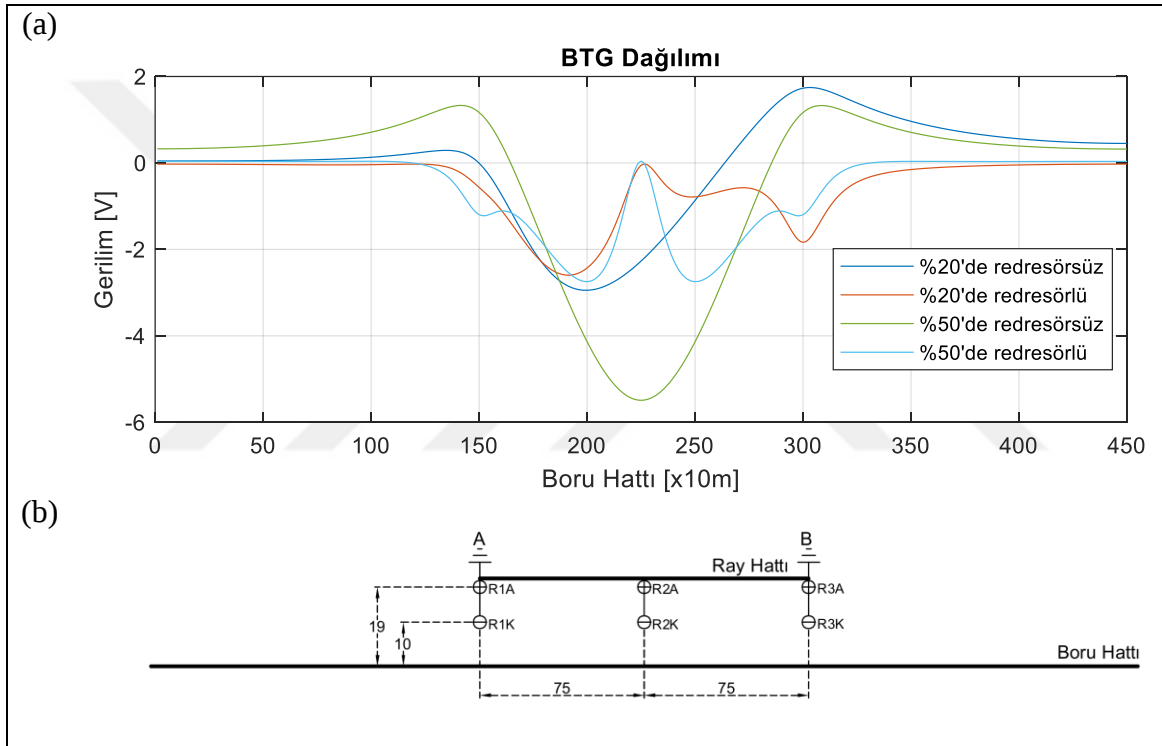
Bu yerleşimde tren ve ray hattı arasına 5 adet redresör yerleştirilmiştir. Redresörlerin anot olarak belirlenen probları ikiye ayrılmış ve rayın topraklandığı noktaların hizasına yerleştirilmiştir. Katot olarak belirlenen prob noktaları ise Şekil 3.36 (b)'deki görselde verildiği gibi yerleştirilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de ve %20'de olduğu yerleşimler için optimizasyon çıktıları 3.36 (a)'da verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %82 ve %72 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.36. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

28.Yerleşim

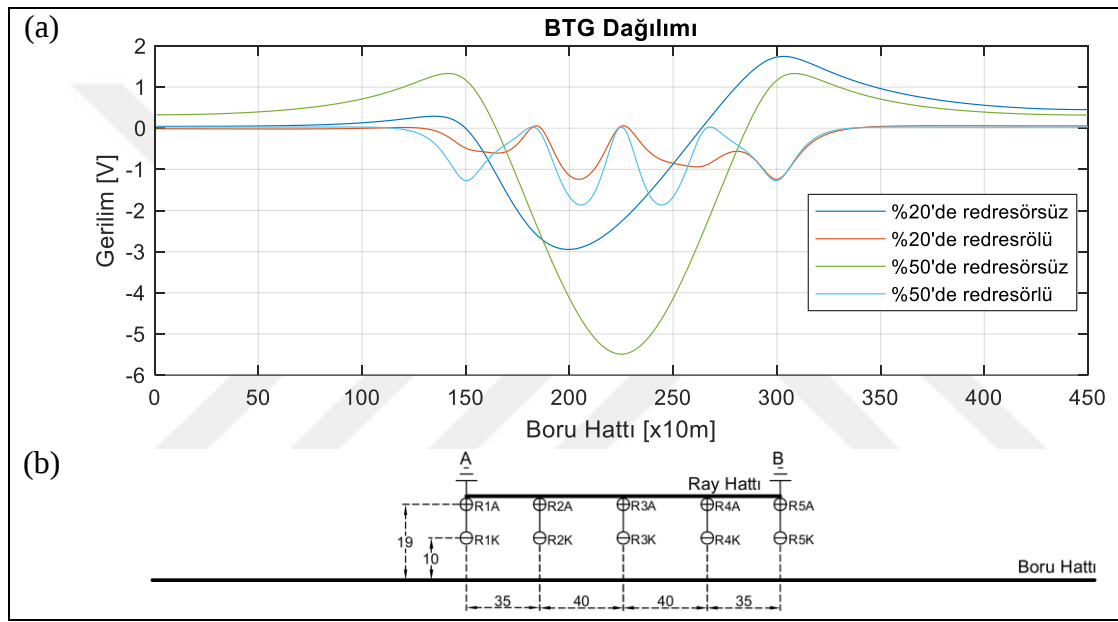
Bu yerleşimde tren ve ray hattı arasına 3 adet redresör yerleştirilmiştir. Redresörlerin anot ve katot olarak belirlenen noktaları ray ve boru hattı arasına Şekil 3.37 (b)'deki görselde verildiği gibi dik yerleştirilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de ve %20'de olduğu durumlar için optimizasyon çıktıları 3.37 (a)'da verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %59 ve %45 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.37. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

29.Yerleşim

Bu yerleşimde tren ve ray hattı arasına 5 adet redresör yerleştirilmiştir. Redresörlerin anot ve katot olarak belirlenen noktaları ray ve boru hattı arasına Şekil 3.38 (b)'deki görselde verildiği gibi dik yerleştirilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de ve %20'de olduğu durumlar için optimizasyon çıktıları 3.38 (a)'da verilmiştir. Bu yerleşim sayesinde tren konumunun %50 ve %20'de olduğu durum için bastırma oranları sırasıyla %72 ve %72 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.38. a) Prob yerleşimine göre redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımı, b) Redresör prob yerleşimi

Sonuçların değerlendirilmesi

Ray hattı ile boru hattı arasına 29 farklı senaryoda yerleştirilen redresör veya redresörlerin BTG dağılımına etkileri oluşturulan model ile gözlemlenmiştir. Redresör prob yerleşimlerinin BTG dağılımı üzerindeki performansını değerlendirmek adına redresörsüz durumdaki BTG dağılımının maksimum ve minimum noktası arasındaki fark ile redresörlü durumdaki optimum BTG dağılımının maksimum ve minimum noktaları arasındaki fark Eş. 3.3'de verilen denklem ile karşılaştırılmıştır.

$$BO = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Redresörlü } (BTG_{max} - BTG_{min})}{\text{Redresörsüz } (BTG_{max} - BTG_{min})} \right) \quad (3.3)$$

Tek redresör için 7 farklı prob yerleşimi denenmiş ve Bastırma Oranları (BO) Çizelge 3.3'te verilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de olduğu durum için denenilen tek redresörlü yerleşimlerden 3. yerleşim %79,6 ile en iyi sonucu verirken tren pozisyonunun %20'de olduğu durumda 2. yerleşim %39 ile en iyi sonucu vermiştir. Tek redresör yerleşimleri tren pozisyonunun %50'de olduğu durum için iyi sonuçlar vermiş olsa da tren pozisyonunun %20'de olduğu durumda nispeten kötü sonuçlar vermiştir. Bu sebeple redresör sayısı ikiye çıkarılmış ve 18 farklı prob yerleşimi denenmiştir. Denenen bu yerleşimlerin BO sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir. Tren pozisyonunun %50'de olduğu durum için denenilen iki redresörlü yerleşimlerden 22. yerleşim %85 ile en iyi sonucu verirken tren pozisyonunun %20'de olduğu durumda 25. yerleşim %80,7 ile en iyi sonucu vermiştir. Redresör sayısının ikiden fazla olduğu durumdaki prob yerleşimleri 4 farklı senaryo denenmiş ve sonuçları Çizelge 3.5'te verilmiştir. Bu yerleşim senaryolarından 27. yerleşim tren pozisyonunun %50 ve %20'de olduğu durumda sırasıyla %82 ve %72 BO sonucu elde edilmiştir. Redresör sayısı artmasına karşın 22. yerleşim ve 25. Yerleşim sonuçlarından daha düşük BO elde edilmiştir.

Çizelge 3.3. Tek redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları

Prob Yerleşimi	Redresör Sayısı	%50'de BO	%20'de BO
1. Yerleşim	1	%71,3	%38
2. Yerleşim	1	%77,8	%39
3. Yerleşim	1	%79,6	%36,2
4. Yerleşim	1	%61,5	%24,4
5. Yerleşim	1	%68,2	%28
6. Yerleşim	1	%69,9	%30,6
7. Yerleşim	1	%61,5	%24,4

Çizelge 3.4. İki redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları

Prob Yerleşimi	Redresör Sayısı	%50'de BO	%20'de BO
8. Yerleşim	2	%66,2	-
9. Yerleşim	2	%72	%42
10. Yerleşim	2	%75	-
11. Yerleşim	2	%57	-
12. Yerleşim	2	%61,7	-
13. Yerleşim	2	%61,8	-
14. Yerleşim	2	%57,5	-
15. Yerleşim	2	%71,3	%50

Çizelge 3.4. (devam) İki redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları

Prob Yerleşimi	Redresör Sayısı	%50'de BO	%20'de BO
16. Yerleşim	2	%77,8	%53
17. Yerleşim	2	%79,6	%53
18. Yerleşim	2	%74	-
19. Yerleşim	2	%68,8	-
20. Yerleşim	2	%63,4	-
21. Yerleşim	2	%66	-
22. Yerleşim	2	%85	%75,7
23. Yerleşim	2	%70,9	%70,75
24. Yerleşim	2	%83,5	%74,75
25. Yerleşim	2	%72	%80,7

Çizelge 3.5. Üç ve beş redresör yerleşim senaryoları için BO sonuçları

Prob Yerleşimi	Redresör Sayısı	%50'de BO	%20'de BO
26. Yerleşim	3	%79	%67,2
27. Yerleşim	5	%82	%72
28. Yerleşim	3	%59	%45
29. Yerleşim	5	%72	%72

Seçilen direnç değerleri için tren pozisyonu ve yerleşim senaryolarında redresör çıkış akım ve gerilimleri Çizelge 3.6'te verilmiştir.

Çizelge 3.6. Tren pozisyonu ve yerleşime göre redresör çıkış akım ve gerilimleri

Prob Yerleşimi	Tren %50'de İken		Tren %20'de İken	
	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi
1. Yerleşim	Ir= 4,43A	Vr= 17,69V	Ir=2,3A	Vr=9,66V
2. Yerleşim	Ir=6,2A	Vr=23,82V	Ir=3,3A	Vr=13,3V
3. Yerleşim	Ir=7,97A	Vr=27,22V	Ir=5,35A	Vr=17,6V
4. Yerleşim	Ir=5,55A	Vr=40,6V	Ir=3,3A	Vr=17,97V
5. Yerleşim	Ir=7,96A	Vr=48,3V	Ir=4,7A	Vr=22,76V
6. Yerleşim	Ir=10,17A	Vr=53,5V	Ir=6,4A	Vr=27,7V
7. Yerleşim	Ir=5,55A	Vr=17,2V	-	-
8. Yerleşim	Ir1=2,96A Ir2=2,96A	Vr1=16,53V Vr2=16,53V	-	-
9. Yerleşim	Ir1=4,05A Ir2=4,05A	Vr1=21,16V Vr2=21,16V	Ir1=2,3A Ir2=1,7A	Vr1=11,05V Vr2=8,69V
10. Yerleşim	Ir1=6,9A Ir2=6,9A	Vr1=28V Vr2=28V	-	-

Çizelge 3.6. (devam) Tren pozisyonu ve yerleşime göre redresör çıkış akım ve gerilimleri

	Tren %50'de İken		Tren %20'de İken	
Prob Yerleşimi	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi
11. Yerleşim	Ir1=4,07A Ir2=4,07A	Vr1=26,1V Vr2=26,1V	-	-
12. Yerleşim	Ir1=5,4A Ir2=5,4A	Vr1=30,29V Vr2=30,29V	-	-
13. Yerleşim	Ir1=6,6A Ir2=6,6A	Vr1=32,9V Vr2=32,9V	-	-
14. Yerleşim	Ir1=4,07A Ir2=4,07A	Vr1=13,98V Vr2=13,98V	-	-
15. Yerleşim	Ir1=2,21A Ir2=2,21A	Vr1=17,7V Vr2=17,7V	Ir1=0,3A Ir2=1,78A	Vr1=5,79V Vr2=10,42V
16. Yerleşim	Ir1=3,1A Ir2=3,1A	Vr1=23,82V Vr2=23,82V	Ir1=0,38A Ir2=2,51A	Vr1=7,73V Vr2=14,13V
17. Yerleşim	Ir1=3,98A Ir2=3,98A	Vr1=27,22V Vr2=27,22V	Ir1=-0,35A Ir2=4,69A	Vr1=7,71V Vr2=17,77V
18. Yerleşim	Ir1=2,98A Ir2=2,98A	Vr1=25V Vr2=25V	-	-
19. Yerleşim	Ir1=3,25A Ir2=3,25A	Vr1=25,5V Vr2=25,5V	-	-
20. Yerleşim	Ir1=2,23A Ir2=2,23A	Vr1=17,2V Vr2=17,2V	-	-
21. Yerleşim	Ir1=2,53A Ir2=2,53A	Vr1=12,63V Vr2=12,63V	-	-
22. Yerleşim	Ir1=4,2A Ir2=4,2A	Vr1=21,8V Vr2=21,8V	Ir1=0,89A Ir2=3,35A	Vr1=3,3V Vr2=18,2V
23. Yerleşim	Ir1=3,3A Ir2=3,3A	Vr1=17,9V Vr2=17,9V	Ir1=0,94A Ir2=2,66A	Vr1=5,13V Vr2=14,78V
24. Yerleşim	Ir1=4,7A Ir2=4,7A	Vr1=16,5V Vr2=16,5V	Ir1=0,43A Ir2=3,88A	Vr1=-2,8V Vr2=14,65V
25. Yerleşim	Ir1=4,1A Ir2=4,1A	Vr1=21,2V Vr2=21,2V	Ir1=1A Ir2=3,34A	Vr1=4,36V Vr2=17,86V
26. Yerleşim	Ir1=0,9A Ir2=3,98A Ir3=0,9A	Vr1=10,6V Vr2=18,7V Vr3=10,6V	Ir1=1,4A Ir2=1,8A Ir3=0,1A	Vr1=7,1V Vr2=9,66V Vr3=5,23V
27. Yerleşim	Ir1=-0,3A Ir2=1,43A Ir3=2,67A Ir4=1,43A Ir5=-0,3A	Vr1=5V Vr2=9,22V Vr3=12,37V Vr4=9,22V Vr5=5V	Ir1=1A Ir2=1,3A Ir3=0,7A Ir4=0,6A Ir5=-0,3A	Vr1=6,36V Vr2=7V Vr3=5,8V Vr4=6,4V Vr5=4,1V
28. Yerleşim	Ir1=-2,9A Ir2=9,4A Ir3=-2,9A	Vr1=-19,92V Vr2=57,84V Vr3=-19,92V	Ir1=-0,7A Ir2=4,2A Ir3=-3,74	Vr1=-7,17V Vr2=25,8V Vr3=-22,7V

Çizelge 3.6. (devam) Tren pozisyonu ve yerleşime göre redresör çıkış akım ve gerilimleri

	Tren %50'de İken		Tren %20'de İken	
Prob Yerleşimi	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi	Redresör Akımı	Redresör Gerilimi
29. Yerleşim	Ir1=-3,5A	Vr1=-22,95V	Ir1=-1,2A	Vr1=-9,67V
	Ir2=3,7A	Vr2=22,6V	Ir2=4,36A	Vr2=27,39V
	Ir3=8,2A	Vr3=51V	Ir3=3,73A	Vr3=22,86V
	Ir4=3,7A	Vr4=22,6V	Ir4=-0,9A	Vr4=-5,7V
	Ir5=-3,5A	Vr5=-22,95V	Ir5=-3,06A	Vr5=-19V

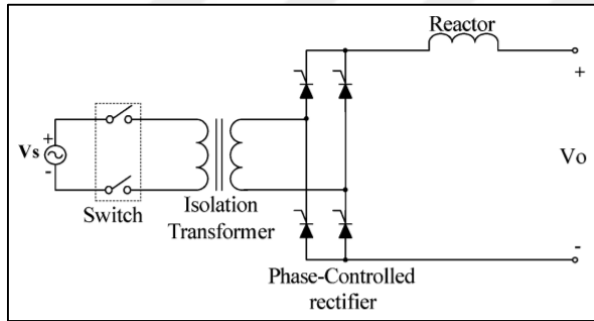
4. KATODİK KORUMA REDRESÖRÜ İÇİN GENİŞ YÜK ARALIĞINDA ÇALIŞABİLEN TAM KÖPRÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

4.1. Giriş

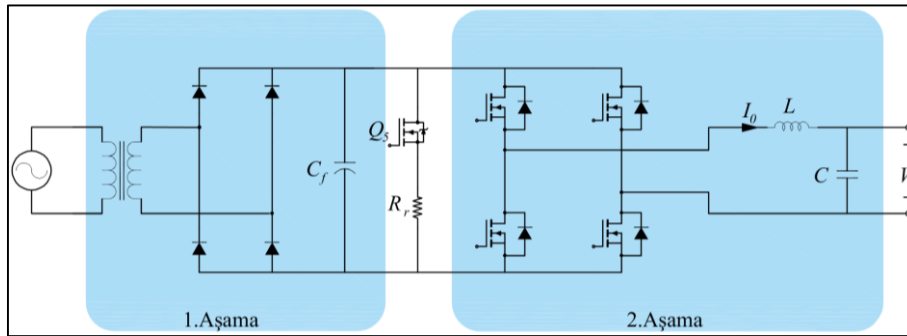
DAK yönteminde kaynak olarak kullanılan DA kaynağını elde etmek için çeşitli topolojiler kullanılmaktadır. Redresörler genelde şebekeden beslendiği için alternatif akımın (AA) doğru akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. Eski tip katodik koruma redresör devreleri servo doğrultucular içermektedir. Bu sistemlerde, şebeke gerilimi bir trafo ile düşürülmekte ve diyotlu köprü ile doğrultulmaktadır. Kontrol için ise bir servo motor kullanılmakta ve trafonun dönüştürme oranı ayarlanmaktadır. Bu yöntem hem pahalı hem de hantal olup, kontrolü çok yavaştır. Bir başka yöntem ise Şekil 4.1’de görseli verilen tristörlü doğrultucu kullanmaktır (Kim ve Nho, 2005). Tristörlü doğrultucular, gereksinime göre tetikleme açılarını değiştirerek çıkış gerilimini kontrol edebilmektedir. Fakat tristör çıkışındaki düşük frekanslı gerilim dalgalanmasını filtrelemek için büyük boyutlu filtre elemanları kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple gereksiz yere ağır olurlar ve tepki hızları da yavaştır. Ayrıca, şebekeyi de, oluşturdıkları harmonikler nedeniyle olumsuz etkilerler. Diğer bir yöntem ise Şekil 4.2’de görseli verilen iki aşamalı doğrultuculardır. Bu yöntemin ilk aşamasında giriş gerilimi köprü doğrultucu ile doğrultularak filtrelenir. İkinci aşamada ise DA/DA dönüştürücü kullanılarak istenilen gerilim düzeyi elde edilir. DA/DA dönüştürücünün anahtarlama frekansı tristörlü doğrultucuya göre oldukça yüksek olduğundan küçük boyutlu filtre elemanları kullanılır. Bu sebeple boyutları küçüktür ve tepkisi hızlıdır. Ayrıca bu yöntemde tam köprü doğrultucu çıkışı filtrelenmeden doğrultulmuş tam dalgayı kullanarak giriş güç katsayısı 1’e yakın doğrultma işlemi gerçekleştirilebilir. Böylece harmonikler düşürülerek şebekeye olan olumsuz etkiler ortadan kaldırılabilir.

