



**SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR UYDULARI İÇİN YENİ BİR İNDİRİCİ
VE YÜKSELTİCİ TİPTE GÜÇ ÇEVİRGEÇİNİN TASARIMI VE
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

İsmail Gencer TULAY

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 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.

İsmail Gencer TULAY

12/07/2021

SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR UYDULARI İÇİN YENİ BİR İNDİRİCİ VE YÜKSELTİCİ TİPTE GÜÇ ÇEVİRGEÇİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

İsmail Gencer TULAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında uydu elektriksel güç alt sisteminde kullanılmak üzere bir güç dönüştürücü tasarlanmıştır. Uydu uygulamaları için bir uydunun aktif hizmet ömrü temel olarak pil ömrüne bağlıdır. Şarj ve deşarj akımları, pillerin kullanım ömürlerinde önemli bir role sahiptir. Bu nedenle pil içeren güç kaynaklarında kullanılan dönüştürücüler, pillerin darbeleri akımlarını engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu çalışmada önerilen güç dönüştürücü, sentetik açıklıklı radar yükü aktifken enerjiyi pilden süperkapasitöre aktarmak için kullanılmaktadır. Buna göre pilin ömrü ve dolayısıyla uydunun ömrü uzayacaktır. Pillerin darbeleri akımlarını önlemenin yanı sıra önerilen dönüştürücü, herhangi bir kararsızlık sorunu yaşamadan giriş gerilimini artırma ve azaltma yeteneğine de sahiptir. Weinberg ve Buck dönüştürücülerden oluşan sistemin çalışma performansı PSim yazılımı kullanılarak analiz edilmiş, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla çalışma doğrulanmıştır. Güvenilirlik ve verim ile ilgili analizler sunulmuştur. Sonuçlar dönüştürücünün uydu uygulamaları için gerekli koşulları sağlayarak çalıştığını göstermektedir.

Bilim Kodu : 90522
Anahtar Kelimeler : Uydu elektriksel güç alt sistemi, pil, süperkapasitör
Sayfa Adedi : 108
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KARAKAYA
İkinci Danışman : Prof. Dr. İres İSKENDER

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NEW STEP UP AND DOWN POWER
CONVERTER FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR SATELLITES

(Ph. D. Thesis)

İsmail Gencer TULAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

Within the scope of the study, a power converter was designed to be used in the satellite electrical power subsystem. For satellite applications, the active service life of a satellite mainly depends on its battery life. Charge and discharge currents play an important role in the lifetime of batteries. For this reason, converters used in power supplies containing batteries should be designed to prevent pulsed currents of batteries. The power converter proposed in this study is used to transfer energy from the battery to the supercapacitor while the synthetic aperture radar load is active. Accordingly, the life of the battery and therefore the life of the satellite will be extended. Besides preventing the pulsating currents of the batteries, the proposed converter is also capable of increasing and decreasing the input voltage without experiencing any instability issues. The operating performance of the system consisting of Weinberg and Buck converters was analyzed using PSim software, and the study was confirmed with the results obtained from the experimental studies. Analyses of reliability and efficiency are presented. The results show that the converter works by providing the necessary conditions for satellite applications.

Science Code : 90522

Key Words : Satellite electrical power subsystem, battery, supercapacitor

Page Number : 108

Supervisor : Dr. Lecturer Mehmet KARAKAYA

Co-Supervisor : Prof. Dr. İres İSKENDER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanlarım sayın Prof. Dr. İres İSKENDER'e ve Dr. Öğretim Üyesi Mehmet KARAKAYA'ya, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocalarım Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR'e ve Prof. Dr. Hamit ERDEM'e, çalışma boyunca çeşitli konularda desteklerini aldığım Murat HARMANDALI'ya, Dr. Buğra KOCAMAN'a, Dr. Ali MAMİZADEH'e, Burak AĞCA'ya, hayatının hiçbir döneminde ilgisini, sevgisini eksik etmeyen annem Yurdağül ŞANAL'a ve abim Cumhuriyet Murat TULAY ile değerli ailesine, 2211-Yurt İçi Lisans Üstü Burs Programı kapsamındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. UYDULARDA KULLANILAN GERİLİM ARTTIRAN VE GERİLİM AZALTAN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	9
2.1. Weinberg Dönüştürücü	19
2.1.1. Dönüştürücü çalışma prensibi	19
2.1.2. Weinberg dönüştürücü ile ilgili analizler	22
2.1.3. Weinberg dönüştürücü küçük işaret modelinin elde edilmesi	26
2.2. Gerilim Düşüren Dönüştürücü	28
2.2.1. Gerilim düşüren dönüştürücü çalışma prensibi.....	28
2.2.2. Gerilim düşüren dönüştürücü ile ilgili analizler.....	29
2.2.3. Gerilim düşüren dönüştürücü küçük işaret modelinin elde edilmesi	32
3. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÖNERİLEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ	34
3.1. Önerilen Güç Dönüştürücünün Çalışma Prensipleri ve İlgili Denklemler.....	35
3.2. Önerilen Güç Dönüştürücünün Tasarımı	42
3.3. Önerilen Güç Dönüştürücü ile İlgili Benzetim Çalışmaları	43
3.4. Önerilen Güç Dönüştürücünün Güvenilirlik Analizi	73

Sayfa

4. ÖNERİLEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	105



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli pil teknolojilerinin karşılaştırılması.....	16
Çizelge 2.2. Weinberg dönüştürücü parametreleri ($V_i = 82$ V için)	23
Çizelge 2.3. Weinberg dönüştürücü parametreleri ($V_i = 100$ V için)	25
Çizelge 2.4. Gerilim düşüren dönüştürücü parametreleri ($V_i = 20$ V için)	30
Çizelge 2.5. Gerilim düşüren dönüştürücü parametreleri ($V_i = 30$ V için)	31
Çizelge 3.1. Benzetim donanım parametreleri	43
Çizelge 3.2. Önerilen devrenin kontrol katsayıları.....	43
Çizelge 3.3. Belirtilen dönüştürücülerin güvenilirliklerinin karşılaştırılması	74
Çizelge 4.1. Prototip donanım parametreleri	75
Çizelge 4.2. Endüktör-transformatör çiftine ait parametreler.....	76
Çizelge 4.3. Önerilen dönüştürücünün Weinberg kipi için verim değerleri	84
Çizelge 4.4. Önerilen dönüştürücünün Buck kipi için verim değerleri.....	84
Çizelge 5.1. Belirtilen güç dönüştürücülerin karşılaştırılması.....	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Genel SAR sistem mimarisi blok diyagramı.....	3
Şekil 1.2. Piller ve süperkapasitörlerin enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması	5
Şekil 1.3. Önerilen mimarinin blok şeması.....	6
Şekil 2.1. Elektriksel güç alt sistemi işlevleri.....	10
Şekil 2.2. Çeşitli görev süreleri ve güç değerlerine göre uydularda yer alan enerji kaynakları.....	11
Şekil 2.3. Uydularda kullanılan güç düzenleme mimarileri	13
Şekil 2.4. Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi	14
Şekil 2.5. Weinberg dönüştürücü	19
Şekil 2.6. Q_1 ve D_2 'nin iletimde, Q_2 ve D_1 'in kesimde olduğu durum	20
Şekil 2.7. Q_1 ve Q_2 'nin kesimde olduğu durum.....	21
Şekil 2.8. PSim programı kullanılarak oluşturulan Weinberg dönüştürücü devre şeması.....	23
Şekil 2.9. Çizelge 2.2'deki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği	24
Şekil 2.10. Çizelge 2.2'deki verilere göre topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri.....	24
Şekil 2.11. Çizelge 2.3'teki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği.....	25
Şekil 2.12. Çizelge 2.3'teki verilere göre topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri	25
Şekil 2.13. Gerilim düşüren dönüştürücü.....	29
Şekil 2.14. PSim programı kullanılarak oluşturulan gerilim düşüren dönüştürücü devre şeması	30
Şekil 2.15. Çizelge 2.4'teki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği.....	30
Şekil 2.16. Çizelge 2.4'teki verilere göre topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Çizelge 2.5'teki verilere göre çıkış gerilimi grafiği	32
Şekil 2.18. Çizelge 2.5'teki verilere göre topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri.....	32
Şekil 3.1. Weinberg dönüştürücü	34
Şekil 3.2. Buck dönüştürücü	34
Şekil 3.3. Önerilen güç dönüştürücü	35
Şekil 3.4. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg çalışma kipinde S1 anahtarının iletimde olduğu durum	36
Şekil 3.5. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg çalışma kipinde S1 ve S2 anahtarlarının kesimde olduğu durum.....	37
Şekil 3.6. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının iletimde olduğu durum	39
Şekil 3.7. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının iletimde olduğu durumda transformatör sargılarından geçen akımlar	40
Şekil 3.8. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının kesimde olduğu durum.....	41
Şekil 3.9. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının kesimde olduğu durumda transformatör sargılarından geçen akımlar.....	41
Şekil 3.10. Süperkapasitör modeli.....	44
Şekil 3.11. $V_i = 60$ V için elde edilen tepkiler (Buck kipi için)	45
Şekil 3.12. $V_i = 40$ V için elde edilen tepkiler (Weinberg kipi için).....	45
Şekil 3.13. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	46
Şekil 3.14. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	46
Şekil 3.15. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	47
Şekil 3.16. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)	48
Şekil 3.18. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)	48
Şekil 3.19. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)	49
Şekil 3.20. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)	49
Şekil 3.21. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	50
Şekil 3.22. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için).....	50
Şekil 3.23. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	51
Şekil 3.24. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	51
Şekil 3.25. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	52
Şekil 3.26. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	52
Şekil 3.27. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)	53
Şekil 3.28. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)	53
Şekil 3.29. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)	54
Şekil 3.30. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)	54
Şekil 3.31. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	55
Şekil 3.32. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için).....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 3.33. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	56
Şekil 3.34. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)	56
Şekil 3.35. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	57
Şekil 3.36. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	58
Şekil 3.37. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)	58
Şekil 3.38. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)	59
Şekil 3.39. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	59
Şekil 3.40. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	60
Şekil 3.41. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)	60
Şekil 3.42. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için).....	61
Şekil 3.43. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	61
Şekil 3.44. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)	62
Şekil 3.45. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	62
Şekil 3.46. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	63
Şekil 3.47. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)	63
Şekil 3.48. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)	64

Şekil	Sayfa
Şekil 3.49. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	64
Şekil 3.50. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	65
Şekil 3.51. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)	65
Şekil 3.52. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için).....	66
Şekil 3.53. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Kipler arası geçiş durumu)	66
Şekil 3.54. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)	65
Şekil 3.55. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi).....	68
Şekil 3.56. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)	68
Şekil 3.57. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi)	69
Şekil 3.58. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)	69
Şekil 3.59. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi).....	70
Şekil 3.60. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)	70
Şekil 3.61. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi).....	71
Şekil 3.62. Kompanze edilmiş durum için Bode grafiği (Buck çalışma kipi için).....	72
Şekil 3.63. Kompanze edilmiş durum için Bode grafiği (Weinberg çalışma kipi için).	72
Şekil 4.1. Önerilen güç dönüştürücü ve çalışma kipi belirlenmesi	76
Şekil 4.2. Önerilen güç dönüştürücünün Buck kipi için kontrol katı	77
Şekil 4.3. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipi için kontrol katı	78

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Kontrollü çalışmayı doğrulamak için hazırlanan PCB.....	79
Şekil 4.5. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve anahtarlama sinyalleri (Buck çalışma kipi)	79
Şekil 4.5. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve anahtarlama sinyalleri (Buck çalışma kipi)	79
Şekil 4.6. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve anahtarlama sinyalleri (Weinberg çalışma kipi).....	80
Şekil 4.7. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve S3 anahtarına ait V_{SD} gerilim ve I_D akım sinyalleri (Buck çalışma kipi – yük geçişi).....	80
Şekil 4.8. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış akımları ve S3 anahtarına ait V_{SD} gerilim ve I_D akım sinyalleri (Buck çalışma kipi – yük geçişi).....	81
Şekil 4.9. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve giriş ve çıkış akımları (Weinberg çalışma kipi – yük geçişi).....	81
Şekil 4.10. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş akımı ve S1 ve S2 anahtarlama sinyalleri ve S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı (250 W için)	82
Şekil 4.11. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş akımı ve S1 ve S2 anahtarlama sinyalleri ve S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı (125 W için)	82
Şekil 4.12. $V_i = 60$ V'tan $V_i = 40$ V'a geçiş için giriş ve çıkış gerilimleri ile giriş ve çıkış akımları	83
Şekil 4.13. $V_i = 40$ V'tan $V_i = 60$ V'a geçiş için giriş ve çıkış gerilimleri ile giriş ve çıkış akımları	83
Şekil 4.14. Önerilen dönüştürücünün Weinberg kipi için verim analizi.....	85
Şekil 4.15. Önerilen dönüştürücünün Buck kipi için verim analizi	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Ah	Amper-saat
A_L	Manyetik geçirgenlik katsayısı
Hz	Hertz
I	Akım
I_{mp}	Azami güç noktası akımı
I_{sc}	Kısa devre akımı
KHz	Kilohertz
kW	kilowatt
mh	milihenry
MHz	Megahertz
ms	milisaniye
P	Güç
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Paralel direnç
V	Volt, gerilim
V_{mp}	Azami güç noktası gerilimi
V_{oc}	Açık devre gerilimi
W	Watt
µs	mikrosaniye
µh	mikrohenry
Λ	Hata oranı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternatif Akım
AGNT	Azami Güç Noktası Takibi
BoL	Ömür Başı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DC	Doğru Akım
DET	Doğrudan Enerji Transferi
DoD	Deşarj Derinliği
EoL	Ömür Sonu
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMF	Elektromotiv Kuvvet
ESA	European Space Agency
FIT	Zamana Bağlı Hata Oranı
GP	Güneş Paneli
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
IC	Entegre Devre
IMU	Atalet Ölçü Birimi
INS	Atalet Seyrüsefer Sistemi
MHD	Magnetohidrodinamik
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
NMOS	n-Tipi Metal Oksit Yarı İletken
PCB	Baskı devre Kartı
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türevsel
PDD	Pil Deşarj Düzenleyici
PMOS	p-Tipi Metal Oksit Yarı İletken
PŞD	Pil Şarj Düzenleyici
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RTG	Termoelektrik Jeneratör
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar
SC	Süperkapasitör
SEPIC	Single Ended Primary Inductor Converter
SR	Şönt Regülatör
TE	Termoelektrik

1. GİRİŞ

Ülkelerin gelişme ve ilerleme yolundaki çabalarını destekleyecek itici güçlerden biri, bilim ve teknolojinin çeşitli alanlarında elde ettikleri yetenek seviyeleridir. Bu açıdan, belki de en yüksek payı sağlayabilecek olan savunma, havacılık ve uzay sektörü hakkında; gerçekleştirilen harcamalar yönünden ülke ekonomilerine olumlu veya olumsuz anlamda katkıları bakımından çeşitli görüşler yer almaktadır. Bu görüşler; genellikle ülkelerin gelişmişlik düzeyi, üretici olup olmamaları vb. gibi durumlara bağlı olarak bazı ülkeler için ekonomik ilerlemeyi arttıracakları gerekçesiyle olumlu; üretici olmayan, düşük ve orta gelir düzeyli bazı ülkeler için ise ekonomik büyümeyi azaltacakları gerekçesiyle olumsuz yönde aktarılmaktadır [1].

Savunma, havacılık ve uzay sanayii en ileri teknolojilerin kullanıldığı, sürekli yeni teknolojilere ihtiyaç duyan stratejik bir alandır. Bu alanda gerçekleştirilen teknolojilerin sonradan sivil uygulamalarda da kullanıldığı, böylece ülkelerin sosyoekonomik ilerlemesine dolaylı ancak büyük oranda katkısının bulunduğu göz ardı edilemeyecek bir olgudur. Bu nedenle, ülkemiz açısından yapılması zorunlu olan savunma harcamaları yapılırken amaç; teknolojik yeteneklerimizi arttırmaya çalışmak, mali ve sosyal kazanımlar sağlayabilmek için savunma sanayii alanında ülkemizi üreten duruma getirmek olmalıdır. Buradaki üreten durum hem teknoloji, hem de ürün üretilmesi anlamındadır [1].

Havacılık ve uzay çalışmaları alanında uydular, ülkelerin gelişmişliği, güvenliği, bilim ve teknolojiadaki ilerlemeleri, ekonomik gelişmişlikleri, gelecek planları konusunda fikir veren, bu teknolojilerin üretilmesinde görev alan kurum ve kuruluşların net bir vizyon ve misyon sahibi olması gereken, son teknolojileri yoğun olarak kullanan sistemlerdir. Savunma, haberleşme, bilimsel araştırmalar gerçekleştirme gibi çeşitli amaçlara yönelik yapılan uydular uzay ortamında, herhangi bir arıza veya hata durumunda yer müdahalesi mümkün olmadan görevini yerine getirebilecek şekilde üretilmelidir. Bu üretim sürecinde uydunun görev yapacağı yörünge, görev ömrü, ağırlığı gibi birçok parametre değerlendirilip en kötü durum senaryoları göz önünde bulundurularak uydu sistemi ve bu sistemi meydana getiren her bir alt sistem optimal şekilde tasarlanmalıdır [2].

Uydu faaliyetleri sivil, ticari, ulusal güvenlik, bilim alanlarında gerçekleştirilmektedir. İnsanlı görevler, meteoroloji, teknoloji kalifikasyonu, eğitim sivil; uydu iletişimi ve yayıncılık, küresel seyrüsefer, yer gözlem, uzay turizmi ticari; askeri uydu haberleşmesi, yer gözlem, küresel seyrüsefer, balistik savunma ulusal güvenlik; astronomi ve uzay bilimleri, yer bilimleri ise bilim alanında gösterilen faaliyetlerdendir [2]. Hem ticari, hem de ulusal güvenlik alanlarının faaliyetlerinden olan yer gözlem faaliyetleri, uygulamanın gereksinimlerine göre optik uydular ve radar uyduları ile gerçekleştirilir [3].

Radar, radyo dalgalarının yardımıyla menzilin tespiti ve belirlenmesi anlamına gelir. Radar anteni hedefe bir radyo dalgası sinyali gönderir, daha sonra hedefe isabet eden sinyal geri saçılır ve nihayetinde geri saçılmış sinyal bir alıcı tarafından alınır. Radar sinyali yüksek frekans üretici tarafından üretilir ve geri saçılmış sinyal hassas bir alıcı tarafından alınır. Modern radar cihazları genellikle bir hedefin geri saçılmış sinyalinden daha fazla veri sağlayabilir. Bir radar cihazının en önemli özelliği mesafeyi harcanan zamana göre belirlemesidir [4, 5].

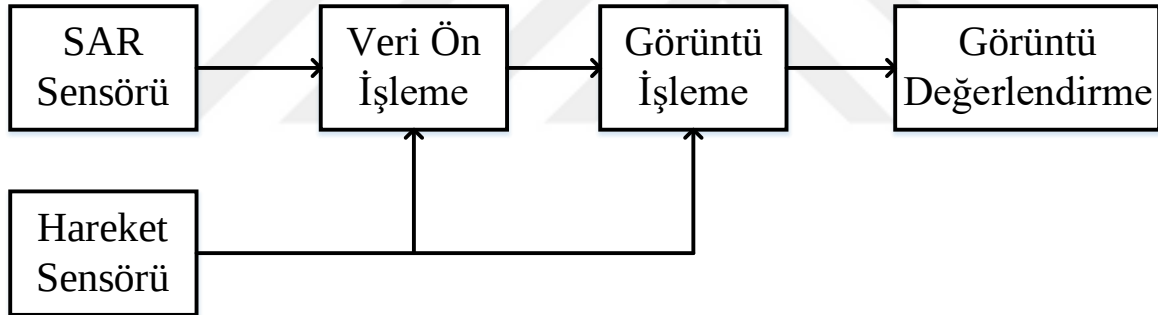
Radar sistemi elektromanyetik darbeleri yüksek güçle iletir ve geri saçılmış sinyalin yankılarını sırayla alır. İletilen darbe dünyanın yüzeyi ile etkileşime girer ve bunun çok az bir kısmı alıcı antene geri saçılır. Geri saçılmış sinyalin genliği ve fazı, görüntü nesnesinin fiziksel (geometri, pürüzlülük...) ve elektriksel özelliklerine (geçirgenlik...) bağlıdır [6-8].

Görüntü standart açıklıklı radarlarda hedef alan sürekli olarak aydınlatılarak oluşturulur. Menzil yönü çözünürlüğü vericinin sinyalinin bant genişliği ile orantılı olsa da, azimut yönü çözünürlüğü radar anteninin uzunluğu ile ilgilidir. Bu olgular nedeniyle, daha iyi bir azimut çözünürlüğü sağlamak için taşınamayan, pratik olmayan bir anten kullanılması gerekmektedir [9, 10].

Uçuş yönünde yüksek çözünürlük sağlamak için imkansız uzunluklara sahip radar antenlere ihtiyaç vardır. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) tekniği, uçuş yönünde daha küçük bir anten kullanarak daha yüksek çözünürlükte görüntü elde etmenin bir yöntemidir. Radar anteni istenilen açıklık boyunca hareket ettirilerek belirli zaman aralıklarında ölçümler alır ve bu verileri eş zamanlı toplayarak sentetik açıklık oluşturur. Bu şekilde oluşturulan sentetik açıklığın büyüklüğü gerçek fiziksel açıklığa eşittir [11].

SAR sistemlerinin avantajı, atmosferik ve aydınlanma koşullarından etkilenmeksizin tüm hava koşullarında yüksek çözünürlük özelliği sayesinde kullanılabilmesidir. Askeri ve sivil uygulamalar, üç boyutlu arazi profilinin çıkarılması, tarım alanları ile ilgili uygulamalar, orman ve buzul alanları ile ilgili önlem alınması kullanım alanlarından birkaçıdır [12-14].

Genel SAR sistem mimarisi Şekil 1.1'deki şemadaki gibi sunulabilir. SAR sensöründen sağlanan işlenmemiş SAR verisi hareket sensöründen sağlanan verilerle birlikte veri ön işleme birimine gönderilir. Bu birimde görüntü elde edilmeden önce işlenmemiş veri üzerinde birincil seviye sarsıntı telafisi gerçekleştirilir. Sonrasında ön işlemeden geçen veri, odaklanmış SAR görüntüsünün elde edilebilmesi için görüntü işleme ünitesine gönderilir. Görüntü işleme birimi arta kalan sarsıntı telafisinin yapıldığı, gürültünün azaltıldığı ve görüntünün hedef tespit ve tasnife hazır hale getirildiği birimdir. Son olarak görüntü değerlendirme birimi, hedef tespit ve tasnifinin yapıldığı, uygulamaya yönelik bilgilerin kullanıcıya aktarıldığı birimdir [11].



Şekil 1.1. Genel SAR sistem mimarisi blok diyagramı

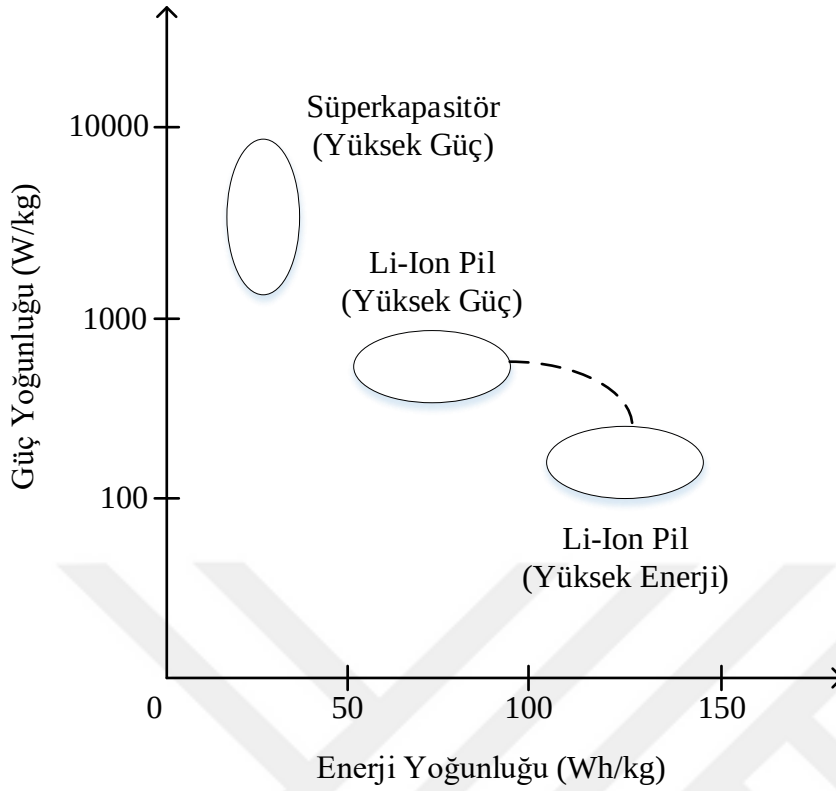
Literatürdeki çalışmalarda çeşitli uydularda, görevinin özelliğine göre SAR yükü en az 3,2 W, en çok 2280 W (5 W, 15 W, 32 W, 100 W, 159 W, 500 W, 1000 W, 1585 W değerleri görülmüştür.) gücünde, görev süresi en az 5 μ s, en çok 10 sn (16 μ s, 50 μ s, 7 sn değerleri görülmüştür.), SAR yükünün giriş gerilimi en az 28 V, en çok 70 V (42 V, 50 V değerleri görülmüştür.) değerlerindedir [15-41].

Uydu çalıştığı sürece elektrik enerjisinin üretimi, depolanması, işlenmesi, denetimi ve belirlenen gerilim bandında tüm bara ve yük ekipmanına bu enerjinin dağıtımından ve arıza durumlarında güç sistem bileşenlerinin korunmasından elektriksel güç alt sistemi sorumludur. Güç alt sisteminin temel elemanları güneş panelleri, güneş paneli açılma

elektroniği, güneş paneli sürücüleri, pil, şönt regülatörü, pil şarj ve deşarj regülatörleri, yük anahtarlama elemanları, sigortalar ve dağıtım hatlarıdır [42].

Pil, uydu güç alt sistemleri için şarj edilebilir bir enerji depolama bileşenidir. Bir pil fotovoltaik panelin sağladığı güçle doldurulur ve yüke enerjisini ihtiyaç oranında aktarır. Şu anda, lityum iyon piller, lityum iyon pil hücresi gerilimi nikel kadmiyumun üç katı olduğundan, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, nikel kadmiyumdan daha düşük kendi kendine deşarj oldukları için, nikel kadmiyum hücreli olanlardan ziyade uydularda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ömürlerinin uzun, çalışma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve hafıza etkisi görülmemesinden dolayı birçok uygulamada yararlanılır. Uydunun ömrü, uydu uygulamaları için geniş çapta pilin ömrüne bağlıdır [43].

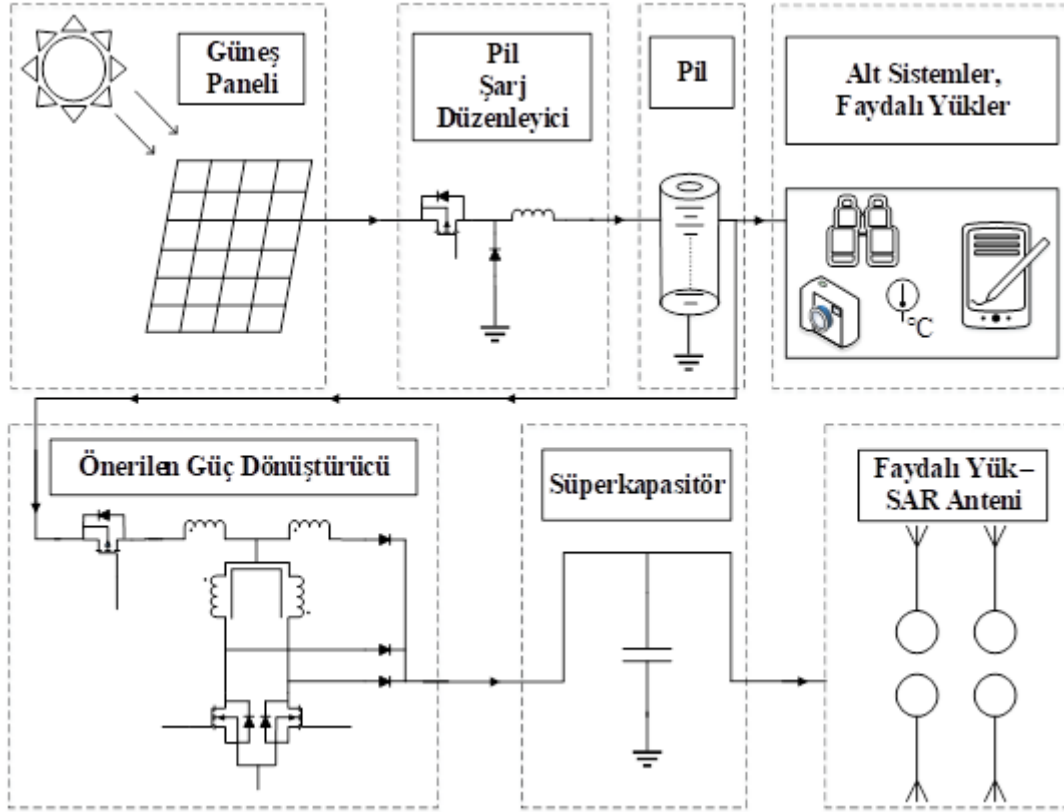
Süperkapasitörler elektrik enerjisini çift katmanları arasında elektrik alanı olarak depoladığından elektrik enerjisini depolamak ve aktarmak için şarj edilebilir piller gibi kullanılabilirler, ancak pillerden daha kısa bir sürede çok daha yüksek güç yoğunluklarına ulaşabilirler. Süperkapasitörlerde birim ağırlık başına depolanan enerji miktarı bir elektrokimyasal pilden çok daha düşüktür. Bu nedenlerden dolayı süperkapasitörler uzun süreli enerji depolama gereksinimleri için tercih edilmezler. Süperkapasitörlerin deşarj oranı, lityum iyon pillerden daha yüksektir; kendi kendine deşarj nedeniyle yük miktarlarının günde % 10-20 civarını kaybedebilirler. Piller enerji depolamakta daha üstünken süperkapasitörler anlık güç arzında daha çok tercih edilir [44, 45]. Piller ve süperkapasitörlerin enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması Şekil 1.2’de gösterilmiştir [46].



Şekil 1.2. Piller ve süperkapasitörlerin enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna göre karşılaştırılması

Güneş panellerinden elde edilen gerilim, pil şarj düzenleyicileri tarafından pilde depolanmakta olup geleneksel uydu güç alt sistemi mimarisindeki yüklerin ve uydu alt sistemlerinin enerjilenmesini sağlar. Ancak SAR yükü bulunduran uydularda, anlık yüksek güçlü uygulamalar için yüksek darbe akımları çekilmesi pilin ömrünün kısılmasına neden olur [47-49]. Süperkapasitörler pillerin yerini alamasa da uydu uygulamaları için tamamlayıcı bir enerji depolama bileşeni olarak kullanılabilirler. Süperkapasitörler çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne, yüksek verimliliğe ve çok hızlı şarj vedeşarj kapasitesine sahiptir. Aynı zamanda süperkapasitörün performansı zamana bağlı görülen yıpranmalardan daha az etkilenir ve en önemli özelliği özgül gücünün yüksek olmasıdır. Tüm bu özellikler, pil ile süperkapasitörün birlikte görev yaptığı hibrit bir sistemle güç arzını cazip kılar. Bu mimaride süperkapasitör, pil yerine anlık yüksek güç gereksinimlerini karşılamakta; böylece pil ömrü, dolayısıyla uydu ömrü uzatılmaktadır [50-63]. Elektrikli araçlar için yakıt hücresinin kullanıldığı aynı çalışma mantığına sahip olan yapı [45, 64]'te sunulmuştur. Bahsedilen mimarinin blok diyagramı Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Güneş panellerinden elde edilen gerilim, klasik uydu güç alt sistemi mimarisinde olduğu gibi bu mimaride de pil şarj düzenleyicileri vasıtası ile pilde depolanır.

Pil uydudaki yükler ve alt sistemler için gerilim arzını gerçekleştirirken pil ve süperkapasitör önerilen güç dönüştürücü üzerinden birbirine bağlanır. SAR yükü böylece süperkapasitör gerilimi ile beslenir.



Şekil 1.3. Önerilen mimarinin blok şeması

Süperkapasitör gerilimi, uydu görev durumuna göre pil gerilim değerinden daha düşük veya daha yüksek olabilir. Örneğin, SAR yükünün aktif olmasının ardından süperkapasitör gerilimi pil geriliminden daha düşükken, güneş panellerinden gerilim sağlanamayan tutulma dönemlerinde pil gerilimi süperkapasitör geriliminden daha düşüktür. Bu nedenle, giriş gerilimini arttırarak ve azaltarak pilden süperkapasitöre tek yönlü gerilim sağlanmalıdır. Literatür taramasından sonra, uydu güç alt sistemlerinde giriş geriliminin yükseltilmesi gerektiğinde Weinberg dönüştürücünün [65-90] ve giriş geriliminin düşürülmesi gerektiğinde Buck dönüştürücünün [91-94] kullanıldığı görülmüştür. Giriş gerilimini arttırmak ve azaltmak için başka güç dönüştürücü topolojileri önerilmiş olsa da [95-136] bu dönüştürücülerin yer aldığı uydu görevi belirtilmemiştir. Uzay uygulamaları kapsamında verimlilik, ağırlık, çalışma ömrü, uydunun maliyeti gibi parametrelerin etkilerinden dolayı güç dönüştürücüler konusunda çalışmaların yapılması önem

taşımaktadır. Klasik mimariye göre değişik çalışma durumlarında süperkapasitörü pil gerilimi ile besleyebilmek için Weinberg dönüştürücü ve Buck dönüştürücü birlikte kullanılmalıdır. Literatürdeki uydu uygulamaları için giriş gerilimini artırma ve azaltma özelliğine sahip bir güç dönüştürücü bulunmamaktadır. Uydu uygulamalarında yer alacak güç dönüştürücüler tüm çalışma koşullarında kararlı çalışmayı gerçekleştirmelidir [137, 138]. SEPIC'ten türetilen Weinberg dönüştürücü [135], giriş gerilimini yükseltebilir ve düşürebilir, ancak sağ yarı düzlem sıfırı bulundurmaktadır. Bu nedenle bu dönüştürücü, kararsızlıktan dolayı uydu uygulamaları için uygun değildir [139, 140]. Pili süperkapasitörden besleme durumu olmadığından çift yönlü Weinberg dönüştürücü [136] ve çift yönlü Buck dönüştürücü [112], SAR yükünü süperkapasitörden beslemek için uygun değildir. Literatürde giriş gerilimini yükseltme ve düşürme özellikli, süperkapasitöre pilden tek yönlü enerji sağlayacak, uydu uygulamaları için kararlı yapıya sahip bir güç dönüştürücü gerçekleştirilmemiştir.

Literatürdeki bu eksikliği ortadan kaldırmak amacıyla, ortalama güç gereksinimleri pilden ve SAR yükünün aktif olduğu tepe güç gereksinimleri süperkapasitörden güç sağlayan bir güç alt sistemi mimarisi için yeni bir güç dönüştürücü sunulmuştur. Sunulan güç dönüştürücünün yeniliği, giriş gerilimini yükseltme ve düşürme, süperkapasitörü pilden tek yönlü besleme ve uydu güç alt sistemleri kapsamında kullanılmak için kararsızlık problemleri görülmeden çalışma özelliği olarak özetlenebilir. Uydu uygulamaları için, kaynak geriliminin yükseltilmesi gerektiğinde Weinberg dönüştürücü ve kaynak geriliminin azaltılması gerektiğinde Buck dönüştürücü kullanılır. Önerilen güç dönüştürücü Weinberg dönüştürücü ve Buck dönüştürücüden türetilmiştir. Bu dönüştürücü pil ile süperkapasitör arasına yerleştirilecek olup kararsızlık problemi olmadan verilen gerilim aralığındaki giriş gerilimini arttırabilecek ve azaltabilecektir. Önerilen güç dönüştürücü, süperkapasitörü pilden tek yönlü besleyecektir. SAR yüklerini beslemede kullanılacak süperkapasitör gerilimi 50 V (± 2 V) ve girişteki pil gerilimi 40-60 V alınmıştır. Yük simülatörü, sunulan güç dönüştürücünün çıkışındaki süperkapasitörü modellemek için sabit akım kipinde kullanılmıştır. Sunulan güç dönüştürücünün güvenilirlik ve verim analizleri gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen analizlerin sonuçları klasik Weinberg dönüştürücü ile klasik Buck dönüştürücünün birlikte kullanıldığı durumun analizleri ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması belirtilen şekilde yapılandırılmıştır: Birinci bölümde konuya giriş yapıp genel anlamda uydular ve SAR yükü hakkında bilgiler verilmiş, yapılan çalışmanın amacı, önemi, yapacağı katkılar ve literatür incelemesi aktarılmıştır. İkinci bölümde uydularda giriş gerilimini arttırmak ve azaltmak için kullanılması önerilen literatürdeki güç dönüştürücüler incelenmiş, üçüncü bölümde gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında önerilen güç dönüştürücünün çalışma prensipleri açıklanmış, kararlı durum ve küçük işaret eşitlikleri çıkarılmış, farklı çalışma durumları için benzetim çalışmaları verilmiş, güvenilirlik ve verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde önerilen güç dönüştürücüye ait deneysel çalışma sonuçları sunulmuş, beşinci bölümde gerçekleştirilen çalışmalar yorumlanmış ve gelecekte yapılması hedeflenen çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

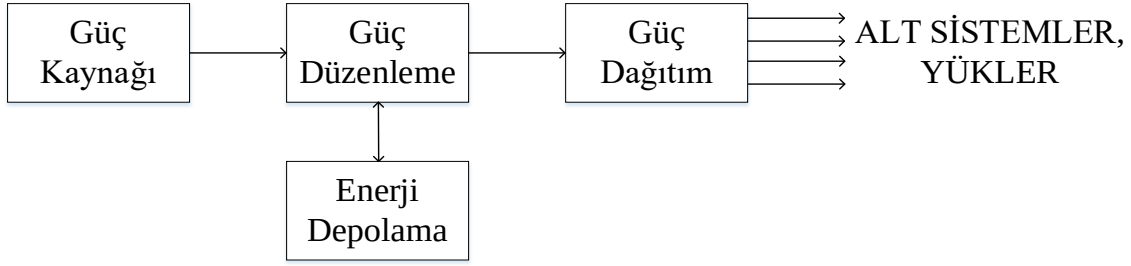
2. UYDULARDA KULLANILAN GERİLİM ARTTIRAN VE GERİLİM AZALTAN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Uydunun gerçekleştirmesi gereken görev, o uydunun konfigürasyonunu belirler. Uydunun görevinin tanımına bağlı olarak uzay, transfer yörüngesi ve yer kesimleri için genel sistem gereksinimleri tanımlanmalıdır. Genel sistem gereksinimleri, belirtilen ortamlar için uydu konfigürasyonuna temel olacak kriterleri temsil eder. Uzay ortamında görev yapan uydu, platform ve faydalı yük olmak üzere iki bölümden oluşur. Platform uydu alt sistemlerinden oluşan, uydu ekipmanlarının ve faydalı yüklerin entegre edildiği gövde; faydalı yük ise uydunun ömrü boyunca görevini yapmasını sağlayan anten, kamera, sensör gibi enstrümanlardır. Uydudaki alt sistemler uydunun icra edeceği göreve göre yapısı değişebilmekle birlikte elektriksel güç, haberleşme, yönelim, uydu yönetim, yapısal ve mekanik, ısı kontrol gibi işlevleri yerine getiren ekipmanlardan oluşur.