Raylı sistemlerden sızan kaçak akımların boru hatları üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla 3. Bölümde önerilen yöntem için gerekli güç kaynağının tasarlanması gerekmektedir. Çizelge 3.6’da görüldüğü üzere prob yerleşimine ve tren konumuna bağlı olarak redresör çıkış geriliminin veya akımının polaritesi yön değiştirebilmektedir. Ayrıca trenin frenleme esnasında rejeneratif çalışması sonucu Şekil 3.9 (b)’deki görselde görüldüğü üzere BTG dağılımının polaritesinin değişmesi nedeniyle redresör çıkışının polaritesinin de

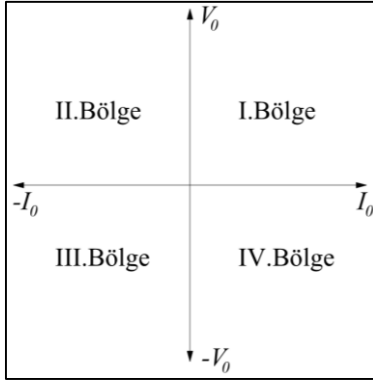
değişmesi gerekmektedir. KK'da kullanılan redresör topolojilerinin çıkış polaritesi tek yönlü olması sebebiyle farklı bir topolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Buna ek olarak Çizelge 3.6'da verilen 17. yerleşimde tren pozisyonun %20'de olduğu durum için prob gerilim ve akımlarının farklı polaritede olduğu görülmektedir. Benzer durum 24. ve 27. yerleşim için de geçerlidir. Bu durum redresör akımının redresörden toprağa doğru olabildiği gibi topraktan redresöre doğru da olabileceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple seçilecek topolojinin çift yönlü enerji akışına uygun bir topoloji olması gerekmektedir. Yukarıda verilen gereksinimler doğrultusunda Şekil 4.2'de verilen iki aşamalı doğrultucu topolojisinin kullanılması uygun görülmüştür. Bu topoloji hem iki polaritede de çıkış gerilimi sunabilmekte hem de ikinci aşamada enerji akışını çift yönlü gerçekleştirebilmektedir. İlk aşamada şebeke gerilimi bir trafo yardımıyla daha düşük gerilim seviyesine indirilir. Böylelikle galvanik izolasyon sağlanmış olur. Daha sonra köprü doğrultucu yardımıyla doğrultulup filtrelenir. İkinci aşamada ise tam köprü DA/DA dönüştürücü ile istenilen çıkış gerilimi elde edilir. Enerji akışının topraktan redresöre doğru olduğu durumda ise DA bara gerilimi belirli gerilim düzeyine ulaşınca Q5 anahtarı iletime geçirilerek bu enerji R_r direnci üzerinde harcanır.



Şekil 4.1. Tristörlü doğrultucu (Kim ve Nho, 2005)



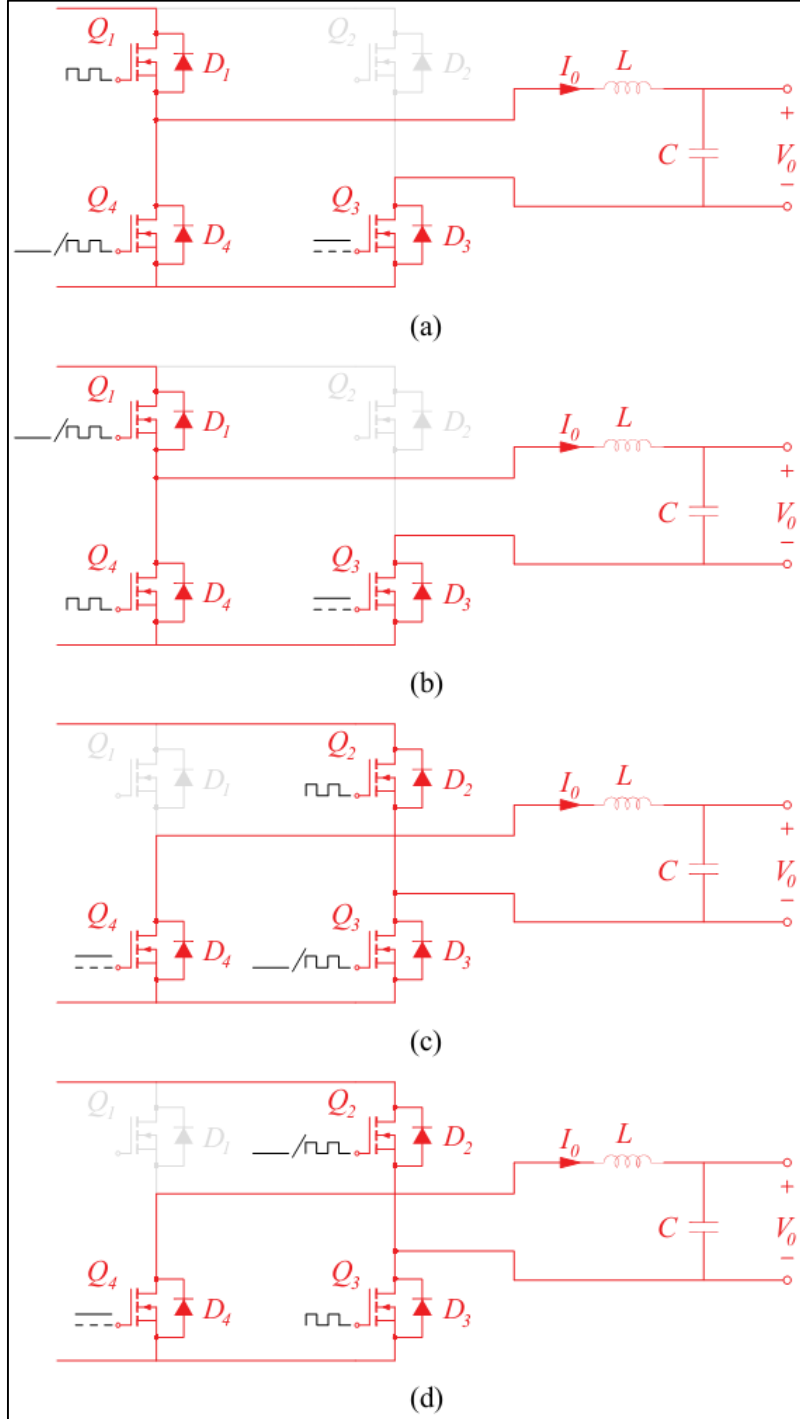
Şekil 4.2. Redresör için seçilen topoloji



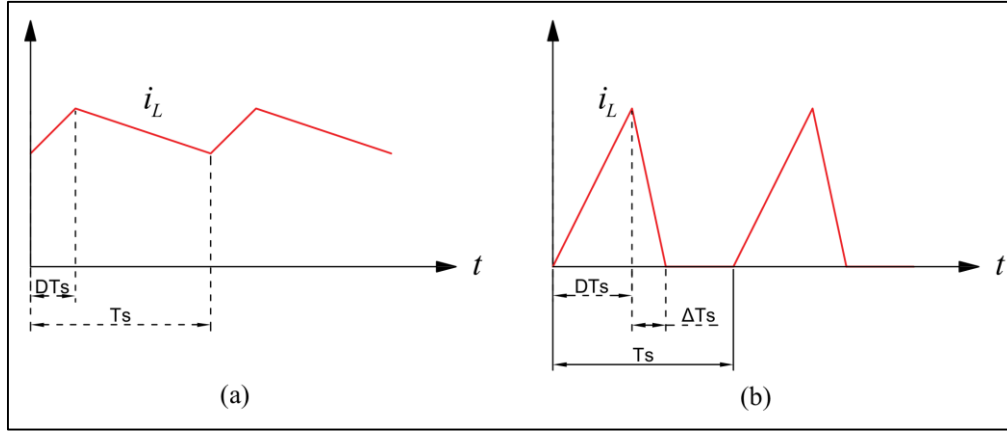
Şekil 4.3. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün çalışma bölgeleri

Tam köprü DA/DA dönüştürücünün çalışma bölgeleri Şekil 4.3'deki görselde sunulmuştur. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün I. Bölge'de çalışması için Q3 anahtarı sürekli sürekli iletimde tutulurken Q1 anahtarı anahtarlama frekansında açıp kapatılır. Q1 anahtarının tıkalı olduğu durumda indüktör akımı D4 diyotu üzerinden devresini tamamlar. Bu çalışma bölgesinin Şekil 4.4 (a)'daki görselde verildiği üzere Buck dönüştürücü ile aynı olduğu görülmektedir. Eğer Q1 anahtarının tıkalı olduğu durumda Q4 anahtarı iletime geçirilirse bu kez devre Senkron Buck dönüştürücü gibi çalışacaktır. Dönüştürücünün II. Bölge'de çalışması için Q3 anahtarı sürekli sürekli iletimde tutulurken Q4 anahtarı anahtarlama frekansında açıp kapatılır. Q4 anahtarının tıkalı olduğu durumda indüktör akımı D1 diyotu üzerinden devresini tamamlar. Bu çalışma bölgesinin çıkıştan girişe doğru bakıldığında Şekil 4.4 (b)'deki görselde verildiği üzere Boost dönüştürücü ile aynı olduğu görülmektedir. Eğer Q4 anahtarının tıkalı olduğu durumda Q1 anahtarı iletime geçirilirse bu kez devre Senkron Boost dönüştürücü gibi çalışacaktır. Dönüştürücünün III. Bölge'de çalışması için Q4 anahtarı sürekli sürekli iletimde tutulurken Q2 anahtarı anahtarlama frekansında açıp kapatılır. Q2 anahtarının tıkalı olduğu durumda indüktör akımı D3 diyotu üzerinden devresini tamamlar. Bu çalışma bölgesinin Şekil 4.4 (c)'deki görselde verildiği üzere yine Buck dönüştürücü ile aynı olduğu görülmektedir. Eğer Q2 anahtarının tıkalı olduğu durumda Q3 anahtarı iletime geçirilirse bu kez devre Senkron Buck dönüştürücü gibi çalışacaktır. Son olarak dönüştürücünün IV. Bölge'de çalışması için Q4 anahtarı sürekli sürekli iletimde tutulurken Q3 anahtarı anahtarlama frekansında açıp kapatılır. Q3 anahtarının tıkalı olduğu durumda indüktör akımı D2 diyotu üzerinden devresini tamamlar. Bu çalışma bölgesinin çıkıştan girişe doğru bakıldığında Şekil 4.4 (d)'deki görselde verildiği üzere yine Boost dönüştürücü ile aynı olduğu görülmektedir. Eğer Q3 anahtarının tıkalı olduğu durumda Q2 anahtarı iletime geçirilirse bu kez devre Senkron Boost dönüştürücü gibi çalışacaktır. Tam

köprü dönüştürücünün çalışma bölgeleri; I-III. Bölge’de Buck veya Senkron Buck, II-IV. Bölge’de Boost veya Senkron Boost olarak temel topolojilerle ifade edilebilir.



Şekil 4.4. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün a) I. Bölgede Buck veya Senkron Buck olarak çalışma b) II. Bölgede Boost veya Senkron Boost olarak çalışma c) III. Bölgede Buck veya Senkron Buck olarak çalışma d) IV. Bölgede Boost veya Senkron Boost olarak çalışma durumları

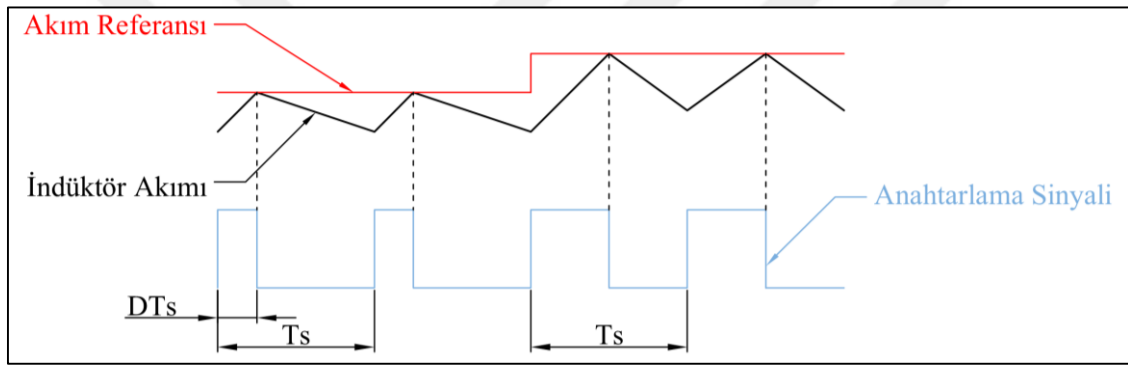


Şekil 4.5. İndüktör akımının a) sürekli olduğu ve b) kesikli olduğu iletim durumları

Boru hattının gömülü olduğu toprak direncindeki, tren pozisyonundaki ve çektiği akımdaki değişkenlik sebebiyle tren ve ray arasına yerleştirilen redresörün BTG dağılımını optimum seviyede tutmak için çıkış gerilim ve akımı Çizelge 3.6’te görüldüğü üzere geniş aralıkta değiştirmesi gerekmektedir. Bu sebeple tam köprü dönüştürücünün indüktör akımının hem Şekil 4.5 (a)’daki görselde verilen sürekli iletim modunda (SİM) hem de Şekil 4.5 (b)’deki görselde verilen kesikli iletim modunda (KİM) çalışması gerekmektedir. Ayrıca tren konumun çok hızlı değişmesi sebebiyle redresör çıkış gerilimini referans değere oturtacak kontrolcünün de yeterince hızlı olması gerekmektedir. Fakat bu iki moddaki sistem davranışları birbirinden oldukça farklı olduğundan her iki iletim modunda tek kontrolcü ile kontrolü oldukça zordur (Broeck ve diğerleri, 2015).

Buck dönüştürücü özelinde bu problemi aşmak için literatürde birçok kontrol yöntemi önerilmiş olsa da bu kontrol yöntemlerinin büyük bölümü SİM için önerilmiş olup her iki iletim modunda çalışabilen kontrol yöntemine nadir rastlanmaktadır. Kontrol yöntemleri genel olarak gerilim modlu kontrol (GMK) ve akım modlu kontrol (AMK) olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. GMK yönteminde genelde çıkış gerilimi ölçülerek geri besleme olarak kontrolcüye verilir. Smedley ve Cuk, farklı olarak yaptıkları GMK yönteminde diyot geriliminin ortalama değerinin çıkış gerilimine eşit olması prensibine dayanan bir kontrol yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntemde bir kapasitör yardımıyla diyot geriliminin bir periyod boyunca integrali alınmakta ve referans gerilimle karşılaştırarak anahtarlama sinyali oluşturulmaktadır (Smedley ve diğerleri, 1995). Böylece her iki iletim modunda da tek periyotta çıkış gerilimi istenilen referansa oturtulmaktadır. Smedley’in yaptığı çalışma her iki iletim modunda kontrol sağlıyor olsa da GMK yöntemlerinin en

büyük dezavantajı aşırı yüklenme veya kısa devre durumunda akımı limitleyecek bir mekanizmayı kontrol yönteminde bulundurmuyor olmalarıdır. Mammano'in yaptığı AMK yönteminde indüktör akımının da kullanıldığı tepe akım modu (TAM) kontrolcü yöntemi kullanılmıştır ve böylece akımın sınırlanması da mümkün hale gelmiştir. Bu yöntemde dış döngüde referans gerilimi ile çıkış geriliminden indüktör akımının olması gereken maksimum değerinin referansı elde edilmektedir. İç döngüde ise bu referans akımı indüktör akımının geri beslemesiyle karşılaştırılıp Şekil 4.6'teki görselde verildiği üzere anahtarlama sinyali üretilmektedir (Bindra, 2014). Bu yöntem her iki akım modunda da hızlı bir biçimde çıkış gerilimini referans değere ulaştırmaktadır ve hali hazırda birçok topolojide kontrol yöntemi olarak kullanılması sebebiyle gürbüz bir kontrol yöntemi olduğunu ispatlamıştır.