Uydu yapısal ve ilgili mekanizmalar uydu konfigürasyonunu önemli ölçüde etkiler ve ileriki aşamalarda büyük çapta etki edecek bir değişiklik genelde mümkün olmadığından bir projenin erken evrelerinde dondurulmuş olmalıdır. Aksi durumda uydu konfigürasyonu üzerinde en baştan çalışılması gereklidir.

Bir uydunun alt sistemleri birbirinden bağımsız olarak kabul edilemez. Birbirleriyle bağlantılı olup birbirlerini etkilerler. Bu duruma bağlı olarak sistemin optimize edilmesi, her bir alt sistemin optimizasyonunu içeren yinelemeli bir süreci gerektirir. Bir uydu görevinin başarılı olması, tüm alt sistemlerin birlikte sorunsuz çalışması ile mümkün olur.

Uydudaki tüm aktif alt sistemlerin ve bağlı birimlerin çalışması için elektrik gücüne ihtiyaç vardır. Uydunun elektriksel güç alt sistemi uydu çalıştığı sürece güç üretimi, enerji depolama, güç düzenleme, güç dağıtımından sorumludur. Belirtilen işlevler Şekil 2.1’de fonksiyonel bloklar olarak verilmiştir. Bir uydunun güç alt sistemi, birkaç watt ile 50 kW arasında değişen güç seviyelerindeki yükleri, 20 V ila 160 V arasında değişen gerilim değerine sahip bara üzerinden beslemektedir.



Şekil 2.1. Elektriksel güç alt sistemi işlevleri

Elektriksel güç alt sistemi, bağlı kullanıcılara güç arzını tüm görev aşamalarında ve uzayda karşılaşılan tüm çevresel kısıtlamalar altında, güvenli ve bakım gerektirmeyen bir şekilde sağlamalı, yerden operasyonel müdahale olmaksızın, olası tüm arıza koşullarında kullanıcılara güç sağlamayı otonom bir şekilde sürdürebilmelidir. Tüm bu gereksinimler, testlerle ve analizlerle doğrulanabilen tüm işlevlere sahip olacak şekilde tasarlanmış, kararlı çalışan ve güvenilir bir elektriksel güç alt sistemi gerektirir.

Uyduya elektrik enerjisi sağlamanın çeşitli yolları bulunmakta olup temel olarak iki yöntem tanımlanabilir:

1. Enerjinin dış ortamdan elde edilmesi
2. Uyduda bir enerji kaynağının taşınması

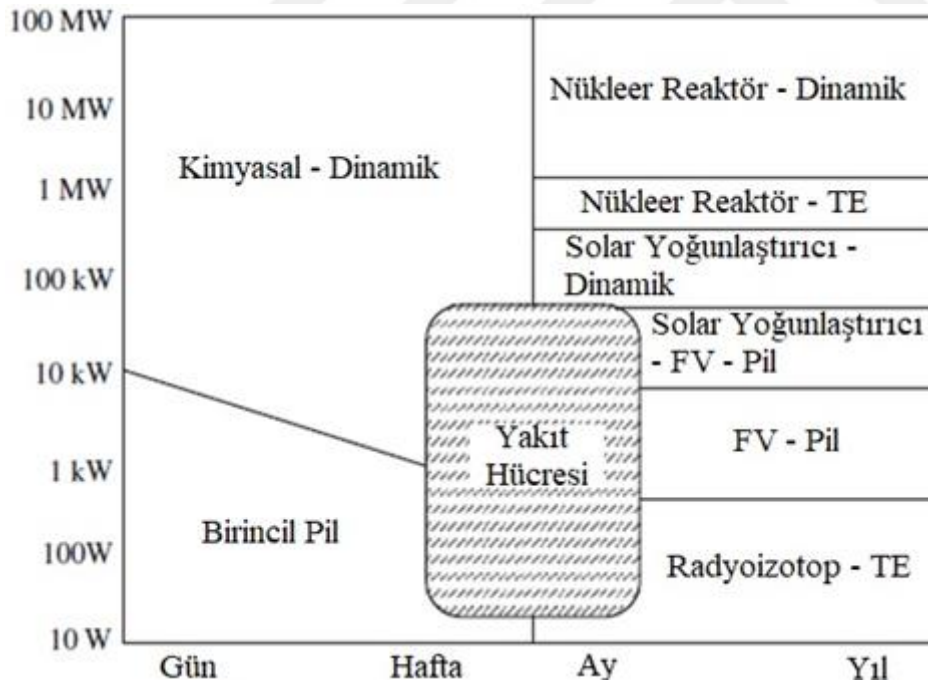
Enerji kaynağından elde edilen enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ya fotovoltaik hücrelerin fotovoltaik etkisi ile birlikte galvanik elemanlarda (piller veya yakıt hücreleri) kimyasal-elektriksel dönüşüm kullanılarak doğrudan, ya da güneş enerjisi veya nükleer enerjinin ısı enerjisiye dönüştürülmesiyle dolaylı yoldan gerçekleşir. Isıl enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü termal ya da termiyonik elemanlar vasıtasıyla yapılır. Üçüncü bir yöntem magnetohidrodinamik (MHD) üreteçler veya gazlı (Brayton çevrimi veya Stirling motoru) ve buharlı türbinler (Rankine çevrimi) bulunduran turboelektrik ısı güç düzenekleri kullanarak kinetik enerji yoluyla dinamik dönüşümdür.

Verimleri düşük olmasına rağmen, şimdiye kadar uydularda görev yapmış tüm nükleer enerji kaynakları, operasyonel güvenilirlikleri ve basit kullanımlarından dolayı

termoelektrik dönüştürücüler kullanmaktadır.

Güneş enerjisini ısı enerjisiye dönüştüren bir güneş dinamik sistemi, dönüştürücü ve enerji kaynağından oluşur. Bu tür sistemlerin yüzey-güç verim oranları (aydınlanan birim yüzey başına üretilen enerji) yüksek olsa da bu yöntem, fotovoltaik hücrelerin üretim maliyetlerindeki iyileşmelerden dolayı büyük çapta bir gelişme gösterememiştir.

Uydu görevleri genellikle yüklere güç sağlamak ve pilleri yeniden şarj etmek için, birçok yörünge döngüsünde görev yapabilecek şekilde elektrik gücü üretebilen güç kaynakları gerektirir. Fırlatma araçlarında, genellikle 1 saatten daha az (en fazla 4 saate kadar) güç sağlamaları gerektiği için güç kaynağı olarak birincil piller kullanılırken, görev periyodu haftalar, aylar veya yıllarla ifade edilen uydular için, pillerin enerji kapasitesi yetersiz kalacağından bu yaklaşım uygun değildir. Çeşitli görev süreleri ve güç değerlerine göre uydularda yer alan enerji kaynakları Şekil 2.2’de gösterilmiştir [47].



Şekil 2.2. Çeşitli görev süreleri ve güç değerlerine göre uydularda yer alan enerji kaynakları [140]

Uzay endüstrisindeki en önemli kilometre taşlarından biri yer yörüngesindeki uydular için güneş ışığını elektriğe dönüştüren fotovoltaik hücrelerin üretilmesidir. Günümüzde uydularda enerji üretimi için en yaygın kullanılan teknoloji fotovoltaiktir. Güneş

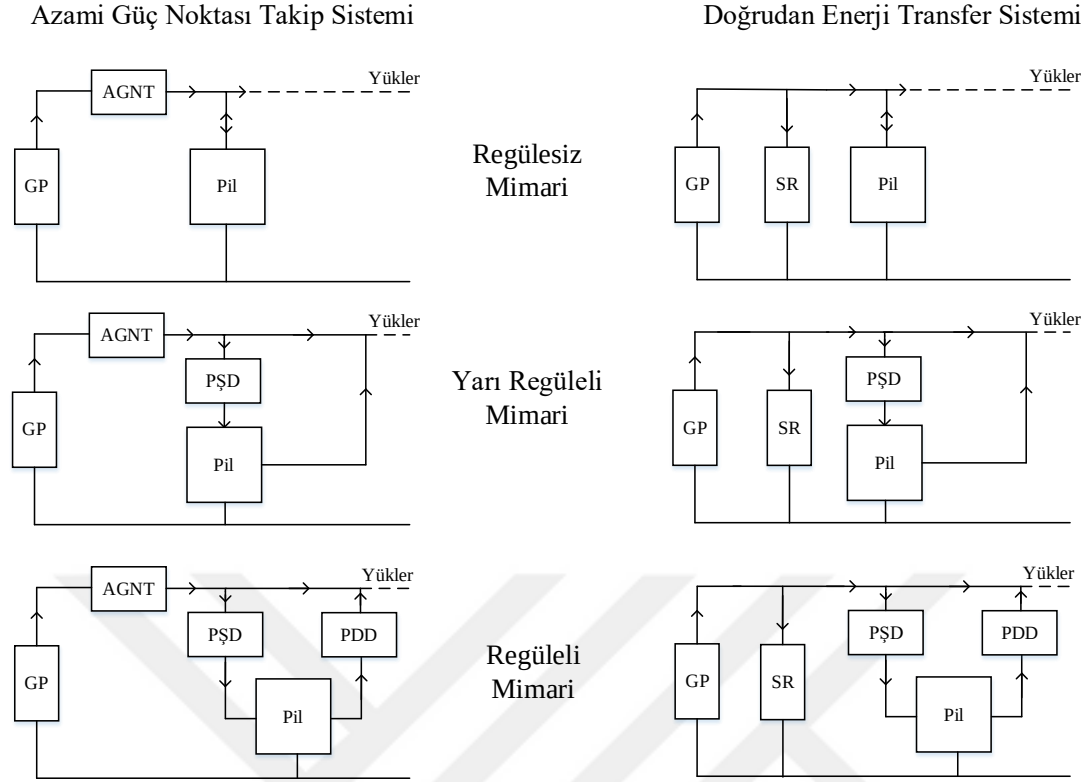
görülmeyişi zamanlar da dahil, yükün sürekli beslenmesi gereken uydularda güneş paneli ile birlikte yeniden şarj edilebilir bir pil kullanılmalıdır. Pil, güneş ışığı görüldüğü zamanlarda şarj edilir ve tutulma zamanlarında yüke güç sağlarken deşarj olur. Görevin gereklerine göre güç düzenleme ve kontrol devrelerinden yararlanılır.

Güç düzenleme ve dağıtımı için gerekli yapı, esas olarak elektriksel güç alt sistemi mimarisi tarafından belirlenir. Mevcut durumdaki güç düzenleme ve dağıtımı, güç barasına gerilimin sağlanma şekline göre regüleli ya da regülesiz bara üzerinden veya her iki baranın da özelliklerini birleştiren yarı regüleli veya hibrit güç sistemi üzerinden sağlanabilir. Uydu uygulamaları için genelde güneş panelleri tarafından üretilen gerilim, gereken gücü sağlamak üzere, doğrudan veya dolaylı enerji transferi ile barayı beslemektedir.

Baranın güç ihtiyacını karşılamak üzere güneş panelinden baraya doğrudan enerji aktarımında aşağıdaki düzenleme yöntemlerinden yararlanılır:

- Şönt regülasyonu (Güneş panelinde üretilen fazla gerilim, ilgili fotovoltaiik dizilerin kısa devre yapılmasıyla güvenli bir şekilde kesilmiş olur.)
- Seri regülasyon (Güneş panelinin gerilimi bir güç regülatörü vasıtasıyla barayı besler.)
- Dizi anahtarlama (Güneş panelindeki diziler, aktif birimlerin güç talebine göre anahtarlanıp baraya gerilim sağlar.)

Dolaylı enerji aktarımında regüle edilmiş güç DC / DC dönüştürücüler tarafından ana baraya aktarılır. Bu dönüştürücüler, bara güç ihtiyacını göz önüne alarak güneş paneli güç karakteristiğindeki uygun çalışma noktasına göre azami gücü sağlayacak şekilde kontrol edilir. Bu nedenle bu kontrol yapısına azami güç noktası takibi (AGNT) de denir [47]. Azami güç noktası takibi ve doğrudan enerji transfer sisteminin bara tiplerine göre nasıl şekillendiğini gösteren mimariler Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Uydularda kullanılan güç düzenleme mimarileri [141]

Regüleli bir birincil güç barası, güneş paneli güç dönüşümü, pil şarjı ve pil deşarjı için her çalışma kipinde kararlı çalışan ve sürekli aynı gerilime sahip bara gerilimi sağlayabilmek için etkin bir kontrol döngüsü gerektirir.

Regülesiz bara kavramı uyduya güç sağlayan güç alt sistemini basitleştirmekle birlikte bu sisteme bağlı yüklerin bara geriliminde $\pm\% 20$ değerindeki değişimlerden etkilenmeden çalışmalarını sürdürmeleri gerekmektedir.

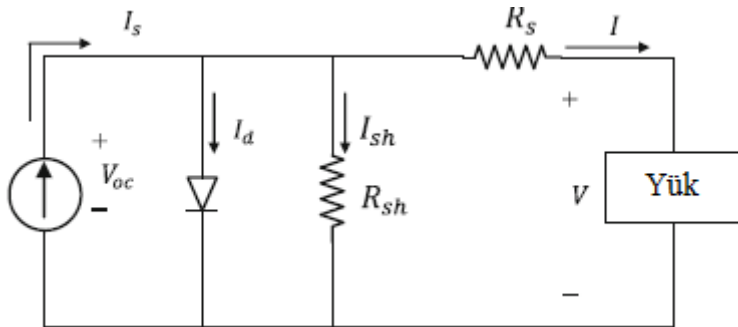
Yarı regüleli bara hem regüleli, hem de regülesiz baranın özelliklerinden bir kısmını taşır. Güneş panelinden yeterli gücün sağlanabildiği dönemlerde regüle edilmiş bara gerilimi elde edilir, güneş panelinden yeterli gücün sağlanamadığı durumlarda ise pilin gerilimi baraya verilir.

Fotovoltaik bir malzemede güneş ışığının elektrik enerjisine dönüşümünde, ışığı soğuran bir yarı iletken maddeye güneş ışığının gelmesi üzerine yük taşıyıcıları (elektron-delik çiftleri) oluşur ve yarı iletken ekleminde bu elektron ve delik çiftlerinin elektrik alan etkisiyle ayrılması sonucu fotoakım ve elektromotiv kuvvet (EMF) üretilir. Bu özellikteki

bir fotovoltaik hücre, yüzeyinin altında p–n eklemi bulunan geniş alanlı bir yarı iletken olarak karakterize edilebilir. Fotonların aydınlatması ile elektron–delik çiftleri ve p–n eklemi meydana gelir. p bölgesinde elektron ve n bölgesinde delik olarak adlandırılan azınlık taşıyıcıları, p–n eklem boyunca elektrik alan etkisiyle taşınırlar. Bunun sonucunda n bölgesi negatif ve p bölgesi pozitif yüklenerek fotoelektrik akım meydana getirir. Fotovoltaik bir hücre aşağıdaki parametrelerle karakterize edilir:

- Kısa devre akımı I_{sc} (gerilim $V = 0$; yük direnci $R = 0$)
- Açık devre gerilimi V_{oc} (sonsuz yük direncinde ($R = \infty$) akım $I = 0$)
- Azami güç noktası akımı I_{mp} (azami fotovoltaik hücre çıkış gücündeki akım)
- Azami güç noktası gerilimi V_{mp} (azami fotovoltaik hücre çıkış gücündeki gerilim)
- Doldurma faktörü $(I_{sc} \times V_{oc}) / (I_{mp} \times V_{mp})$

Şekil 2.4'te bir fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi görülmektedir. Hücre paralel bir diyoda bağlı sabit akım kaynağı olarak çalışmaktadır. R_s seri direnci malzemenin yapısına bağlı direnci temsil ederken, R_{sh} paralel direnci bağlantılar arasındaki kayıpları gösterir. R_{sh} değeri p-n eklem derinliğine, saflığına ve bağlantıdaki dirence bağlıdır. İdeal bir fotovoltaik hücrede $R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$ değerlerine sahipken 2,0 x 2,5 cm boyutundaki kaliteli bir silikon hücrede bu değişkenler $R_s = 0,05-0,10 \Omega$, $R_{sh} = 200-300 \Omega$ değerlerini almaktadır. R_s ve R_{sh} değişkenlerinin değeri sıcaklıkla değişmekte olup, artan sıcaklıkla birlikte hücre çıkış gerilimi ve verimi düşmektedir.



Şekil 2.4. Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi [48]

Farklı uydu görev gereksinimleri için farklı güneş paneli konfigürasyonları mümkün olsa da halihazırdaki konfigürasyonlar şunlardır:

- Doğrudan uydu gövdesinin dış yüzeyine monte edilen güneş panelleri
- Açılabilir döner paneller
- Açılabilir sabit paneller

Açılabilir döner paneller açılma eksenleri etrafında 360° dönebilmektedir. Bu şekilde mümkün olan azami güneş ışınlamını elde etmek ve bunu azami elektrik enerjisine dönüştürmek için fotovoltaiik panel düzleminin herhangi bir zamanda güneş ışınlarını dik olarak alabilmesi amacıyla yönlendirilmesine olanak sağlanır. Uydunun ihtiyaç duyduğu güç miktarı ve görev yapacağı yörüngenin özelliklerine göre belirtilen panel tiplerinden biri tercih edilebileceği gibi bu panel tiplerinin birbirleriyle kombinasyonları da kullanılabilir.

Enerji depolama bir uydunun elektriksel güç alt sisteminin ayrılmaz bir parçasıdır. Enerji açısından güneşe bağlı bir uyduda, tutulma dönemlerinde ve fotovoltaiik panel üzerinde düşük güneş ışıması görülen zamanlarda elektriksel yüklerini beslemek için enerjinin bir şekilde depolanmasına ihtiyaç duyulur.

Enerji depolama genelde bir pil aracılığı ile gerçekleştirilmekte olup volanlar ve yakıt hücreleri gibi enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı bazı uygulamalar da mevcuttur.

Bir pil elektrokimyasal hücrelerin seri ve paralel bağlantı kombinasyonları ile elde edilir. Pil hücrelerinin seri şekilde bağlanması ile gerilim artışı sağlanırken paralel şekilde bağlamak suretiyle beslenebilecek yük kapasitesi arttırılmış olur.

Uydularda enerji depolama sistemleri için kullanılan yeniden doldurulabilir piller temel olarak nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-hidrojen (NiH₂) ve lityum-iyon (Li-Ion) olmak üzere üç hücre teknolojisine dayanmaktadır. Uydu uygulamaları için NiCd teknolojisi son yıllarda önemini yitirmiş olup NiH₂ ve Li-Ion pil teknolojileri daha cazip hale gelmiştir. Çeşitli pil teknolojilerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir [48].

Çizelge 2.1. Çeşitli pil teknolojilerinin karşılaştırılması

Pil Hücresi	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
NiCd	1,2	50-80	2000	Var	-20, 50
NiMH	1,2	70-95	3000	Var	-20, 60
Li-Ion	3,6	118-250	5000	Yok	-40, 70
LiFePO ₄	3,2	120	>2000	Yok	-45, 70

Güneş panelinden ana baraya güç aktarımı için doğrudan enerji transferi (DET) ve azami güç noktası takibi (AGNT) yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Doğrudan enerji transferinde sistem elektroniği basit olup bunun etkisi ağırlık ve maliyette olumlu olarak görülmektedir. Ancak bu sistemde güneş paneli gerilimi ve güç çalışma noktası, ömür sonu (EoL) çalışma koşullarına göre ayarlanmalı ve optimize edilmelidir [47].

Sıcaklık değişiklikleri ve yanlış analiz edilen çalışma sıcaklıkları optimum güneş paneli çalışma noktasından sapmalara neden olur. Regülasyon sisteminin işlevi ve kontrol döngüsü kararlılığı, güneş panelinin parazitik çıkış kapasitansının etkisi nedeniyle, güneş panelinin elektrodinamik çıkış karakteristiğinden etkilenebilir. Güneş panelindeki şönt anahtarlama ile meydana gelen indüklenmeler ve parazitik güneş paneli kapasitanslarının etkileşimleri sonucu, kontrol döngüsünde yanıt süresi uzayabilir.

Azami güç noktası takibinde ise güneş panelinin azami güç noktası her koşulda elde edildiğinden güneş paneli geriliminden, akımından ve sıcaklıktan bağımsız olarak mevcut güneş paneli gücünden azami noktada yararlanılabilir. Böylece kurulu güneş paneli gücünden % 8 ila 25 oranında tasarruf etmek mümkündür. AGNT güneş yoğunluğunda güçlü değişikliklerin görüldüğü gezegenler arası görevler için önemli bir çözüm seçeneğidir.

AGNT’de kullanılan darbe genişlik modülasyonlu (PWM) DC / DC dönüştürücüler, güneş panelinin elektrodinamik davranışına büyük ölçüde duyarsızdır. Güneş panellerinin çıkış kapasitanslarının gelişen fotovoltaik hücre teknolojisi nedeniyle artması, güneş paneli hücreleri için daha ince yarı iletken tabakaların geliştirilmesi, yüksek güçlü uydular için daha yüksek fotovoltaik güce talebin artması nedeniyle bu durum gittikçe önem arz

etmektedir. Ancak AGNT’de DET’den daha fazla devre tasarımı çabası gerektiğinden bu durumun ağırlık ve maliyet üzerinde olumsuz etkisi görülür.

Güneş panelinden güç barasına enerji aktarımı ister DET, ister AGNT üzerinden olsun, güç dönüştürücüler (şönt düzenleyici, pil şarj düzenleyici, pil deşarj düzenleyici...) verimden dolayı yapılarında güç kaybı barındırdıkları için, güneş panelinin ve pilin boyutlandırması yapılırken bu kayıplar da dikkate alınmalıdır. Ayrıca güç dönüştürücüler tasarlanırken regülasyon döngüsünün kararlılığı ve elektromanyetik bozulmaların asgari düzeyde olması önem arz etmektedir.

Güç kullanan ekipmanların uygun önlemlerle güç barasındaki düşük ve aşırı gerilimlere karşı korunması gerektiği gibi, güç barası da aynı şekilde ekipmanların neden olduğu aşırı yüklere ve kısa devrelere karşı korunmalıdır. Bunu sağlayabilmek için her bir güç hattı, sigorta gibi pasif bir koruma elemanıya veya aktif bir elektronik akım sınırlayıcıyla korunmalıdır.

Uydu içinde güç dağıtımı için baraya bağlı ekipmanlar, asıl ve yedek birimler veya bunların kendi yardımcı güç kaynaklarına sahip işlevleri ayrık hatlar üzerinden bağlanmalı, her bir güç hattı, aynı boyutta özel bir dönüş hattı ile birlikte dağıtılmalı ve bükülmelidir. Güç kuşamı, en yüksek yük koşullarında da geçerli olacak şekilde, tüm birincil ve ikincil gücü minimum bozulma ve izin verilen kayıplarla dağıtmak üzere tasarlanmalıdır. 10 MHz’in altındaki frekanslarda çalışan ekipmanların güç dönüş hatları doğrudan ortak topraklama noktasına bağlanmalıdır. Uydudaki birincil güç dağıtım tasarımı, tek bir güç kaynağı ara birimi için en az iki komut verilebilir açma/kapama anahtarı içermelidir. Açma/kapama anahtarları tercihen yarı iletken anahtarlar olup alternatif olarak akım darbe röleleri de kullanılabilir [47].

Elektrik-elektronik ve elektromekanik yapıların çalışırken meydana getirdikleri elektromanyetik enerji ile veya ortamda mevcut bulunan elektromanyetik enerji ile karşılıklı şekilde etkilenmeleri ve bu etkileşim sonucunda yapıların çalışma performanslarında bozulma veya tamamen çalışamaz duruma gelmeleri “elektromanyetik girişim” (EMI) olarak tanımlanır. Elektromanyetik girişim, elektrik ve elektronik birimlerin performansında bozulmaya, istenmeyen tepkiler üretmesine veya hatalı çalışmasına neden olan radyo frekanslarında doğal veya insan kaynaklı her türlü bozucu

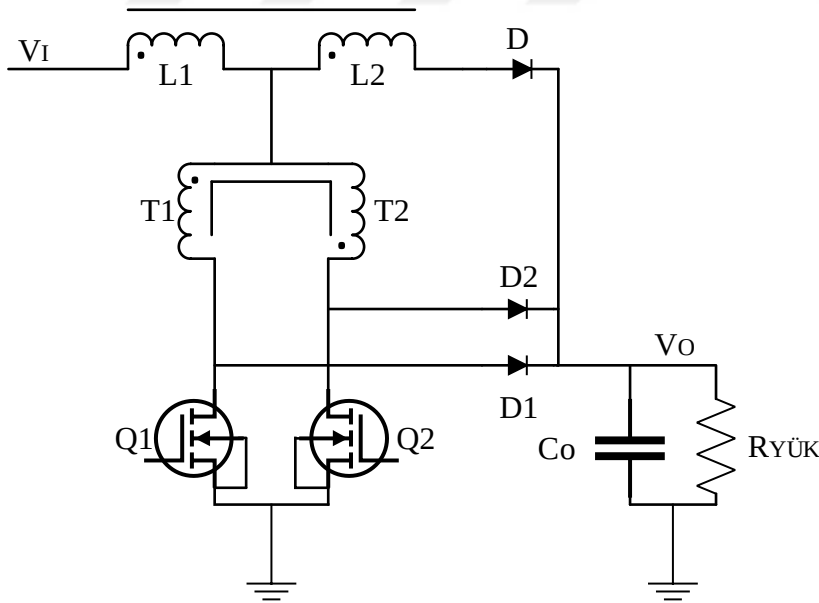
etki, işaret ve yayılımdır. Elektromanyetik uyumluluk (EMC) bir sistemin tüm elektriksel komponentlerinin görevlerini istendiği şekilde gerçekleştirmesidir. Çevresel tesirler ne olursa olsun, hareketin getirdiği şartlar ve süreçler ne olursa olsun bozulma oluşmamasıdır. Bir cihaz, diğer sistemlere girişimde bulunmuyorsa, diğer sistemlerin oluşturduğu girişime bağıksa, kendi içinde girişime neden olmuyorsa elektromanyetik uyumlu olduğu söylenebilir. Sistem; işletim performansı gereksinimlerini sağlayacak şekilde, kendi içinde elektromanyetik uyumlu olmalıdır. Bir alt sistem tarafından üretilen gürültü sistemin genel performansını bozmamalıdır. Uyumluluk, sistem seviyesinde test, analiz veya bunların her ikisi uygulanarak doğrulanmalıdır [142]. Uydu ve uzay çalışmaları kapsamında gerçekleştirilecek elektronik tasarımlarda elektromanyetik uyumluluk konusunda [143] numaralı referansta belirtilen kısıtlar dikkate alınmalıdır.

Uydulardaki güç düzenleme ekipmanında ihtiyaç duyulan gerilim değerinin elde edilebilmesi için farklı birimlerde hem giriş gerilimini arttıran, hem de giriş gerilimini düşüren güç dönüştürücülere ihtiyaç duyulmaktadır. Güneş panellerinin ürettiği gerilimin yeterli olmadığı zamanlarda gerekli bara geriliminin sağlanıp yüklerin beslenebilmesinden pil deşarj regülatörü sorumludur. Uydularda deşarj regülatörü olarak Weinberg dönüştürücünün [65-90], deşarj ve şarj regülatörünün aynı topolojide gerçekleştirildiği çift yönlü dönüştürücünün [95-116], sarmaşık yükselten dönüştürücünün [117-134] önerildiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Güneş panellerinde üretilen gerilim yüklerin ihtiyacından fazla olduğunda ise fazla güç, ihtiyaç olduğunda kullanılabilmek üzere pilde depolanır. Güneş panellerinden pile güç transferi pil şarj regülatörü ile gerçekleştirilir. Uydularda pil şarj regülatörlerinde temel olarak gerilim düşüren dönüştürücünün kullanıldığı çalışmalar [91-94] literatürde mevcuttur. Giriş gerilimini arttırmak ve azaltmak için başka güç dönüştürücü topolojileri de çeşitli çalışmalar kapsamında [135, 136] önerilmiştir. Belirtilen topolojilerden bu çalışmada temel oluşturan Weinberg dönüştürücü ve Buck dönüştürücünün çalışma prensipleri açıklanarak bu devrelerle ilgili gerçekleştirilen analizler ilgili alt bölümlerde sunulmuştur. Analizler Powersim Firması'na ait olup güç elektroniği devreleri benzetim çalışmalarında sıklıkla tercih edilen Psim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.1. Weinberg Dönüştürücü

2.1.1. Dönüştürücü çalışma prensibi

Uydu güç sistemlerinde, özellikle regüleli ana gerilim barasının pilden beslenmesi gerektiği durumlarda yükselten dönüştürücüler kullanılması gerekmektedir. Weinberg dönüştürücü bu amaçla 1974'ten beri kullanılan, özellikle güç anahtarlarının performanslarındaki yükselme ile gelişme gösteren bir topolojidir [65-90]. Bu dönüştürücü uydularla ilgili Olympus, Inmarsat 11, Eurostar 3000, Space Bus 4000, Space Station Freedom, Alphabus, Galileo System Test Bed (GSTB-V2/A), Galileo Satellite Test Bed-V2 (GSTB-V2/A) adlı projelerde kullanılmıştır [86-90]. Belirtilen dönüştürücü ile düşük dalgalığa sahip sürekli çıkış akımı elde edilebilir. Her anahtarlama periyodunda iki anahtarlama elemanının da birer kez anahtarlanması nedeniyle anahtarlama frekansı yüksektir [66]. Küçük çıkış filtresinden dolayı boyutu küçüktür. Verimi yüksektir. Çıkış dalgalık gerilimi, elektromanyetik arayüz ve yarı iletkenler üzerindeki azami akımlar düşüktür [84]. Şekil 2.5'te Weinberg dönüştürücü görülmektedir.



Şekil 2.5. Weinberg dönüştürücü

Dönüştürücünün iki temel çalışma durumu vardır.

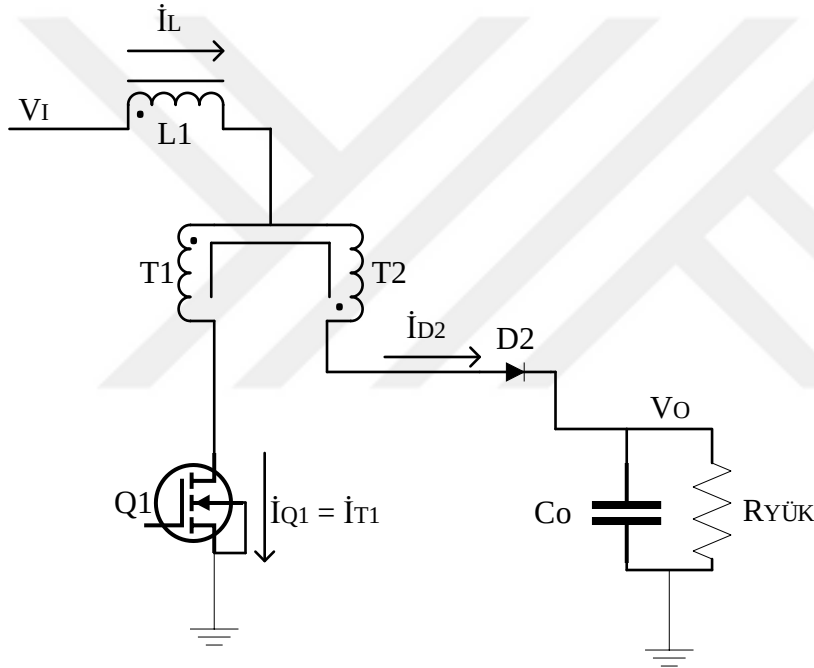
- Q_1 veya Q_2 'nin iletimde olmasına göre D_2 veya D_1 'in (sırası ile) iletimde olması

- Q_1 ve Q_2 'nin kesimde olması ile D 'nin iletimde olması

Çıkış gerilimi Q_1 ve Q_2 'nin PWM ile anahtarlması yoluyla elde edilir. PWM işlemi her anahtarlama periyodunda iki kez gerçekleştirilir, böylece PWM anahtarlama frekansı iki katına çıkmış olur. Bunun sonucunda filtreleyici bileşenlerin boyutu düşer.

İletim durumu

Q_1 ve D_2 'nin iletimde, Q_2 ve D_1 'in kesimde olduğu durum Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Q_1 ve D_2 'nin iletimde, Q_2 ve D_1 'in kesimde olduğu durum

Q_1 'in iletimde olduğu durumda transformatörün birinci sargısı T_1 üzerinden Q_1 transistörüne i_{T1} akımı akar. T_1 ve T_2 'nin aynı sarım sayısına sahip olduğu durumda T_2 üzerinden de aynı büyüklükte akım ($i_{Q1}=i_{T2}$) geçer. Q_2 kesimde olduğundan i_{T2} akımı D_2 üzerinden akarak çıkışa ulaşır. Böylece T_2 çıkışa bağlanmış olur. Bu durumda transformatörün orta ucundaki gerilim (V_{CT}), çıkış geriliminin yarısı olur.

$$[V_{CT}]_{ON}=V_O/2$$

(Eş. 2.1)

Giriş akımı i_{L1} , Q_1 'den ve D_2 'den geçen akımların toplamıdır.

$$i_L = i_{Q1} + i_{D2} \quad (\text{Eş. 2.2})$$

Q_1 ve D_2 'den geçen akım miktarları birbirine eşittir.

$$i_{Q1} = i_{D2} = i_o \quad (\text{Eş. 2.3})$$

$$[i_L]_{ON} = 2 [i_o]_{ON} \quad (\text{Eş. 2.4})$$

Bu durumda L_{ON} , iletim boyunca ana endüktörün endüktansı ($L_{ON} = L_1$) ve V_{L1} bu endüktörün üzerindeki gerilim olmak üzere

$$V_{L1} = V_I - V_O / 2 = L_{ON} (\Delta i_L / \Delta t) \quad (\text{Eş. 2.5})$$

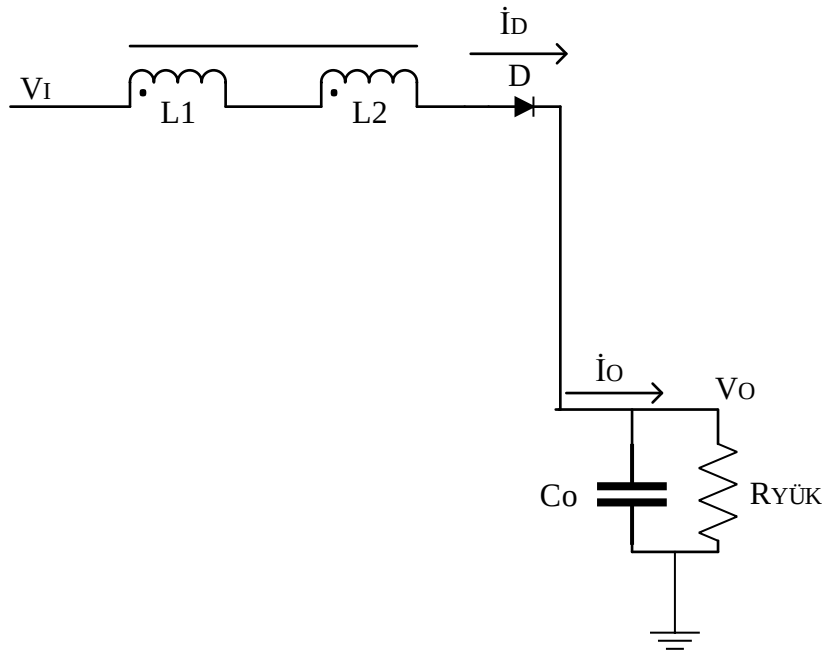
$$(\Delta i_L / \Delta t)_{ON} = (V_I - V_O / 2) / L_{ON} \quad (\text{Eş. 2.6})$$

$$(\Delta i_o / \Delta t)_{ON} = (1/2) (\Delta i_L / \Delta t)_{ON} = (2V_I - V_O) / 4L_{ON} \quad (\text{Eş. 2.7})$$

eşitliği elde edilir.

Kesim durumu

Q_1 ve Q_2 'nin kesimde olduğu durum Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Q_1 ve Q_2 'nin kesimde olduğu durum

D'nin iletimde olduğu durumda D'nin anodundaki ve çıkıştaki gerilimler birbirine eşittir. Endüktör sarım sayıları birbirine eşit ($N_{L1}=N_{L2}$) ve A_L manyetik geçirgenlik katsayısı olmak üzere

$$L_{OFF} = (N_{L1}+N_{L2})^2 A_L = 4 N^2 A_L = 4 L_{ON} \quad (\text{Eş. 2.8})$$

$$[i_L]_{OFF} 2 N = [i_L]_{ON} N \quad (\text{Eş. 2.9})$$

$$[i_O]_{OFF} = i_D = [i_L]_{OFF} = 1/2 [i_L]_{ON} \quad (\text{Eş. 2.10})$$

Çıkış akımı sürekli olduğundan

$$(\Delta i_L / \Delta t)_{OFF} = (\Delta i_O / \Delta t)_{OFF} = (V_I - V_O) / 4 L_{ON} \quad (\text{Eş. 2.11})$$

$$V_I - V_{CT} = V_{CT} - V_O \quad (\text{Eş. 2.12})$$

$$[V_{CT}]_{OFF} = (V_I + V_O) / 2 \quad (\text{Eş. 2.13})$$

eşitlikleri elde edilir.