Şekil 4.6. TAM kontrolcü anahtarlama prensibi

Değişen ortam şartları nedeniyle BTG farkını KP'de tutabilmek için redresör çıkış gerilim referansının sürekli güncellenmesi gerekmektedir. Bu da ancak dijital bir kontrolcü ile mümkün olabilmektedir. Ayrıca dijitalleşme ile birlikte son yıllarda katodik koruma sistemlerinin verimini arttırmak için sistemlerin uzaktan ve toplu olarak kontrolü üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır (Abate ve diğerleri, 2020). Yukarıda sunulan kontrol yöntemleri analog olarak uygulandığından dijitalleşmesi gerekmektedir. Fakat bu kontrol yöntemlerini dijitalleştirmek bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Şekil 4.6'te de görüldüğü üzere anahtarlama karar verilen referans değer ile akım tepe değerinin kesiştiği nokta anlık olarak gerçekleşmektedir. Bu anı doğru ölçümlemek için analog dijital dönüştürücüler (ADD) ile akım veya gerilimi çok fazla sayıda örneklemek ve gürültülerini filtrelemek gerekmektedir. Bu da yüksek işlem hacmine sahip donanımların kullanılmasını gerektirmektedir (Chattopadhyay ve diğerleri, 2006). Saggini'nin yaptığı çalışmada akım referansı dijital olarak üretildikten sonra dijital-analog dönüştürücü (DAD) yardımıyla analog sinyale dönüştürüp karşılaştırma işlemi analog ortamda yapılmıştır (Saggini ve

diğerleri, 2004). Bu yöntemi uygulamak için ya harici bir DAD kullanmak ya da DAD fonksiyonu bulunduran bir işlemci tercih etmek gerekmektedir. İndüktör akımının tepe değerini matematiksel denklemlerle hesaplamak da kullanılan diğer yöntemlerden biridir (Cheng ve diğerleri, 2013). Fakat bu yöntemler indüktör değerinin sabit olduğunu varsayarak hesaplama yapmaktadırlar. Halbuki, indüktör nüvesi olarak kullanılan malzemenin B-H eğrisi doğrusal değildir. Özellikle geniş yük aralığında çalıştırılan dönüştürücülerde çalışma noktasına ve sıcaklığına bağlı olarak indüktör değeri değişmektedir.

AMK tabanlı kontrolcülerden bir diğeri ise ortalama akım modu (OAM) olarak karşımıza çıkmaktadır (Garcera ve diğerleri, 2001). TAM kontrolcünden farklı olarak bu kontrolcüde indüktör akımının ortalama değeri ile kontrol yapılır. İndüktör akımının ortalamasını almak işleri kolaylaştırır da bu yöntemde ortalama değer alınırken en az bir periyotluk bir gecikme söz konusu olmaktadır. Bu yüzden TAM kontrolcüye göre tepki hızı daha yavaş olmaktadır. Garcera'nın yaptığı çalışmadaki kontrol sinyalinden akımın ortalama değerine olan küçük işaret transfer fonksiyonuna (TF) bakıldığında ise bu TF'nin kazancının yük ile değiştiği görülmektedir (Garcera ve diğerleri, 2001). Bu TF'de, yükün kazanca bölüm olarak geldiği ve bu sebeple özellikle geniş yük aralığında çalıştırılan dönüştürücüler için TF'nin büyük ölçüde değişeceği anlamına gelmektedir. Özellikle düşük yüklerde içteki akım döngüsünün hızı düşerken dıştaki gerilim döngüsünün hızı sabit kalmaktadır. Gerilim döngüsünün hızının akım döngüsünden daha yavaş olması gerektiğinden iki döngü arasındaki hız marjını koruma adına gerilim döngüsünün hızının düşürülmesi gerekmektedir. Bu da kontrolcünün tepki süresini düşürmektedir.

Lim'in yaptığı çalışmada çıkış akımı ile indüktör akımının ortalama değerinin aynı olduğunu bu sebeple üzerinde dalgalanma bulunmayan çıkış akımının ölçülmesinin daha kolay olduğunu savunmuştur (Lim ve diğerleri, 2010). Fakat bu yöntemde de kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'de yüke bağımlılık söz konusudur. Çıkış akımından yola çıkılarak durum değişkenlerinin tahminlenmesi de kullanılan kontrol yöntemlerden birisidir. Broeck'un yaptığı çalışmada büyük işaret modeli kullanılmış ve durum değişkenleri (kapasitör gerilimi ve indüktör akımı) ayrık zaman uzayında tahminlenmiştir. Dönüştürücünün hangi iletim modunda çalıştığı çıkış gerilimi ve akımından yararlanarak matematiksel denklemlerle ifade edilmiştir. Tahminlenen durum değişkenleri ile iç akım döngüsünde KİM ve SİM için iki ayrı kontrolcü tasarlayıp dönüştürücü hangi iletim modundaydı o kontrolcüye geçiş yapılmıştır. Yapılan çalışmada LC filtrenin rezonans

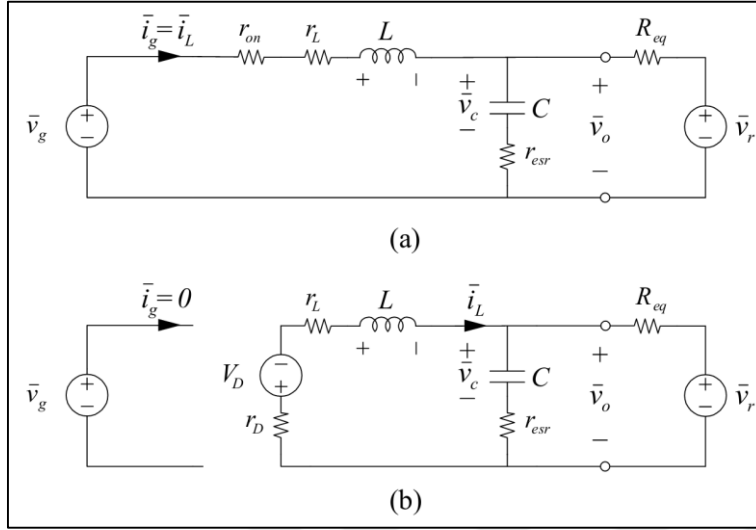
frekansı ile örnekleme periyodunun çarpımının 1'den çok küçük olması koşulu tasarım kriterlerinden birisi olarak sunulmuştur (Broeck ve diğerleri, 2015). Bu kriter önemli bir kısıtlama getirmese de özellikle küçük filtre elemanlarının kullanıldığı devrelerde problem teşkil edebilir. Ayrıca dönüştürücünün KİM ve SİM sınırında çalıştığı durumda iki kontrolcü arasında sürekli geçiş olması ve bunun sonucunda da çıkışta salınım görülmesi olasıdır. Candan ise yaptığı çalışmada Broeck'un yaptığı çalışmadaki modelleme yöntemini ve KİM ile SİM arasındaki geçiş denklemleri kullanmıştır. Farklı olarak durum değişkenlerini tahminlemek adına daha gelişmiş bir yöntem olan ilerletilmiş Kalman filtre gözetleyiciyi kullanmıştır (Candan ve diğerleri, 2020). Bu iki yöntemde de göze çarpan husus örnekleme frekansının anahtarlama frekansından çok küçük olmasıdır. Yüksek frekansta anahtarlama yapan dönüştürücülerde, anahtarlama frekansından daha düşük frekansta örnekleme yapılması işlem yükünü hafifletmek adına büyük önem teşkil etmektedir. Fakat düşük anahtarlama frekanslı dönüştürücülerde örnekleme frekansı anahtarlama frekansına eşit veya büyük seçildiğinde çıkıştan alınan akım ve gerilim değerleri bir sonraki periyod için durum değişkenlerinin tahminlenen değeri olarak kabul edilirse hata payı tahminleme yöntemlerine göre daha yüksek olmayacaktır.

Çalışmanın bu kısmında ilk olarak tam köprü dönüştürücünün bütün çalışma bölgelerindeki iletim modlarında dinamik denklemlerinden elde edilen küçük işaret devre modelleri verilmiştir. Sonrasında devre modellerinden TF'leri elde edilip dönüştürücünün tepkisini etkileyen faktörler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizlerden yararlanarak dönüştürücünün geniş yük aralığında kontrolünü sağlamak adına katsayıları yüke bağlı değişen ardışık PI kontrolcü yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem standart bir ardışık PI kontrolcü ile benzetim çalışması yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonrasında 100W'lık bir dönüştürücü prototipi yardımıyla deneysel sonuçları elde edilmiş ve benzetim çalışması sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.2. Dönüştürücünün Küçük İşaret Devre Modelleri

DA/DA dönüştürücüler küçük işaret ve büyük işaret modeli olmak üzere iki farklı şekilde modellenmektedir. Büyük işaret modelinde doğrusal olmayan durum değişkenleri üzerinden dönüştürücü modellenirken küçük işaret modelinde durum değişkenleri çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusal sistemlerde frekans uzayında kontrolcü tasarımı mümkün olduğundan bu çalışmada küçük işaret modeli yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu

yöntemde kararlı haldeki durum değişkelerine küçük bir bozucu etki eklenerek anahtarın iletimde ve tıkalı olduğu durumdaki denklemlerin Eş. 4.1’de verildiği üzere bir periyod boyunca ortalaması alınır (Vorperian, 1990).



Şekil 4.7. Buck dönüştürücünün a) anahtarının iletimde olduğu, b) anahtarının tıkalı olduğu durumdaki devre şeması

$$\dot{\bar{x}} = \mathbf{A}\bar{x} + \mathbf{B}\bar{u} \quad (4.1)$$

$$\bar{x} = \tilde{x} + X, \quad \bar{u} = \tilde{u} + U, \quad \bar{d} = \tilde{d} + D \quad (4.2)$$

$$\mathbf{A}_{av} = \bar{d}\mathbf{A}_{on} + (1 - \bar{d})\mathbf{A}_{off}, \quad \mathbf{B}_{av} = \bar{d}\mathbf{B}_{on} + (1 - \bar{d})\mathbf{B}_{off} \quad (4.3)$$

$$\dot{\bar{x}} = \mathbf{D}\mathbf{A} \text{ bileşen} + \mathbf{A}_{av}\tilde{x} + \mathbf{B}_{av}\tilde{u} + \mathbf{K}\tilde{d} + \text{yüksek dereceli terim} \quad (4.4)$$

Eş. 4.2 ve Eş. 4.3’deki değişkenler Eş. 4.1’de yerine yazılıp Eş. 4.1 tekrar düzenlendiğinde, Eş. 4.4 elde edilmektedir. Bu denklemde $\mathbf{A}_{av}$ ve $\mathbf{B}_{av}$ katsayıları düzenleme sonucu elde edilen yeni katsayılardır. Küçük bozucu etkilerin birbirleriyle çarpımları Eş. 4.4’te yüksek dereceli terim olarak verilmiştir. Yüksek dereceli terimlerin değerinin diğer değişkenlere göre çok çok küçük olduğu varsayılarak bu terim ihmal edilir. İndüktör geriliminin ve kapasitör akımının bir periyot boyunca ortalamasının sıfır olması nedeniyle bu durum denklemlerinin olduğu eşitliklerde DA bileşeni sıfır olmaktadır. Diğer durum değişkenlerinde ise DA bileşeni denklemin sol tarafındaki DA bileşenine eşit olmaktadır. İdeal olmayan Buck dönüştürücünün anahtarın iletimde olduğu durumdaki devresi Şekil 4.7 (a)’daki görselde verilmiştir. Şekil 4.7 (a) ve (b)’deki görselde literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak yük kısmı bir direnç yerine, bir gerilim kaynağı ve buna seri bağlı bir direnç olarak modellenmiştir. Bunun amacı RP’nin redresör problemleri arasında

oluşturduğu potansiyel farkı ve probalar arasındaki eşdeğer direnci modele eklemektir. Anahtarın iletimde olduğu andaki durum değişkenlerinden indüktör gerilimi, kapasitör akımı ve giriş akımının denklemleri sırasıyla Eş. 4.5, Eş. 4.6 ve Eş. 4.7’de verilmiştir.

$$L \frac{\partial \bar{i}_L}{\partial t} = \bar{v}_g - \bar{v}_o - \bar{i}_L(r_{on} + r_L) \quad (4.5)$$

$$C \frac{\partial \bar{v}_c}{\partial t} = \bar{i}_L - \frac{\bar{v}_o - \bar{v}_r}{R_{eq}} \quad (4.6)$$

$$\bar{i}_g = \bar{i}_L \quad (4.7)$$

Anahtarın tıkalı olduğu durum için Buck dönüştürücünün devresi Şekil 4.7 (b)’deki görselde verilmiştir. Bu devrenin analizlerinden elde edilen durum değişkenleri ise Eş. 4.8, Eş. 4.9 ve Eş. 4.10’da verilmiştir.

$$L \frac{\partial \bar{i}_L}{\partial t} = -V_D - \bar{v}_o - \bar{i}_L(r_D + r_L) \quad (4.8)$$

$$C \frac{\partial \bar{v}_c}{\partial t} = \bar{i}_L - \frac{\bar{v}_o - \bar{v}_r}{R_{eq}} \quad (4.9)$$

$$\bar{i}_g = 0 \quad (4.10)$$

Eş. 4.5 ile Eş. 4.10 arasındaki denklem takımları Eş. 4.2’deki formatta verildiği üzere yerine konup Eş. 4.3’te gösterildiği gibi bir periyottaki ortalaması alındığında Eş. 4.11, Eş. 4.12 ve Eş. 4.13 elde edilmektedir.

$$L \frac{\partial (\bar{i}_L + I_L)}{\partial t} = (\tilde{d} + D)[\tilde{v}_g + V_g - \tilde{v}_o - V_o - (\bar{i}_L + I_L)(r_{on} + r_L)] + (-\tilde{d} + 1 - D)[-V_D - \tilde{v}_o - V_o - (\bar{i}_L + I_L)(r_D + r_L)] \quad (4.11)$$

$$C \frac{\partial (\bar{v}_c + V_c)}{\partial t} = (\tilde{d} + D) \left[\bar{i}_L + I_L - \frac{(\tilde{v}_o + V_o) - (\tilde{v}_r + V_r)}{R_{eq}} \right] + (-\tilde{d} + 1 - D) \left[\bar{i}_L + I_L - \frac{(\tilde{v}_o + V_o) - (\tilde{v}_r + V_r)}{R_{eq}} \right] \quad (4.12)$$

$$\bar{i}_g + I_g = (\tilde{d} + D)(\bar{i}_g + I_g) \quad (4.13)$$

Eş. 4.11, Eş. 4.12 ve Eş. 4.13’teki denklemler DA bileşenlerinden ve 2. dereceden doğrusal olmayan terimlerden arındırıldığında Eş. 4.14, Eş. 4.15 ve Eş. 4.16 elde edilmektedir.

$$L \frac{\partial \bar{i}_L}{\partial t} = \tilde{d}[V_g + V_D + I_L(r_D - r_{on})] + \bar{i}_L[r_L + r_{on}D + r_D(1 - D)] + \tilde{v}_gD - \tilde{v}_o \quad (4.14)$$

$$C \frac{\partial \tilde{v}_c}{\partial t} = \tilde{i}_L - \frac{\tilde{v}_o - \tilde{v}_r}{R_{eq}} \quad (4.16)$$

$$\tilde{i}_g = \tilde{d}I_L + \tilde{i}_L D \quad (4.17)$$

Böylece dönüştürücünün durum denklemleri 1. Dereceden diferansiyel denkleme indirgenerek doğrusallaştırılmış olur. Doğrusal durum denklemleri durum uzayında gösterilebileceği gibi bu çalışmada örnek alınan Ericson'un yaptığı gibi küçük işaret devre modeli olarak da gösterilebilmektedir (Ericson, 2004). İdeal olmayan Buck dönüştürücünün SİM'deki küçük işaret eşdeğer devre modeli Şekil 4.8 (a)'daki görselde verilmiştir. Devredeki V_{eff} değeri Eş. 4.14'de sunulan denklemdeki $\tilde{d}$ 'nin katsayısı, r_{eff} ise $\tilde{i}_L$ 'nin katsayısıdır.

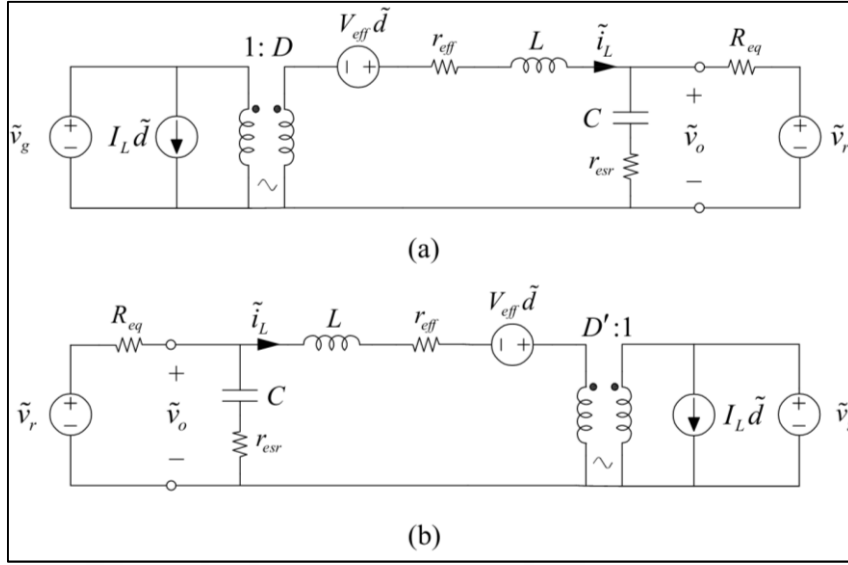
$$V_{eff} = V_g + V_D + I_L(r_D - r_{on}) \quad (4.18)$$

$$r_{eff} = r_L + r_{on}D + r_D(1 - D) \quad (4.19)$$

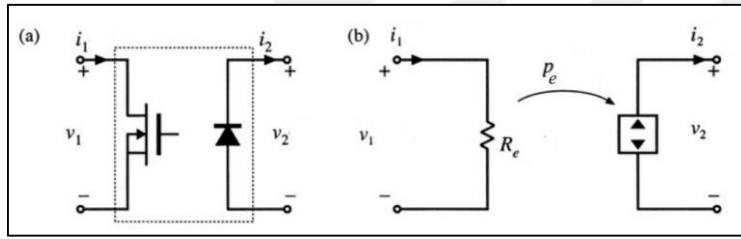
Yukarıdaki adımlar ideal olmayan Boost dönüştürücü için de uygulanmış ve küçük işaret eşdeğer devresi Şekil 4.8 (b)'deki görselde sunulmuştur. Buck ve Boost dönüştürücülerin senkron olarak çalıştığı durumda indüktör akımları sürekli olduğundan küçük işaret eşdeğer devre modelleri de SİM'deki modelleri ile aynı olmaktadır. Farklı olarak diyot yerine anahtar iletimde olacağından V_{eff} ve r_{eff} değerleri Eş. 4.20 ve Eş. 4.21'deki gibi değişecektir.

$$V_{eff} = V_g \quad (4.20)$$

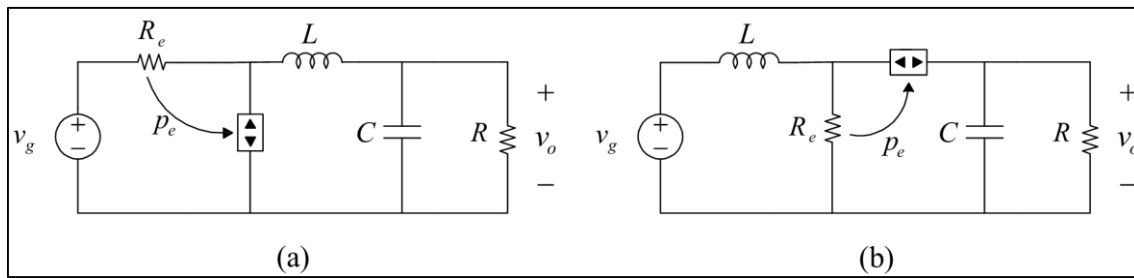
$$r_{eff} = r_L + r_{on} \quad (4.21)$$



Şekil 4.8. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün SİM'deki a) Buck ve Senkron Buck modundaki küçük işaret devre modeli b) Boost ve Senkron Boost modundaki küçük işaret devre modeli