Kalıcı durumda iletim süresince çıkış akımındaki artış, kesim süresince bu akımdaki düşüşe eşittir. Anahtarlama oranı D olmak üzere

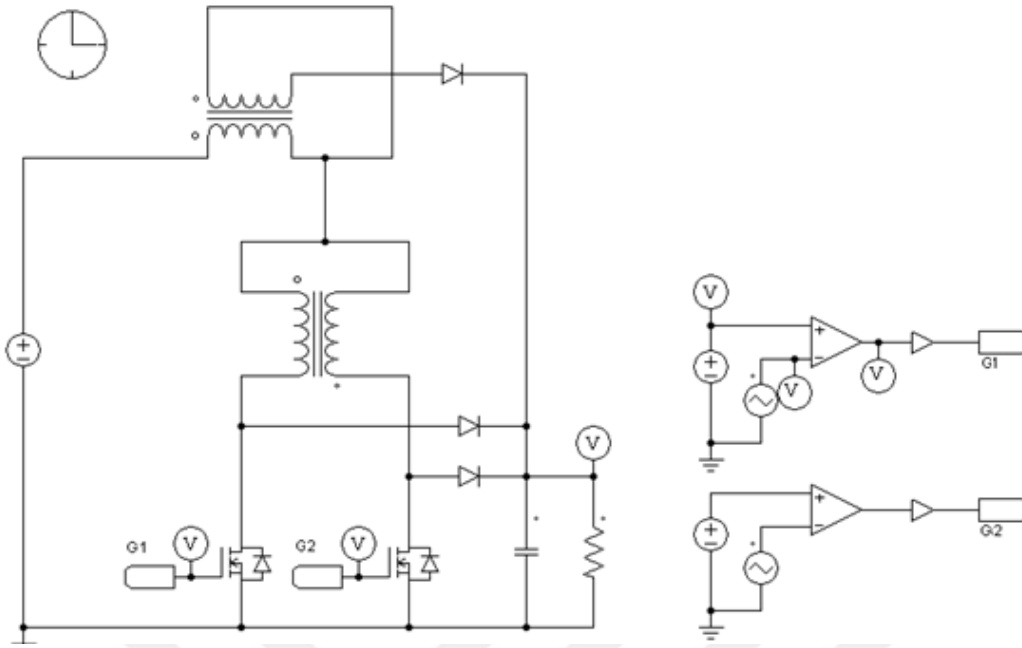
$$D (2 V_I - V_O) / 4 L_{ON} + (1-D) (V_I - V_O) / 4 L_{ON} = 0 \quad (\text{Eş. 2.14})$$

$$V_O = (1+D) V_I \quad (\text{Eş. 2.15})$$

eşitliği çıkış gerilimi için elde edilir. Bu eşitliğe göre Weinberg dönüştürücü çıkışında, giriş gerilimi ve bu gerilimin iki katındaki değerler aralığında çıkış gerilimi üretilebilir [66].

2.1.2. Weinberg dönüştürücü ile ilgili analizler

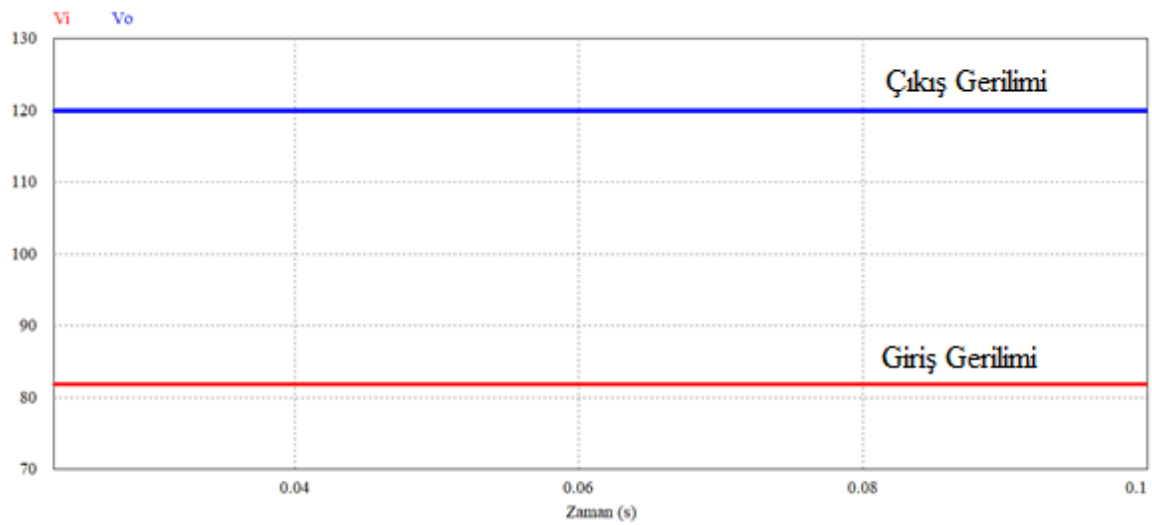
Belirtilen dönüştürücü ile ilgili gerçekleştirilen analizlerde [73, 74] numaralı yayınlar referans olarak alınmıştır. Belirtilen yayınlardaki çalışmalar 5 kW yük için tasarlanmış olup çıkış gerilim referansı 120 V'tur. Belirtilen yayınlarda verilen parametrelere göre PSim programı kullanılarak oluşturulan devre şeması Şekil 2.8'de görülmektedir. Devre ile ilgili parametreler Çizelge 2.2'de verilmiş ve bu parametrelere göre elde edilen giriş ve çıkış gerilimi grafiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8. PSpim programı kullanılarak oluşturulan Weinberg dönüştürücü devre şeması

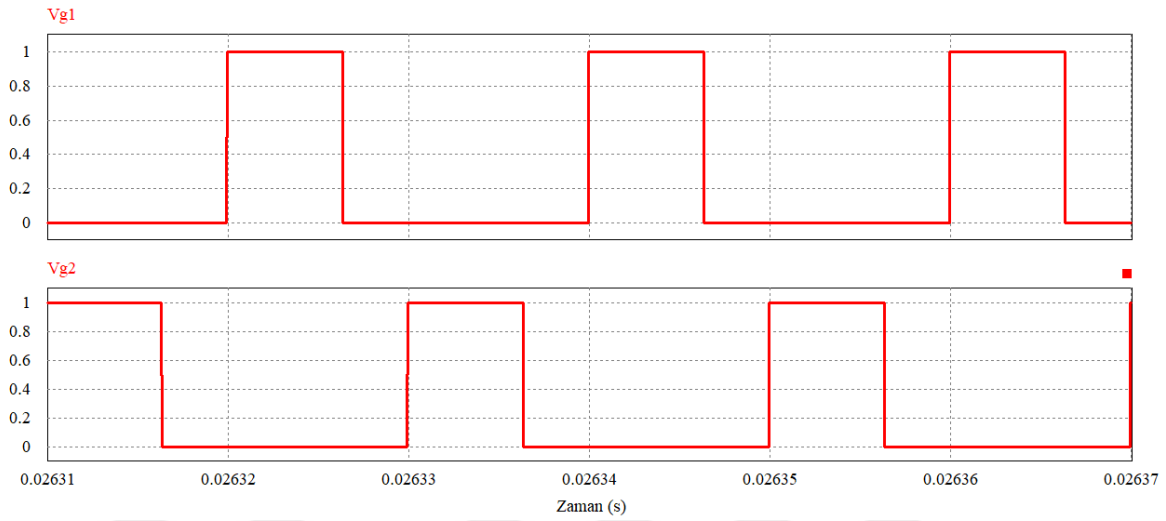
Çizelge 2.2. Weinberg dönüştürücü parametreleri ($V_i = 82$ V için)

$V_i = 82$ V	Transformatör için $N_1 = N_2 = 3$ sarım, $L_M = 86$ μ H
$V_{o-ref} = 120$ V $\pm$ % 0,5	$L_1 = L_2 = 4$ sarım, $L_{mag} = 6,8$ μ H
$P_o = 5$ kW	$C_o = 520$ μ F
$f = 100$ KHz	$R_l = 2,88$ Ω
$D = 0,46$	$V_o = 120,4$ V
Faz kaydırma miktarı = 180°	Çıkış dalgacığı = $0,12$ V



Şekil 2.9. Çizelge 2.2’deki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği

Topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri sırası ile Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

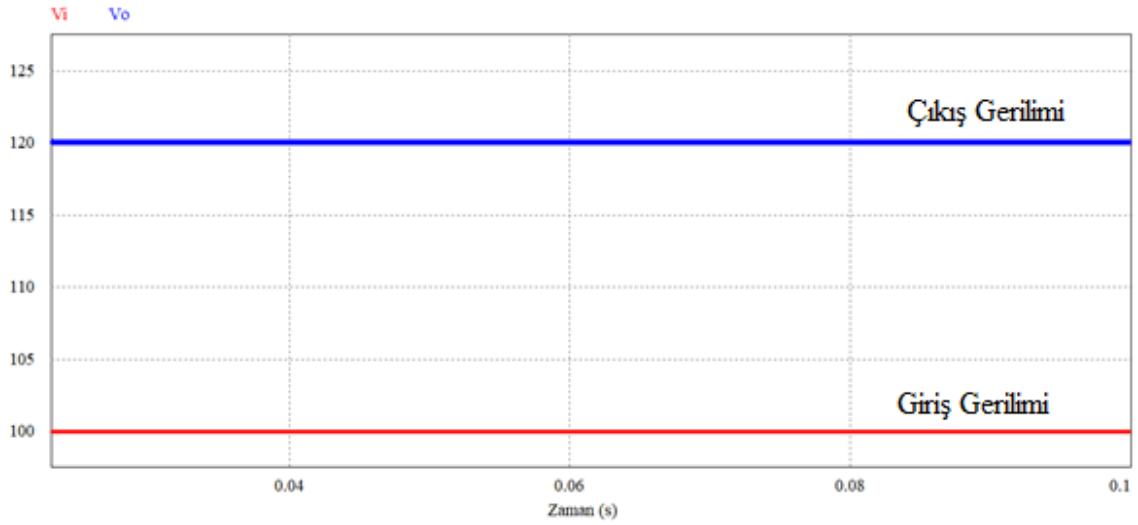


Şekil 2.10. Çizelge 2.2'deki verilere göre topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri

Giriş geriliminin 100 V'a çıkarıldığı durum için devre ile ilgili parametreler Çizelge 2.3'te verilmiş olup bu parametrelere göre elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

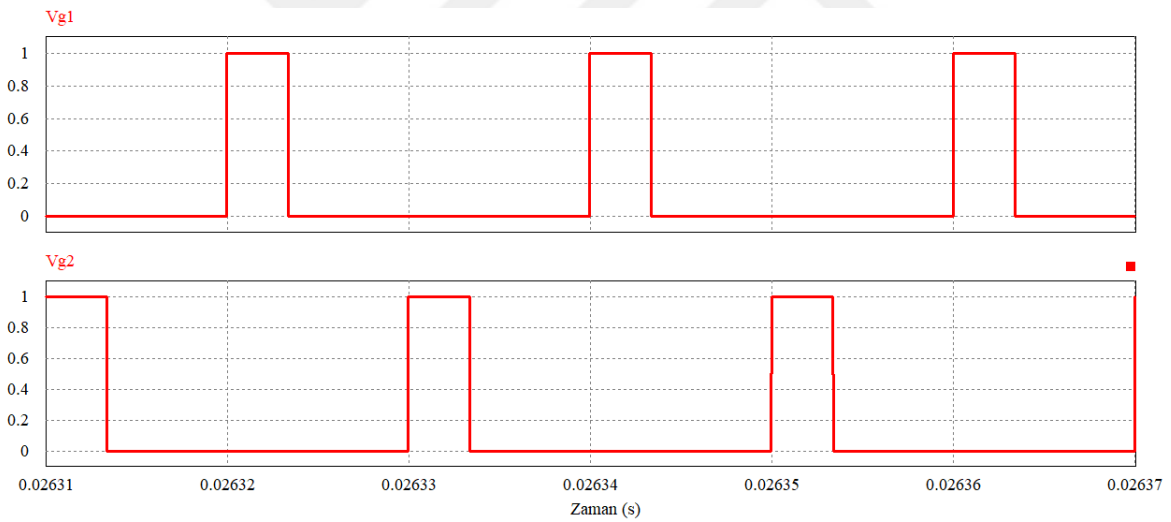
Çizelge 2.3. Weinberg dönüştürücü parametreleri ($V_i = 100$ V için)

$V_i = 100$ V	Transformatör için $N_1 = N_2 = 3$ sarım, $L_M = 86$ μ H
$V_{o-ref} = 120V \pm \% 0,5$	$L_1 = L_2 = 4$ sarım, $L_{mag} = 6,8$ μ H
$P_o = 5$ kW	$C_o = 520$ μ F
$f = 100$ KHz	$R_l = 2,88$ Ω
$D = 0,2$	$V_o = 120,4$ V
Faz kaydırma miktarı = 180°	Çıkış dalgacığı = $0,05$ V



Şekil 2.11. Çizelge 2.3'teki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği

Topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri sırası ile Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Çizelge 2.3'teki verilere göre topolojideki MOSFET'lere ait anahtarlama sinyalleri

2.1.3. Weinberg dönüştürücü küçük işaret modelinin elde edilmesi

Weinberg dönüştürücünün küçük işaret modelinin elde edilmesinde [85] numaralı yayındaki formüller göz önüne alınarak çıkarım yapılmıştır. Devre elemanlarının ideal oldukları varsayılarak eşitlikler düzenlenmiştir.

Q_1 MOSFET'inin iletimde olduğu durumda T_1 ve T_2 sargılarının orta noktalarındaki gerilim, çıkış geriliminin yarısına eşit olup endüktör akımı çıkış akımının iki katıdır.

$$\frac{1}{2} V_o + L \frac{di_L}{dt} = V_g \quad (\text{Eş. 2.16})$$

$$C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} = I_o \quad (\text{Eş. 2.17})$$

$$I_g = 2 I_o \quad (\text{Eş. 2.18})$$

Q_1 MOSFET'inin kesimde olduğu durumda ise Eş. 2.8'e göre endüktans değeri, Q_1 MOSFET'inin iletimde olduğu duruma göre 4 katına çıkmış olup, giriş akımı çıkış akımına eşittir.

$$L_{OFF} = 4 L_{ON} \quad (\text{Eş. 2.19})$$

$$V_o + 4L \frac{di_o}{dt} = V_g \quad (\text{Eş. 2.20})$$

$$C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} = I_o \quad (\text{Eş. 2.21})$$

$$I_g = I_o \quad (\text{Eş. 2.22})$$

Verilen eşitlikler bir periyotluk çalışma süresi için düzenlendiğinde, zaman tanım bölgesinde

$$4L \frac{di_o}{dt} = (2 V_g - V_c) D + (V_g - V_c) (1-D) \quad (\text{Eş. 2.23})$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = I_o - \frac{V_o}{R} \quad (\text{Eş. 2.24})$$

$$I_g = 2 I_o D + I_o (1-D) = (1+D) I_o \quad (\text{Eş. 2.25})$$

ortalama değer eşitlikleri elde edilir.

Ortalama değerlere küçük ac değişimler de eklenerek

$$v_L(t) = V_L + v_L(t) \quad (\text{Eş. 2.26})$$

$$D(t) = D + d(t) \quad (\text{Eş. 2.27})$$

$$i_o(t) = I_o + i_o(t) \quad (\text{Eş. 2.28})$$

eşitlikleri elde edilir. Eş. 3.16-Eş. 3.25 arasında verilen eşitliklere küçük ac değişimlerin eklenmesiyle

$$4L \left(\frac{di_o}{dt} + \frac{dv_o}{dt} \right) = [(1+D) V_g - V_o] + [(1+D) v_g(t) - v_o(t) + V_g d(t)] + v_g(t) d(t) \quad (\text{Eş. 2.29})$$

$$C \left(\frac{dV_o}{dt} + \frac{dv_o}{dt} \right) = \left(I_o - \frac{V_o}{R} \right) + \left(i_o(t) - \frac{v_o(t)}{R} \right) \quad (\text{Eş. 2.30})$$

$$I_g + i_g(t) = (1+D) I_o + [(1+D) i_o(t) + I_o d(t)] + i_o(t) d(t) \quad (\text{Eş. 2.31})$$

Eş. 2.29-Eş. 2.31 arasında verilen eşitliklerin sağ tarafındaki ilk terimler dc nicelikler, ikinci terimler birinci dereceden ac nicelikler ve üçüncü terimler ikinci dereceden ac lineer olmayan niceliklerdir. Bu niceliklerde birinci terimler eşitliklerin sol tarafındaki dc değerlere eşit olup üçüncü terimler ikinci terimlere göre çok küçük oldukları için ihmal edilmektedir. Bu nedenle küçük işaret modelinin elde edilmesinde sadece eşitliklerin sağ tarafındaki ikinci terimler dikkate alınmaktadır. Bu terimlerin Laplace dönüşümleri alındığında

$$4Ls i_o(s) = (1+D) v_g(s) - v_o(s) + V_g d(s) \quad (\text{Eş. 2.32})$$

$$sC v_o(s) = i_o(s) - \frac{v_o(s)}{R} \quad (\text{Eş. 2.33})$$

$$i_g(s) = (1+D) i_o(s) + I_o d(s) \quad (\text{Eş. 2.34})$$

olarak elde edilen eşitlikler, kontrolden çıkış gerilimine transfer fonksiyonunun elde edilmesi için düzenlendiğinde

$$4 L s \left[\left(sC + \frac{1}{R} \right) v_o(s) \right] = - v_o(s) + V_g d(s) \quad (\text{Eş. 2.35})$$

$$\left(4 L C s^2 + 4 \frac{L}{R} s + 1 \right) v_o(s) = V_g d(s) \quad (\text{Eş. 2.36})$$

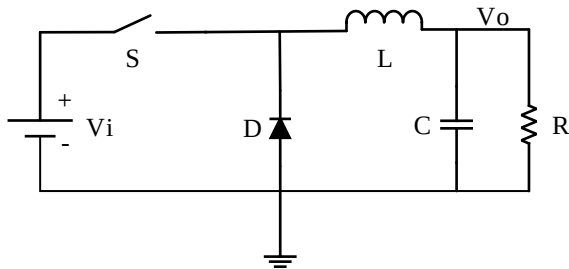
$$G_{vd}(s) = \frac{v_o(s)}{d(s)} = \frac{V_g}{4 L C s^2 + 4 \frac{L}{R} s + 1} \quad (\text{Eş. 2.37})$$

olarak elde edilir.

2.2. Gerilim Düşüren Dönüştürücü

2.2.1. Gerilim düşüren dönüştürücü çalışma prensibi

Uydu elektriksel güç alt sistemlerinde giriş geriliminin azaltılarak çıkışa aktarılması gereken pil şarj düzenleyici gibi birimlerde gerilim düşüren dönüştürücüler kullanılması gerekmektedir [91-94]. Bu dönüştürücünün çeşitli ihtiyaçlara göre senkron [91], sarmaşık yapılı [93] gibi birçok türevi olsa da Şekil 2.13'te gösterilen en basit yapı ile birçok ihtiyaca cevap vermektedir.



Şekil 2.13. Gerilim düşüren dönüştürücü

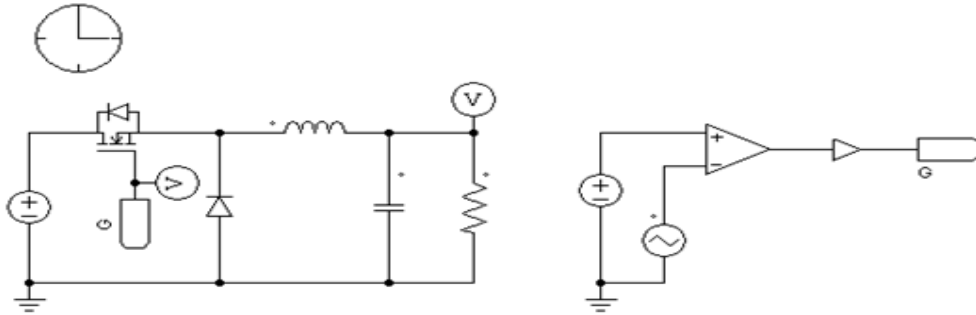
S anahtarının iletimde olduğu durumda diyot kesimde olacak ve endüktör üstündeki gerilim giriş ve çıkış arasındaki gerilim farkına eşit olacaktır. S anahtarının kesimde olduğu durumda ise akım diyot, endüktör ve çıkış yükü üzerinden dolaşımını tamamlayacak ve endüktör üstündeki gerilim çıkış geriliminin negatifine eşit olacaktır. Anahtarın bir periyot boyunca anahtarlama oranı D ve periyot süresi T olmak üzere Eş. 2.38 ve Eş. 2.39 eşitlikleri elde edilir [144].

$$(V_i - V_o)DT + (-V_o)(1-D)T = 0 \quad (\text{Eş. 2.38})$$

$$V_o = D V_i \quad (\text{Eş. 2.39})$$

2.2.2. Gerilim düşüren dönüştürücü ile ilgili analizler

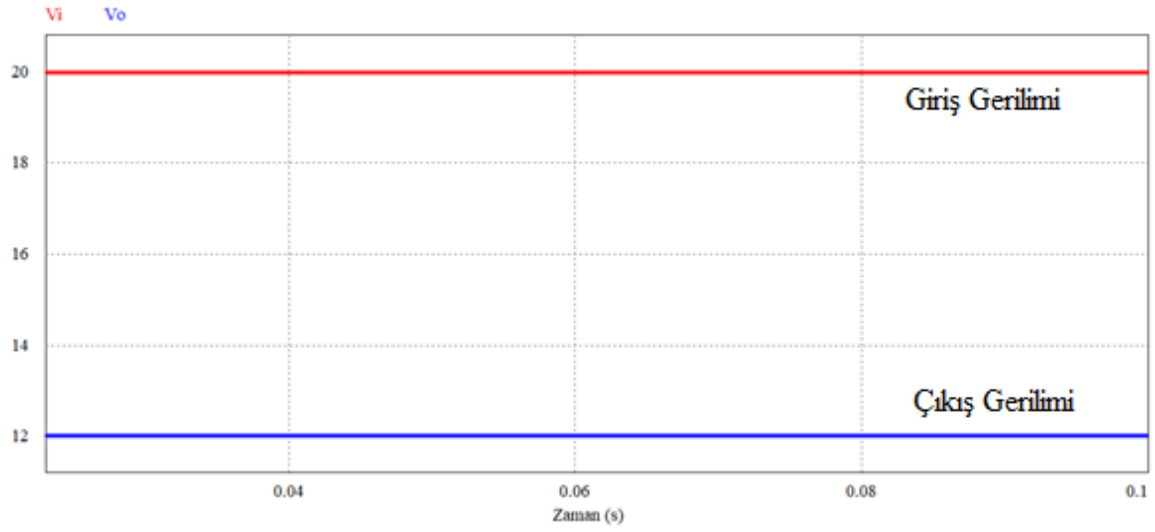
Belirtilen dönüştürücü ile ilgili gerçekleştirilen analizlerde [145] numaralı yayın referans olarak alınmıştır. Belirtilen yayındaki çalışmalar 36 W yük için tasarlanmış olup çıkış gerilim referansı 12 V'tur. Belirtilen yayınlarda verilen parametrelere göre PSim programı kullanılarak oluşturulan devre şeması Şekil 2.14'te görülmektedir. Devre ile ilgili parametreler Çizelge 2.4'te verilmiş ve bu parametrelere göre elde edilen giriş ve çıkış gerilimi grafiği Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. PSim programı kullanılarak oluşturulan gerilim düşüren dönüştürücü devre şeması

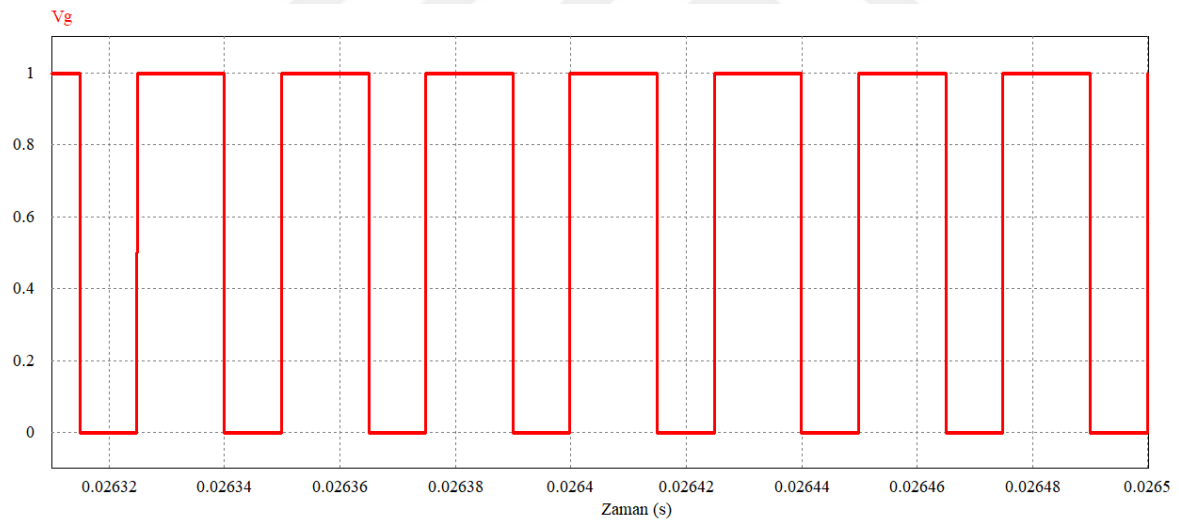
Çizelge 2.4. Gerilim düşüren dönüştürücü parametreleri ($V_i = 20$ V için)

$V_i = 20$ V	$L = 2,2$ mH
$V_{o-ref} = 12$ V	$C_o = 33$ μ F
$P_o = 36$ W	$R_l = 4$ Ω
$f = 40$ KHz	$V_o = 12$ V
$D = 0,6$	Çıkış dalgacığı = 0,005 V



Şekil 2.15. Çizelge 2.4'teki verilere göre giriş ve çıkış gerilimi grafiği

Topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

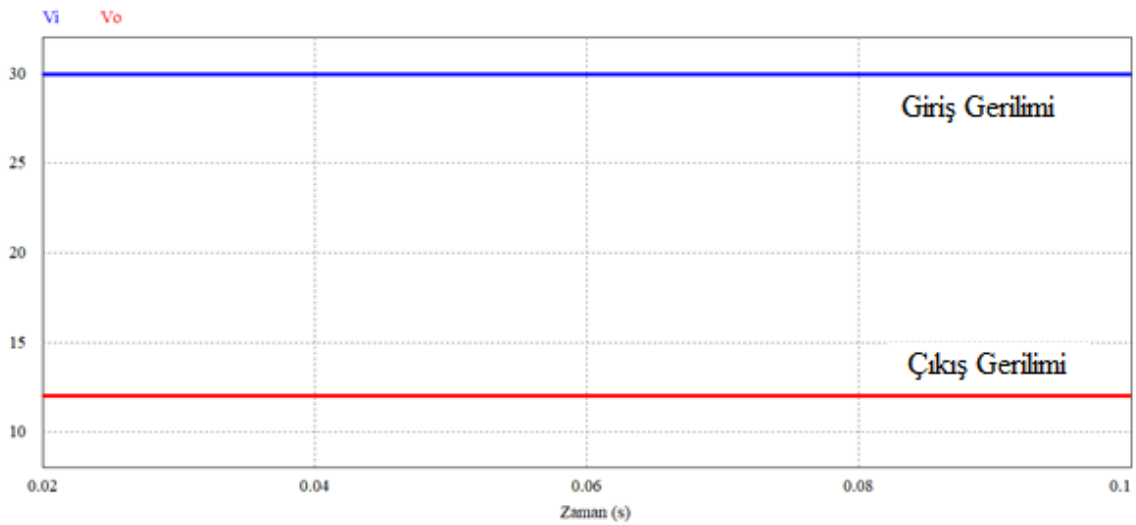


Şekil 2.16. Çizelge 2.4'teki verilere göre topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri

Giriş geriliminin 30 V'a çıkarıldığı durum için devre ile ilgili parametreler Çizelge 2.5'te verilmiş olup bu parametrelere göre elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

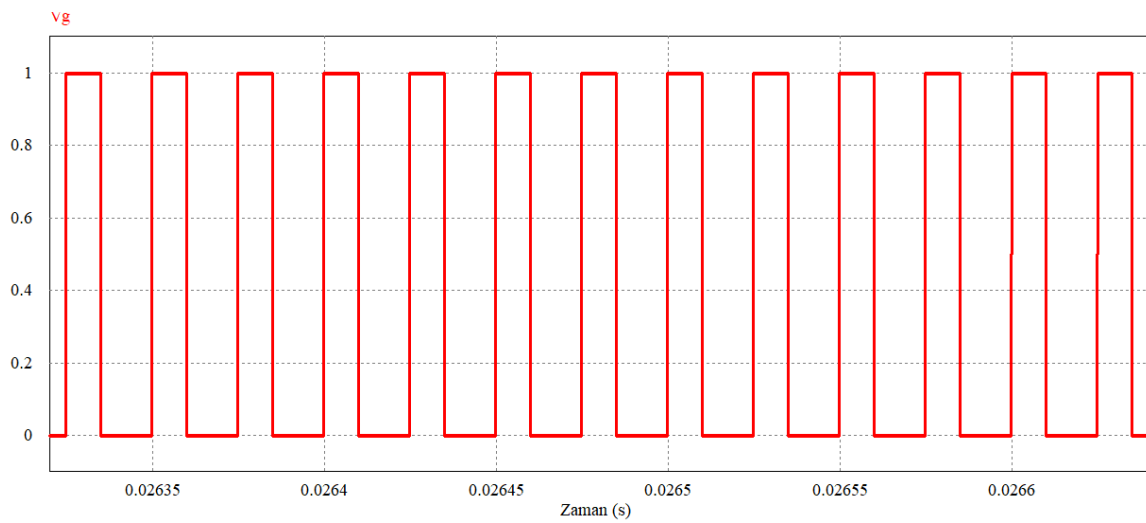
Çizelge 2.5. Gerilim düşüren dönüştürücü parametreleri ($V_i = 30$ V için)

$V_i = 30$ V	$L = 2,2$ mH
$V_{o-ref} = 12$ V	$C_o = 33$ μ F
$P_o = 36$ W	$R_l = 4$ Ω
$f = 40$ KHz	$V_o = 12$ V
$D = 0,4$	Çıkış dalgacığı = 0,005 V



Şekil 2.17. Çizelge 2.5'teki verilere göre çıkış gerilimi grafiği

Topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Çizelge 2.5'teki verilere göre topolojideki MOSFET'e ait anahtarlama sinyalleri

2.2.3. Gerilim düşüren dönüştürücü küçük işaret modelinin elde edilmesi

Gerilim düşüren dönüştürücünün küçük işaret modelinin elde edilmesinde [112] numaralı yayındaki formüller göz önüne alınarak çıkarım yapılmıştır. S anahtarı iletimde iken

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i - V_o \quad (\text{Eş. 2.40})$$

$$i_C = C \frac{dV_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (\text{Eş. 2.41})$$

S anahtarı kesimde iken

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (\text{Eş. 2.42})$$

$$i_C = C \frac{dV_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (\text{Eş. 2.43})$$

olarak elde edilen eşitlikler, kontrolden çıkış gerilimine transfer fonksiyonunun elde edilmesi için düzenlendiğinde

$$L \frac{di_L}{dt} = D V_i + d V_i - V_o \quad (\text{Eş. 2.44})$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R} \quad (\text{Eş. 2.45})$$

$$L s i_L(s) = D V_i(s) + d V_i(s) - V_o(s) \quad (\text{Eş. 2.46})$$

$$s C V_o(s) = i_L(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (\text{Eş. 2.47})$$

$$i_L(s) = V_o(s) \left(s C + \frac{1}{R} \right) \quad (\text{Eş. 2.48})$$

$$V_o(s) \left(s C + \frac{1}{R} \right) = \frac{D V_i(s) + d V_i(s) - V_o(s)}{s L} \quad (\text{Eş. 2.49})$$

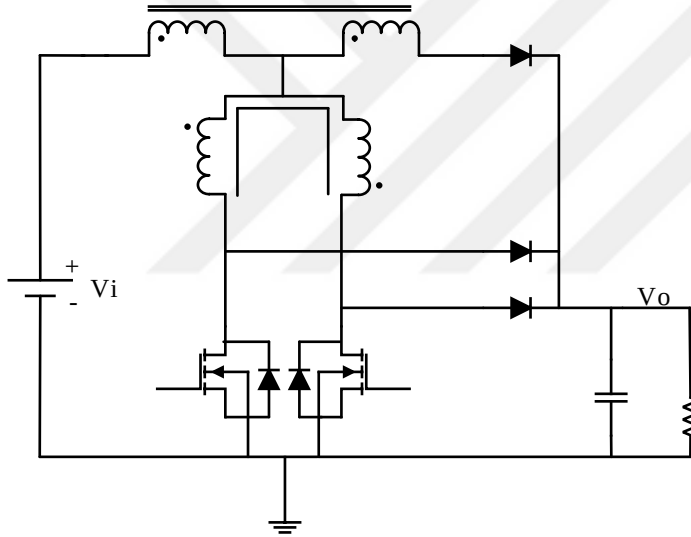
$$G_{vd}(s) = \frac{V_o(s)}{d(s)} = \frac{V_i}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (\text{Eş. 2.50})$$

olarak elde edilir.

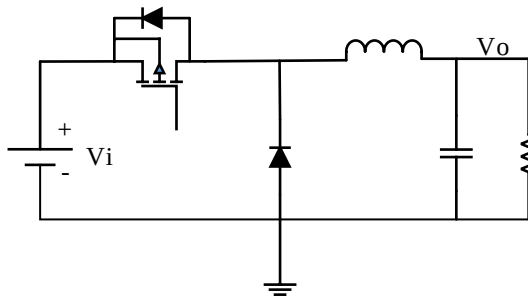


3. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÖNERİLEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Uydu güç alt sistemlerinde, kaynak geriliminin yükseltilmesi gereken durumlarda Weinberg dönüştürücü [65-90], kaynak geriliminin azaltılması gereken durumlarda ise Buck dönüştürücü yer alır [91-94]. Anahtarlama oranı-çıkış gerilimi aktarım fonksiyonları incelendiğinde, bu dönüştürücülerin sağ yarı düzlemlerinde sıfır olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle bu dönüştürücülerin yapısında bir kararsızlık sorunu bulunmamaktadır ve kompanzasyonun uygun şekilde gerçekleştirilmesiyle kararlı bir şekilde işlem görebilirler. Bununla birlikte her iki dönüştürücü de önceki uydu görevlerinde kullanıldığından uydu güç alt sistemi açısından tarihçeye sahiptirler. Adı geçen dönüştürücüler, sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmektedir.

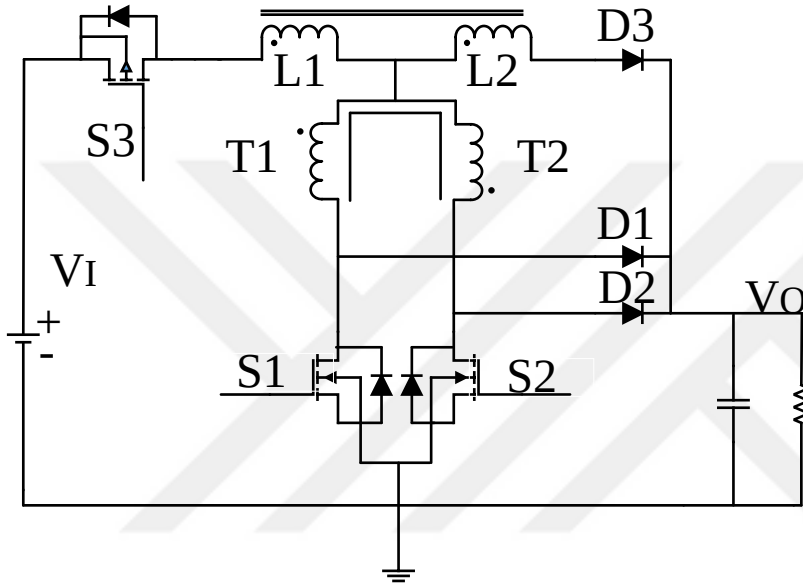


Şekil 3.1. Weinberg dönüştürücü



Şekil 3.2. Buck dönüştürücü

Gerçekleştirilen çalışmada Weinberg ve Buck dönüştürücülerden yeni bir güç topolojisi elde edilmiştir. Kaynak gerilimi önerilen güç topolojisi ile yükseltilebilir ve düşürülebilir. Giriş ve endüktör arasında klasik Weinberg dönüştürücünden farkı oluşturan (S3 olarak isimlendirilen) bir adet anahtar bulunmaktadır. S3, Buck çalışması için anahtarlama oranına ve kaynak gerilimi ile referans değerin kıyaslanmasına göre değer almaktadır. Önerilen güç dönüştürücü Şekil 3.3'te sunulmuştur.



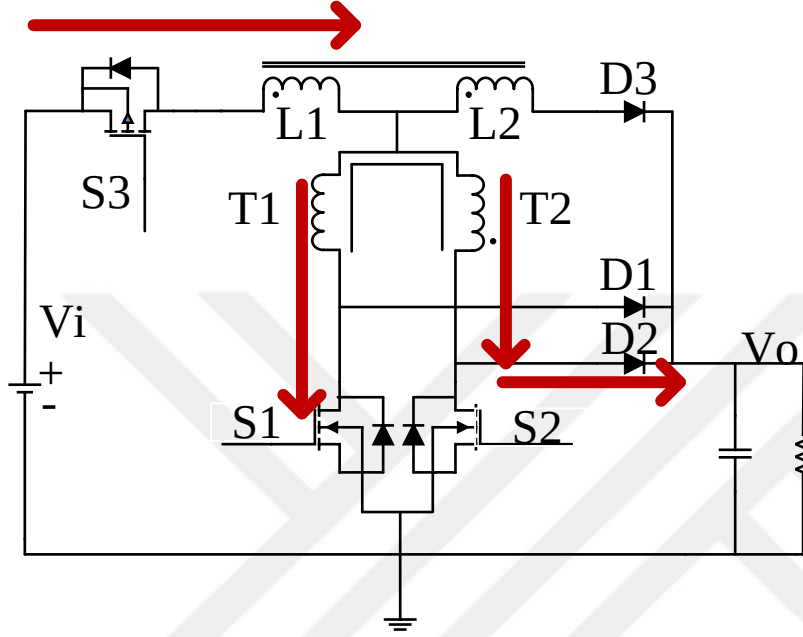
Şekil 3.3. Önerilen güç dönüştürücü

3.1. Önerilen Güç Dönüştürücünün Çalışma Prensipleri ve İlgili Denklemler

Kaynak gerilimi referans değerden küçük oldu durumda güç dönüştürücü gerilim arttırma kipinde görev yapmalıdır, bu nedenle S3 sürekli olarak iletim durumunda çalışmalıdır. Kaynak gerilimi ve giriş endüktörü, S3'ün sürekli iletimi ile birbirine bağlanacaktır. Bahsedilen topoloji, bu durumda Weinberg dönüştürücü olarak görev yapacaktır. Weinberg dönüştürücünün girişine yerleştirilen endüktörde iki sarım bulunmaktadır ve bu sarımlar aynı çekirdek çevresinde sarılmıştır. Birinci bobinin (L_1) çıkış ucu ve ikinci bobinin (L_2) giriş ucu birbirine bağlıdır ve Weinberg dönüştürücünün transformatörünün orta ucu bu bağlantı noktasındadır.

S1 (veya S2) iletimdeyken i_{T1} akımı transformatörün ilk sarımından S1'e (veya S2) aktarılır. Aynı değerdeki akım T_2 sarımını ($i_{Q1} = i_{T2}$) üzerinden geçer, çünkü T_1 ve T_2 eşit

değerde sarılmıştır. S2 (veya S1) anahtarının kesim kipi sebebiyle, i_{T2} akımı çıkış için D₂ diyodu üzerinden geçer. Bu şekilde T₂ çıkışa bağlıdır. Bu durum Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Transformatörün orta ucundaki gerilim (V_{CT}), Eş. 3.1 denklemindeki gibi çıkış geriliminin yarısına eşit olur.



Şekil 3.4. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg çalışma kipinde S1 anahtarının iletimde olduğu durum

$$[V_{CT}]_{ON} = V_O / 2 \quad (\text{Eş. 3.1})$$

Eş. 3.2'ye göre girişteki akım i_{L1} , S1 (veya S2) üzerinden ve D₂ (veya D₁) üzerinden geçen akımların toplamıdır. S1 (veya S2) ve D₂ (veya D₁) üzerinden geçen akımların değeri Eş. 3.3'te belirtildiği üzere birbiri ile eşit olur. Bu nedenle giriş akımı i_{L1} , Eş. 3.4 denkleminde sunulduğu üzere iletim durumunda S1 (veya S2) üzerinden geçen akımın iki katında değere sahiptir.

$$i_L = i_{Q1} + i_{D2} \quad (\text{Eş. 3.2})$$

$$i_{Q1} = i_{D2} = i_O \quad (\text{Eş. 3.3})$$

$$[i_L]_{ON} = 2 [i_O]_{ON} \quad (\text{Eş. 3.4})$$

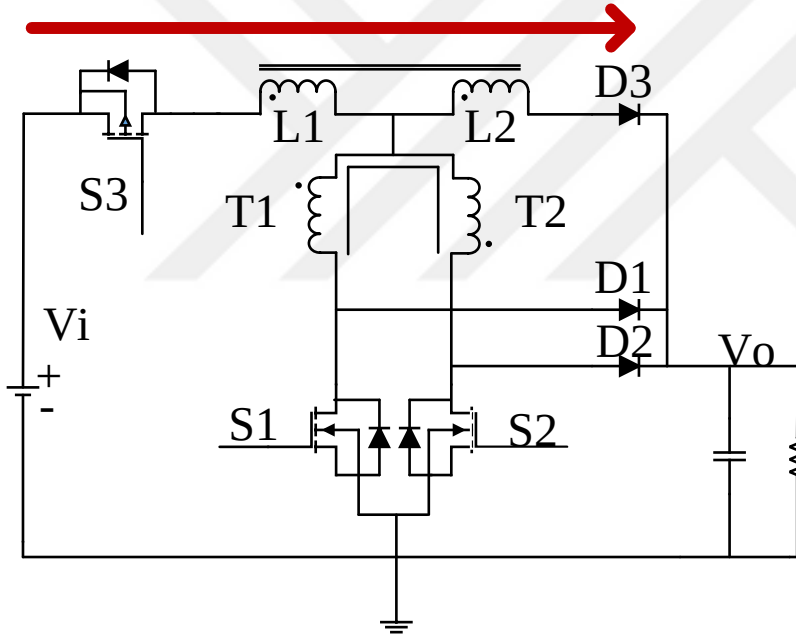
Bu durumda temel sarımın endüktansı L_{ON} ve bu sarımın üzerindeki gerilim V_{L1} olarak adlandırılırsa, iletim kipi için Eş. 3.5, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 denklemleri çıkarılabilir.

$$V_{L1} = V_I - V_O / 2 = L_{ON} (\Delta i_L / \Delta t) \quad (\text{Eş. 3.5})$$

$$(\Delta i_L / \Delta t)_{ON} = (V_I - V_O / 2) / L_{ON} \quad (\text{Eş. 3.6})$$

$$(\Delta I_O / \Delta t)_{ON} = (1 / 2) (\Delta i_L / \Delta t)_{ON} = (2V_I - V_O) / 4L_{ON} \quad (\text{Eş. 3.7})$$

S1 ve S2 anahtarları kesimdeyken D₃ diyodu iletimde olup D₃'ün anodundaki gerilim çıkış gerilimi ile aynı değere sahiptir. Bu durum Şekil 3.5'te gösterilmiştir. D₃ diyodu iletimdeyken etkin endüktans, L₁ ve L₂ eşit sargıya sahip olduğundan L₁ (veya L₂)'in endüktans değerinin dört katı olur. Böylece L₁'in sargı sayısı N_{L1}, L₂'nin sargı sayısı N_{L2}, sargı sayısı N (N = N_{L1} = N_{L2}) ve manyetik geçirgenlik katsayısı A_L olmak üzere, çıkış akımındaki sürekliliğe bağlı olarak Eş. 3.8-Eş. 3.11 denklemleri çıkarılabilir.



Şekil 3.5. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg çalışma kipinde S1 ve S2 anahtarlarının kesimde olduğu durum

$$L_{OFF} = (N_{L1} + N_{L2})^2 A_L = 4 N^2 A_L = 4 L_{ON} \quad (\text{Eş. 3.8})$$

$$[i_L]_{OFF} 2 N = [i_L]_{ON} N \quad (\text{Eş. 3.9})$$

$$[i_O]_{OFF} = i_{D3} = [i_L]_{OFF} = 1/2 [i_L]_{ON} \quad (\text{Eş. 3.10})$$

$$(\Delta i_L / \Delta t)_{OFF} = (\Delta i_O / \Delta t)_{OFF} = (V_I - V_O) / 4 L_{ON} \quad (\text{Eş. 3.11})$$

Bu durumda kaynak gerilimi (V_I), transformatörün orta ucundaki gerilim (V_{CT}) ve çıkış gerilimi (V_O) arasındaki ilişki Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'teki şekilde çıkarılabilir.

$$V_I - V_{CT} = V_{CT} - V_O \quad (\text{Eş. 3.12})$$

$$[V_{CT}]_{\text{OFF}} = (V_I + V_O) / 2 \quad (\text{Eş. 3.13})$$

Çıkış akımının kalıcı durumu için iletim durumundaki yükseliş, kesim durumundaki azalışa eşit olur. Anahtarlama oranı D olmak üzere Eş. 3.14 çıkarılabilir.

$$[D (2V_I - V_O) / 4 L_{ON}] + [(1 - D) (V_I - V_O) / 4 L_{ON}] = 0 \quad (\text{Eş. 3.14})$$

Eş. 3.14 sadeleştirilerek, kalıcı durum için kaynak gerilimi ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki Eş. 3.15'teki şekilde çıkarılabilir [66].

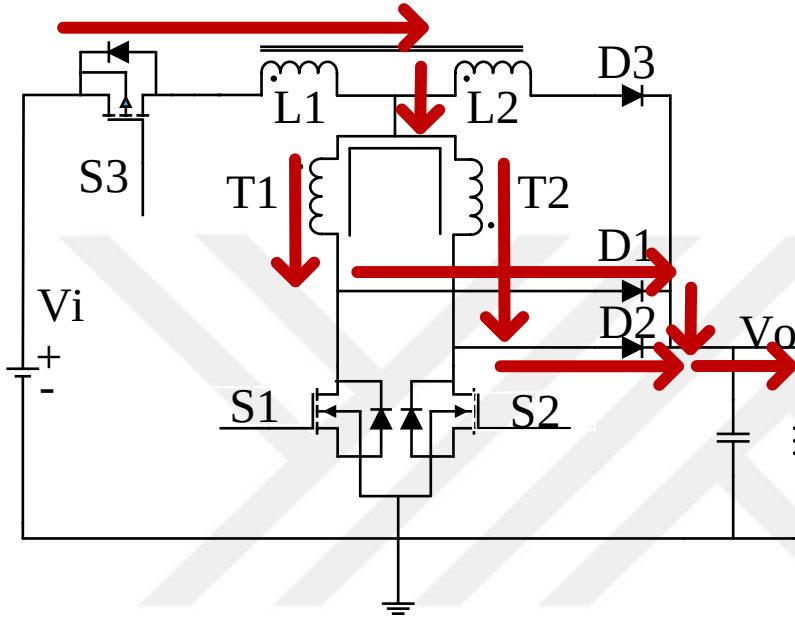
$$V_O = (1 + D) V_I \quad (\text{Eş. 3.15})$$

Önerilen güç dönüştürücünün yükselten kipi için Eş. 3.15'e göre, klasik Weinberg dönüştürücü çalışma prensibine bağlı olarak kaynak gerilimi ile bu gerilimin iki katı değer aralığında çıkış gerilimi sağlanabilir. Önerilen güç dönüştürücünün yükselten kipi için küçük işaret eşitliği klasik Weinberg dönüştürücü ile aynı olacağından bu değer Eş. 3.16'daki gibi sunulabilir [85].

$$G_{vd}(s) = \frac{V_O(s)}{d(s)} = \frac{V_I}{4 L C s^2 + 4 \frac{L}{R} s + 1} \quad (\text{Eş. 3.16})$$

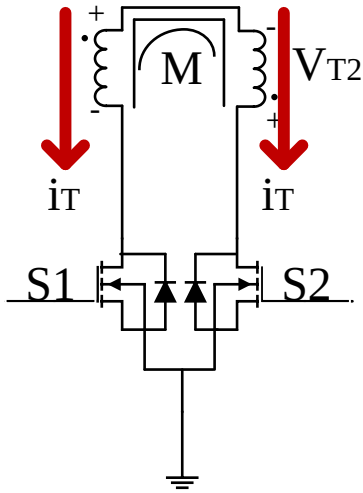
L_1 ve L_2 'nin sargıları birlikte kullanıldığından manyetik çekirdekten daha çok faydalanılmıştır ve manyetik çekirdeğin hacmi azalmıştır. Weinberg dönüştürücünün Boost dönüştürücüye göre üstünlük sağlayan kararlı yapısı endüktör ve transformatörün kombinasyonu ile elde edilir. Bundan dolayı endüktör ve transformatör çifti bu dönüştürücünün en önemli parçası şeklinde değerlendirilebilir. Transformatör sarım sayıları aynı ve sarım yönleri ters olduğundan transformatörde doyum problemi görülmeyecektir, transformatörün sarımlarında enerji depolanmadığından boşluksuz çekirdek kullanılabilir. Bu sayede geçirgenlik değerinin yüksek olması sayesinde boşluklu çekirdekle karşılaştırıldığında daha az sarımla aynı endüktans değeri elde edilebilir.

Kaynak gerilimi referans gerilim değerinden büyükken önerilen güç dönüştürücü Buck kipinde işlem görmelidir, bu kipte S1 ve S2 anahtarları sürekli olarak kesim durumundadır. Önerilen güç dönüştürücü bu kipte S3'ün anahtarlama oranına göre çıkış gerilimi sağlar. S3 iletimdeyken akım girişten çıkışa giriş endüktörü, T₁ ve T₂ sarımları, D₁ ve D₂ diyotları üzerinden geçerek ulaşır. Bu durum Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının iletimde olduğu durum

Giriş endüktörünün üzerindeki gerilim V_L , giriş gerilimi V_i , çıkış gerilimi V_o , transformatörün sarımları üzerindeki gerilimler V_{T1} ve V_{T2} , transformatörün sarımları arasındaki etkileşimli endüktans katsayısı M , S3'ün anahtarlama oranı D ve periyot T olmak üzere, S3'ün iletimi için Eş. 3.17-Eş. 3.22 eşitlikleri çıkarılabilir. Sarımlar aynı çekirdeğe sarıldığından transformatör sargılarının uçları arasındaki gerilim Eş. 3.19'a göre sıfır olur. Bu durumda transformatörün sargıları üzerinden akan akım Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının iletimde olduğu durumda transformator sargilarından geçen akımlar

$$V_{T1} = -L_{T1} \frac{di_T}{dt} + M \frac{di_T}{dt} \quad (\text{Eş. 3.17})$$

$$V_{T2} = L_{T2} \frac{di_T}{dt} + M \frac{di_T}{dt} \quad (\text{Eş. 3.18})$$

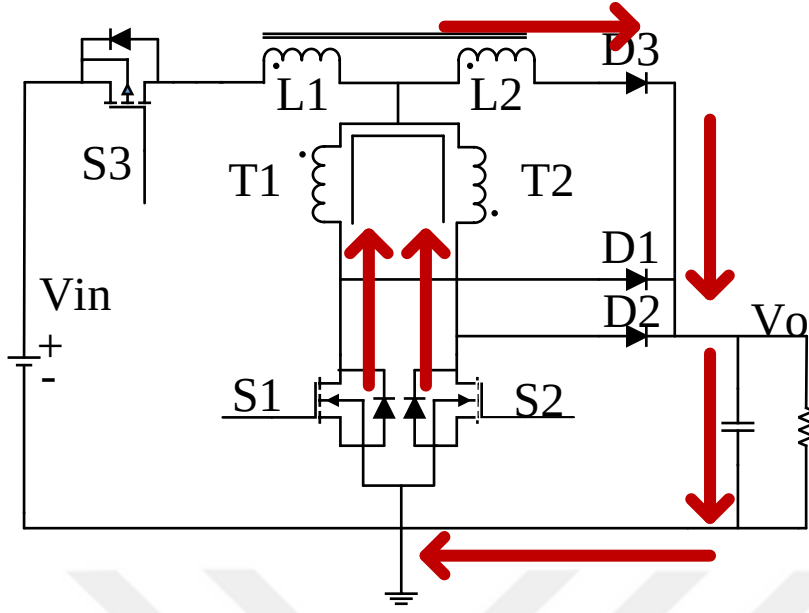
$$V_{T1} = V_{T2} = 0 \quad (\text{Eş. 3.19})$$

$$-V_I + V_L + V_{T1} + V_O = 0 \quad (\text{Transformatörün sol yarısı için KVL eşitliği}) \quad (\text{Eş. 3.20})$$

$$-V_I + V_L - V_{T2} + V_O = 0 \quad (\text{Transformatörün sol yarısı için KVL eşitliği}) \quad (\text{Eş. 3.21})$$

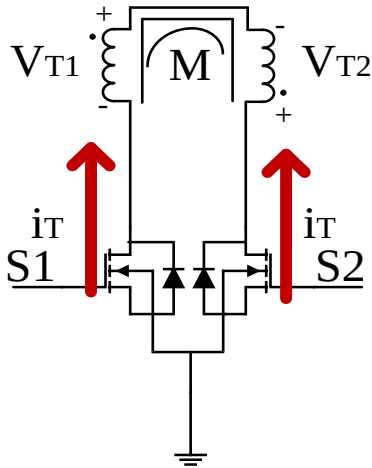
$$V_L = V_I - V_O \quad (\text{Eş. 3.22})$$

S3 anahtarı kesimdeyken akım S1 ve S2 anahtarlarının yapısında bulunan diyotlardan geçer ve dolaşımını giriş endüktörünün sağ yarısı (L_2) üzerinden geçerek bitirir. Bu durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının kesimde olduğu durum

S3'ün kesimde olduğu durumda transformatörün sargıları üzerinden akan akımlar Şekil 3.9'da gösterilmiş, bu durumla ilgili eşitlikler Eş. 3.23-Eş. 3.25 ile verilmiştir. Transformatör sargımları aynı çekirdeğe sarıldığından burada da Eş. 3.19 ile verilen formül geçerlidir.



Şekil 3.9. Önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinde S3 anahtarının kesimde olduğu durumda transformatör sargılarından geçen akımlar

$$V_L + V_T + V_O = 0 \text{ (Transformatörün sol yarısı için KVL eşitliği)} \quad (\text{Eş. 3.23})$$

$$V_L - V_T + V_O = 0 \text{ (Transformatörün sağ yarısı için KVL eşitliği)} \quad (\text{Eş. 3.24})$$

$$V_L = - V_O \quad (\text{Eş. 3.25})$$

Çıkış akımının kalıcı durumu için iletim durumundaki yükseliş, kesim durumundaki düşüş ile aynı değerdedir. Anahtarlama oranı D olmak üzere Eş. 3.26 ve bu eşitliğin basitleştirilmesi ile Eş. 3.27 çıkarılabilir.

$$(V_I - V_O) D + (- V_O) (1 - D) = 0 \quad (\text{Eş. 3.26})$$

$$V_O = D V_I \quad (\text{Eş. 4.27})$$

Önerilen güç dönüştürücü Eş. 4.27'ye göre, gerilim düşüren kipte klasik Buck dönüştürücü ile aynı çalışma prensibine göre işlem görür. Önerilen güç dönüştürücünün gerilim azaltan çalışma durumu için küçük işaret eşitliği klasik Buck dönüştürücü ile aynı olacağından, bu değer Eş. 4.28'deki şekilde doğrudan sunulabilir [112].

$$G_{vd}(s) = \frac{V_O(s)}{d(s)} = \frac{V_I}{L C s^2 + \frac{L}{R} s + 1} \quad (\text{Eş. 3.28})$$

Sunulan eşitliklere göre D anahtarlama oranı olmak üzere önerilen güç dönüştürücü kullanılarak, kaynak gerilimi referans değerinden büyük olduğunda D V_I ve kaynak gerilimi referans değerinden küçük olduğunda $(1 + D)$ V_I gerilim değerleri aralığında çıkış gerilimi sağlanabilir. Bahsedilen topolojide Eş. 3.16 ve Eş. 3.28'de sunulduğu üzere sağ yarı düzlem sıfırı bulunmamaktadır, buna göre kompanzasyon doğru şekilde tasarlandığında dönüştürücünün kararlı şekilde çalışabileceği yorumu çıkarılabilir. Her iki çalışma kipi için de kararlı durum ve küçük işaret eşitlikleri elde edilirken parazitik etkiler göz ardı edilmiştir.

3.2. Önerilen Güç Dönüştürücünün Tasarımı

Önerilen güç dönüştürücünün çalışma kipleri farklı durumlar için incelenmiştir. Önerilen güç dönüştürücünün çalışmasını incelemek için 250 W güç değerinde, giriş gerilim aralığı 40-60 V, çıkış gerilimi 50 V (± 2 V), çalışma frekansı 100 kHz olan bir benzetim devresi gerçekleştirilmiştir. Simulasyona ait donanım parametreleri Çizelge 3.1'de aktarılmıştır. Devrenin donanım parametreleri belirlenirken hem Weinberg dönüştürücü [83], hem de Buck dönüştürücü [145] için geçerli olacak değerler belirlenmiştir. Benzetimler elektronik

komponentlerin gerçeğe yakın modellenebilmesi ve analog devrelerde uygulama ile yakın sonuçlar sunmasından dolayı PSim yazılımının serbest versiyonu kullanılmak suretiyle hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Benzetim donanım parametreleri

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi	40 – 60 V
Çıkış Gerilimi	50 V (± 2 V)
Güç	250 W
Çalışma Frekansı	100 kHz
Transformatör	$L_{T1} = L_{T2} = 500 \mu\text{H}$
Endüktör	$L_{L1} = L_{L2} = 50 \mu\text{H}$
Çıkış Kapasitörü	2000 μF

Önerilen dönüştürücü tek modülden oluştuğu için gerilim kontrol kipi tercih edilmiştir. Gerilim denetiminde PI kontrol kullanılmış olup bu denetleyicinin temel avantajı, kapalı döngü sistemi kararlı olduğu sürece sıfır kalıcı durum hatasını sağlayabilmesidir [146]. PI kontrol katsayıları MATLAB yazılımının PID Tuner Toolbox'ı kullanılarak elde edilmiştir. Bu katsayılar Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

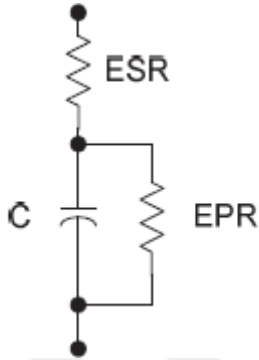
Çizelge 3.2. Önerilen devrenin kontrol katsayıları

Katsayı	Değer
K_p (Buck Kipi için)	9,2
K_i (Buck Kipi için)	33334
K_p (Weinberg Kipi için)	0,1
K_i (Weinberg Kipi için)	316

3.3. Önerilen Güç Dönüştürücü ile İlgili Benzetim Çalışmaları

Gerçekleştirilen çalışma için süperkapasitörün cevabını incelemek amacıyla süperkapasitörün modellenmesi ile ilgili araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Süperkapasitör ile ilgili literatürde birçok farklı model sunulmuş olmakla birlikte [45, 52, 147-160],

gerçekleştirilen çalışmalarda [157-160] numaralı yayınlarda verilmiş olan model ve parametrelerin sonuç vermesi üzerine bu yapı kullanılmıştır. Kullanılan yapı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

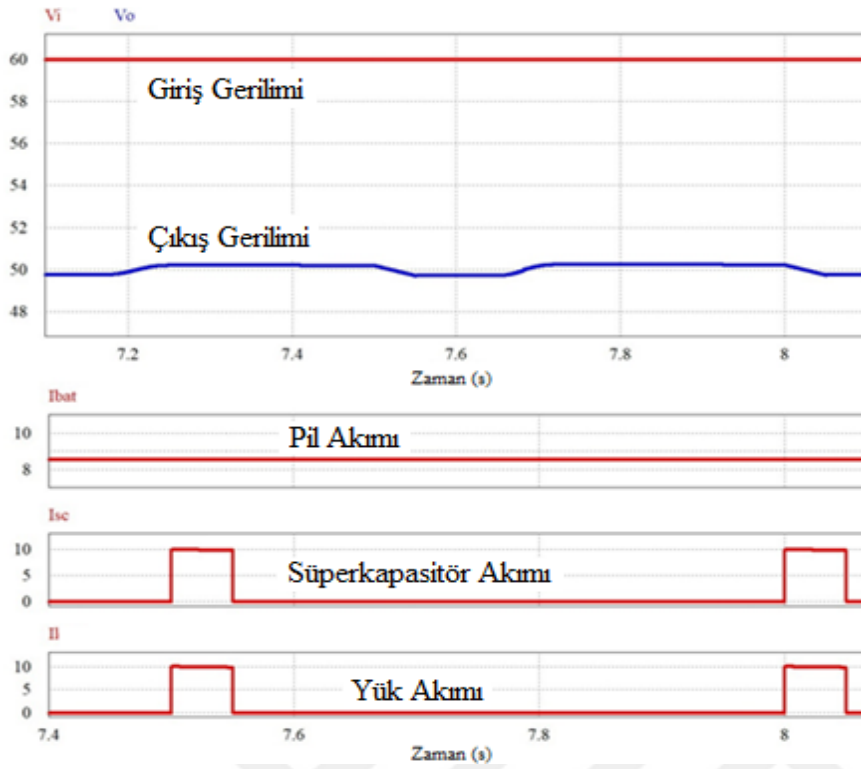


Şekil 3.10. Süperkapasitör modeli [160]

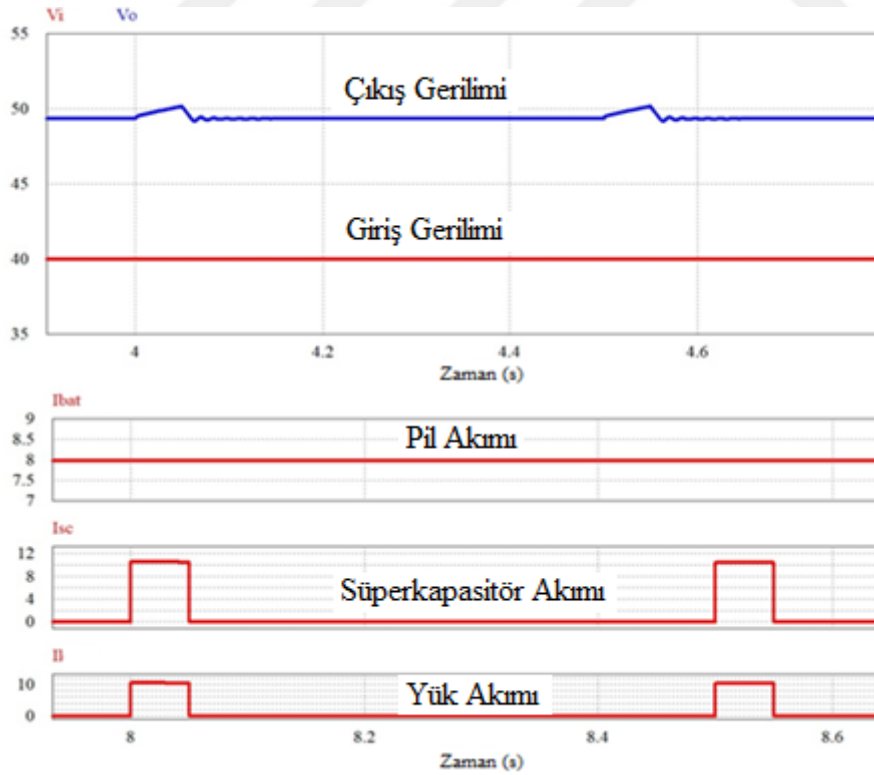
Simulasyonlar dahilinde ilk olarak SAR yükü aktifken süperkapasitörün tepkileri incelenmiştir. SAR yükü açık-kapalı yapılarak, giriş ve çıkış gerilimleri ve pil, süperkapasitör ve SAR yükünün akımları izlenmiştir. Önerilen dönüştürücünün süperkapasitör kullanıldığı durumda çalışmasını doğrulamak için simulasyonlarda ortalama yük 200 W ve SAR yükü 250 W olarak alınmıştır.

Süperkapasitör tepkileri ile ilgili analizler birçok farklı koşul için gerçekleştirilmiş olup $V_i = 60$ V'a (Buck kipi için) ve $V_i = 40$ V'a (Weinberg kipi için) ait olan tepkiler sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir.

Simulasyonlar sonucu elde edilen grafikler yukarıdan aşağıya V_i , V_o , I_{bat} (pilin akımı), I_{sc} (süperkapasitörün akımı), I_l (SAR yükünün akımı) sırasıyla gösterilmiştir. SAR yükü aktifken süperkapasitör anlık güç gereksinimlerini karşılamakta ve grafiklerde de görüldüğü gibi bu şekilde pilden darbeli akım çekilmesi engellenmektedir.

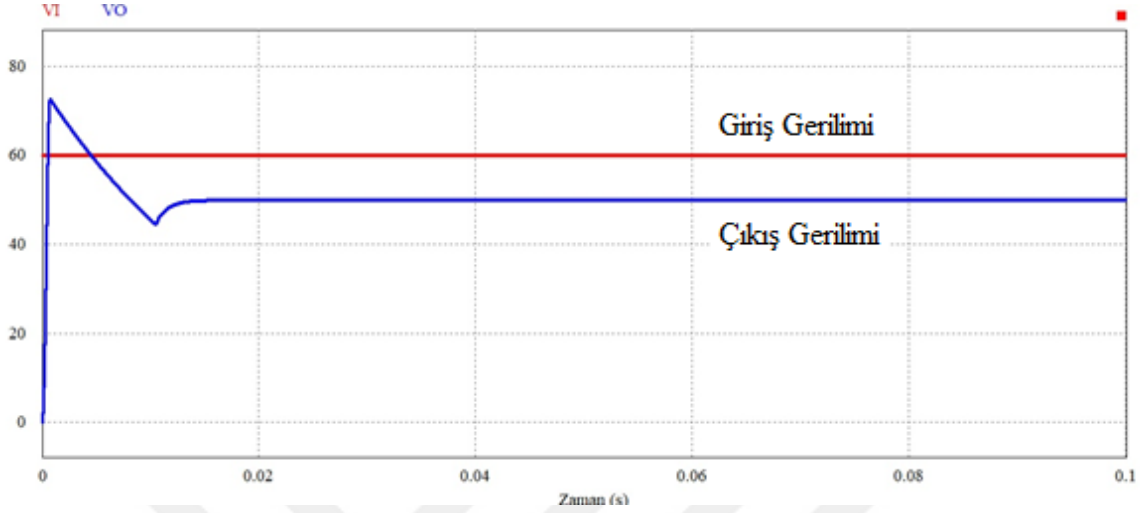


Şekil 3.11. $V_i = 60\text{ V}$ için elde edilen tepkiler (Buck kipi için)



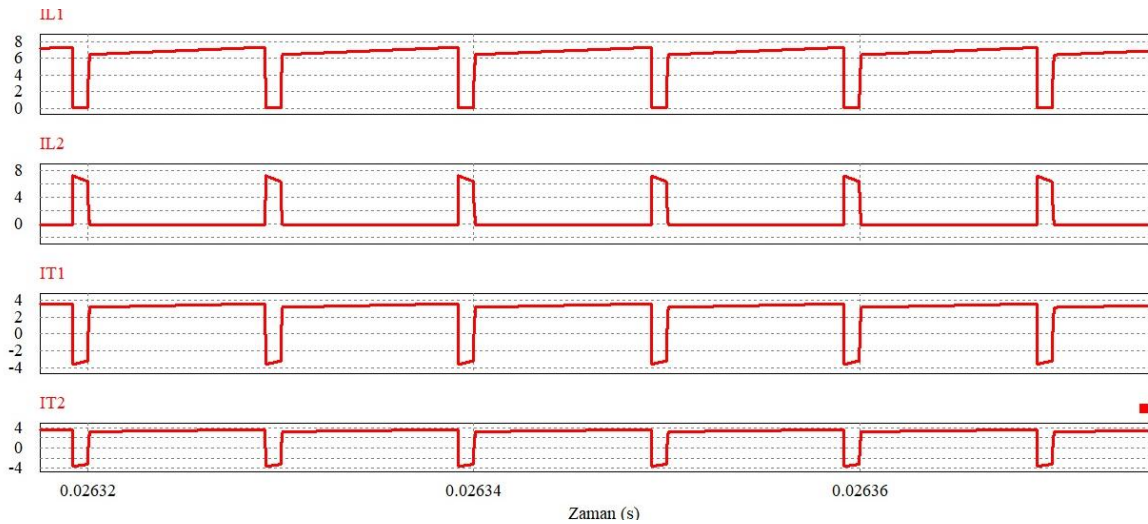
Şekil 3.12. $V_i = 40\text{ V}$ için elde edilen tepkiler (Weinberg kipi için)

Önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde 60 V giriş gerilimi için giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Giriş geriliminin 60 V olduğu durumda giriş endüktörünün sol yarısı üzerinden geçen akım IL1, giriş endüktörünün sağ yarısı üzerinden geçen akım IL2, transformatörün sol yarısı üzerinden geçen akım IT1, transformatörün sağ yarısı üzerinden geçen akım IT2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.14'te verilmiştir.



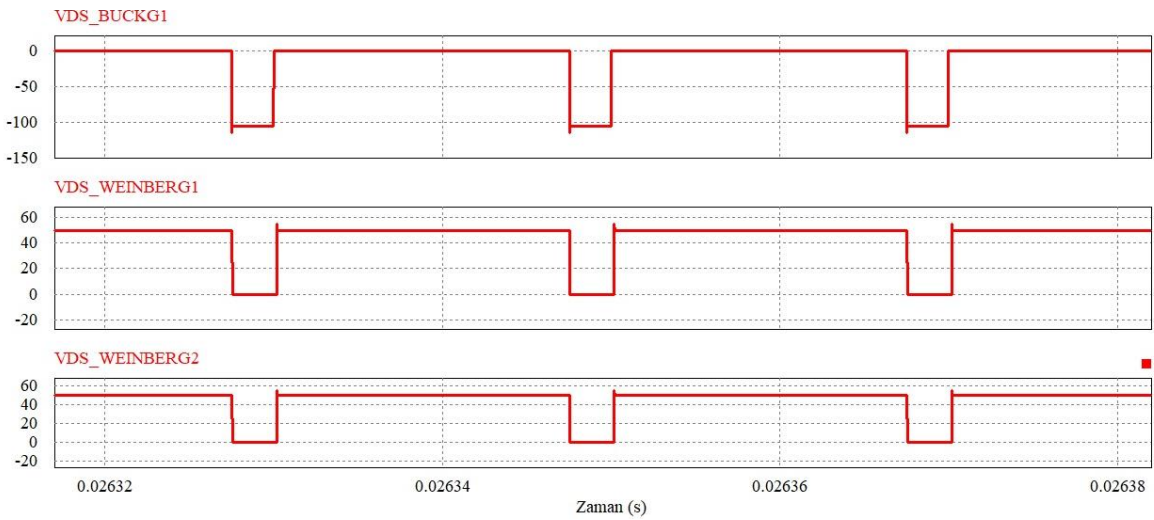
Şekil 3.14. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S1'in anahtarlama sinyali WEINBERG1, S2'nin anahtarlama sinyali WEINBERG2, S3'ün anahtarlama sinyali BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.15'te verilmiştir.



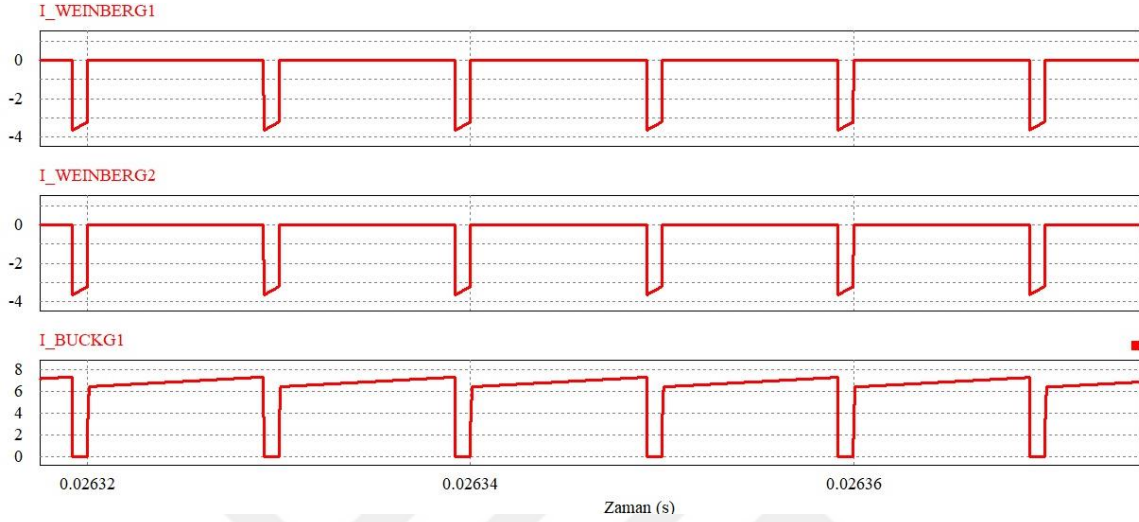
Şekil 3.15. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S3'ün terminalleri arasındaki gerilim VDS_BUCKG1, S1'in terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG1, S2'nin terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.16'da verilmiştir.



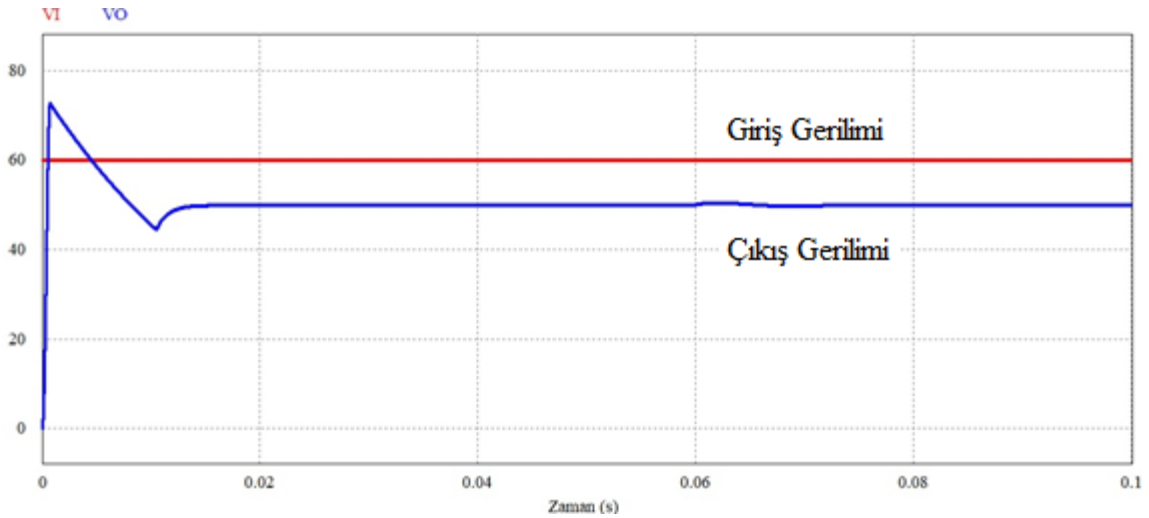
Şekil 3.16. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S1'in üzerinden akan akım $I_{WEINBERG1}$, S2'nin üzerinden akan akım $I_{WEINBERG2}$, S3'ün üzerinden akan akım I_{BUCKG1} şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.17'de verilmiştir.



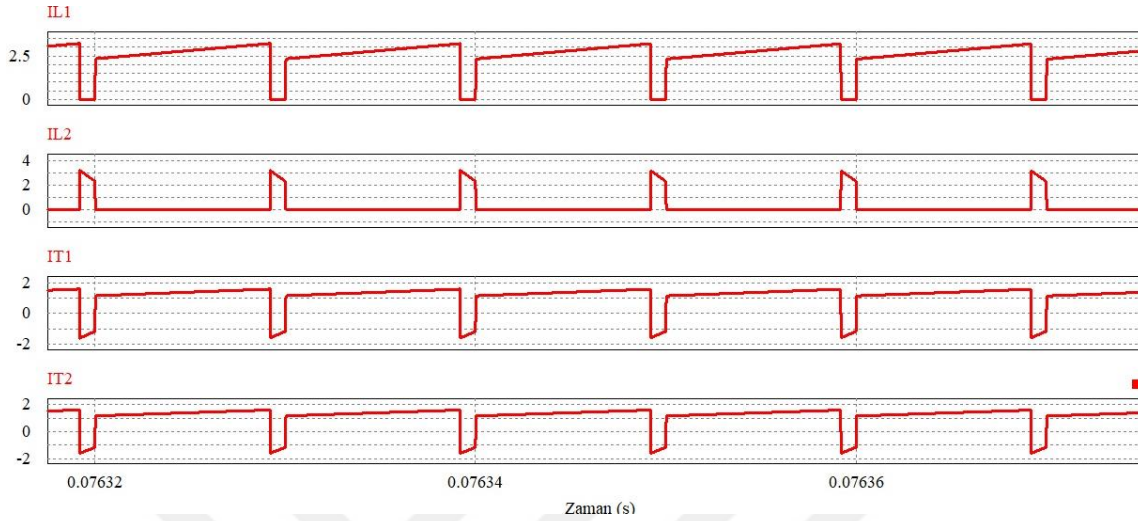
Şekil 3.17. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Önerilen güç dönüştürücüde $t = 0.06$ s anında yük yarıya indirilmiş, bu durumda elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.18'de verilmiştir.