Şekil 4.9. a) Anahtar ve diyot b) anahtar ve diyotun kayıpsız direnç ve bağımlı güç kaynağı ile modellenmesi (Ericson, 2004)



Şekil 4.10. KİM'deki dönüştürücülerin kayıpsız direnç devre modelleri a) Buck b) Boost

KİM'de SİM'den farklı olarak Şekil 4.5 (b)'deki görselde verildiği üzere indüktör akımının sıfır olduğu bir zaman aralığı vardır. SİM'de anahtarın iletimde ve tıkalı olduğu iki zaman aralığı üzerinden durum değişkenlerinin ortalaması alınırken KİM'de indüktans akımının sıfır olduğu üçüncü bir zaman aralığı bulunmaktadır. Fakat indüktör akımının sıfır olduğu bu zaman aralığı indüktans değeri, doluluk oranı, anahtarlama frekansı, indüktör akımı ve

çıkış gerilimi gibi birçok parametreye bağlıdır. Anahtarlama elemanlarının bir periyot boyunca aktardıkları ortalama güç dengesinden yola çıkarak, Şekil 4.9'deki görselde verildiği üzere anahtar kayıpsız direnç (R_e), diyotu ise bu direnç gücüne bağlı bir güç kaynağı (p_e) olarak modellenenilmektedir (Singer, 1990). Böylece değişken sayısı büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Anahtarlama elemanlarının kayıpsız direnç modeli Buck ve Boost devresinde yerine konulduğunda sırasıyla Şekil 4.10 (a) ve (b)'deki eşdeğer devreleri elde edilmektedir. Buck dönüştürücü için verilen Şekil 4.10 (a)'daki devrede p_e 'nin gücü Eş. 4.22'deki denklemde verilen R_e direncinin üzerindeki güce eşittir. Bağımlı güç kaynağı üzerindeki gerilim çıkış gerilimine (v_o) eşit olduğundan p_e 'den çekilen akım Eş. 4.23'te verilmiştir. Yük akımı ise Eş. 4.24'de verildiği üzere v_g kaynağından çekilen akım ile p_e kaynağından çekilen akımların toplamına eşittir. Giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki çevirme oranı (M) Eş. 4.25'deki gibi yazılırsa Buck dönüştürücü için R_e direncinin değeri Eş. 4.26'daki gibi elde edilir. Benzer adımlar izlenerek Şekil 4.10 (b)'de modeli verilen Boost dönüştürücü için hesaplanan R_e değeri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

$$p_e = \frac{(v_g - v_o)^2}{R_e} \quad (4.22)$$

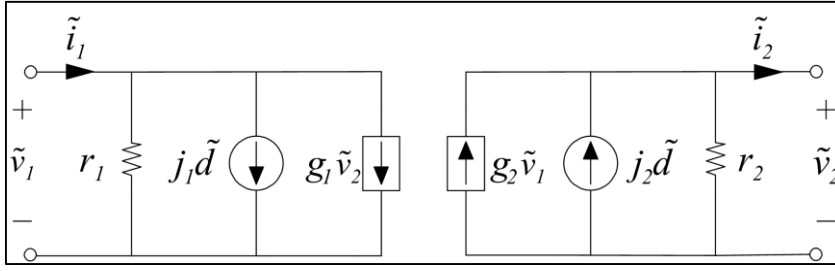
$$i_{pe} = \frac{p_e}{v_o} \quad (4.23)$$

$$\frac{v_o}{R} = \frac{v_g - v_o}{R_e} + \frac{(v_g - v_o)^2}{R_e v_o} \quad (4.24)$$

$$M = \frac{v_o}{v_g} \quad (4.25)$$

$$R_e = \frac{R(1-M)}{M^2} \quad (4.26)$$

Kayıpsız direnç modelinin çıkışına direnç yerine Şekil 4.8'deki devre modelindeki gibi direnç ve dirence seri gerilim kaynağı bağlandığında R_e 'nin değeri değişmektedir. Bu durum için yukarıdaki adımlar izlenmiş ve R_e değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. KİM'de durum denklemleri anahtarın iletimde olduğu, diyotun iletimde olduğu ve indüktör akımının sıfır olduğu 3 durum için SİM'dekine benzer şekilde türetildikten sonra anahtar ve diyot ikilisinin iki portlu küçük işaret eşdeğer devre modeli Şekil 4.11'de verildiği gibi elde edilebilir (Ericson, 2004). Model sayesinde Buck ve Boost dönüştürücünün KİM'deki anahtar ve diyot yapısı tek devre ile modellenmiş olur. Görseldeki parametreler Buck ve Boost dönüştürücü için farklı olmakla birlikte yük durumuna göre bu parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Anahtar ve diyotun iki portlu küçük işaret eşdeğer devre modeli

Çizelge 4.1. Anahtar ve diyot ikilisinin iki portlu küçük işaret devre modeli parametreleri

Anahtar ve Diyot Yapısı	Yük	g_1	j_1	r_1	V_1
Buck		$\frac{1}{R_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DR_e}$	R_e	V_g
		$\frac{1}{R_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DR_e}$	R_e	V_g
Boost		$\frac{1}{(M-1)^2 R_e}$	$\frac{2MV_1}{D(M-1)R_e}$	$\frac{(M-1)^2 R_e}{M^2}$	V_0
		g_2	j_2	r_2	R_e
Buck		$\frac{2-M}{MR_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DMR_e}$	$M^2 R_e$	$\frac{(1-M)R_{eq}}{M^2}$
		$\frac{2-M}{MR_e}$	$\frac{2(1-M)V_1}{DMR_e}$	$M^2 R_e$	$\frac{(1-M)R_{eq}V_0}{M^2(V_0-V_r)}$
Boost		$\frac{2M-1}{(M-1)^2 R_e}$	$\frac{2V_1}{D(M-1)R_e}$	$(M-1)^2 R_e$	$\frac{V_0 R_{eq} M}{(V_r - V_0)(M-1)}$

4.2.1. SİM'deki transfer fonksiyonlarının elde edilmesi

Küçük işaret eşdeğer devreleri yardımıyla herhangi iki değişken arasındaki TF elde edilirken diğer kaynaklar tıpkı süperpozisyon teoreminde olduğu gibi (gerilim kaynakları kısa devre, akım kaynakları açık devre yapılarak) devre dışı bırakılır. Daha sonra Laplace uzayı dönüşümü yapılarak TF'leri elde edilir.

Tam köprü DA/DA dönüştürücünün I. Bölge ve III. Bölge'deki SİM TF'leri

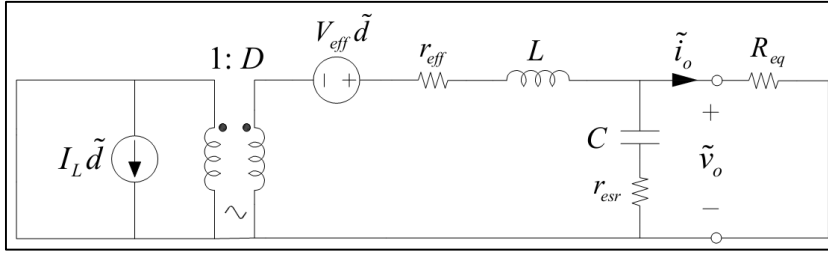
Dönüştürücü I. Bölge'de daha önce bahsedildiği üzere Buck veya Senkron Buck olarak çalıştırılabilir. Fakat çıkış yük durumuna göre iki farklı senaryoda incelenmesi gerekmektedir. Bu senaryolardan ilki tren akımının sıfır olduğu durumdur. Diğer bir ifadeyle Şekil 4.8 (a)'deki görselde $\tilde{v}_r$ geriliminin sıfır olduğu durumdur. Bu yük durumu bundan sonra birinci yük senaryosu olarak adlandırılacaktır. Kontrol sinyaline bağlı kaynaklar harici diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığında Şekil 4.12'deki görselde verilen devre elde edilir. Bu devre analiz edildiğinde kontrol sinyalinden çıkış gerilimine olan TF Eş. 4.27'deki gibi elde edilir.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{R_{eq}V_{eff}(1+r_{esr}Cs)}{(r_{esr}+R_{eq})LCs^2 + [L+r_{eff}(r_{esr}+R_{eq})C+r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff}+R_{eq}} \quad (4.27)$$

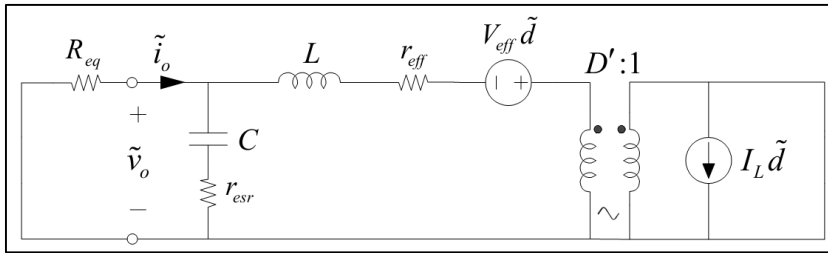
İkinci senaryoda yani tren akımının sıfırdan farklı olduğu durumda redresör problemleri arasında bir potansiyel fark olduğu durumdur. Diğer bir ifadeyle Şekil 4.8 (a)'deki görselde $\tilde{v}_r$ geriliminin sıfırdan farklı olduğu durumdur. Bu yük durumu ise bundan sonra ikinci yük senaryosu olarak adlandırılacaktır. Bu senaryoda da kontrol sinyalinden çıkış gerilimine olan TF, $\tilde{v}_r$ gerilimi kısa devre yapılacağından yine Eş. 4.27'deki TF ile aynı olacaktır. Benzer şekilde Şekil 4.13'deki devreden kontrol sinyali ile çıkış akımının TF Eş. 4.28'deki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\tilde{i}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{eff}(1+r_{esr}Cs)}{(r_{esr}+R_{eq})LCs^2 + [L+r_{eff}(r_{esr}+R_{eq})C+r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff}+R_{eq}} \quad (4.28)$$

Dönüştürücünün III. Bölgede çalışması durumunda Şekil 4.8 (a)'deki görseldeki bütün gerilim ve akım kaynaklarının yönü tersine döneceğinden yine Eş. 4.27 ve Eş. 4.28'deki



Şekil 4.12. Buck dönüştürücünün küçük işaret eşdeğer devresinde kontrol sinyaline bağlı kaynaklar harici diğer kaynakların devre dışı bırakılmış hali



Şekil 4.13. Boost dönüştürücünün küçük işaret eşdeğer devresinde kontrol sinyaline bağlı kaynaklar harici diğer kaynakların devre dışı bırakılmış hali

TF'leri ile benzer eşitlikler elde edilecektir. Sadece gösterimde gerilim ve akım yönü aynı kaldığından eşitliklerin başına eksi getirilmesi gerekmektedir.

Tam köprü DA/DA dönüştürücünün II. Bölge ve IV. Bölge'deki SİM TF'leri

Dönüştürücü II. Bölge'de daha önce bahsedildiği üzere Boost veya Senkron Boost olarak çalıştırılabilir. Bu durumda enerji akışının yönü çıkıştan girişi doğrudur. Fakat burada kontrol edilmek istenen gerilim DA bara gerilimi değil yine Şekil 4.8 (b)'deki görselde verilen $\tilde{v}_o$ gerilimidir. Bu doğrultuda Şekil 4.8 (b)'deki kontrol sinyaline bağlı kaynaklar dışındaki diğer akım ve gerilim kaynakları devre dışı bırakıldığında Şekil 4.13'deki görselde verilen devre elde edilir. Bu devre analiz edildiğinde kontrol sinyalinden çıkış gerilimine olan TF Eş. 4.27'deki TF'nin negatif işaretlisi elde edilir. Kontrol sinyalinden çıkış akımına olan TF ise Eş. 4.28 ile aynıdır. Dönüştürücünün IV. Bölgede çalışması durumunda Şekil 4.8 (b)'deki görseldeki bütün gerilim ve akım kaynaklarının yönü tersine döneceğinden kontrol sinyalinden $\tilde{v}_o$ gerilimine olan TF Eş. 4.27'deki TF ile aynı çıkış akımına olan TF ise Eş. 4.28'in negatifi olacaktır. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün SİM için bütün çalışma bölgelerinde kontrol sinyalinden çıkış gerilimi ve akımına elde edilen TF'lerinin özeti Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tam köprü DA/DA dönüştürücünün SİM için bütün çalışma bölgelerinde elde edilen TF'leri

Çalışma Bölgesi	$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)}$
I. Bölge	$\frac{R_{eq}V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
II. Bölge	$-\frac{R_{eq}V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
III. Bölge	$-\frac{R_{eq}V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
IV. Bölge	$\frac{R_{eq}V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
Çalışma Bölgesi	$\frac{\tilde{i}_o(s)}{\tilde{d}(s)}$
I. Bölge	$\frac{V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
II. Bölge	$\frac{V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
III. Bölge	$-\frac{V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$
IV. Bölge	$-\frac{V_{eff}(1 + r_{esr}Cs)}{(r_{esr} + R_{eq})LCs^2 + [L + r_{eff}(r_{esr} + R_{eq})C + r_{esr}R_{eq}C]s + r_{eff} + R_{eq}}$

4.2.2. KİM'deki transfer fonksiyonlarının elde edilmesi

Tam köprü DA/DA dönüştürücünün I. Bölge ve III. Bölge'deki KİM TF'leri

Dönüştürücü I. Bölgede (Buck modu) KİM analizleri yine yük durumunun iki farklı senaryosu üzerinden yapılması gerekmektedir. İlk senaryo da Şekil 4.11'deki görselde verilen KİM'deki anahtar ve diyotun küçük işaret eşdeğer devresine filtre elemanları ve yük eklenip kontrol sinyali hariç diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığında Şekil 4.14'deki görseli verilen devre elde edilir. Bu devre kapasitör ve indüktör olmak üzere iki tane dinamik eleman içermektedir. Kontrol sinyali ile çıkış gerilimi ve akımı arasındaki TF'lerinin bu sebeple iki tane kökü vardır. Fakat indüktör sebebiyle TF'lerine gelen kök anahtarlama frekansına yakın

olduğundan indüktör etkisi ihmal edilir (Ericson, 2004). Bu durumda kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF Eş. 4.29'daki denklemde verildiği gibi birinci dereceden genel bir formatta yazılabilir.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{G_{do}}{1 + \frac{s}{\omega_{do}}} \quad (4.29)$$

Buradaki G_{do} ve ω_p Şekil 4.14'deki indüktör kısa devre edilip devre analiz edildiğinde Eş. 4.30 ve Eş. 4.31'deki gibi edilir.

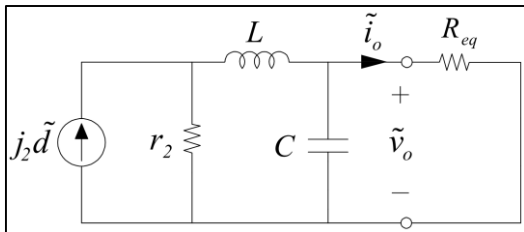
$$G_{do} = j_2(R_{eq} \parallel r_2) \quad (4.30)$$

$$\omega_{do} = \frac{1}{(R_{eq} \parallel r_2)C} \quad (4.31)$$

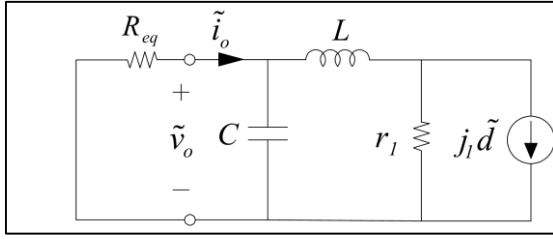
Şekil 4.14'deki devreden kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin G_{do} da benzer şekilde Eş. 4.32'deki denklemde verildiği gibi elde edilir.

$$\frac{\tilde{i}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\frac{G_{do}}{R_{eq}}}{1 + \frac{s}{\omega_{do}}} \quad (4.32)$$

İkinci yük senaryosu için ise analiz yaparken $\tilde{v}_r$ gerilimi yine devre dışı bırakılacağından aynı denklemler elde edilecektir. Fakat Çizelge 4.1'de verildiği üzere denklemler aynı olsa da denklemlerdeki değişkenler birbirinden farklı olduğu için farklı TF'ler elde edilecektir. Dönüştürücünün III. Bölge'de çalıştığı durumda SİM'de açıklandığı üzere yine Eş. 4.29 ve Eş. 4.32'de verilen TF'lerinin negatif işaretlisi olacaktır.



Şekil 4.14. Buck modu için KİM'deki anahtar ve diyotun küçük işaret eşdeğer devresine filtre elemanları ve yük eklenip kontrol sinyali hariç diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığı devre şeması



Şekil 4.15. Boost modu için KİM'deki anahtar ve diyotun küçük işaret eşdeğer devresine filtre elemanları ve yük eklenip kontrol sinyali hariç diğer kaynaklar devre dışı bırakıldığı devre şeması

Tam köprü DA/DA dönüştürücünün II. Bölge ve IV. Bölge'deki KİM TF'leri

Bir önceki bölümde izlenen adımlar II. Bölge için de izlendiğinde dönüştürücünün bu bölgedeki küçük işaret eşdeğer devresi Şekil 4.15'deki görselde verildiği gibi elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus Şekil 4.11 (b)'den farklı olarak çıkış ile girişin gösterimde yer değiştirmiş olmasıdır. Bu sebeple M değeri v_g/v_o olarak alınmalı ve Çizelge 4.1'de v_g ile v_o yer değiştirmelidir. Şekil 4.15'deki devre analiz edilip TF'leri Eş. 4.29 ve Eş. 4.30 formatında yazıldığında bu bölgede G_{do} ve ω_{do} değerleri Eş. 4.33 ve Eş. 4.34'de verildiği şekilde elde edilir.

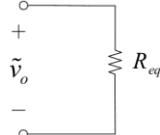
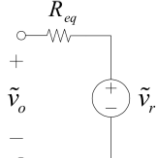
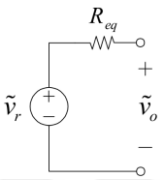
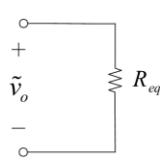
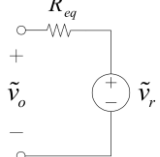
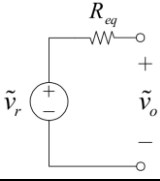
$$G_{do} = -j_1(R_{eq} \parallel r_1) \quad (4.33)$$

$$\omega_{do} = \frac{1}{(R_{eq} \parallel r_1)C} \quad (4.34)$$

Bu durum için kontrol sinyali ile giriş akımı arasındaki TF Eş. 4.32'nin negatifi olarak bulunur.