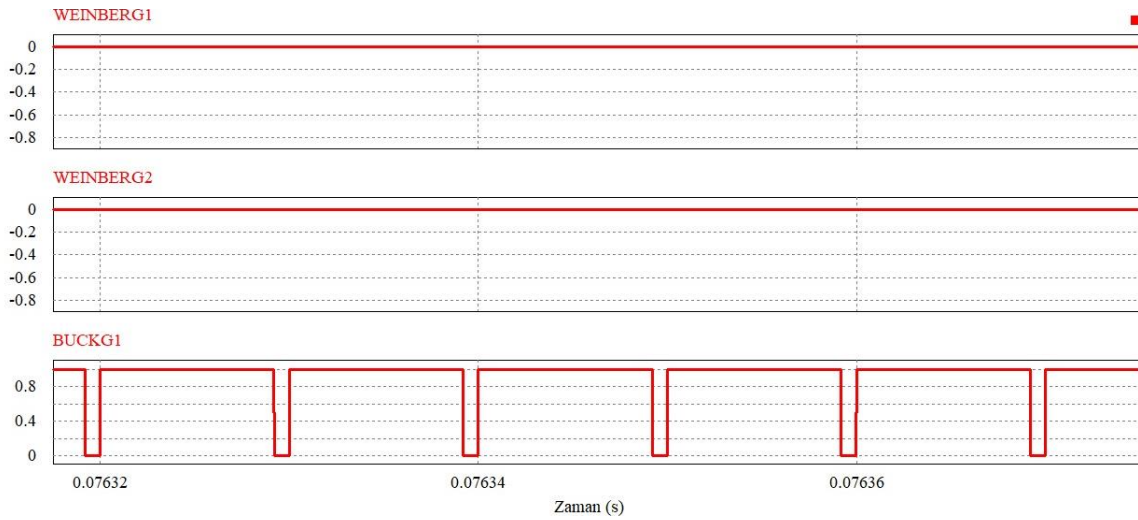
Şekil 3.18. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra sarımlardan geçen akımlarla ilgili grafikler Şekil 3.19'da verilmiştir.



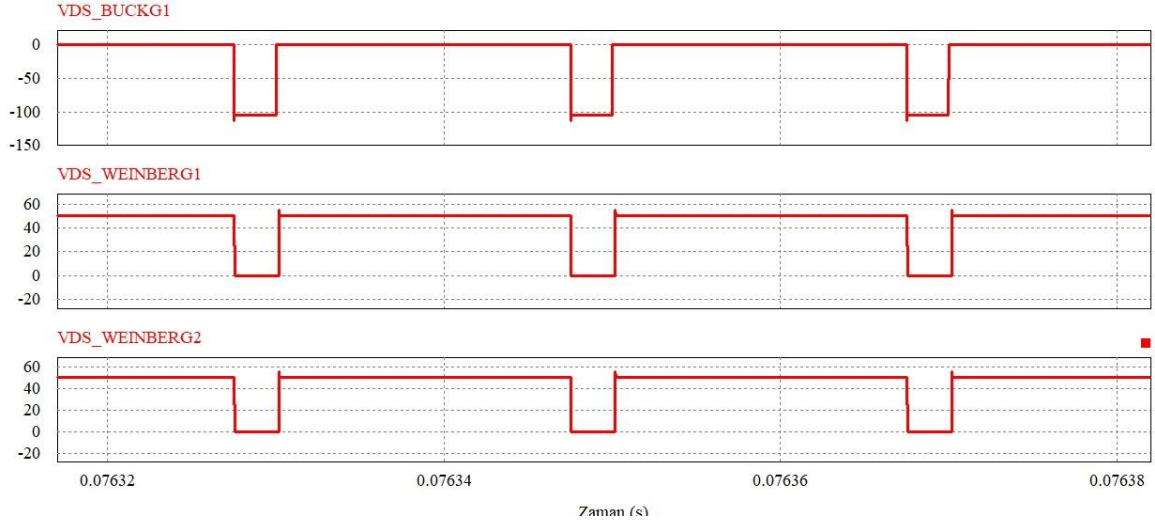
Şekil 3.19. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlama sinyalleri ile ilgili grafikler Şekil 3.20'de verilmiştir.



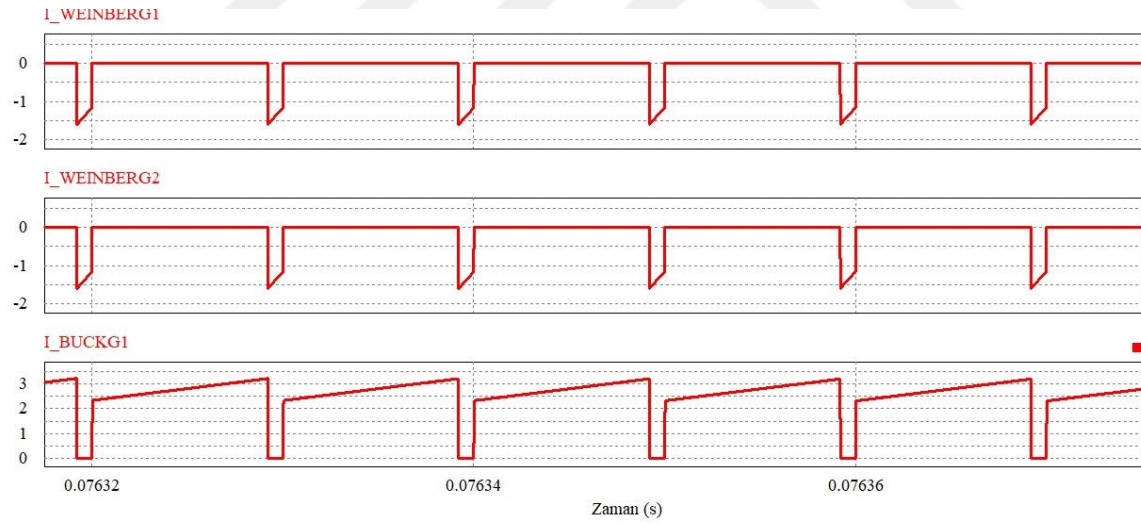
Şekil 3.20. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtar terminalleri arasındaki gerilimlerle ilgili grafikler Şekil 3.21'de verilmiştir.



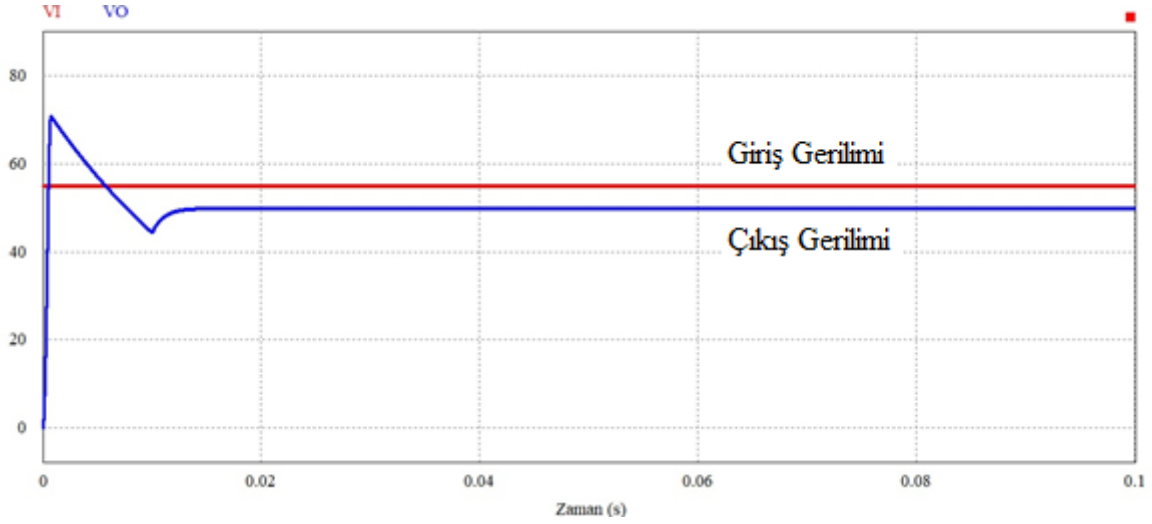
Şekil 3.21. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlar üzerinden geçen akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.22’de verilmiştir.



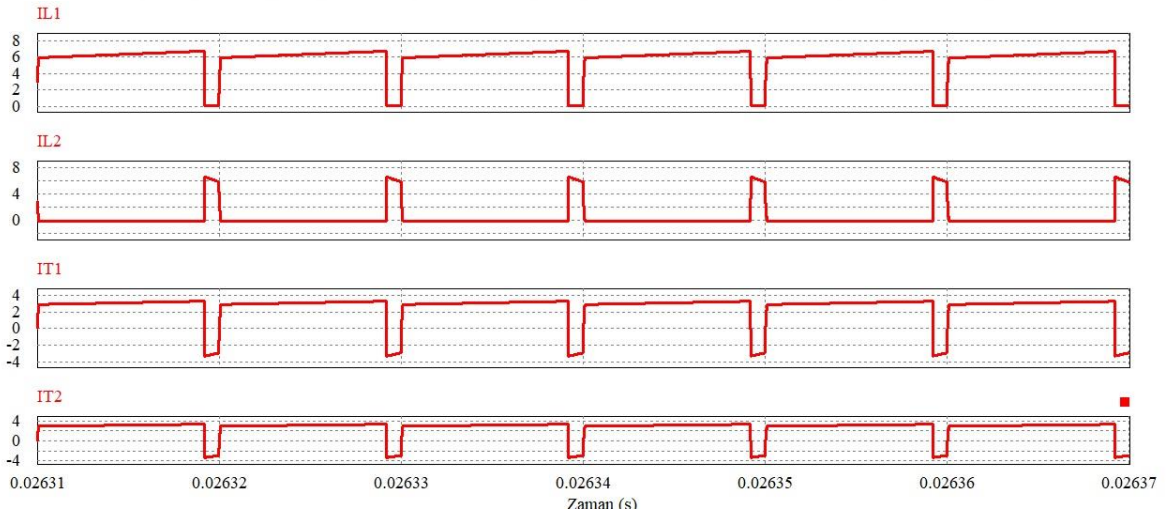
Şekil 3.22. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 60$ V için)

Önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde 55 V giriş gerilimi için giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.23’te verilmiştir.



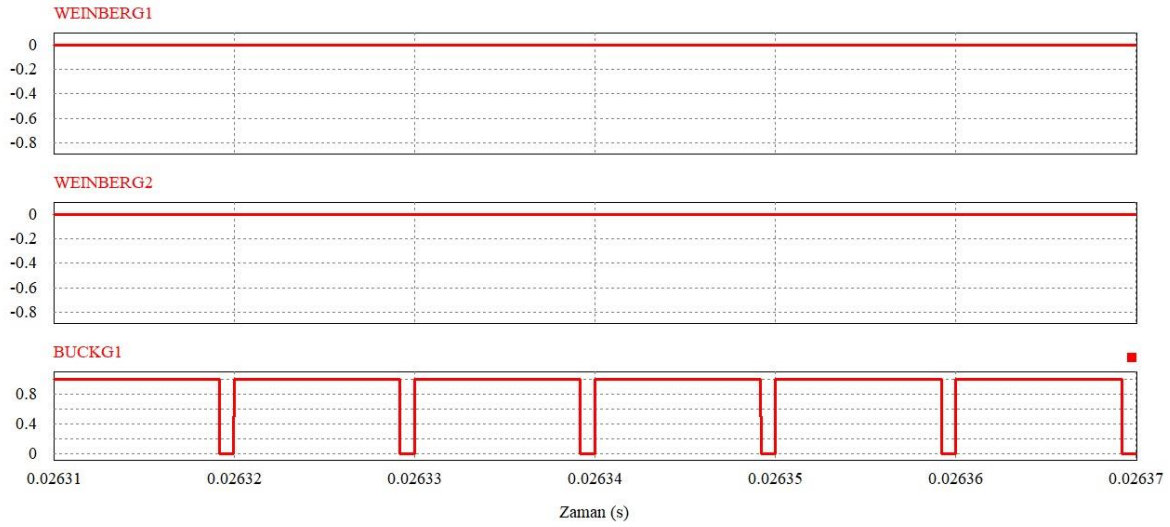
Şekil 3.23. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Giriş geriliminin 55 V olduğu durumda giriş endüktörünün sol yarısı üzerinden geçen akım IL1, giriş endüktörünün sağ yarısı üzerinden geçen akım IL2, transformatörün sol yarısı üzerinden geçen akım IT1, transformatörün sağ yarısı üzerinden geçen akım IT2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.24’te verilmiştir.



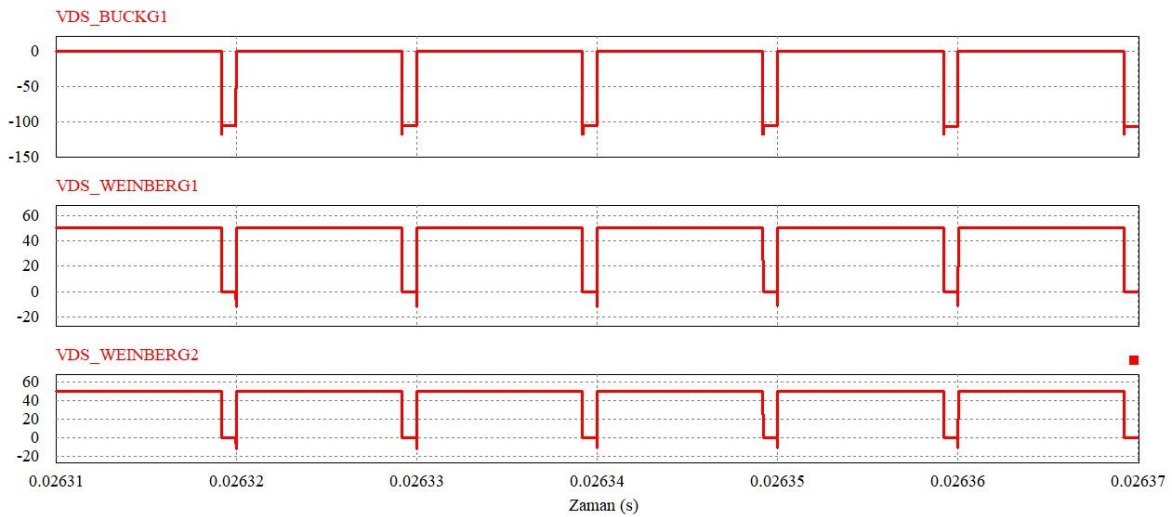
Şekil 3.24. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Giriş geriliminin 55 V olduğu durumda S1’in anahtarlama sinyali WEINBERG1, S2’nin anahtarlama sinyali WEINBERG2, S3’ün anahtarlama sinyali BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.25’te verilmiştir.



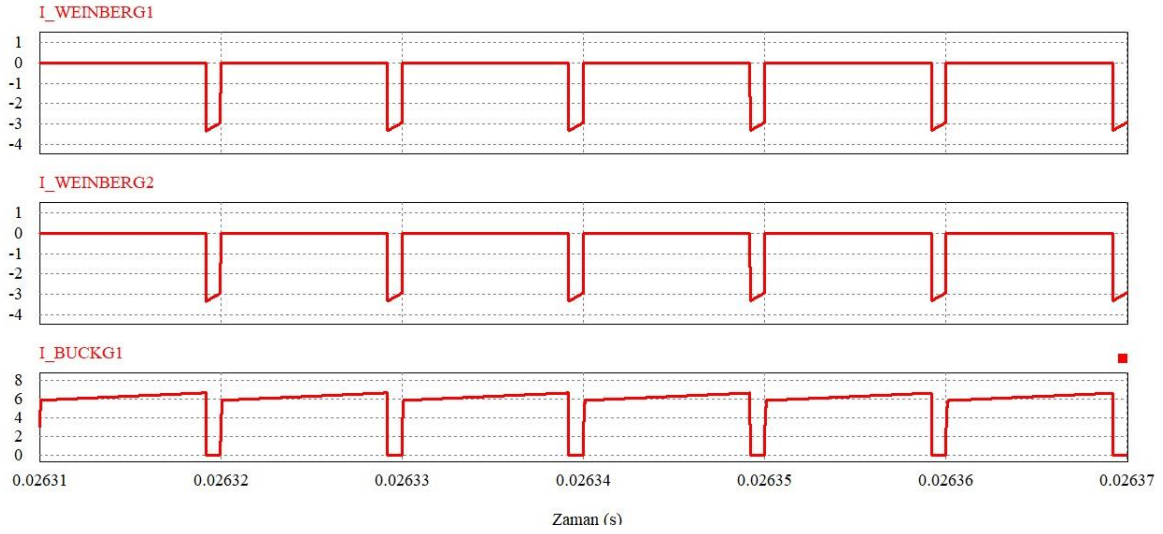
Şekil 3.25. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Giriş geriliminin 55 V olduğu durumda S3'ün terminalleri arasındaki gerilim VDS_BUCKG1, S1'in terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG1, S2'nin terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.26'da verilmiştir.



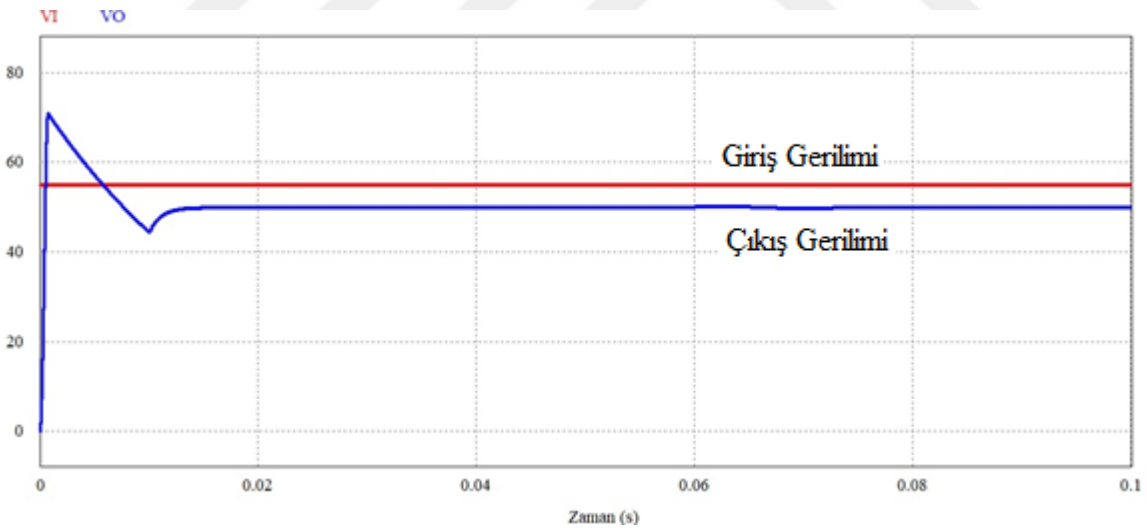
Şekil 3.26. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Giriş geriliminin 55 V olduğu durumda S1'in üzerinden akan akım I_WEINBERG1, S2'nin üzerinden akan akım I_WEINBERG2, S3'ün üzerinden akan akım I_BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.27'de sunulmuştur.



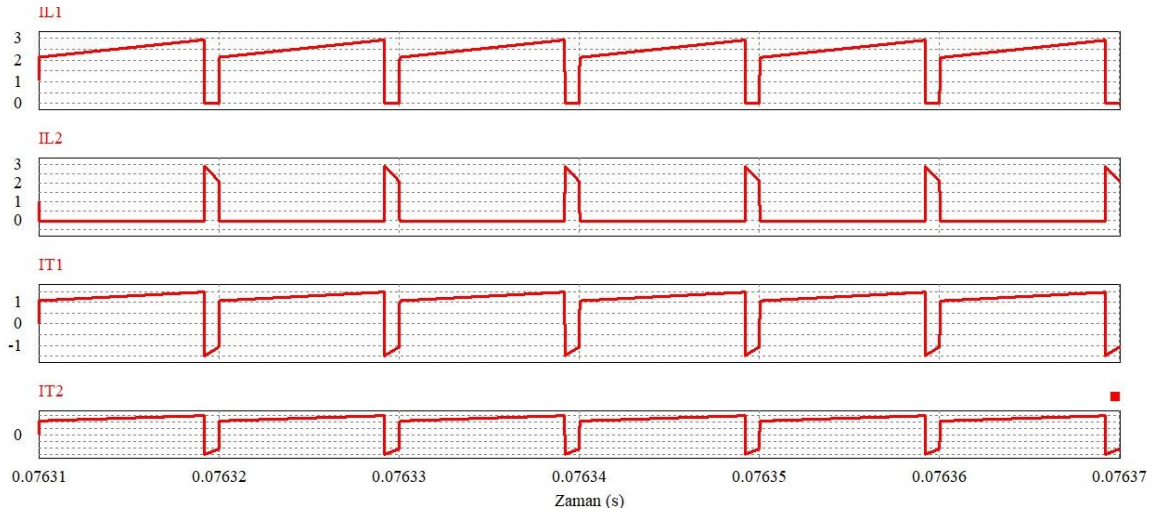
Şekil 3.27. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Önerilen güç dönüştürücüde $t = 0.06$ s anında yük yarıya indirilmiş, bu durumda elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.28’de sunulmuştur.



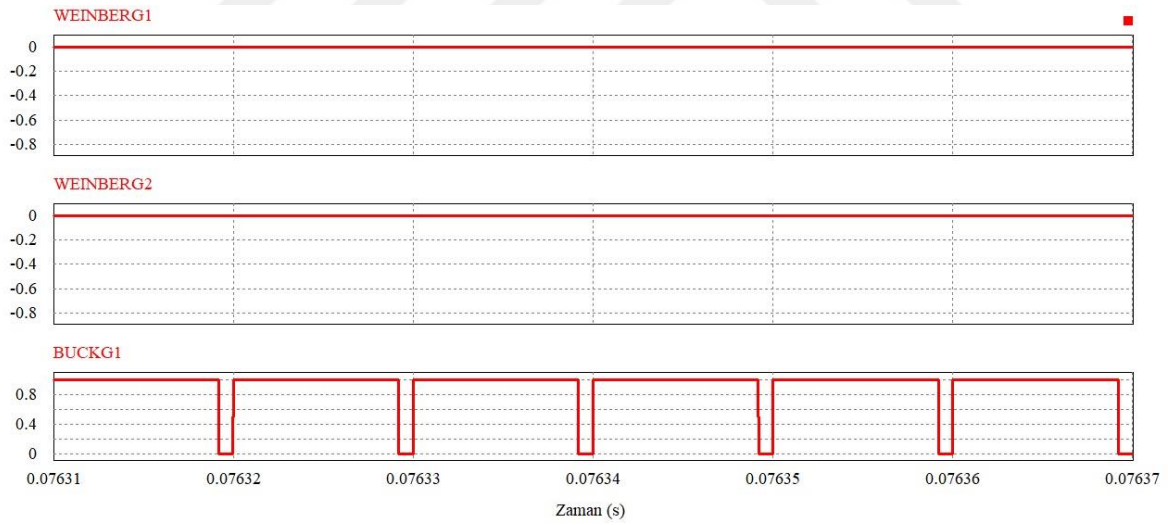
Şekil 3.28. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra sarımlardan geçen akımlarla ilgili grafikler Şekil 3.29’da verilmiştir.



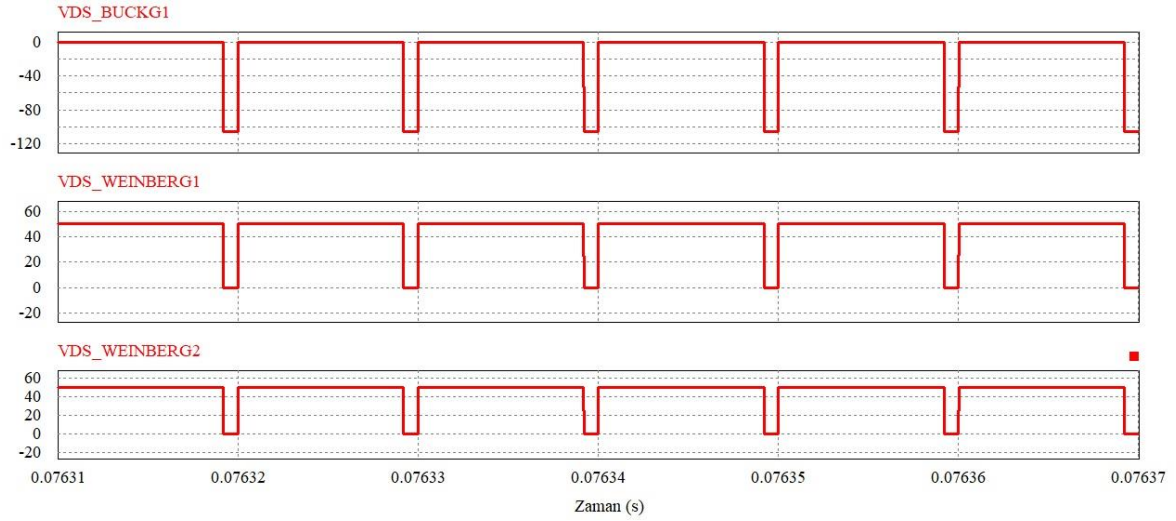
Şekil 3.29. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlama sinyalleri ile ilgili grafikler Şekil 3.30'da verilmiştir.



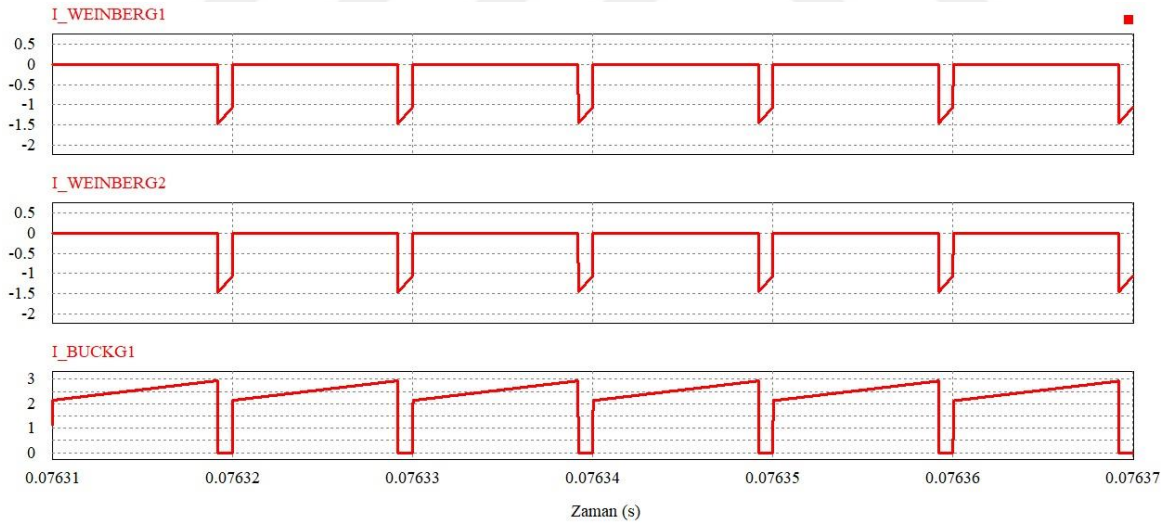
Şekil 3.30. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtar terminalleri arasındaki gerilimlerle ilgili grafikler Şekil 3.31'de verilmiştir.



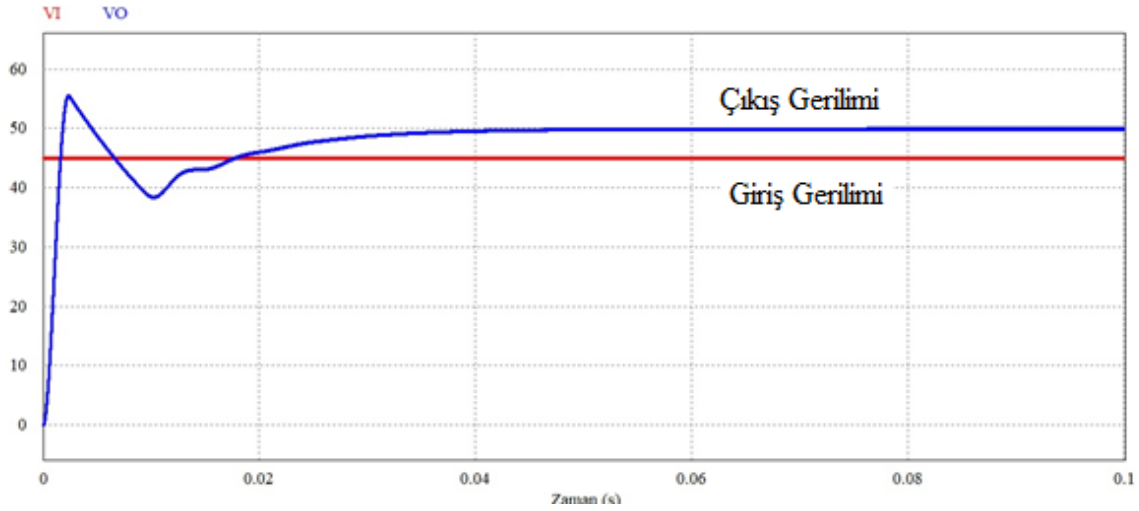
Şekil 3.31. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlar üzerinden geçen akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.32’de sunulmuştur.



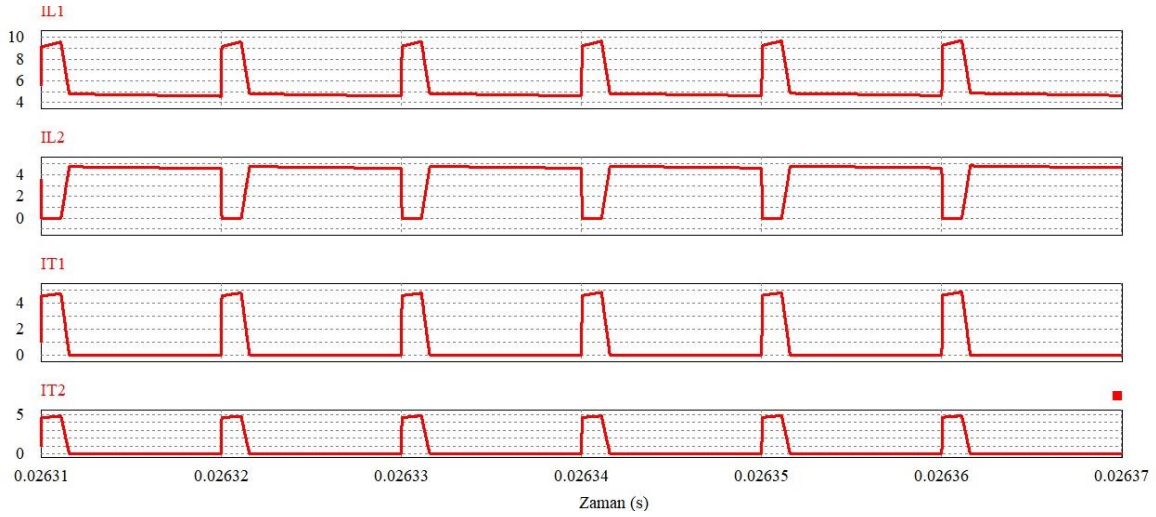
Şekil 3.32. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Buck kipi, $V_i = 55$ V için)

Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde 45 V giriş gerilimi için giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.33’te sunulmuştur.



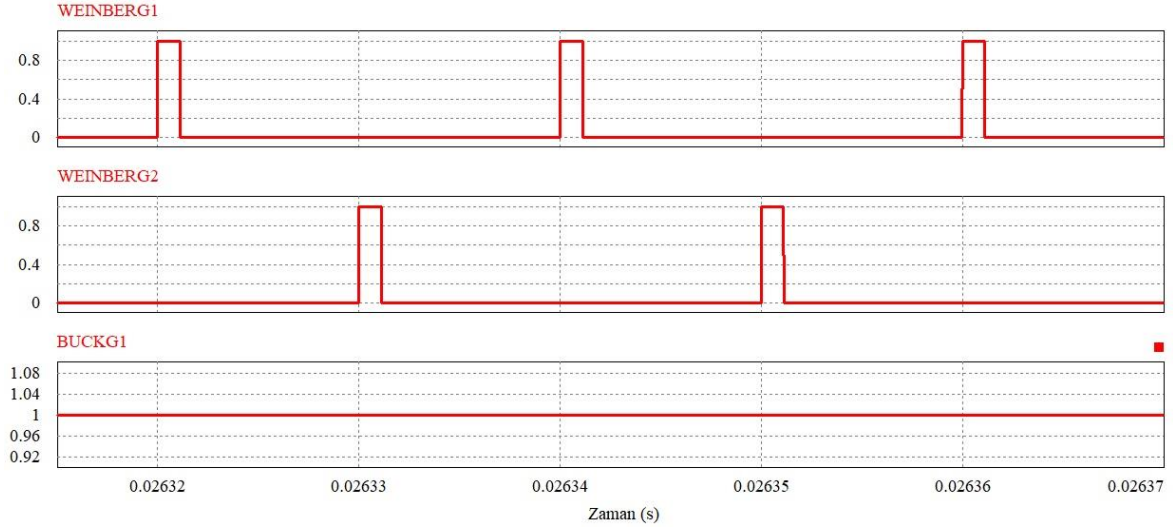
Şekil 3.33. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Giriş geriliminin 45 V olduğu durumda giriş endüktörünün sol yarısı üzerinden geçen akım IL1, giriş endüktörünün sağ yarısı üzerinden geçen akım IL2, transformatörün sol yarısı üzerinden geçen akım IT1, transformatörün sağ yarısı üzerinden geçen akım IT2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.34’te sunulmuştur.



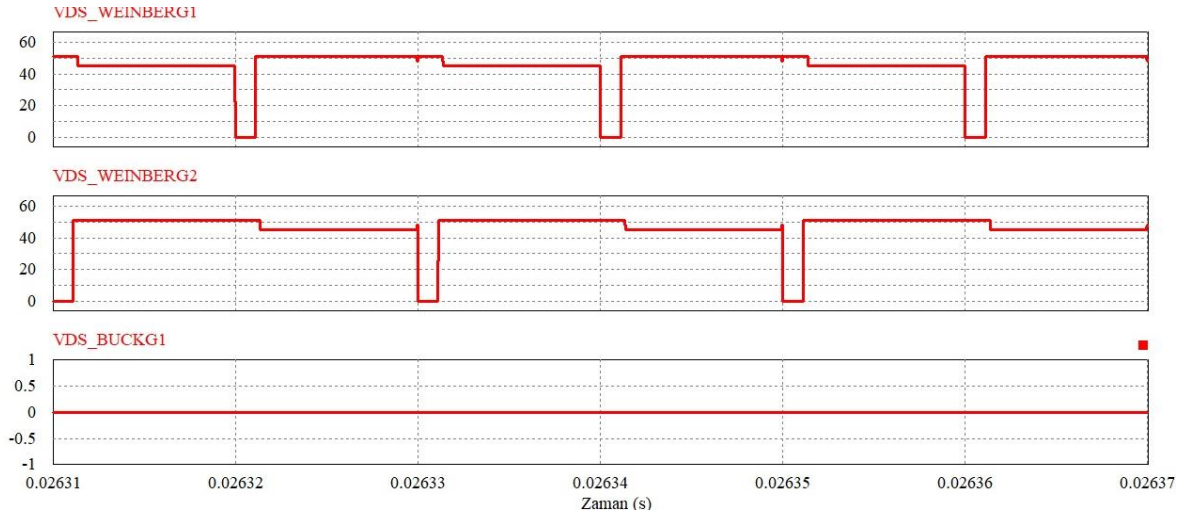
Şekil 3.34. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Giriş geriliminin 45 V olduğu durumda S1’in anahtarlama sinyali WEINBERG1, S2’nin anahtarlama sinyali WEINBERG2, S3’ün anahtarlama sinyali BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.35’te sunulmuştur.



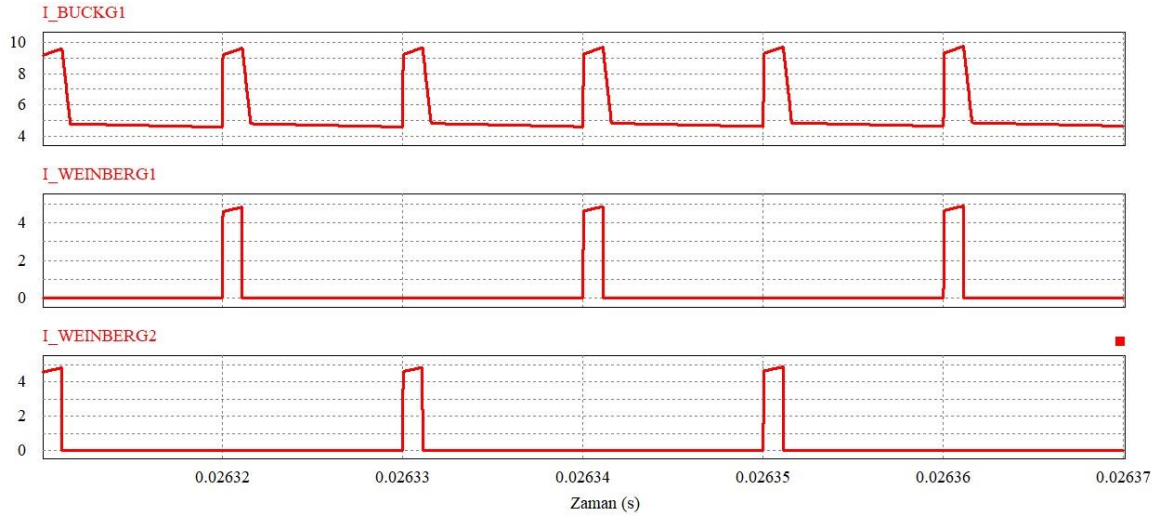
Şekil 3.35. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Giriş geriliminin 45 V olduğu durumda S3'ün terminalleri arasındaki gerilim VDS_BUCKG1, S1'in terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG1, S2'nin terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.36'da verilmiştir.