Dönüştürücünün IV. Bölgedeki TF'leri ise II. Bölge için bulunan TF'lerinin negatif işaretlisi olacaktır. Elde edilen denklemlerde Çizelge 4.1'deki değerler yerine konulduğunda KİM'deki bütün çalışma bölgelerinin Eş. 4.29 ve Eş. 4.32'deki formatta G_{do} ve ω_{do} değerleri Çizelge 4.3'deki gibi elde edilir.

Çizelge 4.3. KİM'deki bütün çalışma bölgeleri için Eş. 4.29 ve Eş. 4.32'deki formata G_{do} ve ω_{do} değerleri

Çalışma Bölgesi	Yük	G_{do}	ω_{do}
I. Bölge		$\frac{2V_o(1-M)}{D(2-M)}$	$\frac{2-M}{(1-M)R_{eq}C}$
		$\frac{2V_o(1-M)}{D\left[1+(1-M)\frac{V_o}{V_o-V_r}\right]}$	$\frac{2-M-\frac{V_r}{V_o}}{(1-M)R_{eq}C}$
II. Bölge		$-\frac{2V_o}{D\left[M+(M-1)\frac{V_o}{V_r-V_o}\right]}$	$\frac{MV_r-V_o}{V_o(M-1)R_{eq}C}$
III. Bölge		$-\frac{2V_o(1-M)}{D(2-M)}$	$\frac{2-M}{(1-M)R_{eq}C}$
		$-\frac{2V_o(1-M)}{D(1+(1-M)\frac{V_o}{V_o-V_r})}$	$\frac{2-M-\frac{V_r}{V_o}}{(1-M)R_{eq}C}$
IV. Bölge		$\frac{2V_o}{D\left[M+(M-1)\frac{V_o}{V_r-V_o}\right]}$	$\frac{MV_r-V_o}{V_o(M-1)R_{eq}C}$

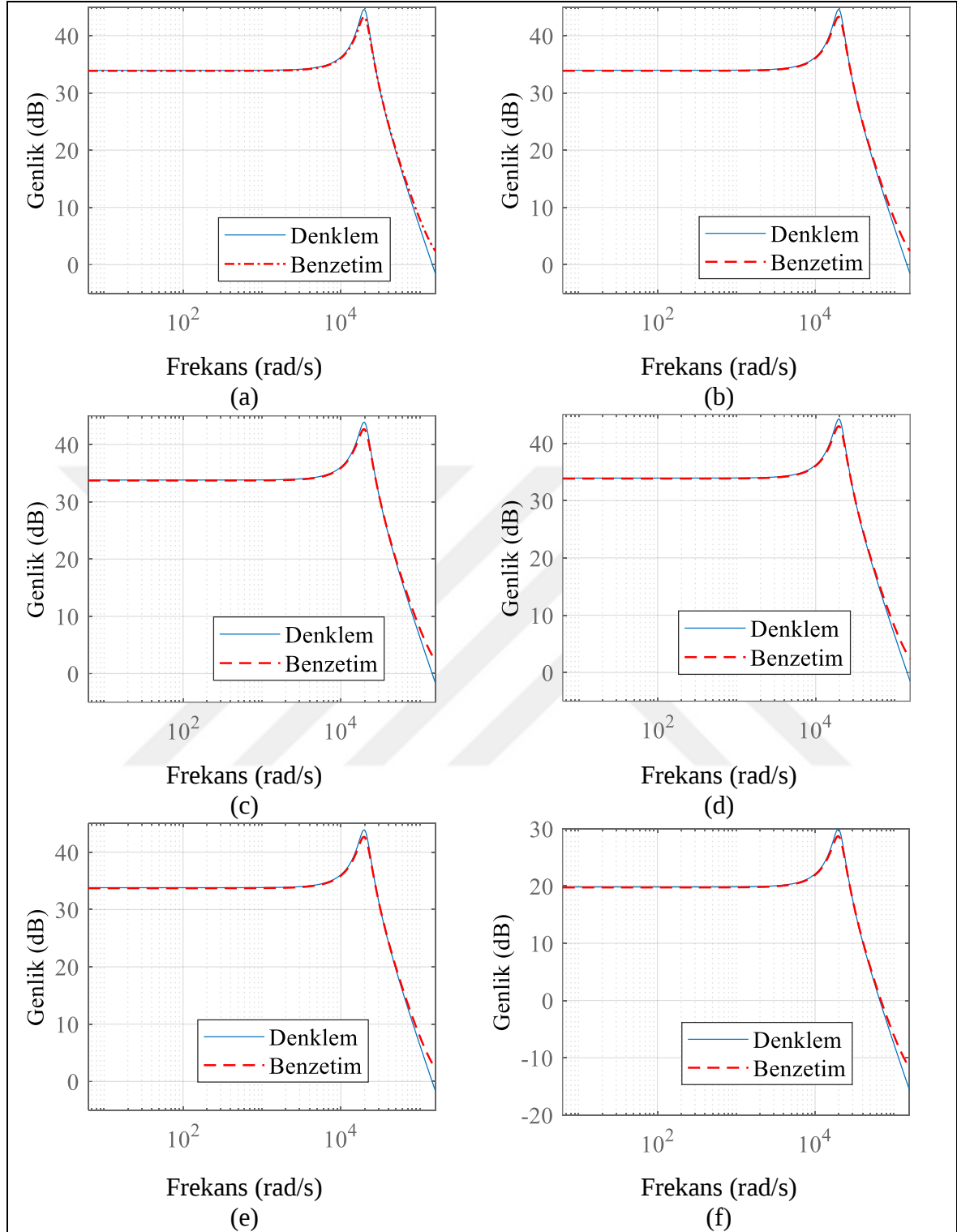
4.2.3. Elde edilen transfer fonksiyonlarının doğrulanması

Bir önceki bölümde hesaplanan TF'leri doğrulamak için PLECS benzetim ortamında tam köprü dönüştürücünün devresi kurulup dürtü yanıtı yöntemiyle bode diyagramı elde edilmiştir. Hesaplanan TF'lerin bode diyagramı ise MATLAB'de elde edilmiştir. Bu iki diyagram aynı grafik üstünde çizdirilip hesaplanan TF'ler doğrulanmıştır. Dönüştürücünün SİM'de I. Bölge'deki her iki yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF'lerin bode diyagramlarının benzetim sonuçları ile karşılaştırması Şekil 4.16 (a) ve (b)'de verilmiştir. I. Bölge'de birinci yük senaryosu için senkron olarak çalıştığı durum elde edilen

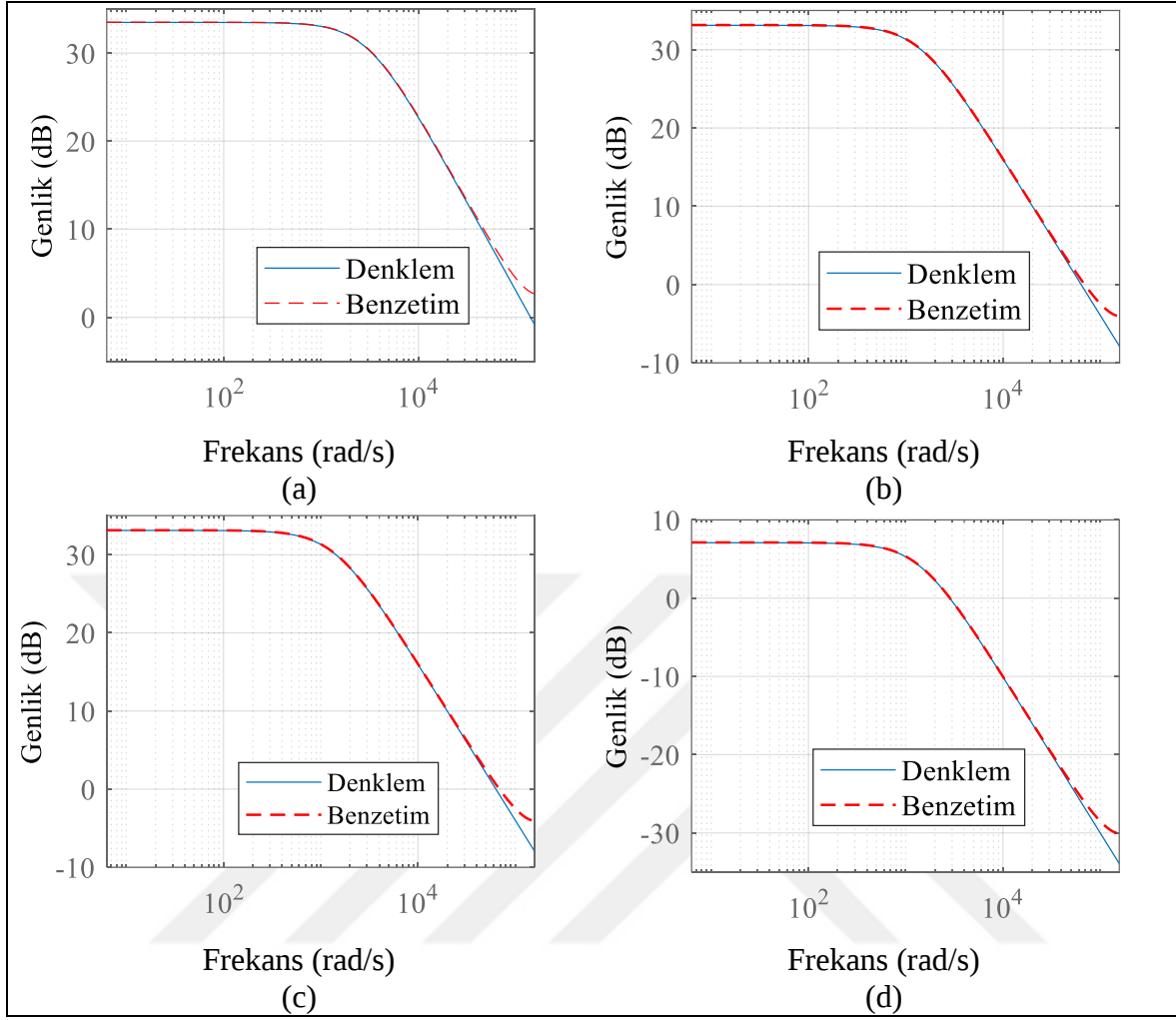
TF'lerin bode diyagramının benzetim sonuçları ile karşılaştırması Şekil 4.16 (c)'de verilmiştir. Dönüştürücünün II. Bölge'de normal ve senkron olarak çalıştığı durumlardaki TF'lerin bode diyagramının benzetim sonuçları ile karşılaştırması ise sırasıyla Şekil 4.16 (d) ve (e)'de verilmiştir. Dönüştürücünün I. Bölge'de kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin bode diyagramı ile benzetim sonucunun karşılaştırması ise Şekil 4.16 (f)'deki görselde verilmiştir. Diğer çalışma bölgelerindeki TF'lerin bode diyagramları ile karşılaştırması yapılan bölgelerdeki TF'lerin bode diyagramları aynı olduğu için diğer durumların karşılaştırılmasına gerek duyulmamıştır.

Dönüştürücünün KİM'de çalıştığı durumlarda kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasında elde edilen TF'leri doğrulamak için ise I. Bölge'de birinci ve ikinci yük senaryosu için elde edilen TF'lerin bode diyagramı ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.17 (a) ve (b)'de verilmiştir. II. Bölge'deki TF'nin bode diyagramı ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 4.17 (c)'de verilmiştir. Şekil 4.17 (d)'de ise I. Bölge ikinci yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin bode diyagramı ile benzetim sonucu karşılaştırması verilmiştir.

SİM'de elde edilen TF'lerin bode diyagramı ile benzetim sonuçları arasında köşe frekansındaki genliklerde ufak farklılıklar vardır. KİM'de elde edilen TF'lerin bode diyagramı ise benzetim sonuçlarıyla birebir örtüşmektedir.



Şekil 4.16. Dönüştürücünün SİM'deki TF denklemlerinin bode diyagramlarının benzetim sonuçları karşılaştırılması. a) I. Bölge'de birinci, b) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu, c) I. Bölge'de senkron çalışma, d) II. Bölge'de normal, e) II. Bölge'de senkron çalışma durumları için kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF'lerin ve f) II. Bölge'de ikinci yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin doğrulaması



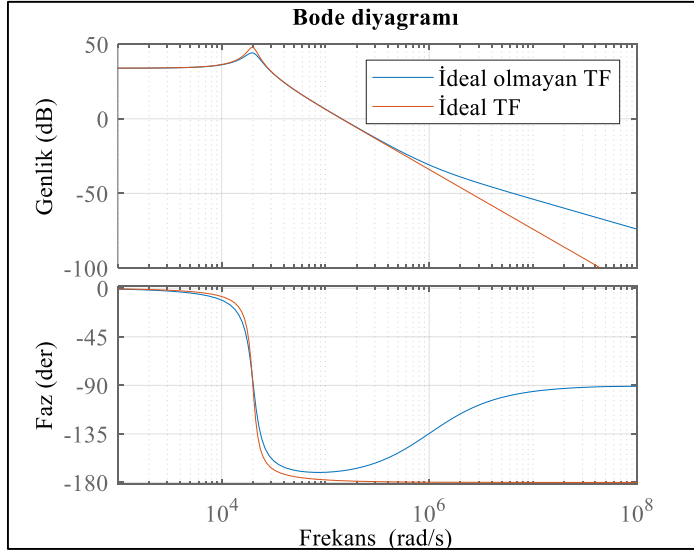
Şekil 4.17. Dönüştürücünün KİM'deki TF denklemlerinin bode diyagramlarının benzetim sonuçları karşılaştırılması. a) I. Bölge'de birinci, b) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu, c) II. Bölge'de çalışma durumları için kontrol sinyali ile çıkış gerilimi arasındaki TF'lerin ve d) I. Bölge'de ikinci yük senaryosu için kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'nin doğrulanması

4.3. Katsayıları Yüke Bağlı Değişen Ardışık PI Kontrolcü Tasarımı

Tasarlanan kontrolcüde çıkış gerilimini kontrol etmek için dış döngüde gerilim geri beslemesi ile referans gerilim farkından PI kontrolcü ile akım referansı elde edilmiştir. İç döngüde ise çıkış akımı ile referans akımı farkından katsayıları yüke bağlı değişen PI kontrolcü ile kontrol sinyali üretilmiştir. Tasarımın ilk aşamasında dönüştürücünün SİM'deki ve KİM'deki transfer fonksiyonları incelenmiştir. Daha sonra her iki iletim modunda kontrolcü tasarımını etkileyen faktörler incelenmiştir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Dönüştürücünün SİM'deki TF'lerinin incelenmesi

Dönüştürücünün Çizelge 4.2'deki verilen çalışma bölgelerindeki SİM'de kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF'lere bakıldığında işaret farklılıkları dışında bir fark yoktur. Dolayısıyla tasarlanan kontrolcünün performansı SİM'de her bölgede aynı olacaktır. Önceki bölümde SİM'de TF'ler elde edilirken ideal olmayan devre elemanlarının parametreleri r_{on} , r_D , r_L , r_{esr} ve V_D dikkate alınmıştır. Kapasitörün iç direnci r_{esr} Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere TF'lere bir sıfır eklemektedir. Bazı uygulamalarda kapasitör iç direnci büyük seçilerek veya kapasitöre seri ek bir direnç bağlanarak sistem kontrolünde kullanılabilmektedir (Qian ve diğerleri, 2013). Fakat bu yöntem hem çıkış gerilimindeki dalgalanmayı arttırmaktadır hem de kapasitör iç direncinin sıcaklık, çalışma frekansı, üretimde meydana gelecek farklılıklar ve yaşlanma ile büyük oranda değişmektedir (Lahyani ve diğerleri, 1998). Dönüştürücüyü çalışma noktasından bağımsız olarak analiz edebilmek için Eş. 4.18'daki r_{on} ve r_D dirençleri ihmal edilmiştir. Kapasitör iç direncinin dönüştürücünün TF'sine eklediği kök yüksek frekanslarda olduğu için bu kök de ihmal edilmiştir. Bu parametreler ihmal edildiğinde kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF Eş. 4.35'de verilen ikinci derece alçak geçiren filtrenin TF formunda yazılabilir. Eş. 4.28'deki TF ile r_{on} , r_D ve V_D parametrelerinin ihmal edildiği Eş. 4.35'deki TF'nin bode diyagramları Şekil 4.17'deki görselde verilmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü üzere bu iki transfer fonksiyonu arasında yüksek frekanslar haricinde pek fark yoktur. Yüksek frekanslardaki farkın sebebi ise r_{esr} 'nin sisteme eklediği sıfırın ihmal edilmesidir.



Şekil 4.18. İdeal ve ideal olmayan dönüştürücünün TF'lerinin bode diyaqramları

$$\frac{i_o}{d} = \frac{\frac{V_g}{R_{eq}}}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{s}{Q\omega_0} + 1} \quad (4.35)$$

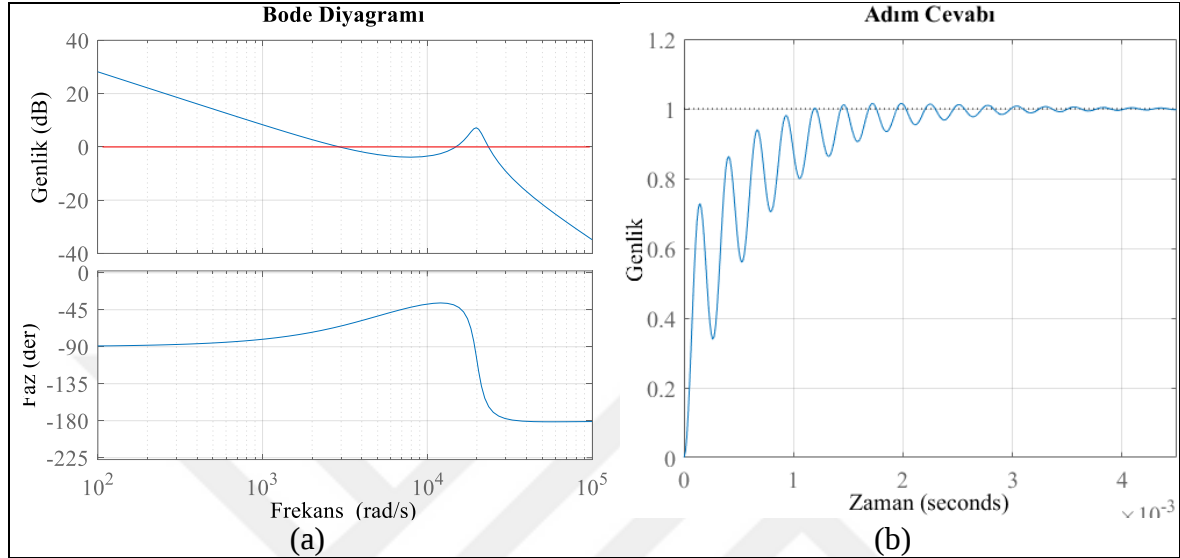
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.36)$$

$$Q = \frac{R_{eq}\sqrt{LC}}{L + R_{eq}C(r_{esr} + r_L)} \quad (4.37)$$

Eş. 4.35'teki ve benzeri karakteristiğe sahip sistemler için PI kontrolcü ile kontrol edilebilen bant genişliği kalite faktörüne Q 'ya bağlı olarak köşe frekansı dolaylarında sınırlıdır. Bu aralık eğer $Q \ll 1$ ise köşe frekansının birkaç katına kadar çıkabilmektedir. Fakat $Q > 1$ ise kontrol edilebilen bant genişliği köşe frekansı ile sınırlıdır. Bunun sebebi birinci derecen kontrolcüler ile köşe frekansından sonra yeterince faz marjının elde edilememesidir. Q 'nın kontrolcü tasarımına bir diğer etkisi ise eğer tasarımda köşe frekansındaki kalite faktörü nedeniyle genlik artışı dikkate alınmazsa açık çevrim TF'nin genlik eğrisinde Şekil 4.19 (a)'daki gibi çoklu sıfır geçişleri meydana gelebilir. Genlik eğrisinin sıfırı kestiği ilk noktada yeterince faz marjı varken son kestiği noktada yetince faz marjı yoktur. Bu da Şekil 4.19 (b)'deki adım cevabında salınımların meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Eş. 4.37'de görüldüğü Q , L ve C oranı ile birlikte çıkış yüküne bağlıdır. Q en yüksek değerine çıkış yükünün maksimum olduğu noktada yani SİM ile KİM sınırında çalıştığı durumda ulaşmaktadır. SİM ile KİM sınırındaki bu direnç değeri Eş. 4.38'deki denklemde verilmiştir. Bu denklemde R_{krit} ise en yüksek değerine doluluk oranı D 'nin en büyük olduğu durumda

ulaşmaktadır. Diğer bir değişle dönüştürücünün çıkış geriliminin maksimum olduğu durumda ulaşmaktadır. KİM’de dönüştürücünün TF’si birinci derece olduğundan kalite faktöründen bahsedilemez.



Şekil 4.19. a) Köşe frekansında genlik artışı sebebiyle genlik eğrisinin çoklu sıfır kesimi
b) çoklu kesim durumunda adım cevabı

$$R_{krit} = \frac{2Lf_s}{(1-D)} \quad (4.38)$$

Köşe frekansındaki genlik artışı Eş. 4.39’daki denklemde verilmiştir.

$$P = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2-1}} \quad (4.39)$$

Dönüştürücünün KİM’deki TF’lerinin incelenmesi

Dönüştürücünün KİM’deki TF’leri çalışma bölgesine ve yük senaryolarına bağlı olarak oldukça farklılık gösterse de Şekil 4.17’deki görselde verildiği üzere aynı yük ve dönüştürme oranlarında benzer genlik eğrilerine sahiptir. Bu sebeple kontrolcü tasarımı yapılırken I. Bölge’deki birinci yük senaryosuna göre tasarım yapılmış diğer çalışma bölgelerinde ise PLECS benzetim ortamında test edilmiştir. Bu iletim modunda Eş. 4.32’de verildiği üzere dönüştürücünün kazancına yük yine bölüm olarak gelmektedir. İkinci bir husus ise Çizelge 4.3’de verildiği üzere aynı şekilde yük köşe frekansına bölüm olarak gelmektedir.

Tasarımda dikkate alınan faktörler

Yukarıda yapılan incelemeler sonucunda dönüştürücünün her iki iletimde de kontrolünü sağlamak amacıyla edinilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

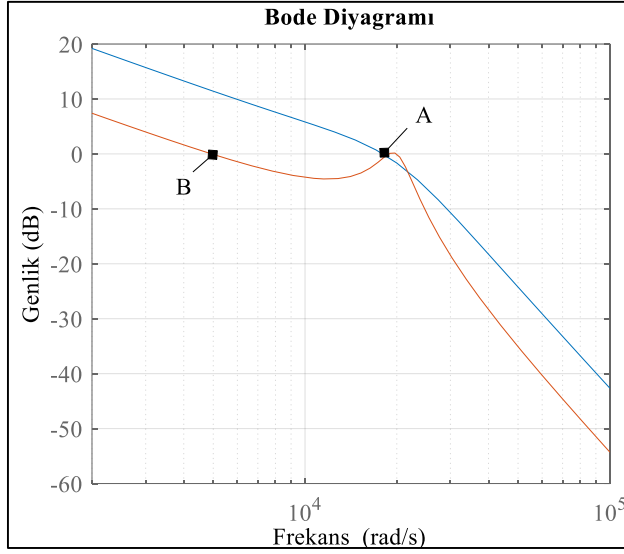
- SİM’de PI ile çıkılabilecek en yüksek bant genişliği köşe frekansı ile sınırlıdır.
- Kalite faktörü yük direnci ile değişmekte olup maksimum değerine kritik iletimde ulaşmaktadır.
- Hem SİM’de hem de KİM’de kontrol sinyali ile çıkış akımı arasındaki TF’nin genliği yük direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir.
- SİM’de köşe frekansı sabit iken KİM’de yük direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir.

PI kontrolcü tasarımı yapılırken ilk konu kontrolcünün kazancının ne olacağıdır. Ardışık kontrolcüde iç döngünün yanıtının dış döngüden daha hızlı olması gerekmektedir. Fakat hem SİM’de hem de KİM’de iç akım döngüsünün kazancı yük direnci ile ters orantılı olarak düşmektedir. Bunun sonucu olarak iç döngünün hızı yavaşlarken dış döngünün hızı sabit kalmaktadır. Bu problemi çözmek için gerilim döngüsünün tepki hızını akım döngüsünün tepki hızının en düşük olduğu durumdan daha düşük seçmek düşünülebilir. Fakat iç akım döngüsünün bant genişliği köşe frekansı ile sınırlı olduğundan tüm sistemin hızı önemli ölçüde düşecektir. Bu problemi çözmeye yönelik PI kontrolcünün integral katsayısı k_i Eş. 4.40’da verildiği üzere birinci dereceden yüke bağlı doğrusal bir fonksiyon olarak seçilmiştir.

$$k_i(R) = \alpha R + \beta \quad (4.40)$$

Bu denklem iki tane bilinmeyen içermektedir. Bu değişkenleri hesaplamak için Şekil 4.20’de görseli verilen akım döngüsünün genlik diyagramında iki farklı çalışması noktası A ve B baz alınmıştır. A noktası yük direncinin en düşük olduğu ve giriş geriliminin maksimum olduğu durumdaki genlik eğrisidir. Bu noktada en yüksek tepki hızına erişebilmek için k_i fonksiyonunun genliğinin Eş. 4.41’de verildiği üzere köşe frekansının genliğine eşit olması gerekmektedir.

$$|\omega_o| = \left| \frac{v_g^{max}}{R_{min}} (\alpha R_{min} + \beta) \right| \quad (4.41)$$



Şekil 4.20. Eş. 4.40'taki değişkenleri hesaplamak için baz alınan sıfır kesim noktaları

B noktasında ise dönüştürücü en yüksek çıkış geriliminde ve SİM ile KİM sınırında çalışmaktadır. Diğer bir değişle Q 'nun en yüksek olduğu noktada çalıştığı durumdur. Daha önce bahsedilen çoklu sıfır kesiminden kaçınmak için bu durumda k_i fonksiyonundan Eş. 4.42'de verildiği üzere P 'nin genliği eklenmiştir. Böylece fonksiyondaki iki bilinmeyeni çözmek için iki denklem elde edilmiş olur. Dönüştürücünün tasarımında L/C oranı küçük seçilmişse A noktasındaki P 'nin genliği Eş. 4.41'den eklenerek köşe frekansına eşitlenmelidir.

$$|\omega_o| = \left| \frac{V_g^{max}}{R_{krit}^{max}} (\alpha R_{krit}^{max} + \beta) \right| + |P_{max}| \quad (4.42)$$

PI kontrolcü tasarımındaki diğer bir konu ise sıfır yerleşimidir. Eğer PI kontrolcünün sıfırı 0 ile ω_o arasına yerleştirilirse maksimum kesim frekansı Şekil 4.21'daki görselde verildiği üzere sıfırın yerleştirildiği frekansta sınırlanır. Bu durumda eğer dönüştürücünün kazancı artarsa kesim frekansı faz marjının düşük olduğu köşe frekansının ötesine geçebilir. Eğer azalırse kesim frekansı sıfırın soluna kayabilir. Dolayısıyla sıfırın yerleştirildiği frekans ile köşe frekansı aralığı çalışma bölgesinin dışında kalarak sistem hızını düşürür. Aslında SİM'de integralin faz eğrisini bant genişliği boyunca -90° geriletmesi ile yeterince faz marjı elde edilmiş olur. Fakat KİM'de köşe frekansı sabit değildir. İntegralin faz geriletmesi ile köşe frekansından sonra faz marjı -180° 'ye yaklaşmaktadır. Bu sebeple sıfır yerleştirilerek kesim frekansında yeterince faz marjı oluşturulması gerekmektedir. KİM'de

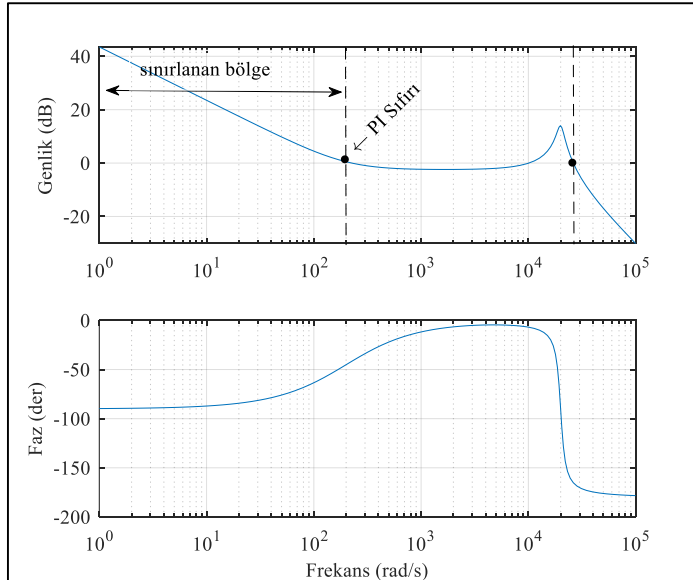
daha önce bahsedildiği üzere köşe frekansı yük direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bu problemi çözmek için yine integral katsayı seçiminde olduğu gibi sıfırın yerleştirileceği frekans Eş. 4.43’de verildiği üzere yük ile değişecek şekilde seçilmiştir.

$$k_p(R) = \gamma R^2 \quad (4.43)$$

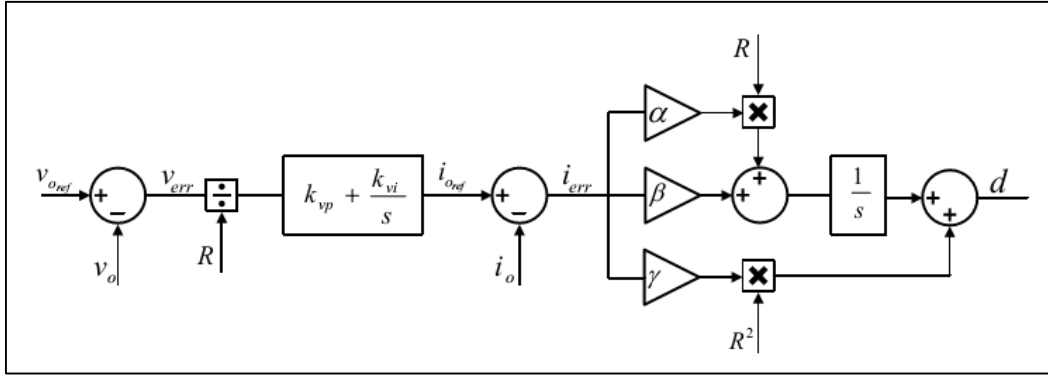
$$\omega_o = \frac{k_i(R_{krit}^{max})}{k_p(R_{krit}^{max})} \quad (4.44)$$

$$\gamma = \frac{k_i(R_{krit}^{max})}{(R_{krit}^{max})^2 \omega_o} \quad (4.45)$$

Sıfırın yerini k_i/k_p belirlediğinden ve de k_i yük direnci ile değişecek şekilde seçildiğinden nu denklem de yük direncinin karesiyle değişecek şekilde seçilmiştir. Eğer bu denklem SİM ve KİM sınırında Eş. 4.44’de verildiği üzere köşe frekansına eşit olursa sıfırın yeri SİM’de çalışırken bant genişliği dışında kalırken KİM’de yük azaldıkça daha düşük frekanslara kayarak sisteme yeterince faz marjı verebilecektir. Böylece Eş. 4.43’deki bilinmeyen Eş. 4.45’deki gibi elde edilecektir. Önerilen kontrolcünün akış şeması Şekil 4.22’deki görselde sunulmuştur. Dış döngüdeki gerilim kontrolcü tasarımının iç akım döngüsünün hızından yavaş olacak şekilde yapılması yeterli olacaktır.



Şekil 4.21. Sıfır yerleşiminin bode diyagramına etkisi



Şekil 4.22. Önerilen kontrolcünün akış şeması

Çizelge 4.4. Dönüştürücü parametreleri

İndüktör Değeri	$L = 50\mu H$
Kapasitör Değeri	$C = 50\mu F$
İç Dirençler	$r_{esr} = 0,1\Omega, r_L = 0,1\Omega$
Maksimum Giriş Gerilimi	$V_g^{max} = 30V$
Maksimum Çıkış Gerilimi	$V_o^{max} = 25V$
Maksimum Yük	$R^{max} = 1\Omega$
Anahtarlama Frekansı	$f_s = 50kHz$

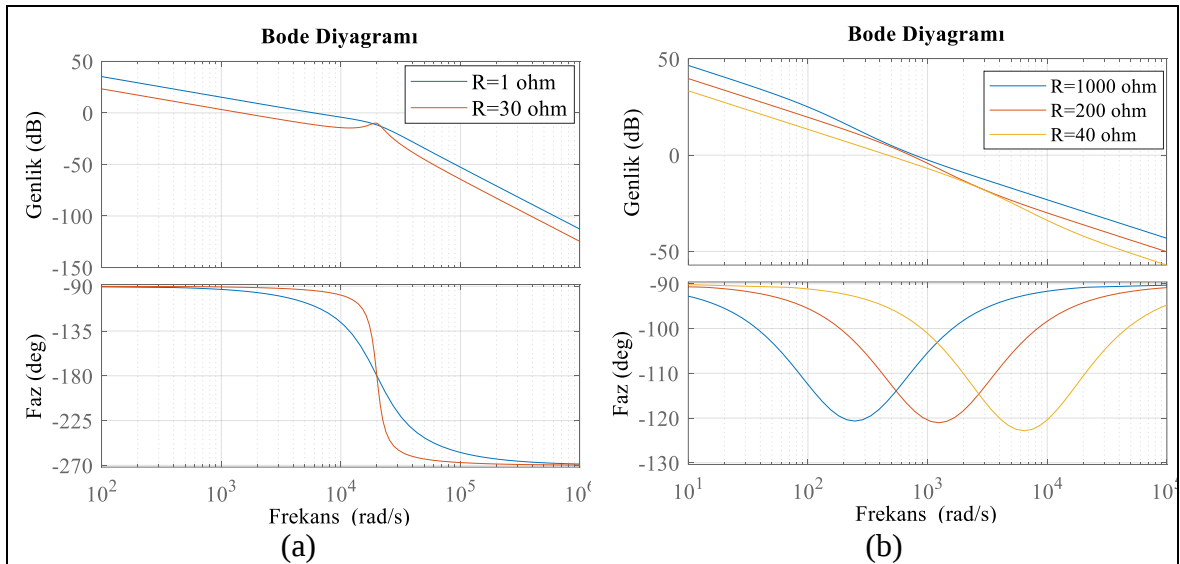
4.4. Benzetim ve Deney Sonuçları

Bu bölümde değerleri Çizelge 4.4'te verilen dönüştürücü için ilk önce örnek bir tasarım yapılmıştır. Daha sonra önerilen yöntemle elde edilen parametreler ile tasarlanan kontrolcünün performansı hem benzetim ortamında hem de deneysel olarak test edilmiştir. Birinci yük senaryosu için hem benzetim hem de deneysel çalışma yapılmıştır. İkinci yük senaryosu için ise sadece benzetim çalışması yapılmıştır.

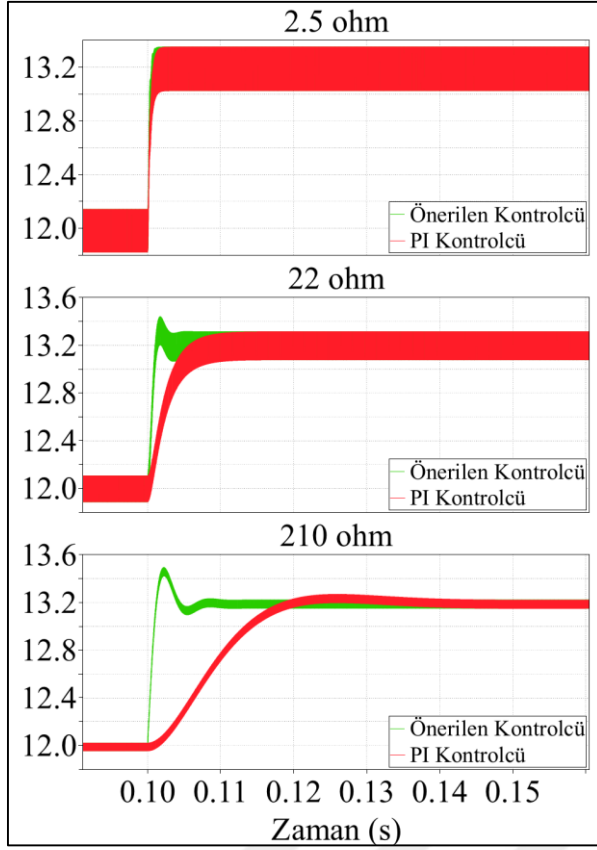
Çizelge 4.4'te verilen parametreler ile dönüştürücünün SİM'deki köşe frekansı Eş. 4536 kullanılarak $\omega_o = 20000 \text{ rad/s}$ elde edilmiştir. Doluluk oranının maksimum değeri 5/6 olarak elde edilmiştir. Bu değeri kullanarak Eş. 4.38'den $R_{crit}^{max} = 30\Omega$ olarak elde edilmiştir. Eş. 4.37'den kalite faktörünün en yüksek değeri $Q_{max} = 4.29$ olarak elde edilmiştir. Q_{max} 'ın bu değerinde Eş. 4.39'dan $P_{max} = 4.34$ olarak elde edilmiştir. İsteğe bağlı olarak bu çalışmada kesim frekansında yeterince kazanç marjı elde edebilmek için Eş. 4.41 ve 5.42'in sağ tarafına 10dB eklenmiştir. Elde edilen değerler Eş. 4.41 ve 5.42'de yerine konulup denklem takımları çözüldüğünde k_i denklemindeki bilinmeyenler $\alpha = 43$ ve $\beta =$

167 olarak bulunmuştur. Tasarımın son aşamasında ise Eş. 4.44'ten $\gamma = 10^{-4}$ olarak bulunmuştur. Gerilim döngüsündeki katsayılar ise gerilim döngüsünün hızının en kötü durumda akım döngüsünün hızından yavaş olmasını sağlayacak şekilde $k_{vi} = 100$ ve $k_{vp} = 0,01$ seçilmiştir.