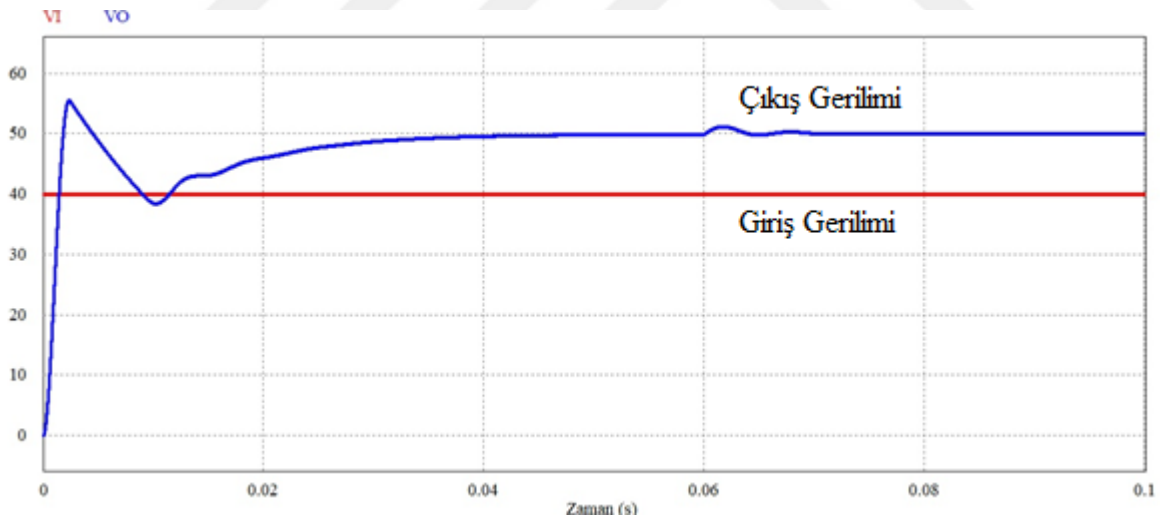
Şekil 3.36. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Giriş geriliminin 45 V olduğu durumda S1'in üzerinden akan akım I_WEINBERG1, S2'nin üzerinden akan akım I_WEINBERG2, S3'ün üzerinden akan akım I_BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.37'de sunulmuştur.



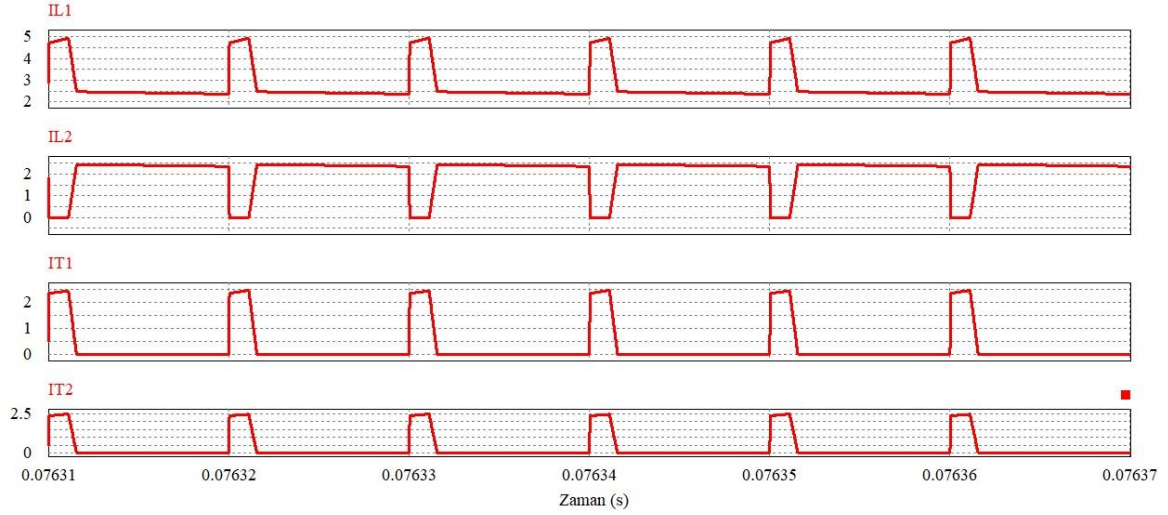
Şekil 3.37. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Önerilen güç dönüştürücüde $t = 0.06$ s anında yük yarıya indirilmiş, bu durumda elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.38’de sunulmuştur.



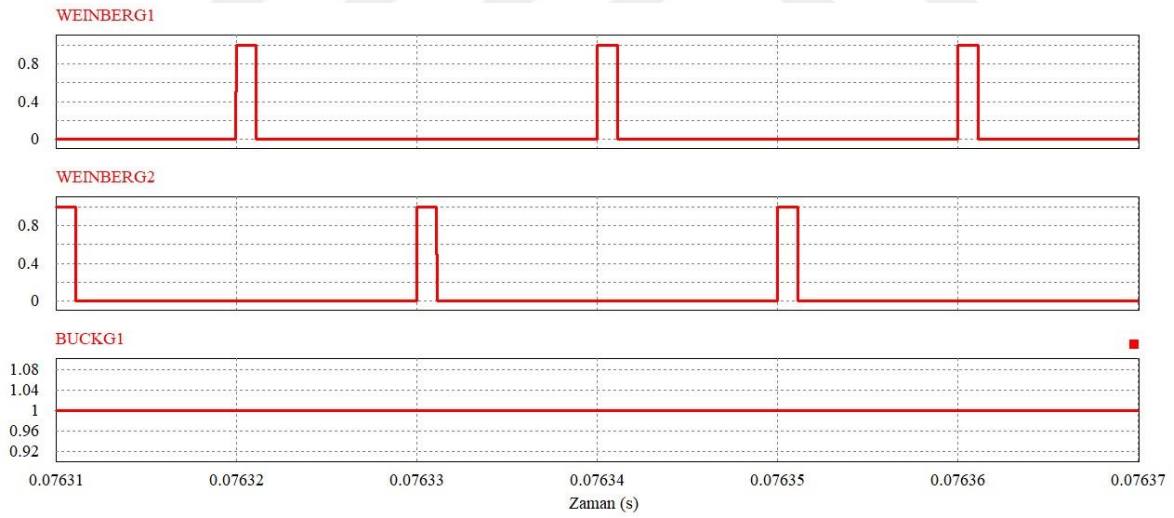
Şekil 3.38. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra sarımlardan geçen akımlarla ilgili grafikler Şekil 3.39’da verilmiştir.



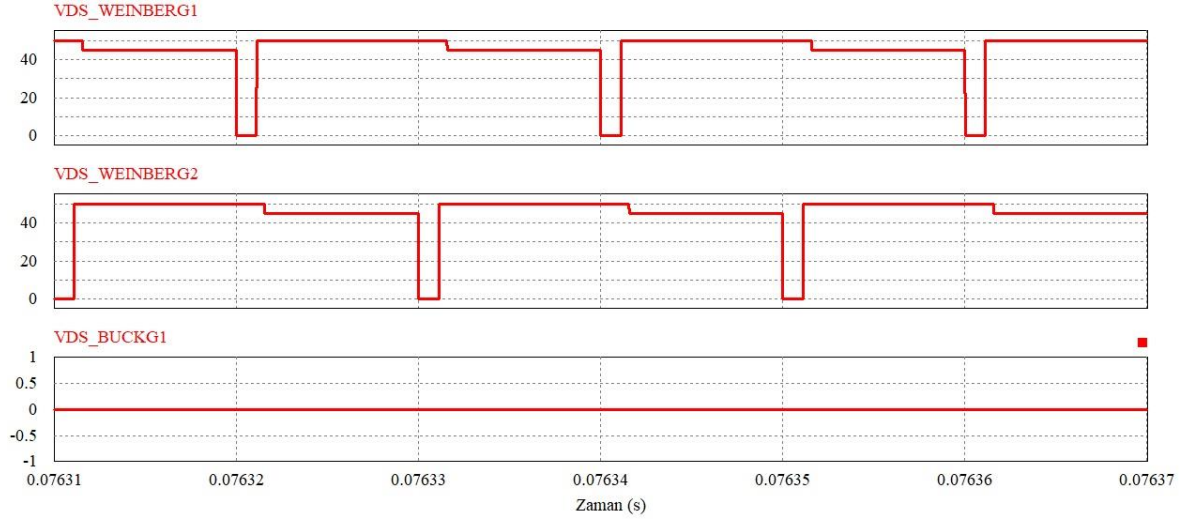
Şekil 3.39. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlama sinyalleri ile ilgili grafikler Şekil 3.40'ta verilmiştir.



Şekil 3.40. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtar terminalleri arasındaki gerilimlerle ilgili grafikler Şekil 3.41'de verilmiştir.



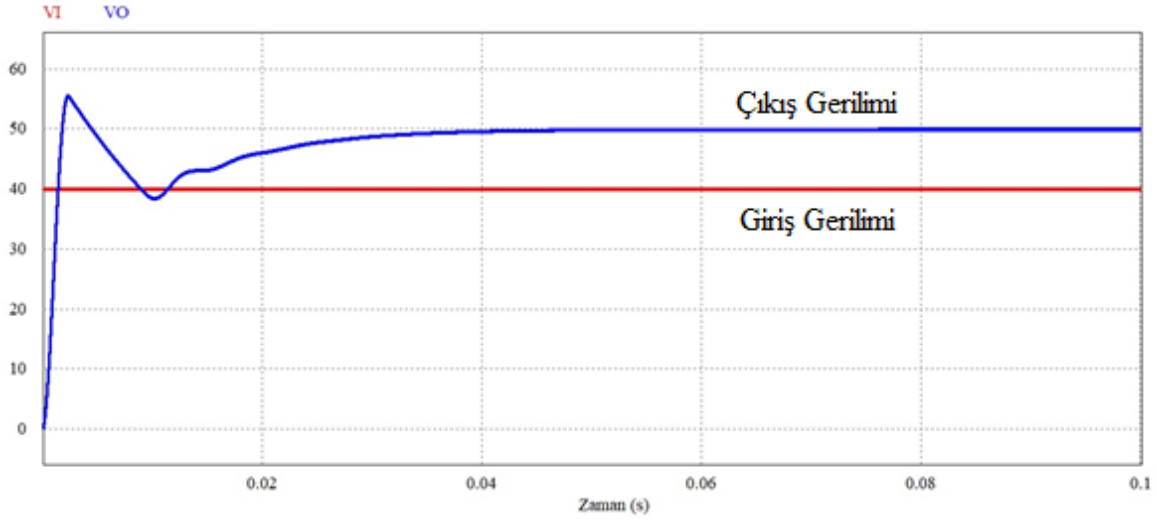
Şekil 3.41. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlar üzerinden geçen akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.42’de sunulmuştur.



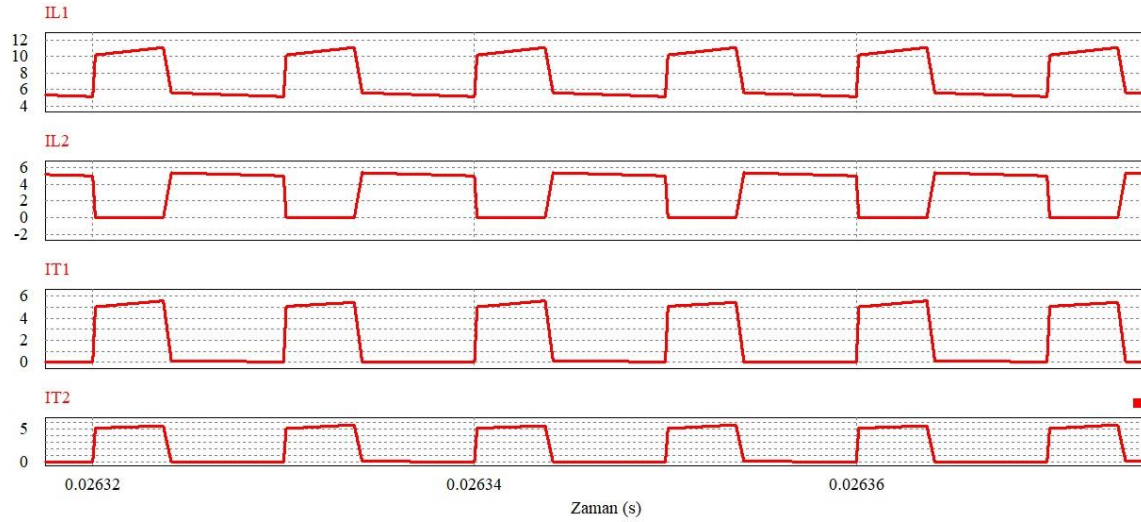
Şekil 3.42. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 45$ V için)

Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde 40 V giriş gerilimi için giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.43’te sunulmuştur.



Şekil 3.43. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Giriş geriliminin 40 V olduğu durumda giriş endüktörünün sol yarısı üzerinden geçen akım IL1, giriş endüktörünün sağ yarısı üzerinden geçen akım IL2, transformatörün sol yarısı üzerinden geçen akım IT1, transformatörün sağ yarısı üzerinden geçen akım IT2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.44’te verilmiştir.



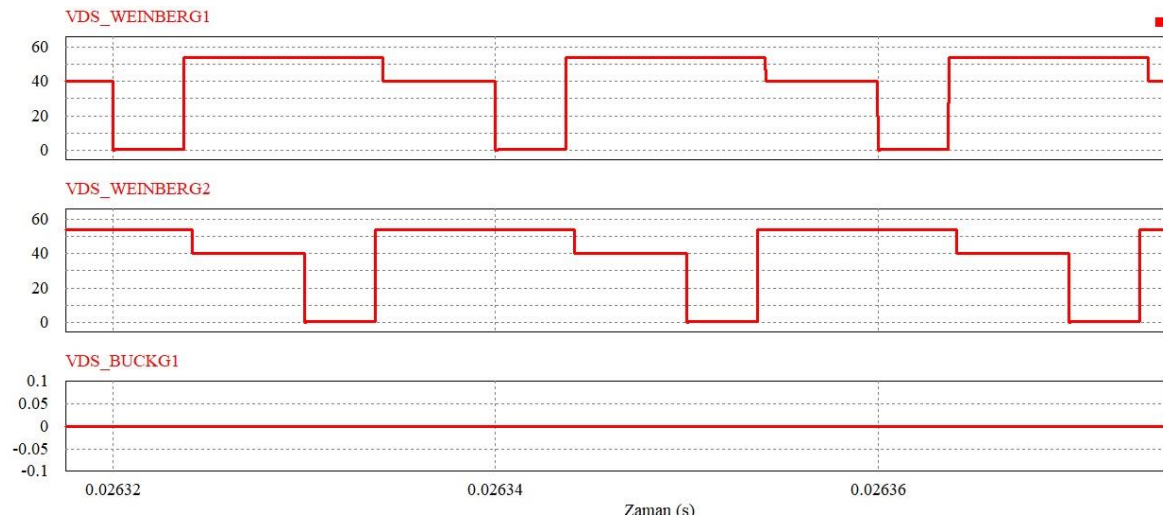
Şekil 3.44. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Giriş geriliminin 40 V olduğu durumda S1'in anahtarlama sinyali WEINBERG1, S2'nin anahtarlama sinyali WEINBERG2, S3'ün anahtarlama sinyali BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.45'te verilmiştir.



Şekil 3.45. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Giriş geriliminin 40 V olduğu durumda S3'ün terminalleri arasındaki gerilim VDS_BUCKG1, S1'in terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG1, S2'nin terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.46'da verilmiştir.



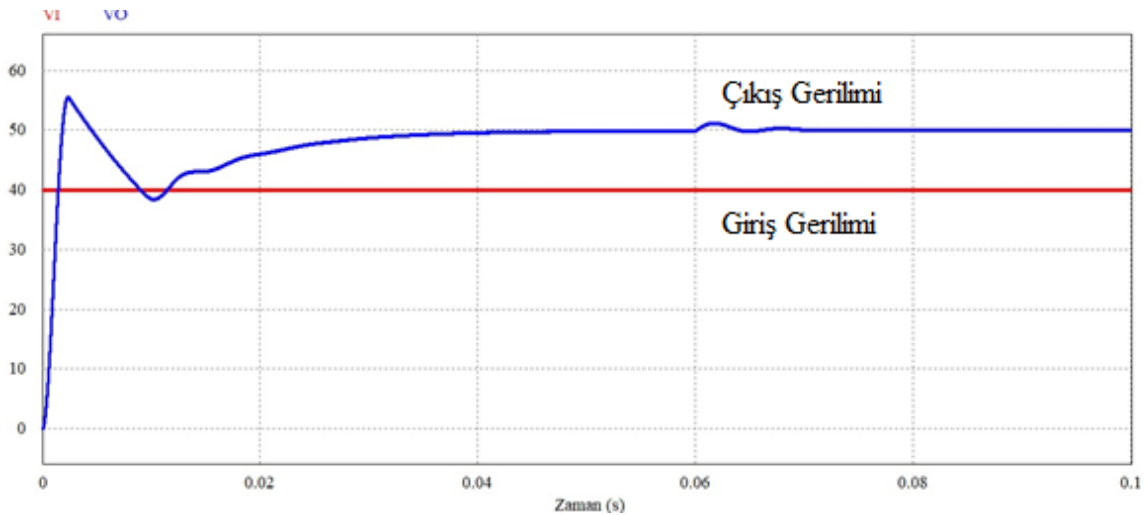
Şekil 3.46. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Giriş geriliminin 40 V olduğu durumda S1'in üzerinden akan akım $I_{\text{WEINBERG1}}$, S2'nin üzerinden akan akım $I_{\text{WEINBERG2}}$, S3'ün üzerinden akan akım I_{BUCKG1} şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.47'de verilmiştir.



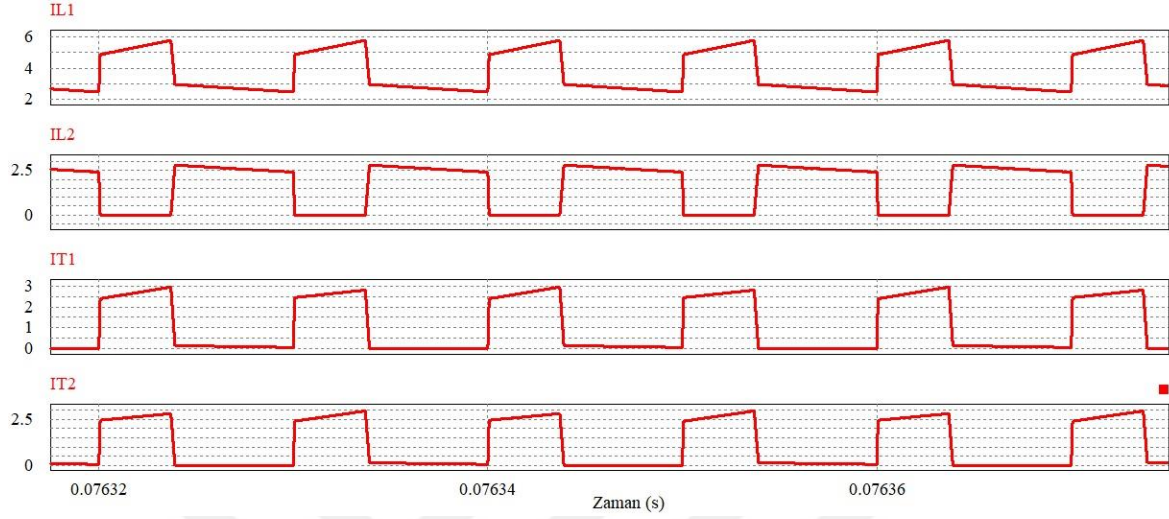
Şekil 3.47. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Önerilen güç dönüştürücüde $t = 0.06$ s anında yük yarıya indirilmiş, bu durumda elde edilen giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.48'de sunulmuştur.



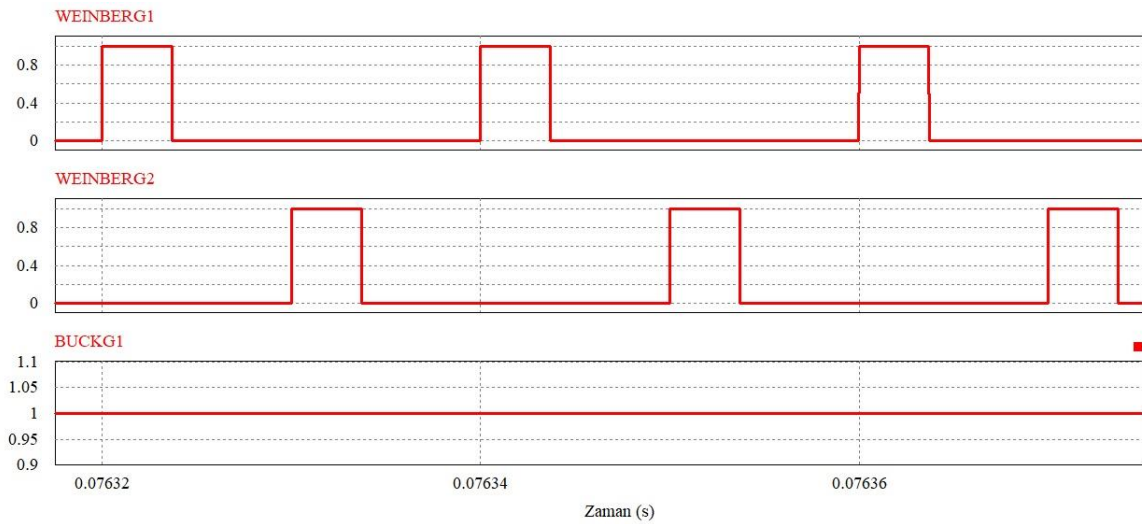
Şekil 3.48. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra sarımlardan geçen akımlarla ilgili grafikler Şekil 3.49'da sunulmuştur.



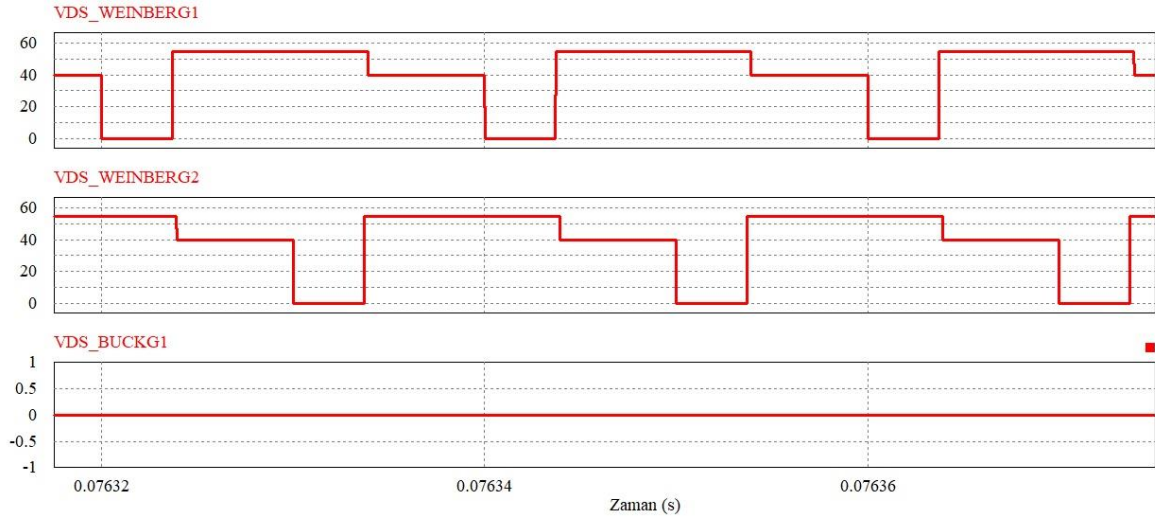
Şekil 3.49. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra sarımlarından geçen akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlama sinyalleri ile ilgili grafikler Şekil 3.50'de verilmiştir.



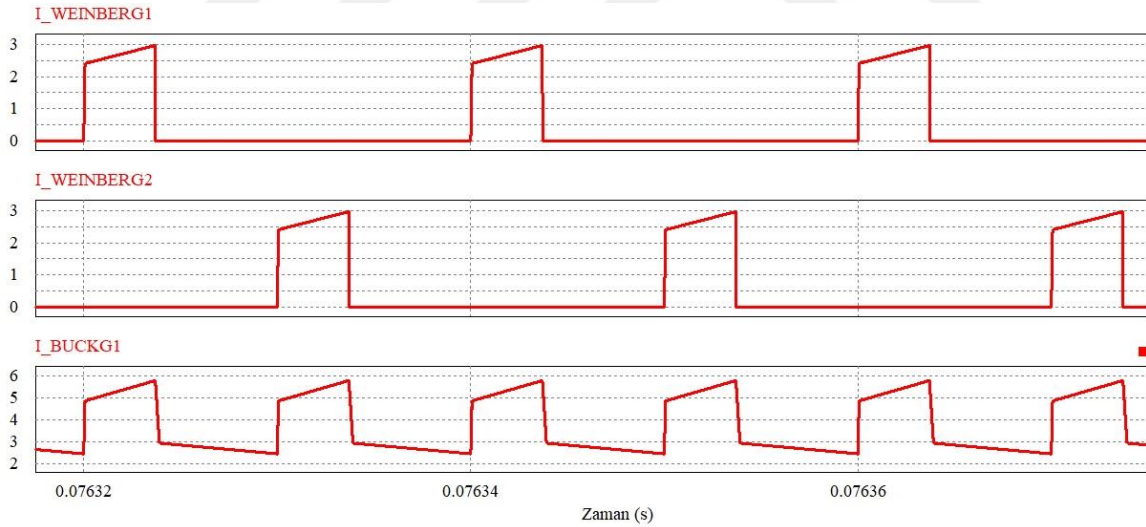
Şekil 3.50. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarlama sinyalleri (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtar terminalleri arasındaki gerilimlerle ilgili grafikler Şekil 3.51'de sunulmuştur.



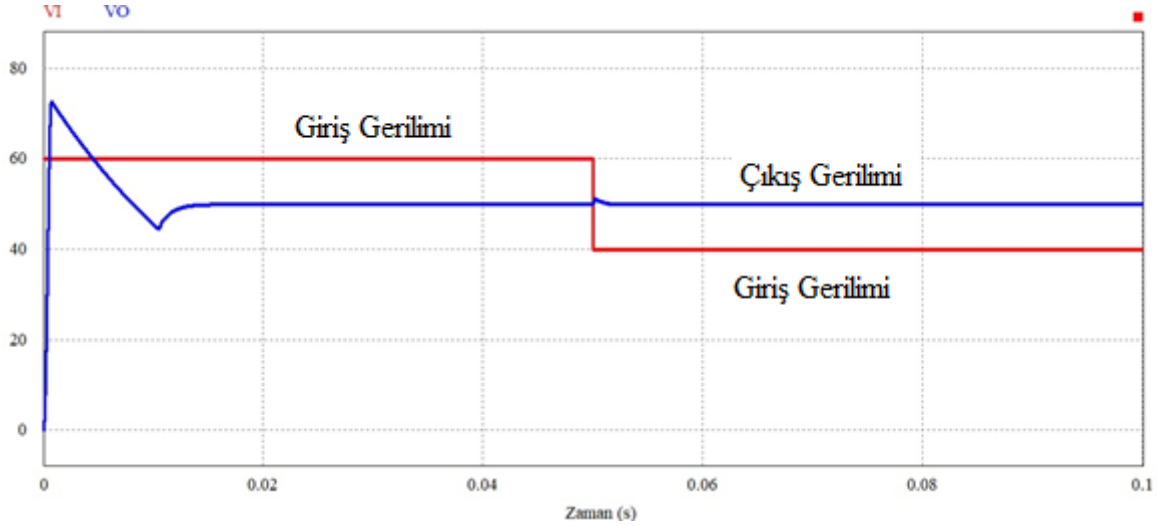
Şekil 3.51. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra terminalleri arasındaki gerilimler (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Yük yarıya indirildikten sonra anahtarlar üzerinden geçen akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.52’de verilmiştir.



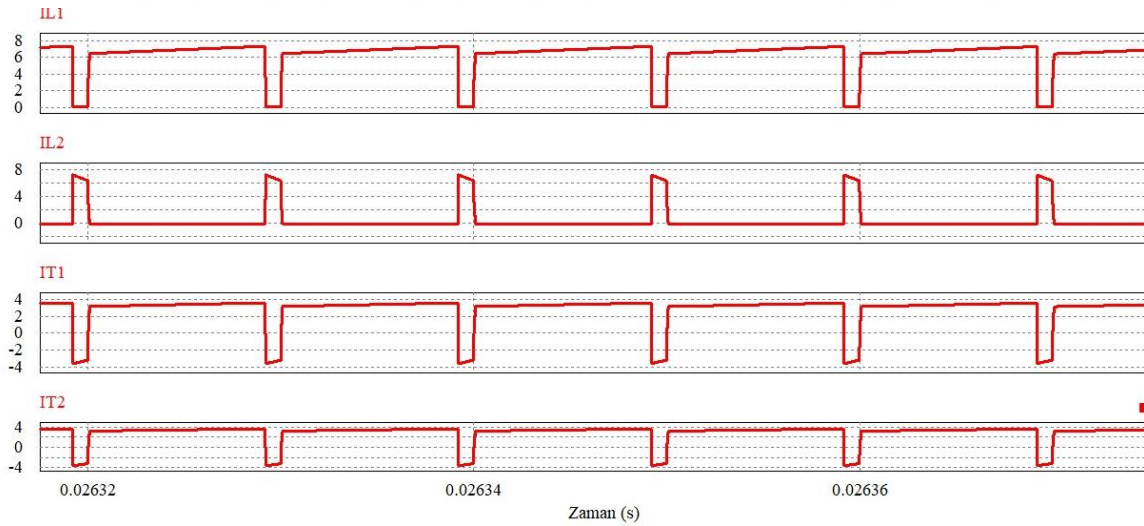
Şekil 3.52. Önerilen güç dönüştürücünün yükü değiştirildikten sonra anahtarları üzerinden akan akımlar (Weinberg kipi, $V_i = 40$ V için)

Önerilen güç dönüştürücünün kipler arasındaki geçişi $t = 0.05$ s anında giriş gerilimi 60 V’tan 40 V’a düşürülerek incelenmiş, bu durum için giriş ve çıkış gerilimi Şekil 3.53’te sunulmuştur.



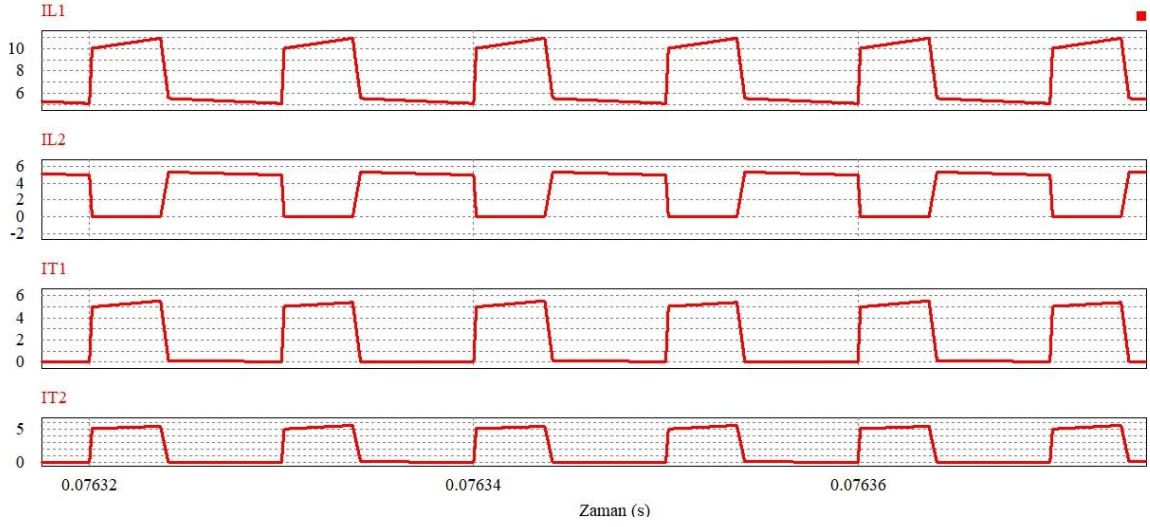
Şekil 3.53. Önerilen güç dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi (Kipler arası geçiş durumu)

Kip geçişinden önce giriş geriliminin 60 V olduğu durumda giriş endüktörünün sol yarısı üzerinden geçen akım IL1, giriş endüktörünün sağ yarısı üzerinden geçen akım IL2, transformatörün sol yarısı üzerinden geçen akım IT1, transformatörün sağ yarısı üzerinden geçen akım IT2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.54'te sunulmuştur.



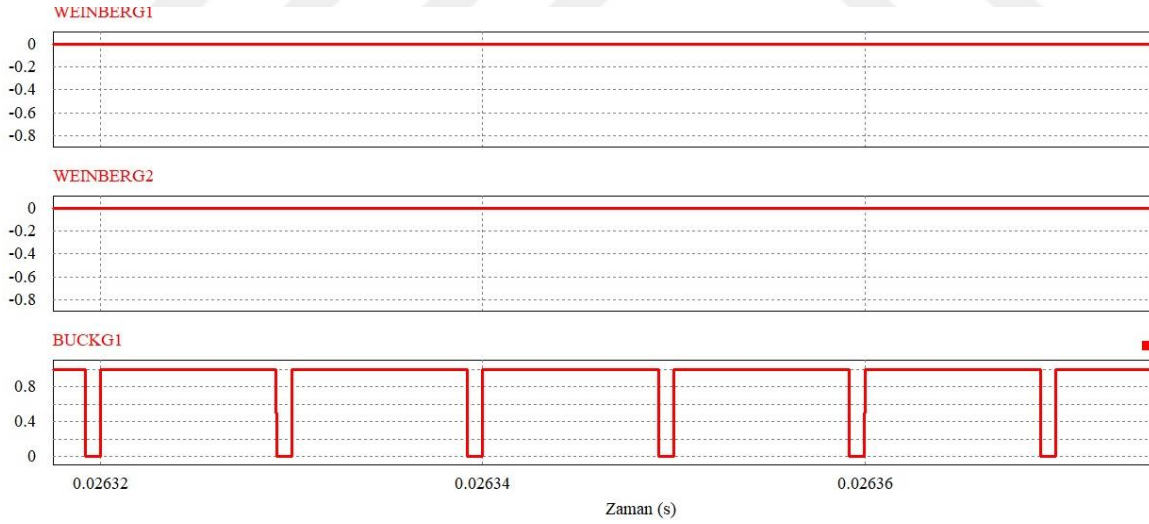
Şekil 3.54. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)

Kip geçişinden sonra giriş geriliminin 40 V olduğu durumda sarımlardan geçen akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.55'te verilmiştir.



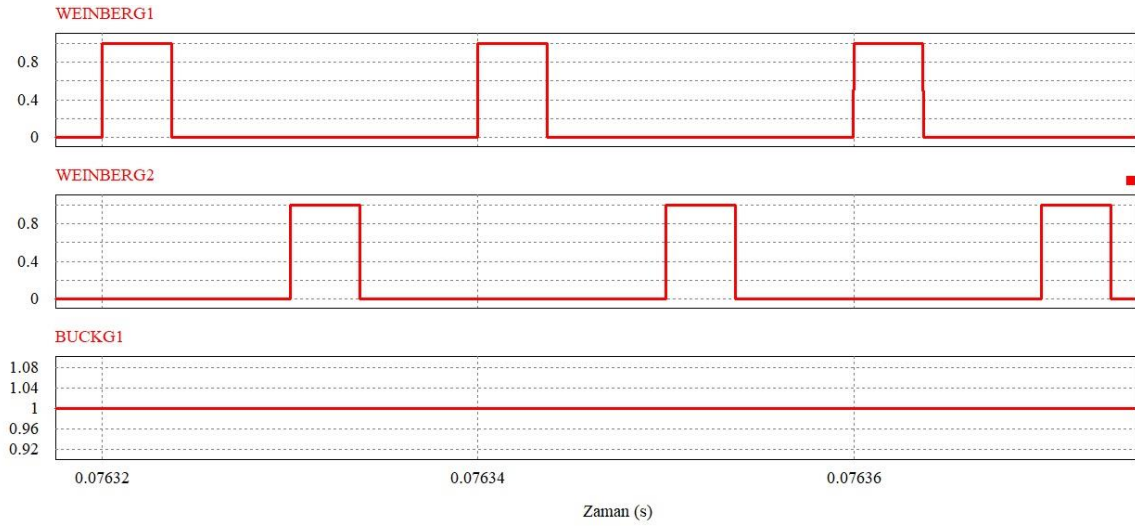
Şekil 3.55. Önerilen güç dönüştürücünün sarımlarından geçen akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi)

Kip geçişinden önce giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S1'in anahtarlama sinyali WEINBERG1, S2'nin anahtarlama sinyali WEINBERG2, S3'ün anahtarlama sinyali BUCKG1 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.56'da verilmiştir.



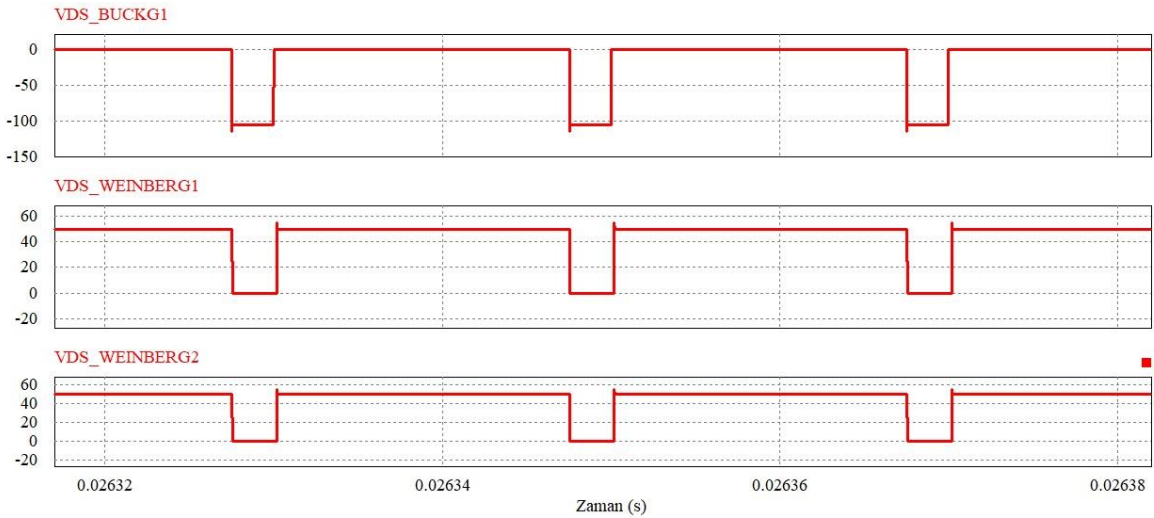
Şekil 3.56. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)

Kip geçişinden sonra giriş geriliminin 40 V olduğu durumda anahtarlama sinyalleri ile ilgili grafikler Şekil 3.57'de sunulmuştur.