İlk etapta tasarlanan akım kontrolcüsünün farklı yüklerde etkisini doğrulamak adına MATLAB'de kontrolcü ile birlikte dönüştürücünün açık çevrim bode diyagramları her iki iletim modu için Şekil 4.23'deki görselde verildiği gibi çizdirilmiştir. Şekil 4.23 (a)'da dönüştürücünün SİM'de çalıştığı durum için parametrelerin hesaplandığı yük direncinin 1Ω olduğu maksimum yük ve 30Ω olduğu kritik iletimdeki yükteki bode diyagramları verilmiştir. Hesaplandığı üzere köşe frekansında 10dB'lik bir kazanç marjı elde edilmiştir. Yük direnci azaldıkça kesim frekansı yaklaşık üç kat azalmaktadır. Bunun sebebi k_i fonksiyonunda çoklu sıfır kesiminden kaçınmak için eklenen β sabitinin düşük yük dirençlerinde αR 'ye baskın olmasıdır. Şekil 4.23 (b)'de ise dönüştürücünün KİM'de çalıştığı durumda üç farklı yük için bode diyagramları verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere yük direnci arttıkça k_i fonksiyonundaki αR artık β 'dan baskın olduğu için kesim frekansı çok fazla değişmemiştir. Ayrıca tasarımda istenildiği gibi PI sıfırı sistemin köşe frekansını takip ederek yeterince faz marjının oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 4.23. a) SİM'de tasarım yapılan yük dirençlerinde, b) KİM'de farklı yüklerde kontrolcü ile birlikte dönüştürücünün açık çevrim bode diyagramları

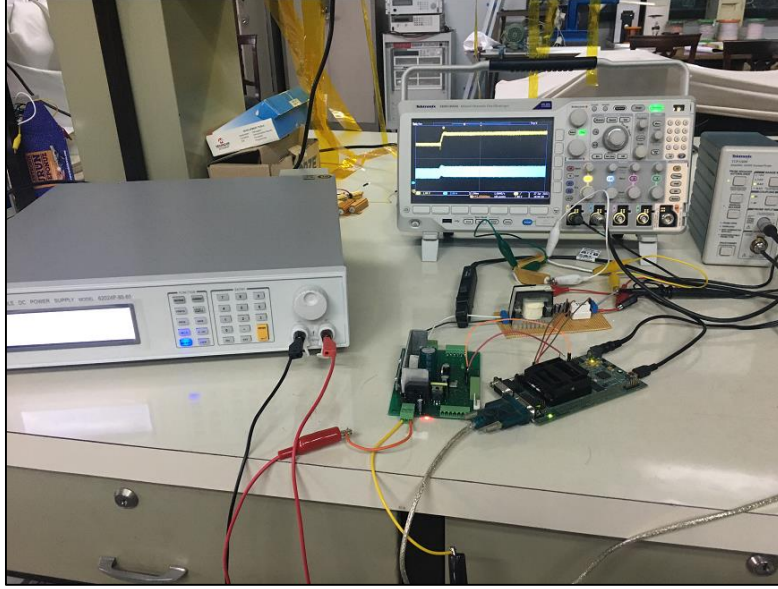


Şekil 4.24. Birinci yük senaryosunda akım döngüsündeki PI ve önerilen kontrolcünün farklı yüklerdeki $t=0,1$ s’de %10’luk referans değişimine tepkileri

Önerilen akım kontrolcüsü ile maksimum yükte aynı tepkiyi verecek şekilde katsayıları $k_i = 210$ ve $k_p = 10^{-4}$ olan PI kontrolcü performanslarını kıyaslamak adına PLECS benzetim ortamında birinci yük senaryosu için koşturulmuştur. Benzetimde her iki kontrolcü için dönüştürücünün çıkışına $2,5\Omega$, 22Ω ve 210Ω ’luk dirençler bağlanmış ve referans akım değeri çıkış gerilimi 12V olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra bu referans akıma 0.1’inci saniyede %10’luk bir adım eklenerek Şekil 4.24’deki görselde verilen çıkış gerilimleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Çizelge 4.5’te verilen karşılaştırma tablosu oluşturulmuştur. Bu tablodan PI kontrolcünün hızı yük azaldıkça yaklaşık 18 kat azaldığı gözlemlenmiştir. Önerilen kontrolcünün ise en düşük yükte PI kontrolcünden yaklaşık 5 kat daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir.

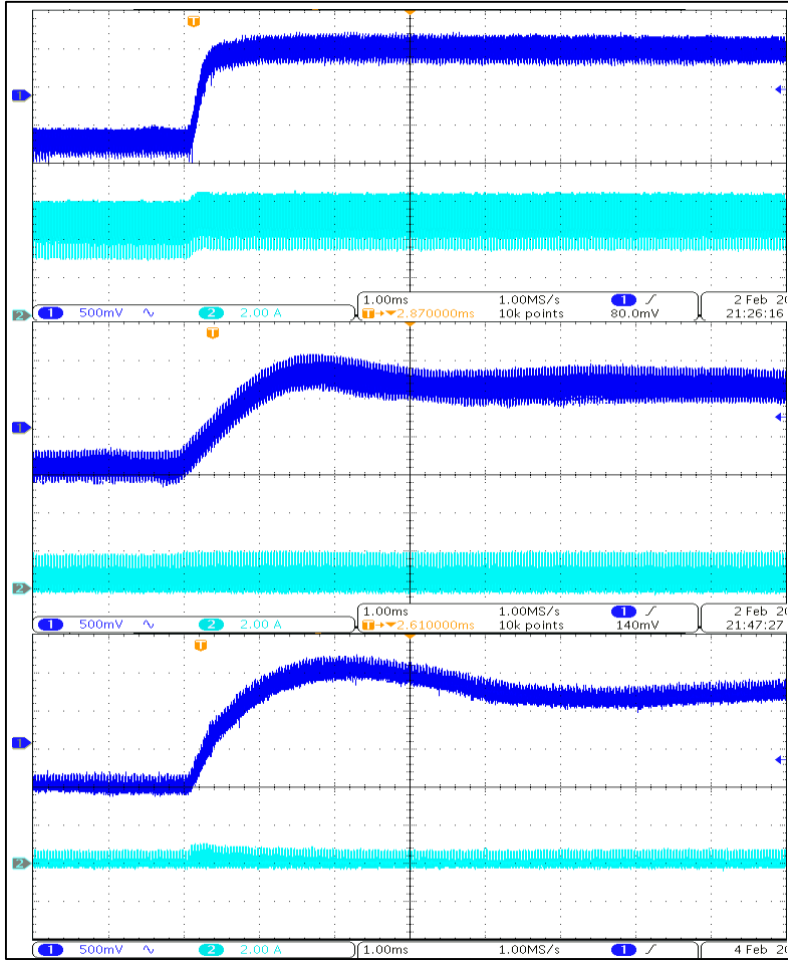
Çizelge 4.5. Birinci yük senaryosunda benzetimde elde edilen sonuçlardan akım döngülerinin performansları

	Yükselme Zamanı (ms)			Oturma Zamanı (ms)			Aşım (%)		
Yük (Ω)	2,5	22	210	2,5	22	210	2,5	22	210
Önerilen Kontrolcü	0,42	0,84	0,87	0,63	2,3	3,6	0	9,5	19
PI Kontrolcü	0,72	5,1	13,8	1	7,5	18,2	0	0	0,8



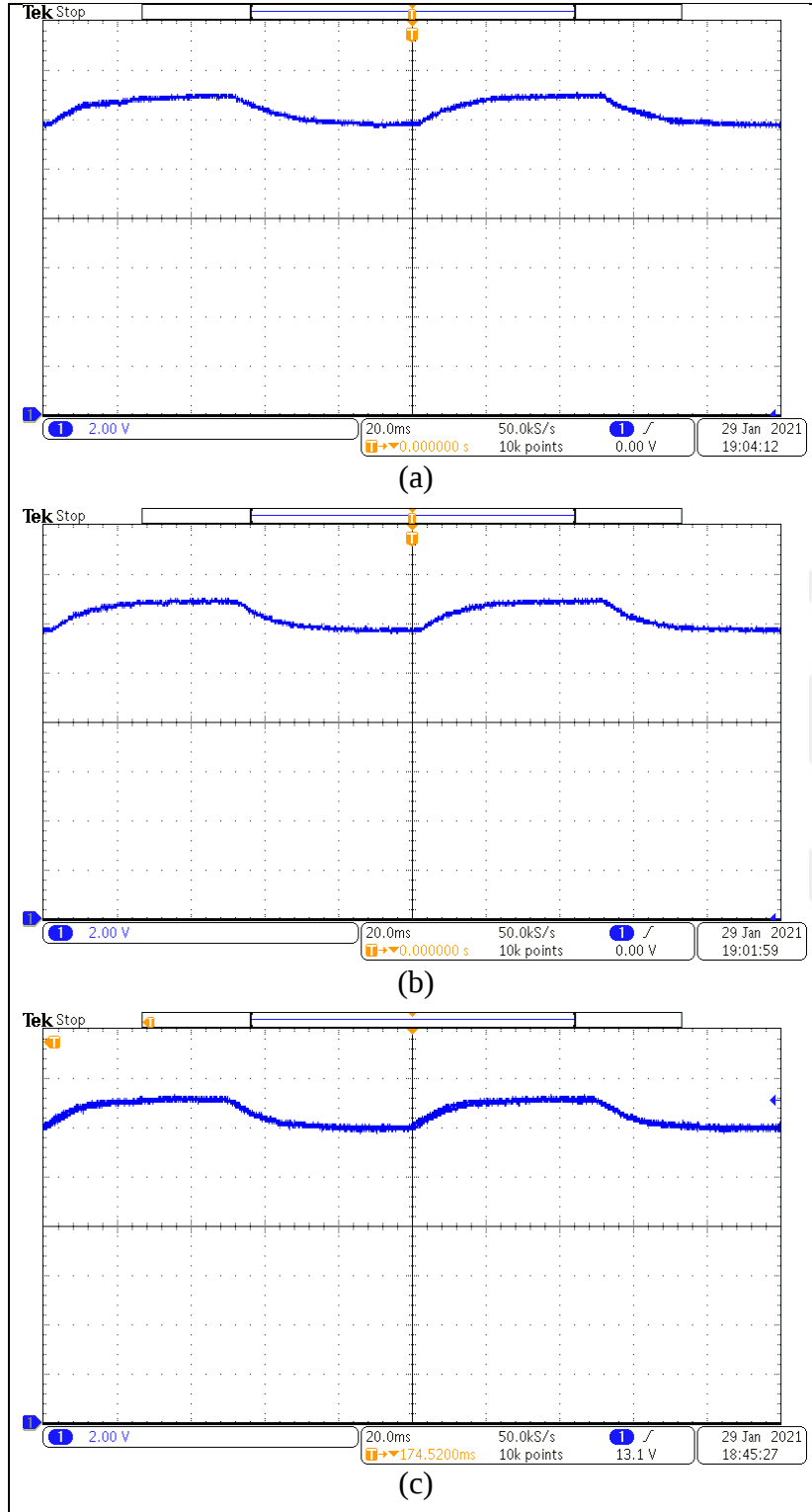
Şekil 4.25. Önerilen kontrolcünün uygulandığı deney düzeneği

PLECS benzetim ortamında uygulanan senaryonun aynısı Şekil 4.25'te verilen deney düzeneğinde de oluşturulmuştur. Önerilen akım kontrolcüsü eZdsp kartı üzerindeki ve TI TMS320F28335 sayısal sinyal işleme işlemcisiyle gerçekleştirilmiş ve 100W'lık tam köprü DA/DA dönüştürücü prototipine uygulanmıştır. Elde edilen osiloskop görüntüleri Şekil 4.26'teki görselde sunulmuştur. Verilen görselde dönüştürücünün çıkışına bağlanan yükler yukarıdan aşağıya doğru 2,5 Ω , 22 Ω ve 210 Ω 'dur. Görseldeki mavi çizimler çıkış gerilimini turkuaz çizgiler ise indüktör akımını göstermektedir. Bu yüklerdeki oturma zamanları ise sırasıyla yaklaşık 0.3ms, 1.2ms ve 3ms'dir. Şekil 4.26'te üstteki görselde dönüştürücü SİM'de çalışmaktadır ve yük akımı 4,8A'den 5,28A'e değişmektedir. Ortadaki görselde ise dönüştürücü KİM'de çalışmaktadır ve yük akımı 545mA'den 600mA'e değişmektedir. En alttaki görselde ise yine KİM'de çalışmakta ve yük akımı 57mA'den 63mA'e değişmektedir. Yük akımı 84'te birine düşmesine rağmen akım kontrolcüsünün hızı 10'da birine düşmüştür. Ayrıca Şekil 4.24 ve Şekil 4.26'te görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir.



Şekil 4.26. Yukarıdan aşağıya $2,5\Omega$, 22Ω ve 210Ω çıkış yükü için önerilen akım kontrolcüsünün referans değişimindeki tepkilerinin osiloskop görüntüleri (mavi çizimler çıkış gerilimini turkuaz çizimler ise çıkış akımını göstermektedir)

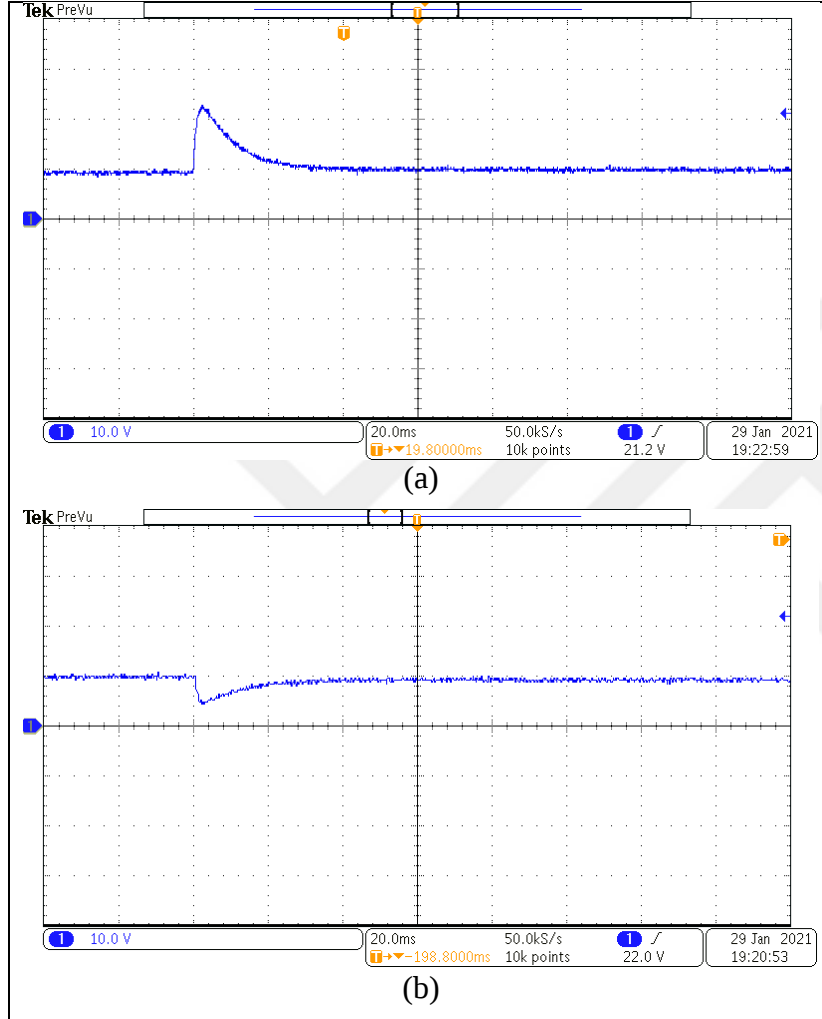
Önerilen akım kontrolcüsü ile birlikte gerilim kontrolcüsünün farklı yüklerdeki tepkisini gözlemlemek adına 12V'luk referans gerilimine periyodu 100ms, genliği ise 1,2V olan kare dalga eklenerek Şekil 4.26'daki görselde verilen osiloskop ekran görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.27 (a), (b) ve (c)'de çıkışa bağlanan yük sırasıyla $2,5\Omega$, 22Ω ve 210Ω 'dur. Çıkış yükü geniş bir aralıkta değişmesine rağmen kontrolcünün tepkisi aynı kalmıştır. Oturma süresi ise yaklaşık 30ms olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.27. Önerilen akım kontrolcüsü ile gerilim kontrolcüsünün farklı yüklerde referans değişimine tepkilerinin osiloskop görüntüleri. a) $2,5\Omega$, b) 22Ω , c) 210Ω

Önerilen kontrolcünün katsayıları yüke bağlı olarak değiştiğinden kontrolcünün yük değişimde nasıl tepki verdiğini gözlemlemek amacıyla çıkış geriliminin referans değeri 10V’de sabit tutulup çıkışa bağlı direnç ilk önce 10Ω ’dan 60Ω ’a artırılmış daha sonra

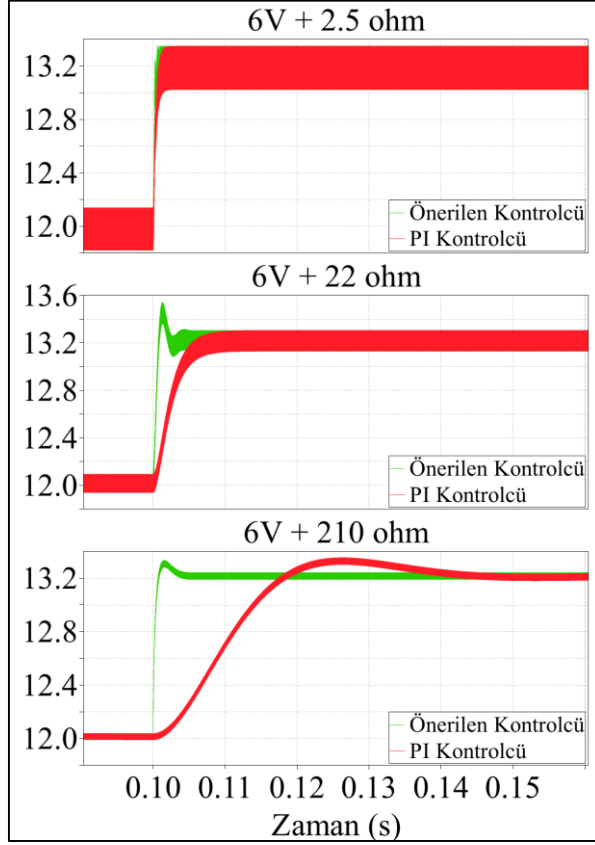
60 Ω 'dan tekrar 10 Ω 'a düşürülmüştür. Elde edilen osiloskop ekran görüntüleri sırasıyla Şekil 4.28 (a) ve (b)'de verilmiştir. Yük 10 Ω 'dan 60 Ω 'a değiştirildiğinde yaklaşık %120'lik bir aşım, 60 Ω 'dan 10 Ω 'a değiştirildiğinde ise %50'lik düşüm gözlenmesine rağmen oturma süresi 30ms olarak kalmıştır.