Şekil 3.57. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarlama sinyalleri (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi)

Kip geçişinden önce giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S3'ün terminalleri arasındaki gerilim VDS_BUCKG1, S1'in terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG1, S2'nin terminalleri arasındaki gerilim VDS_WEINBERG2 şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.58'de verilmiştir.



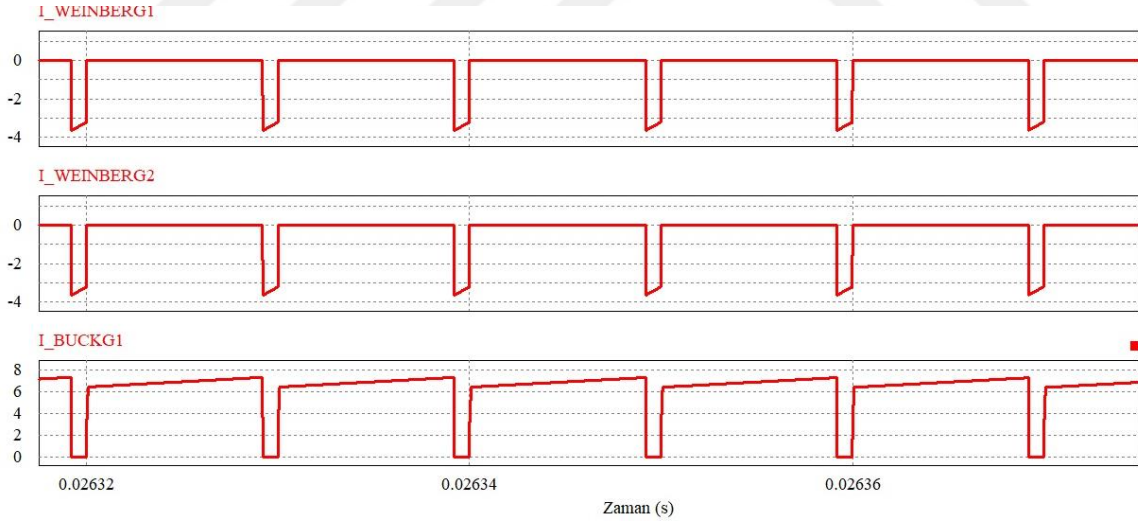
Şekil 3.58. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)

Kip geçişinden sonra giriş geriliminin 40 V olduğu durumda anahtar terminalleri arasındaki gerilimler ile ilgili grafikler Şekil 3.59'da verilmiştir.



Şekil 3.59. Önerilen güç dönüştürücünün anahtar terminalleri arasındaki gerilimler (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi)

Kip geçişinden önce giriş geriliminin 60 V olduğu durumda S1'in üzerinden akan akım $I_{WEINBERG1}$, S2'nin üzerinden akan akım $I_{WEINBERG2}$, S3'ün üzerinden akan akım I_{BUCKG1} şeklinde isimlendirilerek ilgili grafikler Şekil 3.60'ta verilmiştir.



Şekil 3.60. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Buck kipi)

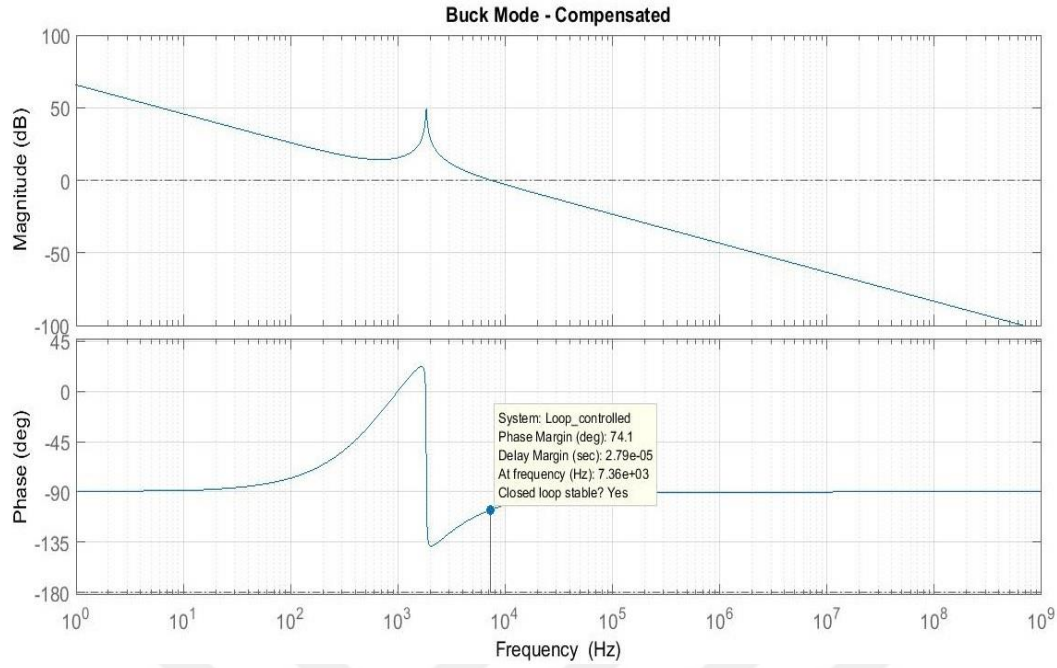
Kip geçişinden sonra giriş geriliminin 40 V olduğu durumda anahtarlar üzerinden akan akımlar ile ilgili grafikler Şekil 3.61'de sunulmuştur.



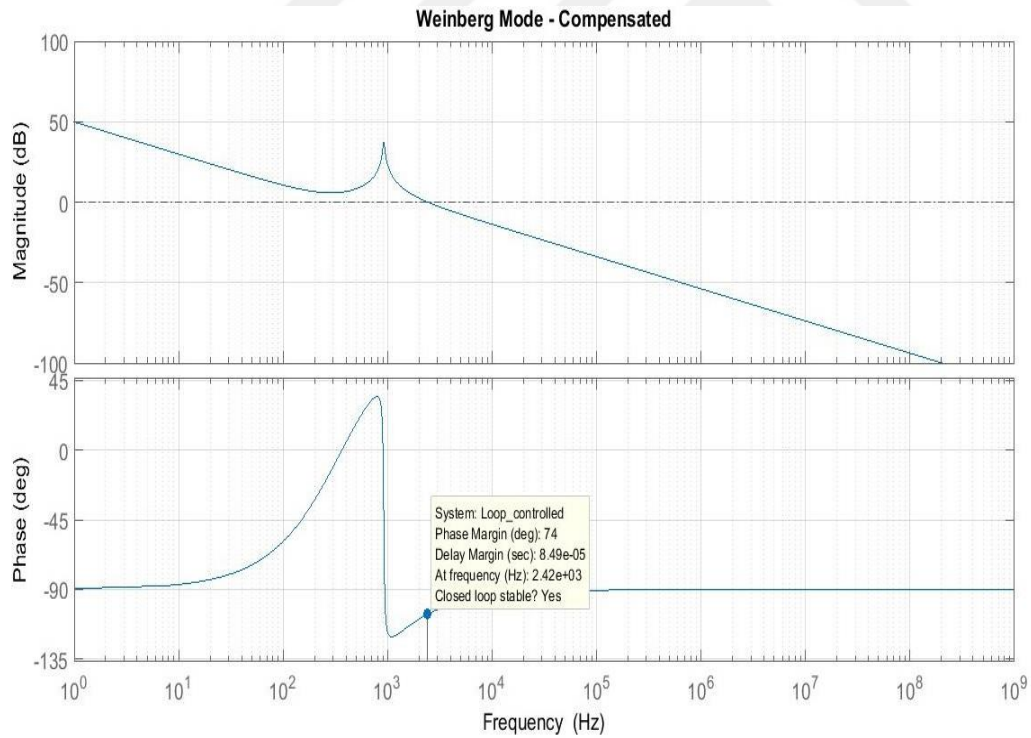
Şekil 3.61. Önerilen güç dönüştürücünün anahtarları üzerinden akan akımlar (Kipler arası geçiş durumu-Weinberg kipi)

Gerçekleştirilen çalışmalarda simülasyon sonuçları, sunulan eşitliklerle tutarlı şekilde elde edilmiştir. Çıkış gerilimi çeşitli durumlar için ve giriş gerilimi ve yük geçişlerinde hedef gerilim değerinde (50 V) sabitlenmiştir ve çıkış geriliminin üzerindeki gerilim dalgacığı hedeflenenden çok daha düşük değerde elde edilmiştir ($\pm 2V$). Önerilen güç dönüştürücünün çalışması böylece simülasyonlar yolu ile sunulmuştur.

MATLAB yazılımı kullanılması yolu ile Bode grafikleri elde edilerek önerilen güç dönüştürücünün kararlılığı analiz edilmiştir. Kompanze edilmiş çalışmalar için incelemeler gerçekleştiğinde, Buck durumunda çalışma için geçiş frekansı 7.36 KHz ve faz payı 74.1° iken, Weinberg durumunda çalışma için geçiş frekansı 2.42 KHz ve faz payı 74° değerlerinde çıkmıştır. Bu değerler [138]'de sunulan asgari kabul edilebilir değerlerden çok daha iyi performans sağlamaktadır. Buck durumunda çalışmaya ait Bode çizimleri Şekil 3.62'de ve Weinberg durumunda çalışmaya ait Bode çizimleri Şekil 3.63'te verilmiştir. Sunulan Bode çizimlerine göre kompanzasyon katsayıları uygun şekilde ayarlandığında bahsedilen güç dönüştürücünün kararsızlık problemi olmadan işlem görebileceği yorumlanabilir.



Şekil 3.62. Kompanze edilmiş durum için Bode grafiği (Buck çalışma kipi için)



Şekil 3.63. Kompanze edilmiş durum için Bode grafiği (Weinberg çalışma kipi için)

3.4. Önerilen Güç Dönüştürücünün Güvenilirlik Analizi

Önerilen güç dönüştürücünün çalışması her çalışma durumu için doğrulandıktan sonra güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Uydular bir kez fırlatıldıktan sonra bakım-onarım faaliyetleri mümkün olmadığından sürdürülebilirlikleri güvenilirliklerine bağlıdır. Bu nedenle uyduda görev alacak her bir birimin belli bir güvenilirlik değerine sahip olması gereklidir. Sistemin güvenilirliği tüm görev ömrü boyunca komponentlerin birlikte görevini gerçekleştirebilmesine dayanır. Uydu alanında uçuş tarihçesi ile ilgili gerçek bilgiler sadece az sayıda uydu için bulunmaktadır. Bu da güvenilirlik tahminlerini zor, tartışmalı, hatta şüpheli hale getirmektedir. Yine de bu tahminler birçok açıdan kullanışlıdır, en azından bu tahminler temel alınarak güvenilirlik zincirindeki zayıf halkalar tanımlanıp düzeltilebilir. Komponent güvenilirlik tahmini zaman boyunca o komponentin hata oranına (failure in time: FIT) (risk oranı olarak da bilinir) bağlıdır ve bu değer bir komponentin milyon saatteki hata sayısı ve yıla bağlı olarak hata oranını gösterir. Verilen zaman boyunca ömür başı ya da sonu olmasına bağlı olmaksızın rastgele hataların sayısıdır. Başka bir ifadeyle, rastgele hata durumunda komponent verilen zaman boyunca başarısız olmazsa yeni kadar iyidir. Ancak rastgele başarısızlıkların kümülatif doğası gereği zaman geçtikçe komponentin başarıyla çalışma olasılığı zaman geçtikçe üstel olarak azalmaktadır.

Bu durumda güvenilirlik Poisson dağılım fonksiyonu ile Eş. 3.29'daki şekilde belirtilebilir. Burada $R(t)$ güvenilirliği ve Λ hata oranını (birim zamandaki hata sayısı) belirtmektedir. $R(t)$ güvenilirlik fonksiyonu sistemin $[0, t]$ zaman aralığında hatasız çalışma olasılığını, Λ hata oranı ise t zamanı geçtikten sonra hataya maruz kalan komponent sayısını göstermektedir [161, 162].

$$R(t) = e^{-\Lambda t} \quad (\text{Eş. 3.29})$$

Eş. 3.29 kullanılarak klasik Weinberg dönüştürücü ve klasik Buck dönüştürücünün birlikte kullanıldığı durum ve önerilen güç dönüştürücünün kullanıldığı durum için güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Dönüştürücülerin güvenilirlikleri hesaplanırken [163, 164]'te verilen komponent güvenilirlik değerleri kullanılmıştır. Uydu görev ömrüne göre dönüştürücülerin güvenilirlikleri karşılaştırılmış ve ilgili değerler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Önerilen güç dönüştürücünün kullanıldığı durumda klasik Weinberg

dönüştürücü ve klasik Buck dönüştürücünün birlikte kullanıldığı duruma göre güvenilirlik daha yüksektir ve bu fark görev ömrü arttıkça daha belirgin şekilde görülmektedir.

Çizelge 3.3. Belirtilen dönüştürücülerin güvenilirliklerinin karşılaştırılması

Yıla Göre Güvenilirlik Değeri	Klasik Buck Dönüştürücü + Klasik Weinberg Dönüştürücü	Önerilen Güç Dönüştürücü
R (1)	0,9997579	0,9997759
R (3)	0,99927	0,99933
R (5)	0,99879	0,99888
R (7)	0,998307	0,998432
R (10)	0,997582	0,997761

4. ÖNERİLEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Önerilen güç dönüştürücünün çalışması farklı çalışma kipleri için incelenmiştir. Önerilen güç dönüştürücünün çalışmasını incelemek için 250 W güç değerine sahip, kaynak gerilim aralığı 40-60 V, çıkış gerilimi 50 V (± 2 V), çalışma frekansı 100 kHz olan bir prototip devre oluşturulmuştur. Prototip devreye ait donanım parametreleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Prototip donanım parametreleri

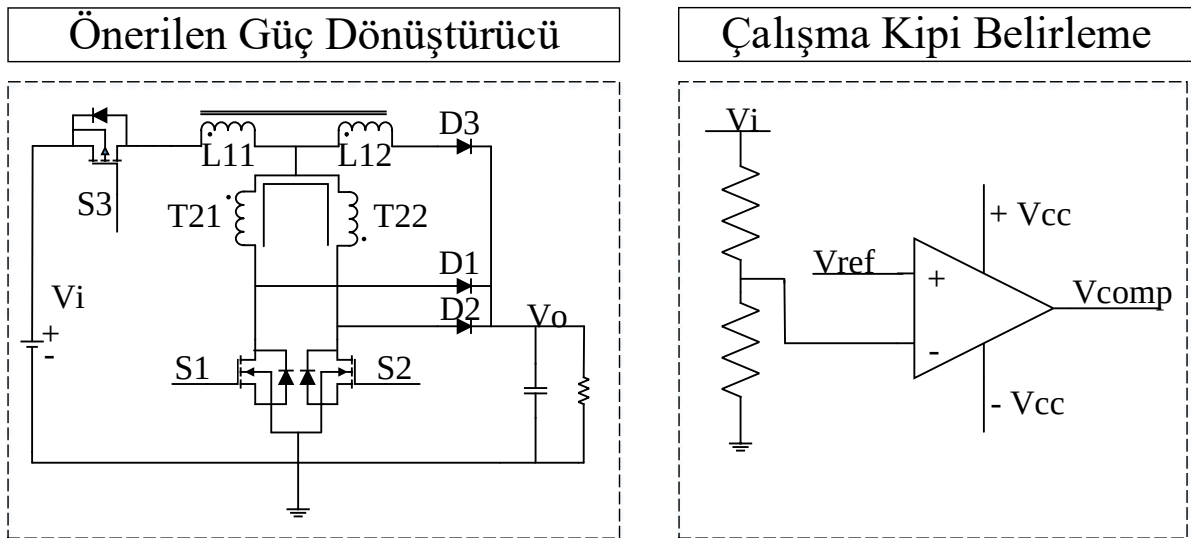
Parametre	Değer
Giriş Gerilimi	40 – 60 V
Çıkış Gerilimi	50 V (± 2 V)
Güç	250 W
Çalışma Frekansı	100 kHz
Diyot	$V_R = 150$ V, $V_F = 0,71$ V, $I_F = 2 \times 20$ A
MOSFET-NMOS	$V_{DSS} = 100$ V, $I_D = 57$ A, $R_{DS(ON)} = 23$ m Ω
MOSFET-PMOS	$V_{DSS} = -100$ V, $I_D = -38$ A, $R_{DS(ON)} = 60$ m Ω
Transformatör	$L_{T1} = L_{T2} = 500$ μ H
Endüktör	$L_{L1} = L_{L2} = 50$ μ H
Çıkış Kapasitörü	2000 μ F (2 x 1000 μ F)

Önerilen dönüştürücünün en kritik parçası olarak yorumlanabilecek endüktör-transformatör çiftine ait parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Prototip donanım parametreleri tespit edilirken hem Weinberg çalışma kipi [83], hem de Buck çalışma kipi [145] için çalışmayı doğrulayabilecek değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Endüktör-transformatör çiftine ait parametreler

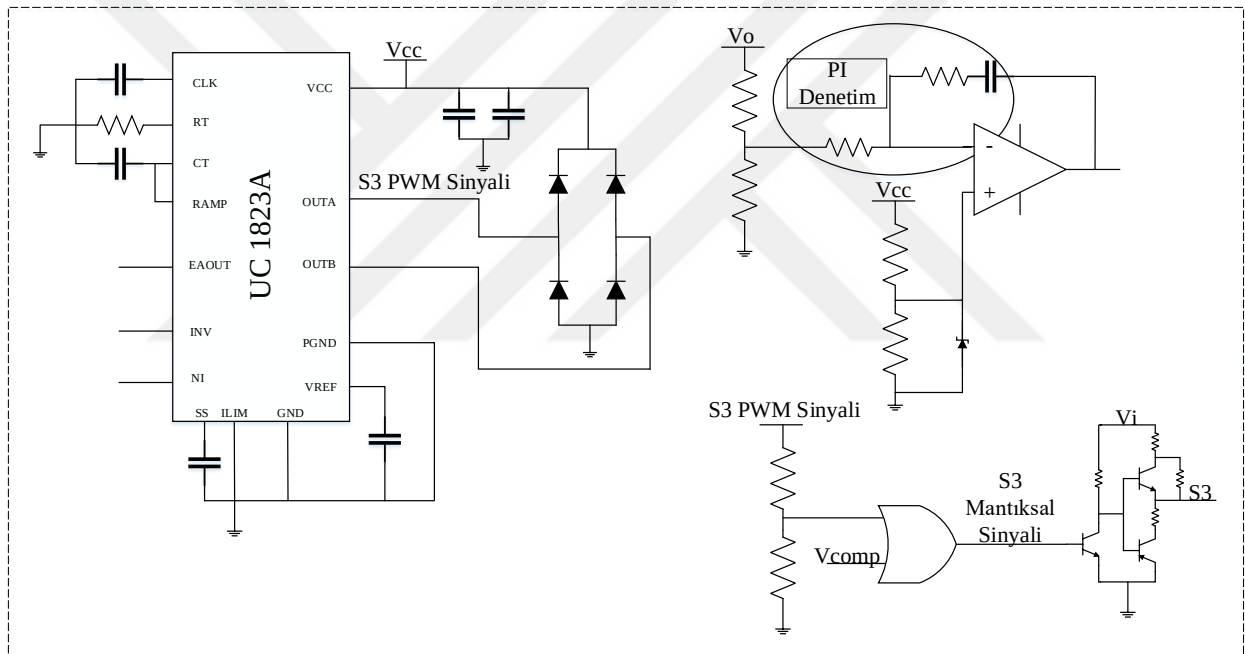
	İndüktör	Transformatör
Sarım Sayısı	15	10
Endüktans Değeri	50 μ H	500 μ H
Tepe Akım Değeri	16 A	8 A
Kablo Çapı	0,404 mm (26 AWG)	0,404 mm (26 AWG)
Kablo Sayısı	10	10
Çekirdek Değeri	RM14 (boşluklu)	RM14 (boşluksuz)
Çekirdek A_L Değeri	250 nH $\pm$ % 3	6000 nH % +30 / -20
Çekirdek Malzemesi	N87	N87

Bahsedilen güç dönüştürücü topolojisi ve bu dönüştürücünün çalışma kipiinin belirlenmesini sağlayan bloklar Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Weinberg ve Buck dönüştürücülerin tek bir topolojide birleştirilmesiyle elde edilen güç dönüştürücünün girişindeki gerilimden alınan örnek, referans gerilim değeri ile karşılaştırılmakta; bu karşılaştırma işleminin sonucuna göre üretilen V_{comp} sinyali ile dönüştürücünün çalışma kipi belirlenmektedir. Giriş gerilimi referans geriliminden büyük olduğunda karşılaştırma sonucu $-V_{cc}$, küçük olduğunda $+V_{cc}$ değerine eşit olmaktadır.



Şekil 4.1. Önerilen güç dönüştürücü ve çalışma kipiinin belirlenmesi

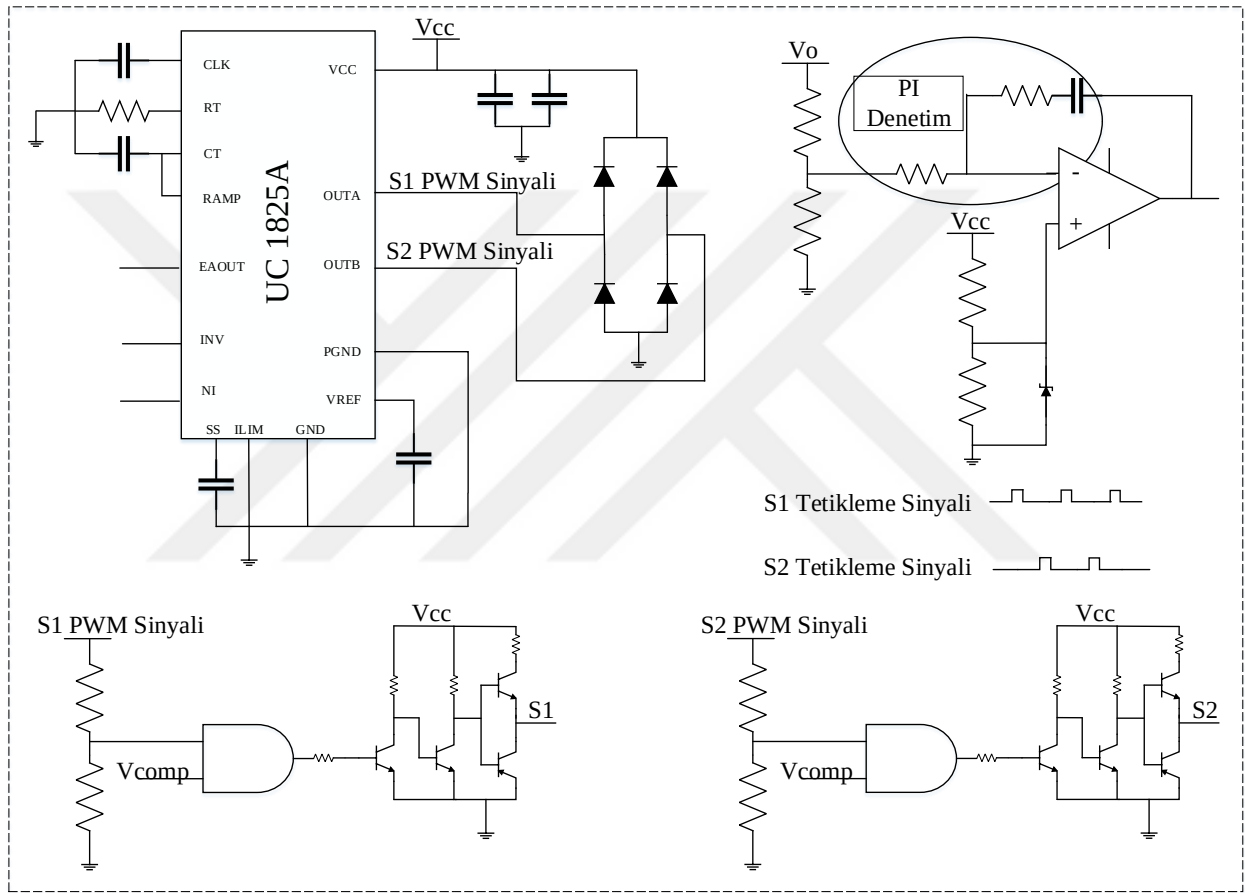
Şekil 4.2’de önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde çalışması için tasarlanan kontrol katı görülmektedir. Giriş geriliminin referans gerilim değerinden yüksek olduğu durumda V_{comp} sinyali $-V_{cc}$ değerine sahip olmakta, önerilen güç dönüştürücü S1 ve S2 anahtarlarının sürekli kesimde olması ve S3 anahtarının anahtarlama sonucu Buck kipinde çalışmaktadır. Çıkış geriliminden alınan örneğe PI kontrol uygulanarak giriş gerilimindeki ve çıkış yükündeki değişikliklere karşı çıkış gerilimi hedeflenen değerde sabit tutulmaktadır. S3 anahtarı için anahtarlama entegresinden elde edilen sürme sinyali örneklenerek V_{comp} sinyali ile mantıksal VEYA işlemine tabi tutulmakta ve anahtarlama sinyali bu işlemin ardından uygun değere getirilerek S3 anahtarının anahtarlama gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.2. Önerilen güç dönüştürücünün Buck kipi için kontrol katı

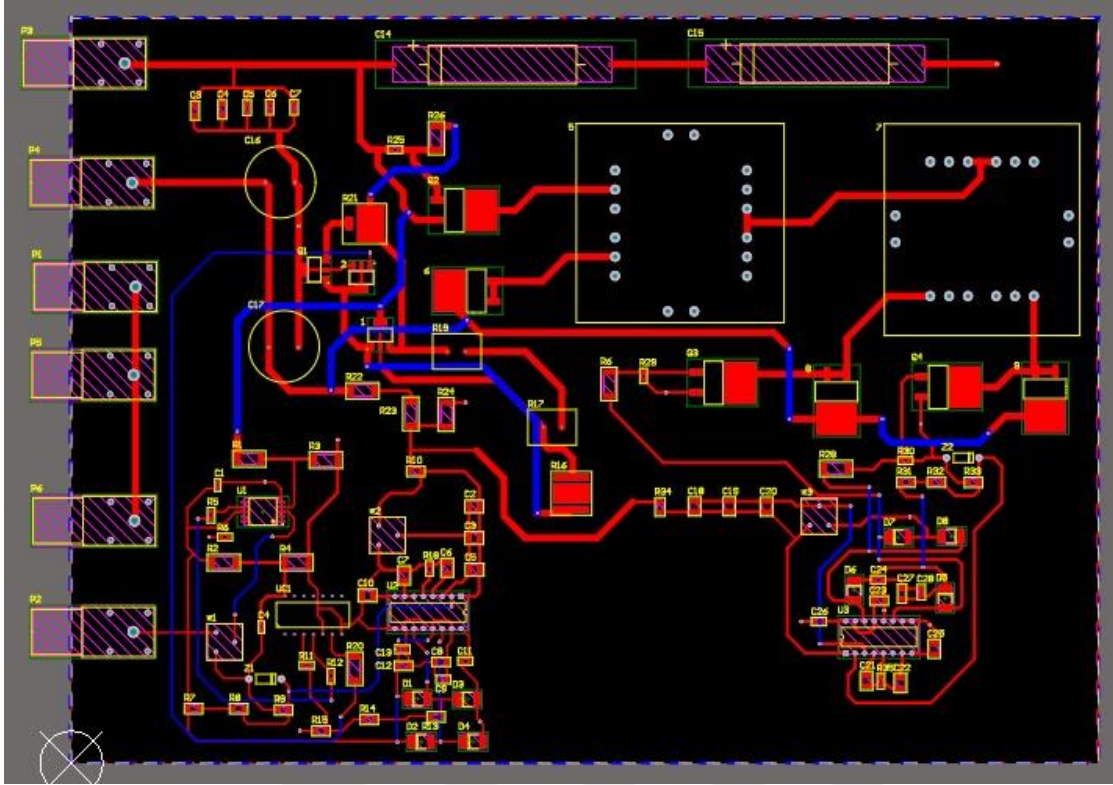
Şekil 4.3’te önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışması için tasarlanan kontrol katı görülmektedir. Giriş geriliminin referans gerilim değerinden düşük olduğu durumda V_{comp} sinyali $+V_{cc}$ değerine sahip olmakta, bunun sonucunda S3 anahtarı sürekli olarak iletimde bulunmaktadır. S1 ve S2 anahtarları 180° faz kaydırmalı şekilde anahtarlansınca önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışması gerçekleştirilmektedir. Çıkış geriliminden alınan örneğe PI kontrol uygulanarak giriş gerilimindeki ve çıkış yükündeki değişikliklere karşı çıkış gerilimi hedeflenen değerde sabit tutulmaktadır. S1 ve S2 anahtarları için anahtarlama entegresinden elde edilen sürme

sinyalleri örneklenerek V_{comp} sinyali ile mantıksal VE işlemine tabi tutulmakta ve anahtarlama sinyali bu işlemin ardından uygun değere getirilerek S1 ve S2 anahtarının anahtarlama gerçeleştirilmektedir. Bu kipte çalışma durumunda giriş gerilimi referans gerilimden küçük olduğundan V_{comp} sinyali $-V_{cc}$ değerine sahip olmakta, S1 ve S2 anahtarlama sinyallerinin değeri mantıksal işlem sonunda aynı değerde elde edilerek bu anahtarlar sürülmektedir.



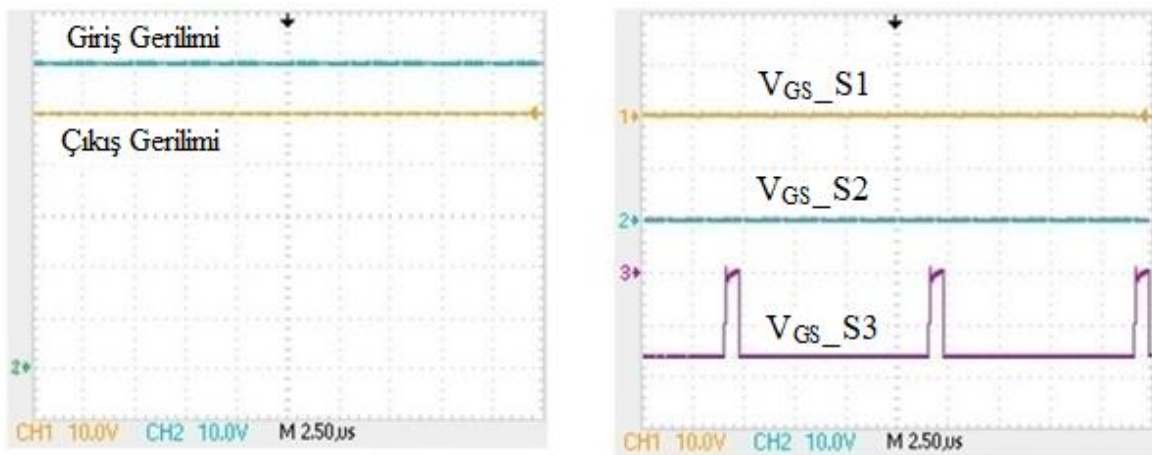
Şekil 4.3. Önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipi için kontrol katı

Önerilen güç dönüştürücünün kontrollü çalışmasını doğrulamak amacıyla Altium Designer yazılımı kullanılarak bir prototip devre tasarlanmıştır. Prototip baskı devre kartı iki kata çizilmiş olup alt yüz sadece delikler üzerinden elektriksel hatların geçişini sağlamak üzere yol çiziminde kullanılmıştır, bu yüzde herhangi bir komponent bulunmamaktadır. Dönüştürücü çıkışındaki süperkapasitöre bağlı yükü modellemek için yük simülatörü sabit akım ve sabit güç kiplerinde çalıştırılmış ve sonuçlar gözlenmiştir. Altium Designer programı kullanılarak hazırlanan PCB Şekil 4.4'te verilmiştir.



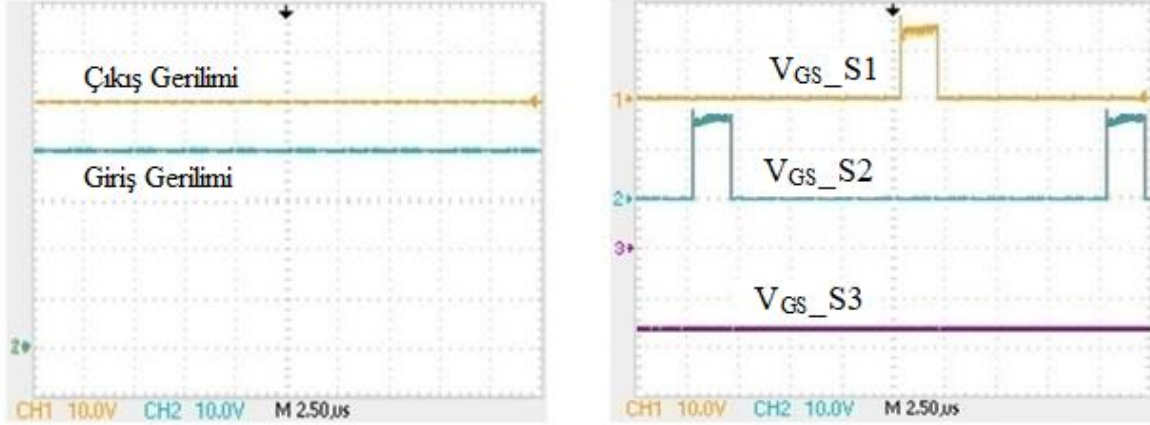
Şekil 4.4. Kontrollü çalışmayı doğrulamak için hazırlanan PCB

Şekil 4.5'te önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde çalışma durumu için giriş ve çıkış gerilimleri ile ilgili anahtarlama sinyalleri görülmektedir. 60 V giriş gerilimi için çıkış gerilimi hedeflenen 50 V değerine oturmakta, S1 ve S2 anahtarları sürekli kesimdeyken S3 anahtarı anahtarlama yapmaktadır.



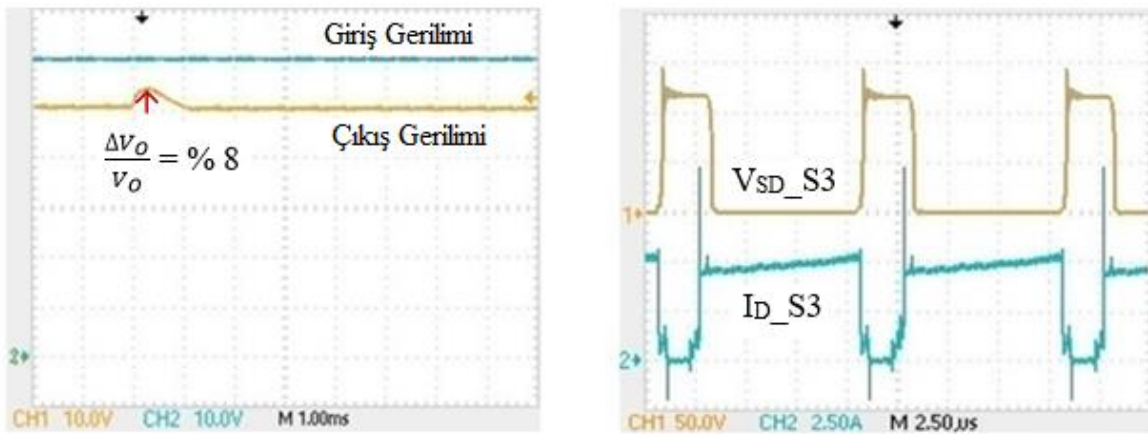
Şekil 4.5. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve anahtarlama sinyalleri (Buck çalışma kipi)

Şekil 4.6’da önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışma durumu için giriş ve çıkış gerilimleri ile ilgili anahtarlama sinyalleri görülmektedir. 40 V giriş gerilimi için çıkış gerilimi hedeflenen 50 V değerine oturmakta, S1 ve S2 anahtarları anahtarlama yaparken S3 anahtarı sürekli olarak iletimde kalmaktadır.



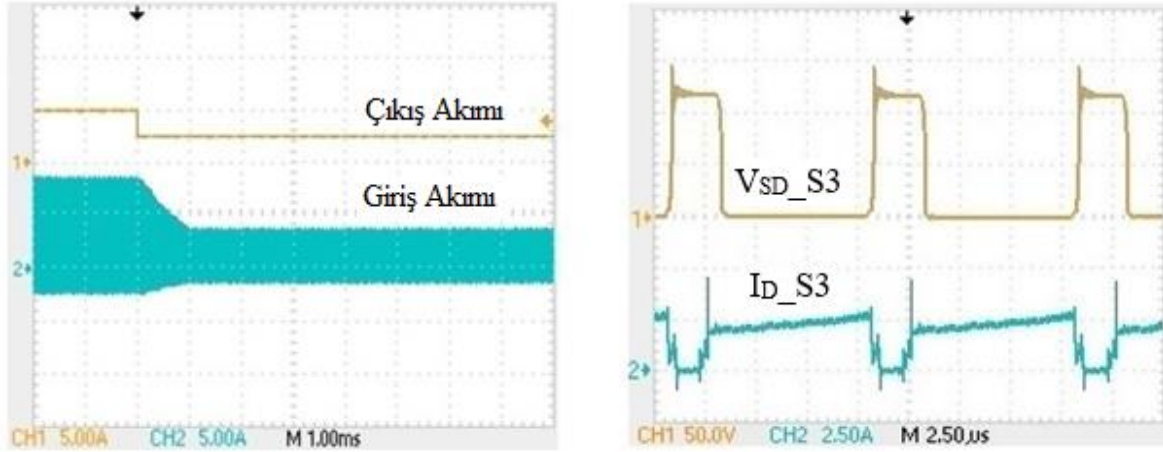
Şekil 4.6. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve anahtarlama sinyalleri (Weinberg çalışma kipi)

Şekil 4.7’de önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde çalışma durumunda 250 W değerinden 125 W değerine yük geçişi için giriş ve çıkış gerilimleri ile 250 W yük değeri için S3 anahtarına ait V_{SD} gerilimi ve I_D akımının değerleri görülmektedir. Bu anahtara ait akım aynı zamanda giriş akımıdır. Düşük değerdeki bir yükselmeden sonra çıkış gerilimi hedef değere oturmaktadır.