Şekil 4.28. Önerilen kontrolcünün yük değişine karşı tepkisi a) 10 Ω 'dan 60 Ω 'a b) 60 Ω 'dan 10 Ω 'a

İkinci yük senaryosunda önerilen akım kontrolcüsünün performansını değerlendirmek ve PI kontrolcü ile karşılaştırmak adına bir önceki benzetim çalışmasından farklı olarak dönüştürücünün çıkışına dirence seri 6V'lık bir kaynak eklenmiştir. Benzetimde akım referansının artışına karşın elde edilen çıkış gerilimleri Şekil 4.29'deki görselde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan Çizelge 4.6'te verilen karşılaştırma tablosu oluşturulmuştur. Bu senaryoda özellikle düşük yükte PI kontrolcünün hızı büyük oranda

düşerken önerilen kontrolcünün hızı eşdeğer direnci daha yüksek gördüğünden önceki senaryoya göre artmıştır.



Şekil 4.29. İkinci yük senaryosunda akım döngüsündeki PI ve önerilen kontrolcünün farklı yüklerdeki $t=0,1s$ 'de %20'luk referans değişimine tepkileri

Çizelge 4.6. İkinci yük senaryosunda benzetimde elde edilen sonuçlardan akım döngülerinin performansları

	Yükselme Zamanı (ms)			Oturma Zamanı (ms)			Aşım (%)		
Yük (6V + ... Ω)	2,5	22	210	2,5	22	210	2,5	22	210
Önerilen Kontrolcü	0,2	0,72	0,56	0,54	2	2,5	0	19	7,5
PI Kontrolcü	0,86	5,1	16	1,1	6,3	35	0	0	0,8



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

DA raylı sistemlerindeki kaçak akımlar çevresindeki özellikle boru hattı gibi toprağa gömülü metalik yapılarda korozyona neden olmaktadır. Literatürde bulunan kaçak akımları azaltmaya yönelik öneriler ray direncinin azaltılması, kaçak akım toplayıcı mat kullanımı, ray-toprak arası yalıtımın arttırılması, besleme istasyonlarının gerilimlerinin arttırılması, istasyonlar arasındaki mesafenin azaltılması, dönüş akımını paylaşması için fazladan ray eklenmesi ve kaçak akımları azaltmaya yönelik topraklama çeşitleri gibi pasif yöntemlerdir. Bu önleyici yöntemlerin bazıları raylı sistemin inşası sırasında tesis edilmesi gerekmektedir. Bazılarının ise sonradan tesis edilmesi büyük maliyetler doğurmaktadır. Ayrıca kaçak akımlar KK sistemine sahip yapılarda KK sisteminin verimliliğini düşürmekte ya da işlevsiz kılmaktadır.

Bu motivasyon ile ilk aşamada toprak 2 boyutlu direnç ağı olarak modellenmiş, ray ve boru hattı modele birer katman olarak eklenmiştir. Uzay olarak 550x550 boyutunda bir direnç ağı oluşturulup kenarlardaki bozulmalar nedeniyle uzayın 450x250 kısmındaki sonuçlar esas alınmıştır. Modellemede her iki düğüm noktası arasındaki uzaklık 10m olacak şekilde direnç değerleri belirlenmiştir. İki istasyonlu 1.5km'lik ray hattı uzayın tam ortasına boylamsal olarak yerleştirilmiş boru hattı da 200m yakınına paralel olarak eklenmiştir. Model bu şekilde oluşturulduktan sonra modeldeki düğüm noktalarının gerilimleri, matris boyutunun büyüklüğü nedeniyle yakınsamalı bir çözüm yöntemi ile elde edilmiştir. Oluşturulan model ve çözüm yöntemiyle rayın İDM noktalarında parça parça topraklandığı ve topraklanmadığı durum için BTG dağılımları elde edilmiştir. Oluşturulan senaryoda elde edilen sonuçlara göre rayın İDM noktalarında topraklanmasının BTG farkını %62 arttırdığı, RP'yi ise %36 düşürdüğü gözlemlenmiştir. En kötü durum senaryosu rayın parça parça topraklandığı durum olduğundan sonraki aşamalarda bu senaryo üzerinden devam edilmiştir. Ayrıca trenin her konumda aynı akımı çektiği varsayılarak farklı tren konularında BTG dağılımı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda tren istasyona yaklaştıkça BTG üzerindeki etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Raydan sızıp boru hattına yönelen kaçak akımların yönünü RP dağılımına ters bir potansiyel dağılım oluşturarak değiştirme hipotezini kanıtlamak için ray ve boru hattı arasına 29 farklı anot-katot prob diziliminde redresör veya redresörler yerleştirilmiştir. Hangi yerleşim

senaryosunun daha etkili sonuç verdiğini araştırmak adına her bir senaryoda BTG farkını minimize eden redresör akım ve gerilimleri optimizasyon kullanılarak elde edilmiştir. Redresörlü ve redresörsüz BTG dağılımının maksimum ile minimum noktaları arasındaki farkın oranı BO adı verilen performans parametresi üzerinden karşılaştırılmıştır. Tren konumunun %50’de olduğu durumda tek redresörlü prob yerleşimlerinden 3. Yerleşim senaryosu %79,6 ile en iyi BO değerini vermiştir. Tren konumunun %20’de olduğu durum için ise %39’luk BO ile 3. Yerleşim senaryosu en iyi sonucu vermiştir. Tek redresör ile tren konumunun %20’de olduğu durumda yeterince iyi BO elde edilemediğinden redresör sayısı ikiye çıkarılmıştır. İki redresörlü prob yerleşimlerinden 22. Yerleşim tren pozisyonunun %50’de olduğu durumda %85’lik BO sonucunu verirken, tren pozisyonunun %20’de olduğu durumda %75,7’lik BO sonucunu vermiştir. Üç ve daha fazla redresör prob yerleşimlerinde ise 27. Yerleşim tren konumunun %50 ve %20’de olduğu durumda sırasıyla %82 ve %72’lik BO sonuçlarını vermiştir. Denenen 29 farklı yerleşim senaryosunda maliyet/fayda açısından en iyi sonucu 22. Yerleşim vermiştir.

Optimizasyon sonucunda elde edilen redresör akım ve gerilimleri bu yöntemde kullanılacak redresörün hem çift yönlü enerji akışına hem de çift yönlü polaritede çıkış verebilen bir topoloji yapısına sahip olması gerektiğini göstermiştir. Bu sebeple redresör olarak iki aşamalı bir topoloji seçilmiştir. İlk aşamada şebeke gerilimi daha düşük gerilimlere düşük frekanslı trafo ile indirilip doğrultan tam köprü yapısı tercih edilmiştir. İkinci aşamada ise elde edilen DA’dan istenilen DA’ya dönüşüm için tam köprü DA/DA dönüştürücü tercih edilmiştir. Tren konumu ile çektiği akımın anlık ve ani değişmesi sebebiyle önerilen yöntemdeki redresör çıkış geriliminin de adaptif bir biçimde değişmesi gerekmektedir. Bu sebeple tam köprü DA/DA dönüştürücünün kontrolcüsünün hızlı tepki vermesi gerekmektedir. Tezin ikinci aşamasında doğru bir kontrolcü tasarımı için ilk önce tam köprü DA/DA dönüştürücünün tüm çalışma bölgelerindeki iletim modlarının küçük işaret devre modelleri iki farklı yük senaryosunda elde edilmiştir. Elde edilen devre modellerinden kontrol sinyalinin çıkış gerilimine ve çıkış akımına olan TF’leri türetilmiştir. Kontrolcü tasarımını etkilemeyen bazı parametreler ihmal edilerek TF’ler sadeleştirilmiştir. Dönüştürücünün hem KİM’deki hem de SİM’deki TF’leri incelenerek dönüştürücünün tepkisini etkileyen faktörler analiz edilmiştir. Bu analizler ışığında katsayıları yüke bağlı olarak değişen ardışık PI kontrolcü yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen kontrolcü ile ardışık PI kontrolcü ilk önce PLECS benzetim ortamında karşılaştırılmıştır. Birinci yük senaryosunda önerilen yöntemdeki iç akım döngüsünün yerleşme zamanı yük direnci $2,5\Omega$ ’dan 210Ω ’a

çıkıldığında 6 katına çıkarken ardışık PI kontrolcünün iç akım döngüsünün yerleşme zamanı 18 katına çıkmıştır. İkinci yük senaryosunda ise yine yük direnci $2,5\Omega$ 'dan 210Ω 'a çıktığında 5 katına çıkarken ardışık PI kontrolcünün iç akım döngüsünün yerleşme zamanı 35 katına çıkmıştır. Önerilen kontrolcünde iç akım döngüsünün hızı değişim gösterse de dış gerilim döngüsünün hızı 30ms'de sabit kalmıştır. Benzetim sonuçlarını ile deneysel sonuçları karşılaştırmak adına 100W'lık tam köprü DA/DA dönüştürücü tasarlanmış ve önerilen kontrolcü dijital olarak dönüştürücüye uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçlarının birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen kontrolcünün katsayıları yüke bağlı olarak değiştiğinden yük değişiminde vereceği tepkiyi gözlemlemek adına çıkış yükü anlık arttırılmış daha sonra da anlık olarak düşürülmüştür. Her iki durumda da referans değere 30ms'de oturduğu gözlemlenmiştir.

Tezin ilk aşamasında yapılan modelleme çalışmasında tek tren olduğu varsayımı ile çalışmalar yapılmıştır. Ancak gerçekte gidiş ve dönüş yönü için rayda birden fazla tren bulunabilmektedir. Bu da farklı BTG dağılımlarının oluşacağı anlamına gelmektedir. İlerleyen çalışmalarda bu senaryolarda göz önünde bulundurularak yerleşim senaryolarının performansı analiz edilecektir. Ayrıca CDEGS veya ANSYS gibi benzetim ortamlarında benzer senaryolar koşturularak yöntem ve modelin doğruluğu ispatlanacaktır. Daha sonra ise önerilen yöntem benzer problemlerin yaşandığı doğalgaz boru hatlarında denenecektir.



KAYNAKLAR

- Abate, F., Di Caro, D., Di Leo, G. and Pietrosanto, A. (2020). A networked control system for gas pipeline cathodic protection. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 69(3), 873-882.
- Adedeji, K. B., Ponnle A. A., Abe B. T. and Jimoh A. A. (2015). *Effect of increasing energy demand on the corrosion rate of buried pipelines in the vicinity of high voltage overhead transmission lines*. 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), Ankara, 299-303.
- Basham, D. L., Wright, J. W., Ferguson, K. I. and Moy, G. W. (2003). Operation and maintenance of cathodic protection systems. *Unified Facilities Criteria (UFC)*, Department of Defence USA, 1-220.
- Bilgiç, S. (2008). Korozyon eğitimi ve öğretimi. *Korozyon Dergisi*, 16(1-2), 3-7.
- Bindra, A. (2014). Pulsewidth modulated controller integrated circuit: Four decades of progress [A Look Back]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 1(3), 10-44.
- Boteler, D.H. (2004). *Telluric currents and their effect on cathodic protection of pipelines*. Corrosion 2004, Huston Texas, 4050.
- Brenna, M., Dolara, A., Leva, S. and Zanineli, D. (2010). *Effects of the DC stray currents on subway tunnel structures evaluated by FEM analysis*. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, USA, 1-7.
- Cai, Y., Irving, M. R. and Case, S. H. (1995). Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 142(5), 323-328.
- Candan, M. Y. and Ankarali, M. M. (2020). *Extended kalman filter based state and parameter estimation method for a buck converter operating in a wide load range*. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3238-3244.
- Cao, A. L. (2010). *Protection against stray current corrosion of buried metals pipeline*. Doctor thesis, Chongqing University College of Material Science and Engineering.
- Charalambous, C. (2005). *Stray current control and corrosion limitation for dc mass transit systems*. Doctor thesis, Manchester University Faculty of Engineering and Physical Sciences.
- Charalambous, C., Cotton, A. I. and Aylott, P. (2008). A simulation tool to predict the impact of soil topologies on coupling between a light rail system and buried third-party infrastructure. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(3), 1404-1416.
- Chattopadhyay, S. and Das, S. (2006). A digital current-mode control technique for DC/DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(6), 1718-1726.

- Cheng, K. Y., Yu, F., Lee, F. C. and Mattavelli, P. (2013). Digital enhanced V2 type constant on time control using inductor current ramp estimation for a buck converter with low-ESR capacitors. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(3), 1241-1252.
- Demirel, B. and Yalçın, H. (2013). Investigation of the telluric effects arising along the cathodically protected natural gas pipeline between Karadeniz Ereğli and Düzce. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 21, 758-765.
- Dolara, A., Foiadelli, F. and Leva, S. (2012). Stray current effects mitigation in subway tunnels. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2304-2311.
- Durham, M. O. and Durham R. A. (2005). Cathodic protection. *IEEE Industry Applications Magazine*, 11(1), 41-47.
- Erickson, R. W. and Maksimović, D. (2004). *Fundamentals of power electronics*. (2. Baskı). Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 185-256.
- Garcera, G., Pascual, M. and Figueres, E. (2001). Robust average current-mode control of multimodule parallel dc-dc PWM converter systems with improved dynamic response. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 48(5), 995-1005.
- Heidersbach, R. (2010). *Metallurgy and corrosion control in oil and gas production*. (1. Baskı). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 132-150.
- Hill, R. J., Brillante, S. and Leonard, P. J. (1999). Railway track transmission line parameters from finite element field modelling: Series impedance. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 146(6), 647.
- Jabbehdari, S. and Mariscotti, A. (2015). *Distribution of stray current based on 3-dimensional earth model*. 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, Aachen, Germany, 1-6.
- Kim, I. and Nho, E. (2005). Module type switching rectifier for cathodic protection of underground and maritime metallic structures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(1), 181-189.
- Klechka, E.W. (2004). Corrosion protection for offshore pipelines. *NIST Special Publication*, 1035(3), 132-144.
- Koch, G.H., Thompson, N.G., Moghissi, O., Payer, J.H. and Varney, J. (2016). International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study. *NACE International*. Houston. 2-6.
- Koç, T. ve Yalçın, H. (1995). *Korozyon ve katodik koruma*. (1. Baskı). Ankara: YY yayıncılık, 90-100.
- Lahyani, A., Venet, P., Grellet, G. and Viverge, P.-J. (1998). Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switch mode power supply. *IEEE Trans. Power Electron.*, 13(6), 1199-1207.

- Lim, S. F. and Khambadkone, A. M. (2010). A simple digital DCM control scheme for boost PFC operating in both CCM and DCM. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 47(4), 1802-1812.
- McCullum, B. and Logan, K. H. (1916). Leakage of currents from electric railways, U.S. Bureau of Standards, Washington, D. C..
- Nagat, M.K., Gawad, A., Adel, Z., Dein, E., Magdy, M. (2015). Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions. *Electric Power Systems Research*, 127, 297-306.
- Ogunsola, A., Sandrolini, L. and Mariscotti, A. (2015). Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric–electromechanical modeling and traffic simulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5431-5441.
- Oh, JS. and Kim, JD. (2004). A new protection strategy of impressed current cathodic protection for ship. *KSME International Journal*, 18, 592-596.
- Ölmez, T. ve Kilic, B. (2020). Metro AC CER güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellenmesi. *Demiryolu Mühendisliği*, 12, 22-33.
- Pham, K. D., Thomas, R. S. and Stinger, W. E. (2001). *Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system*, IEEE/ASME Joint Railroad Conference, Toronto, Canada, 141-160.
- Qian, T., Wu, W. and Zhu, W. (2013). Effect of combined output capacitors for stability of buck converters with constant on-time control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(12), 5585-5592.
- Saggini, S., Ghioni, M. and Geraci, A. (2004). An innovative digital control architecture for low-Voltage, high-current DC-DC converters with tight voltage regulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(1), 210-218.
- Schwalm, L. H. and Sandor, J. G. (1969). Stray current the major cause of underground plant corrosion. *Materials Perform*, 6, 31-36.
- Shaffer, R. E., Smith, A. V. and Fitzgerald III, J. H. (1981). Stray earth current control Washington, DC metro system. *Materials Perform.*, 20(4), 143.
- Singer, S. (1990). Realization of loss free resistive elements. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 37(1), 54-60.
- Smedley, K. M. and Cuk, S. (1995). One-cycle control of switching converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10(6), 625-633.
- Van Der Broeck, C. H., De Doncker, R. W., Richter, S. A. and Bloh, J. V. (2015) Unified control of a buck converter for wide-load-range applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4061-4071.

- Vorperian, V. (1990). Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch Part I: Continuous conduction mode. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 26(3), 490-496.
- Vorperian, V. (1990). Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch Part II: Discontinuous conduction mode. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 26(3), 497-505.
- Wang, C., Liang, X. and Freschi, F. (2020). Investigation of factors affecting induced voltages on underground pipelines due to inductive coupling with nearby transmission lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1266-1274.
- Wang, G. and Pei, X. X. (2014). Three dimensional finite element modeling and analysis of different subway tunnels stray current fields. *Open Electr. Electron. Eng. J.*, 8(1), 124-132.
- Xu, S., Li, W. and Wang, Y. (2013). Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(8), 3569-3580.
- Yu, J. G. and Goodman, C. J. (1992). *Stray current design parameters for DC railways*. IEEE/ASME Joint Railroad Conference, Atlanta, USA, 19-28.
- Yu, Z., Liu, L., Wang, Z., Li, M. and Wang, X. (2019). Evaluation of the interference effects of HVDC grounding current on a buried pipeline. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5.



GAZİ GELECEKTİR..