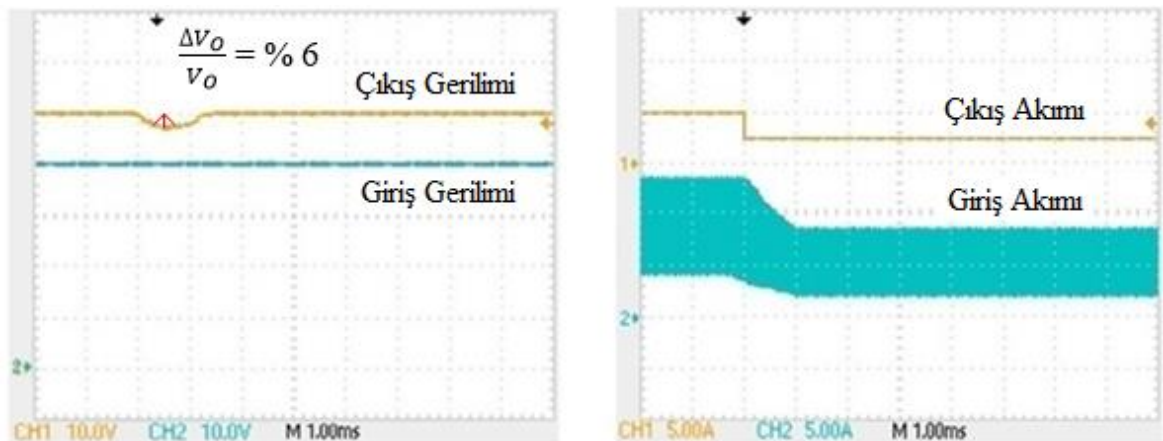
Şekil 4.7. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve S3 anahtarına ait V_{SD} gerilim ve I_D akım sinyalleri (Buck çalışma kipi – yük geçişi)

Şekil 4.8’de önerilen güç dönüştürücünün Buck kipinde çalışma durumunda 250 W değerinden 125 W değerine yük geçişi için giriş ve çıkış akımları ile 125 W yük değeri için S3 anahtarına ait V_{SD} gerilimi ve I_D akımının değerleri görülmektedir.



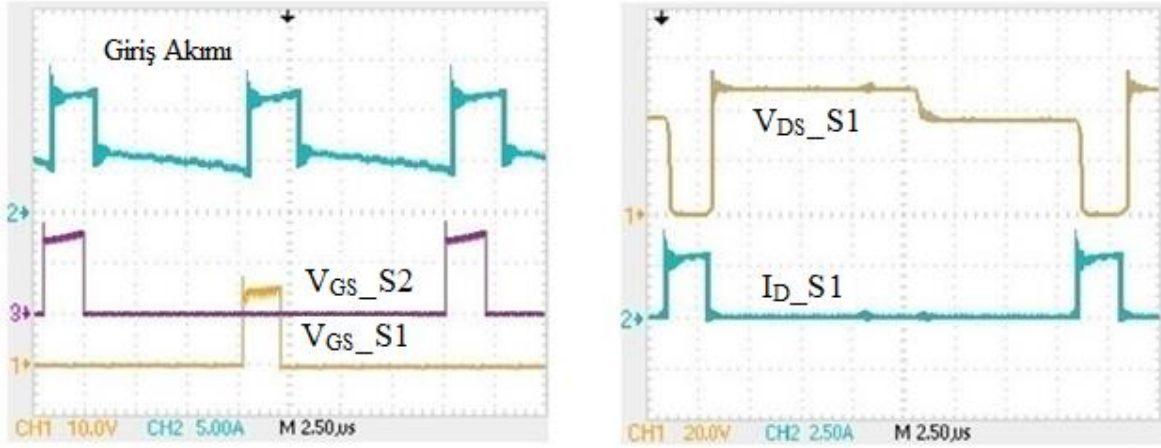
Şekil 4.8. $V_i = 60$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış akımları ve S3 anahtarına ait V_{SD} gerilim ve I_D akım sinyalleri (Buck çalışma kipi – yük geçişi)

Şekil 4.9’da önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışma durumunda 250 W değerinden 125 W değerine yük geçişi için kaynak ve çıkış gerilimleri ile kaynak ve çıkış akımları görülmektedir. Kısa süreli bir düşmeden sonra çıkış gerilimi hedef değere oturmaktadır.



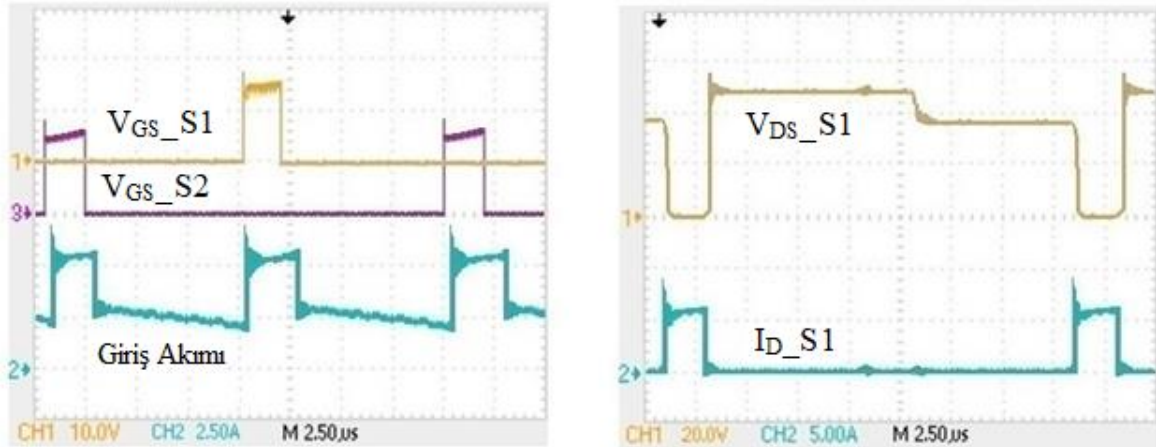
Şekil 4.9. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş ve çıkış gerilimleri ve giriş ve çıkış akımları (Weinberg çalışma kipi – yük geçişi)

Şekil 4.10'da önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışma durumunda 250 W değerinde giriş akımı ve S1 ve S2'nin anahtarlama sinyalleri ile S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı görülmektedir.



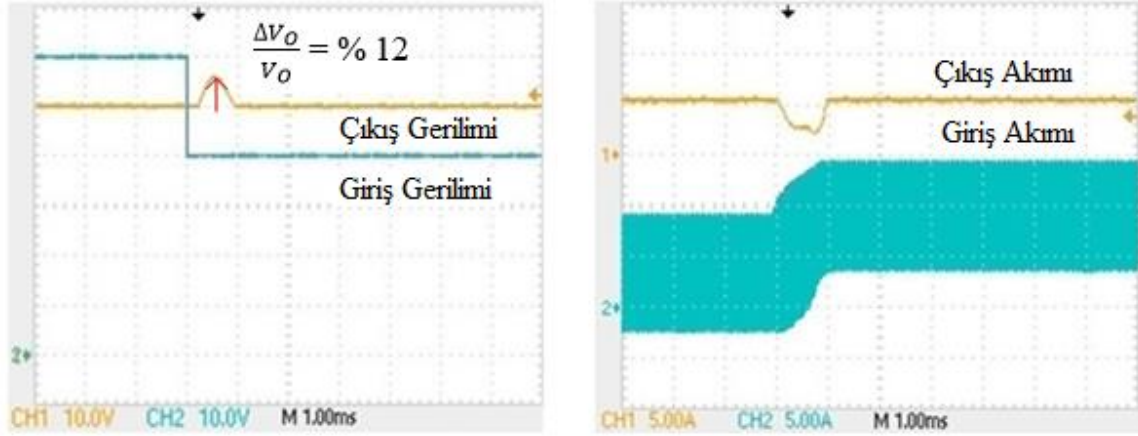
Şekil 4.10. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş akımı ve S1 ve S2 anahtarlama sinyalleri ve S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı (250 W için)

Şekil 4.11'de önerilen güç dönüştürücünün Weinberg kipinde çalışma durumunda 125 W değerinde giriş akımı ve S1 ve S2'nin anahtarlama sinyalleri ile S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı görülmektedir.



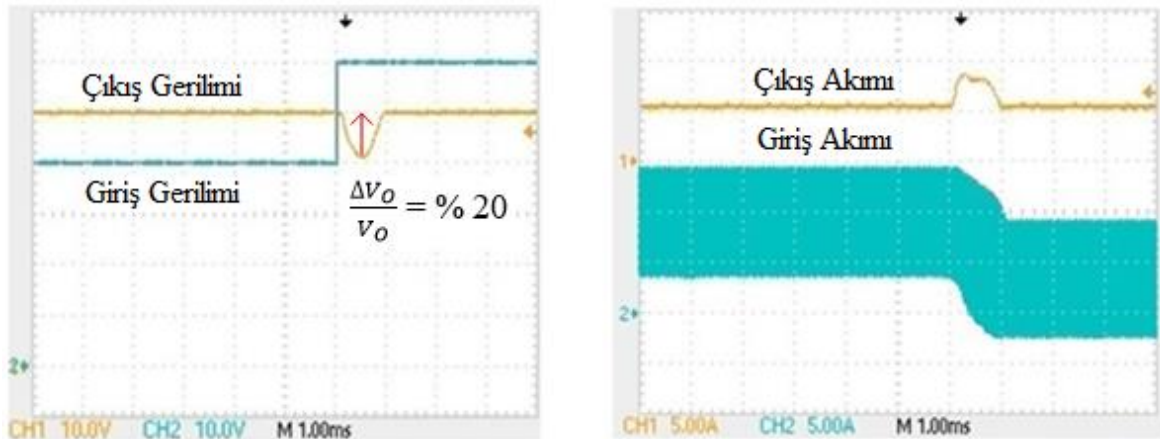
Şekil 4.11. $V_i = 40$ V için osiloskopta görülen giriş akımı ve S1 ve S2 anahtarlama sinyalleri ve S1 anahtarına ait V_{DS} gerilimi ve I_D akımı (125 W için)

Şekil 4.12’de önerilen güç dönüştürücünün Buck çalışma kipinden Weinberg çalışma kipine geçtiği durum için kaynak ve çıkış gerilimleri ile kaynak ve çıkış akımları görülmektedir.



Şekil 4.12. $V_i = 60\text{ V}$ 'tan $V_i = 40\text{ V}$ 'a geçiş için giriş ve çıkış gerilimleri ile giriş ve çıkış akımları

Şekil 4.13’te önerilen güç dönüştürücünün Weinberg çalışma kipinden Buck çalışma kipine geçtiği durum için kaynak ve çıkış gerilimleri ile kaynak ve çıkış akımları görülmektedir.



Şekil 4.13. $V_i = 40\text{ V}$ 'tan $V_i = 60\text{ V}$ 'a geçiş için giriş ve çıkış gerilimleri ile giriş ve çıkış akımları

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla önerilen güç dönüştürücünün yük geçişlerine ve giriş gerilimindeki geçişlere cevap verebildiği, çalışma durumundaki değişikliklerde çıkış

geriliminin her koşulda hedef değere oturarak sistemin kontrole cevap verdiği görülmüştür. Deneysel çalışmaların sonuçları teorik değerler ve benzetim sonuçları ile uyumludur.

Önerilen güç dönüştürücünün çalışması her çalışma durumu için doğrulanıp verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Hem yükselten, hem düşüren kip için verim hesabında komponentlerin iletim ve kesim boyunca üzerlerindeki kayıplar dikkate alınarak benzetimler ve deneysel ölçümlerle verim hesaplanmıştır. Elde edilen verim değerleri, Weinberg kipi için Çizelge 4.3 ve Buck kipi için Çizelge 4.4'te verilmiştir.

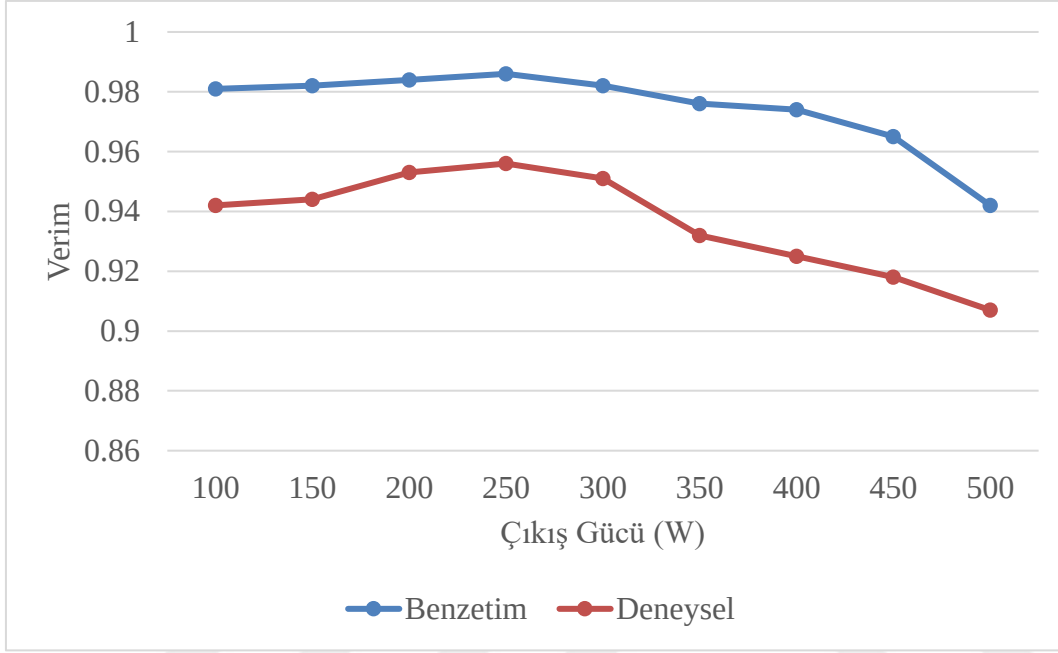
Çizelge 4.3. Önerilen dönüştürücünün Weinberg kipi için verim değerleri

Io (A)	Po (W)	Verim (Benzetim Sonuçları)	Verim (Deneysel Sonuçlar)
2	100	0,981	0,942
3	150	0,982	0,944
4	200	0,984	0,953
5	250	0,986	0,956
6	300	0,982	0,951
7	350	0,976	0,932
8	400	0,974	0,925
9	450	0,965	0,918
10	500	0,942	0,907

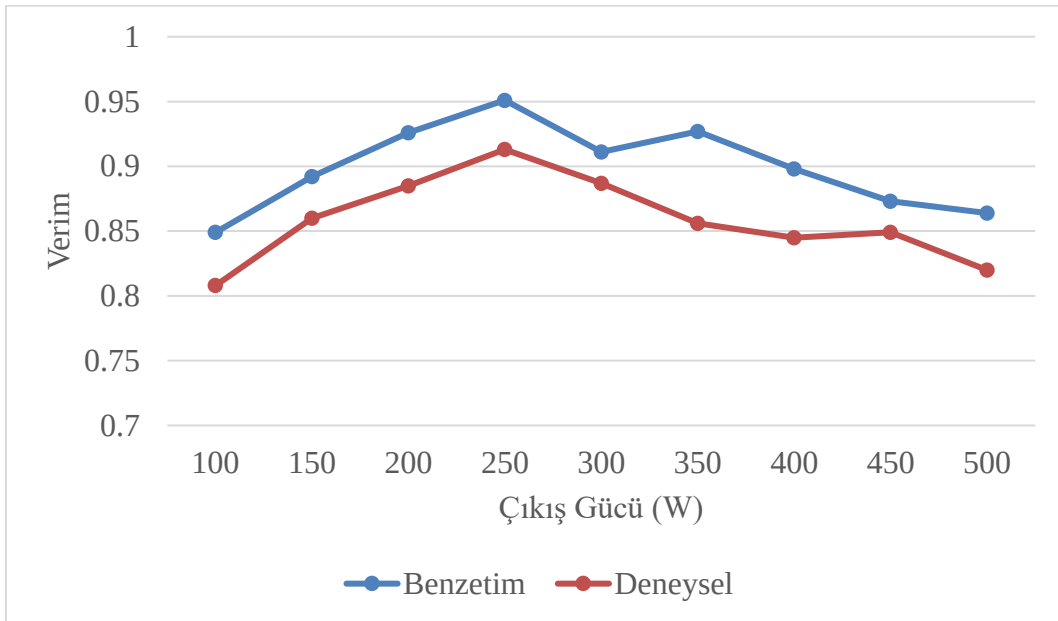
Çizelge 4.4. Önerilen dönüştürücünün Buck kipi için verim değerleri

Io (A)	Po (W)	Verim (Benzetim Sonuçları)	Verim (Deneysel Sonuçlar)
2	100	0.849	0.808
3	150	0.892	0.86
4	200	0.926	0.885
5	250	0.951	0.913
6	300	0.911	0.887
7	350	0.927	0.856
8	400	0.898	0.845
9	450	0.873	0.849
10	500	0.864	0.82

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'e dayanarak farklı çıkış güç değerleri için karşılık gelen verim grafikleri, Weinberg kipi için Şekil 4.14'te ve Buck kipi için Şekil 4.15'te verilmiştir. Bu grafiklerden önerilen dönüştürücünün tasarlandığı güç değeri civarında en yüksek verimle çalıştığı görülmekte olup bu durum tüm güç dönüştürücüler için beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4.14. Önerilen dönüştürücünün Weinberg kipi için verim analizi



Şekil 4.15. Önerilen dönüştürücünün Buck kipi için verim analizi



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmada SAR uydularındaki ani güç ihtiyacını karşılamak amacıyla pilden süperkapasitöre enerji akışını gerçekleştirecek yeni bir güç dönüştürücü topolojisi sunulmuştur. Pilden ani akımların çekildiği durumlarda pil ömrü, buna bağlı olarak uydu görev ömrü kısalmaktadır. Anlık güç ihtiyaçlarının pil yerine süperkapasitörden sağlandığı bir uydu güç alt sistemi mimarisinde bu sorun ortadan kalkacaktır. Elektrikli araçlardakine benzer bu mimaride pil ile süperkapasitör arasına yerleştirilen bir güç dönüştürücü ile girişteki pilin gerilimi süperkapasitöre hem artırılarak, hem de azaltılarak süperkapasitörün beslenmesi sağlanabilecektir.

Literatür çalışmasında uydu güç alt sistemlerinde kaynak geriliminin yükseltilmesi gereken durumlarda Weinberg dönüştürücünün, kaynak geriliminin düşürülmesi gereken durumlarda Buck dönüştürücünün kullanıldığı tespit edilmiştir. Uyduda görev yapacak güç dönüştürücülerin kararlı yapıda olması istenmekte olup klasik yükselten, SEPIC, Buck-Boost gibi dönüştürücüler yapılarında bulunan sağ yarı düzlem sıfırından dolayı ihtiyaca cevap verememektedir. Görülen bu eksiklikten dolayı pil ve süperkapasitör arasında yer alacak ve pilden süperkapasitörü tek yönde besleyecek, giriş gerilimini hem artırıp hem de azaltabilen, kararsızlık problemi olmayan bir güç dönüştürücü türetilmiştir.

Önerilen güç dönüştürücünün kullanılmazsa süperkapasitörün enerjilenmesinde pilin gerilim aralığından dolayı klasik Weinberg dönüştürücü ve klasik Buck dönüştürücünün birlikte görev yapma ihtiyacı doğmaktadır. Bahsedilen dönüştürücülerin her biri ayrı bir görev için uyduda yer aldığına bunun ağırlık, maliyet, ısı tasarımı gibi faktörlerde olumsuz etkisi bulunmaktadır. Klasik Weinberg dönüştürücüden tek fark olarak giriş gerilim kaynağı ile giriş endüktörü arasına konan bir güç anahtarı barındıran güç dönüştürücü ile ihtiyaca cevap verilmektedir. Hem gerilim yükselten, hem de gerilim düşüren kip için teorik eşitlikleri çıkarılan ve benzetimleri gerçekleştirilen güç dönüştürücünün çalışması benzetimler ve deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Küçük işaret analizleri gerçekleştirilen dönüştürücünün yapısında sağ yarı düzlem sıfırı bulunmadığından kontrol parametreleri uygun şekilde ayarlandığında herhangi bir kararsızlık problemi görülmeyecektir. Kontrollü yapı için gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile deneysel sonuçlar birbirini doğrulamış, önerilen güç dönüştürücünün her iki

kipi için yük geçişleri ve giriş geriliminin değişimi sonucu çalışma kipi de değişimi ile önerilen güç dönüştürücü bu durumlara uygun cevap vermiştir. Kontrol parametreleri kullanılarak çizilen Bode grafiklerinden önerilen güç dönüştürücünün kararlı çalıştığı görülmüştür. Gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri ile önerilen güç dönüştürücünün uydu uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılabileceği doğrulanmıştır. Önerilen güç dönüştürücüde ve Weinberg dönüştürücüde gerilimin artırılması için iki adet MOSFET bulunduğundan dolayı bu dönüştürücüler çalışma frekansının iki katında çalıştırılabilirler. Bu yolla filtre boyutları azaltılmış olur. Önerilen güç dönüştürücünün dezavantajlarından biri şu ana kadar uydularda görev almadığından uçuş tarihçesinin bulunmayışıdır. Bu duruma rağmen güvenilirlik açısından bahsedilen güç dönüştürücü, klasik Weinberg dönüştürücü ve klasik Buck dönüştürücünün birlikte kullanıldığı duruma göre daha üstündür. Verim açısından bakıldığında yapısında klasik Weinberg dönüştürücüye göre bir adet fazla anahtar bulundurduğundan ve Buck dönüştürücüye göre daha büyük değerde endüktans kullanıldığından verimi bu iki dönüştürücüye göre daha düşüktür. Dinamik tepkiler açısından karşılaştırıldığında girişindeki anahtar iletime geçtikten sonra klasik Weinberg dönüştürücü ile arasında fark görülmemekte, ancak klasik Buck dönüştürücü ile karşılaştırıldığında daha büyük endüktans kullanıldığından bu dönüştürücüye göre tepki süresi uzamaktadır. Önerilen güç dönüştürücünün, klasik Weinberg dönüştürücünün ve klasik Buck dönüştürücünün karşılaştırması Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Belirtilen güç dönüştürücülerin karşılaştırılması

	Klasik Weinberg Dönüştürücü	Klasik Buck Dönüştürücü	Önerilen Güç Dönüştürücü
Giriş Gerilimine Etkisi	Sadece arttırma	Sadece azaltma	Arttırma- Azaltma
Kararlılık	+	+	+
Çalışma Frekansı	✓✓	✓	✓✓
Güç Katındaki Komponent Sayısı	9	5	10
Verim	✓	✓	↓
Dinamik Tepki	✓	✓	↓
Uçuş Tarihçesi	✓	✓	-
Güvenilirlik	✓		✓✓

Bahsedilen güç dönüştürücü kullanılmazsa, süperkapasitörün enerjilenmesi için pilin gerilim aralığına bağlı olarak klasik Weinberg dönüştürücünün ve klasik Buck dönüştürücünün birlikte görev alma ihtiyacı doğmaktadır ve bu durumun ağırlık, verim, maliyet gibi faktörler üzerinde olumsuz etkileri görülmektedir. Bahsedilen güç dönüştürücü için sunulan eşitlikler benzetim ve deneysel sonuçlarla ispatanmıştır. Teorik, benzetim ve deneysel sonuçlar birbiri ile uyumludur. Uygulamadaki ihtiyaca göre önerilen güç dönüştürücü üzerinde yapılacak basit değişikliklerle ihtiyaca cevap verilebilir. Eğer giriş-çıkış gerilim aralığı değiştirilecekse komponentler üzerinde MOSFET'lerin akım geçirme kapasitesi, endüktör ve transformatörün sargılarındaki kablo sayısı gibi küçük değişiklikler yoluyla, bahsedilen güç dönüştürücü $D V_I$ ve $(1 + D) V_I$ aralığında çıkış gerilimi sağlamayı sürdürebilecektir. Verimin arttırılması gerekirse güç dönüştürücünün girişindeki güç anahtarı için PMOS yerine NMOS kullanılma, yumuşak anahtarlama dan yararlanma gibi yollarla verim iyileştirilebilir. Güvenilirliğin arttırılması gerekirse anahtarlama elemanları yedeklenerek bu elemanlarda meydana gelecek bir bozulma

durumunda çalışmanın etkilenmeden operasyona devam etmesi sağlanabilir. Yüksek güçlü uygulamalar için birden çok modülün paralellenmesi ile çıkış yükü beslenebilir. Ancak böyle bir çalışma durumu için gerilim kontrolü yerine modüller arasında akım paylaşımının hassas bir şekilde gerçekleşebilmesi amacıyla akım kontrolü tercih edilmelidir. Belirtilen bu hususlar ilerleyen zamanda çalışmanın farklı noktalardan incelenmesi konusunda yardımcı olacaktır.



KAYNAKLAR

1. Saraçöz, Y. (2018). *Savunma sanayiinin önemi ve savunma harcamalarının ülke ekonomisine etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2-5.
2. Macdonald, M., Norris, P. and Spencer, D. B. (2014). Introduction. In M. Macdonald, and V. Badescu (Eds), *The International Handbook of Space Technology*. Springer, Chichester, 1-24.
3. STM Teknolojik Düşünce Merkezi. (2019). *Küçük uydular ve başarı potansiyelleri (Araştırma Raporu Şubat 2019)*. Ankara: STM Teknolojik Düşünce Merkezi, 4-10.
4. Cohen, D. and Eldar, Y. C. (2018). Sub-nyquist radar systems: temporal, spectral, and spatial compression. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(6), 35-58.
5. Kalkan, Y. (2016). Frequency-only radars and other frequency-based systems with applications. *IEEE Microwave Magazine*, 17(7), 26-52.
6. Coster, A. D. and Lambot, S. (2019). Full-wave removal of internal antenna effects and antenna-medium interactions for improved ground-penetrating radar imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1), 93-103.
7. Ameri, A., Bose, A., Li, J. and Soltanalian, M. (2019). One-bit radar processing with time-varying sampling thresholds. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(20), 5297-5308.
8. Xiong, X., Deng, Z., Qi, W., Ou, H. and Cui, Z. (2018). A novel high-precision range estimation method based on phase of wideband radar echo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6), 3392-3403.
9. Chaturvedi, S. K. (2019). Study of synthetic aperture radar and automatic identification system for ship target detection. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 4(2), 173-182.
10. Anghel, A., Tudose, M., Cacoveanu, R., Datcu, M., Nico, G., Masci, O., Dongyang, A., Tian, W., Hu, C., Ding, Z., Nies, H., Loffeld, O., Atencia, D., Huamán, S. G., Medella, A., and Moreira, J. (2019). Compact ground-based interferometric synthetic aperture radar: short-range structural monitoring. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(4), 42-52.
11. Irak, H. (2009). SAR sistem ve teknolojileri, *Elektrik Mühendisliği*, 437, 86-90.
12. Liu, X., Yan, K., Chen, Z., Li, C., Zhang, J., Ye, S. and Fang, G. (2018, 18-21 June). *A m-sequence UWB radar system design and contrast test with an impulse radar*. Paper presented at 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil.

13. Tsai, Y.L.S., Dietz, A., Oppelt, N., and Kuenzer, C. (2019). Remote sensing of snow cover using spaceborne SAR: a review. *Remote Sensing*, 11(12), 1456–1499.
14. Majewski, J. J., Melody, J., and Messier, A. (2018, 23-27 April). *LiTE SAR, ku-band synthetic aperture radar for small unmanned air vehicles*. Paper presented at IEEE Radar Conference (RadarConf18), Oklahoma City.
15. Miller, M.G., Mullenhoff, C.J., Kiefer, R.D., Brase, J.M., Wieting, M.G., Berry, G.L., and Jones, H.E. (1996, 13-16 May). *Preliminary results of the LLNL airborne experimental test-bed SAR system*. Paper presented at Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference, Ann Arbor.
16. Rajan, G.V.C., and Pramod, V.B. (2008, 26-27 November). *Achieving EMC in high frequency and high power switching environment on radar imaging satellite*. Paper presented at 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, Bangalore.
17. Bugryniec, P. (2016). CubeSat: The need for more power to realise telecommunications; Mini Project: Final Report; *Department of Chemical and Biological Engineering, University of Sheffield*, Sheffield, 1-10.
18. Massonnet, D., and Adragna, F. (1997, 3-8 August). *Probing the ultimate capabilities of radar interferometry for deformation with low gradient: a new mission?*. Presented at IEEE international geoscience and remote sensing symposium proceedings, Singapore.
19. Yu, Z., Zhou, Y., Chen, J., and Li, C. (2006, 16-19 October). *Suppressing range ambiguity for spaceborne synthetic aperture radar based on linearly constrained minimum variance algorithm*. Presented at 6th International Conference on Radar, Shanghai.
20. Brautigam, B., Schwerdt, M., Bachmann, M., and Stangl, M. (2007, 23-28 July). *Individual T/R module characterisation of the TerraSAR-X active phased array antenna by calibration pulse sequences with orthogonal codes*. Presented at IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona.
21. Breit, H., Fritz, T., Schaettler, B., Balss, U., Damerow, H., and Schwarz, E. (2008, 2-5 June). *TerraSAR-X SAR Payload Data Processing: Results from Commissioning and Early Operational Phase*. Presented at 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen.
22. Brautigam, B., Schwerdt, M. and Bachmann, M. (2009). An efficient method for performance monitoring of active phased array antennas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(4), 1236-1243.
23. Pan, W., and Cai, B. (2010, 22-24 October). *Robust adaptive ground moving target indication technique applied to distributed spaceborne SAR system*. Paper presented at International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Taiyuan.

24. Park, D. J., Ahn, S. I., Chun, Y. S., Shin, J. M., Yoon, J. C. and Kim, J. H. (2011, 26-30 September). *Development of active transponder for KOMPSAT-5 mission*. Paper presented at 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Seoul.
25. Zhang, F., Yu, A., He, F. and Dong, Z. (2013, 6-10 July). *An improved DBS algorithm based on Doppler localization equations*. Paper presented at IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing, Beijing.
26. Calio, E., Bussi, B., Nicito, A., Porfilio, M., and Serva, S. (2014, 3-5 June). *COSMO-SkyMed: operational results and performance*. Paper presented at 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2014), Berlin.
27. Yang, H., An, J. H., Jung, H. W., Kim, J. H., and Sumantyo, J. T. S. (2014, 22-24 October). *Circular polarization implementation on synthetic aperture radar*. Paper presented at International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Busan.
28. Wang, W., Wang, R., Deng, Y., Balz, T., Hong, F., and Xu, W. (2016). An improved processing scheme of digital beam-forming in elevation for reducing resource occupation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3), 309-313.
29. Li, B., Li, C., Xie, Y., Chen, L., Shi, H. and Deng, Y. (2018, 25-27 September). *A SoPC based fixed point system for spaceborne SAR real-time imaging processing*. IEEE High Performance extreme Computing Conference (HPEC), Waltham.
30. Yuan, X. T., Lu, C. Z., Zhang, X., Zhu, L., Huang, G. L., Yuan, T., and Zou, W. (2019, 18-21 July). *Phase effect of orthogonal modes on 3-dB axial-ratio beamwidth of circularly-polarized patch antennas*. Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Taiyuan.
31. Lu, J. (2019). Introduction. In J. Lu (Editor), *Design Technology of Synthetic Aperture Radar*. Chennai. Wiley-IEEE Press, 1-13.
32. Alam, M., Siddique, M., Kanaujia, B. K., Beg, M. T., Kumar, S., and Rambabu, K. (2019). Meta-surface enabled hepta-band compact antenna for wearable applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(3), 2372-2379.
33. Tan, L., Wang, Y. and Sheng, L. (2019, 26-29 November). *A high performance low-cost SAR system loaded on small satellite platform*. Paper presented at 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Xiamen.
34. Kilders, E. S., Capel, A., Carrasco, J.A., Maset, E., and Espi, J.M. (1999, 1 July). *New very low power, high efficiency, DC/DC power supply for LEO satellite constellation*. Paper presented at 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Charleston.
35. Pequet, E., Delporte, P., Fayt, P., Gak, M., and Canon, T. (2000, 2-4 May). *ESA qualified EPC for telecommunication satellites TWTA*. Paper presented at International Vacuum Electronics Conference 2000, Monterey.

36. Osuga, H., Terukina, I., and Nagano, H. (2009, 10-13 May). *A study of high voltage converter topologies with wide input voltage range*. Paper presented at 4th International Telecommunication - Energy Special Conference, Vienna.
37. Demirel, S., Sanli, E., Gokten, M., Yagli, A. F., ve Gulgonul, S. (2012, 2-5 October). *Properties and performance comparison of electrical power sub-system on TUSAT communication satellite*. Paper presented at IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL), Rome.
38. Giofre, R., Colantonio, P., Giannini, F., Gonzalez, L., Cabria, L., and Arriba, F. D. (2016, 9-11 May). *Development of solid state power amplifier on GaN technology for Galileo satellite systems*. Paper presented at 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Krakow.
39. Formicone, G., Burger, J., Custer, J., Veitschegger, W., Bosi, G., Raffo, A., and Vannini, G. (2017, 15-18 January). *A GaN power amplifier for 100 VDC bus in GPS L-band*. Paper presented at IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR), Phoenix.
40. Giofre, R., Colantonio, P., Gonzalez, L., Arriba, F. D., Cabria, L., Molina, D. L., Garrido, E. C., and Vitobello, F. (2018). Design realization and tests of a space-borne GaN solid state power amplifier for second generation Galileo Navigation System. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(5), 2382-2396.
41. Mahmoud, M. A. B. (2017, 19-21 December), *Comparing between different approaches of using various auxiliary sources for LEO satellites*. Paper presented at Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo.
42. Patel, M.R. *Spacecraft Power Systems*. Florida: CRC Press, 5.
43. Chang, Y., Fang, H., and Zhang, Y. (2017). A new hybrid method for the prediction of the remaining useful life of a lithium-ion battery. *Applied Energy*, 206(1), 1564–1578.
44. Maddu, A., Saputra, A., Ayuningtiyas, N. I., Tsalsabila, A., Ismayana, A., Nurhalim, H. and Arjo, S. (2018). Synthesis of MnO₂/carbon dots nanocomposite derived from rice husk for supercapacitor electrodes. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 1476–1482.
45. Andari, W., Ghozzi, S., Allagui, H., and Mami, A. (2020). Control Strategy of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Propulsion System for an Electric Vehicle. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(1), 464–473.
46. Zhang, Q., Deng, W., Zhang, S., and Wu, J. (2016). A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, 1-17.
47. Ley, W. and Merkle, F. (2009). Subsystems of Spacecraft. In W. Ley, K. Wittmann and W. Hallmann (Eds.). *The Handbook of Space Technology*, Chicester. John Wiley & Sons Ltd, 201-398.

48. Patel, M.R. *Spacecraft Power Systems*. Florida: CRC Press, 214-252.
49. Karangia, R., Jadeja, M., Upadhyay, C., and Chandwani, H. (2013, 10-12 April). *Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in electric vehicle*. Paper presented at International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, Nagercoil.
50. Livreri, P., Castiglia, V., Pellitteri, F., and Miceli, R. (2018, 10-13 September). *Design of a battery/ultracapacitor energy storage system for electric vehicle applications*. Paper presented at IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI), Palermo.
51. Bopche, L. M., Deosant, A. A., and Ahmad, M. (2016, 9-10 September). *Combination of parallel connected supercapacitor & battery for enhancing battery life*. Paper presented at 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), Pune.
52. Arazzi, M., Payman, A., Camara, M. B., and Dakyo, B. (2018, 14-17 October). *Control of isolated DC/DC resonant converters for energy sharing between battery and supercapacitors*. Paper presented at 7th International Conference on Renewable Energy Research and Application, Paris.
53. Khan, S. A., Kuni, S. K., Rajkumar, R., Syed, A., Hawladar, M., and Rahman, M. (2018, 11 January). *Instantaneous charging & discharging cycle analysis of a novel supercapacitor based energy harvesting circuit*. Paper presented at Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS 2017), Dhaka.
54. Karandikar, P. B., Negi, A., Pandey, A. K., and Kumar, S. (2013, 23-24 August). *Comparative study of rolled and stacked type aqueous supercapacitor*. Paper presented at 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS), Trivandrum.
55. Gualous, H., Camara, M. B., Boudrat, B., Gallay, R., and Dakyo, B. (2013, 13-17 May). *Supercapacitor characterization for electric vehicle applications*. Paper presented at 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul.
56. Mihai, V. G. (2015, 22-25 October). *The influence of charging/discharging current on supercapacitor's storage capacity*. Paper presented at 2015 IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Brasov.
57. Abeywardana, D. B. W., Hredzak, B., and Agelidis, V. G. (2015, 22-25 November). *Battery-supercapacitor hybrid energy storage system with reduced low frequency input current ripple*. Paper presented at 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo.
58. Giri, R., Chaudhari, S., Mishra, U., Deshpande, A.P., Karandikar, P. B., and Sharma, S. (2018, 22-24 October). *Analysis of aqueous supercapacitor for variation in*

- separator wetness*. Paper presented at 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi.
59. Gineste, V., Loup, D., Mattesco, P., and Neugnot, N. (2011, 6-10 June). *Preliminary evaluation of commercial supercapacitors for space applications*. Paper presented at 9th European Space Power Conference, Saint Raphael.
 60. Fusalba, F., Chami, M., Rey, M., Moreau, G., Reynier, Y., and Azais, P. (2014, 15-17 April). *Emphasis on high power lithium ion technology for pulse-load operations: terrestrial developments potential benefits to space application*. Paper presented at 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout.
 61. Signorini, C., Blancquaert, T., Dudley, G., Gerlach, L., Schautz, M., Simon, E., and Tonicello, F. (2008, 14-19 September). *Power and energy conversion technology: ESA R&D roadmap and applications*. Paper presented at 8th European Space Power Conference, Constance.
 62. Gineste, V., Gajewski, L., Carron, C., Rouzies, C., Marec, A., and Sanchez, O. (2014, 15-17 April). *Li-ion battery/supercapacitor hybrid power supply (HPS) for space applications*. Paper presented at 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout.
 63. Daniele, C., Fabio, C. T., Giovanni, R. E., and Valmra, E. (2019, 30 September-4 October). *A study on supercaps application for radar missions*. Paper presented at 12th European Space Power Conference, Juan-les-Pins.
 64. Andari, W., Khadrawi, A., Ghozzi, S., Allagui, H., and Mami, A. (2019). Energy management strategy of a fuel cell electric vehicle: design and implementation. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(3), 1154-1164.
 65. Weinberg, A. H., and Ghislanzoni, L. (1992). A new zero voltage and zero current power switching technique. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 7(4). 655-665.
 66. Weinberg, A. H., and Boldo, P. R. (1992, 29 June-3 July). *High power, high frequency, DC to DC converter for space applications*. Paper presented at 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Toledo.
 67. Hung, C., Lee, C. Q., and Lee, H. T. (1995, 18-22 June). *Modeling of high power DC/DC converter system based on Weinberg topology*, Paper presented at 26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Atlanta.
 68. Kornetzky, P., Moussaoui, Z., Batarseh, I., Hawasly, S. and, Kennedy, C. (1996, 11-14 April). *Modeling technique for DC to DC: converters using Weinberg topology*. Paper presented at Proceedings of SOUTHEASTCON '96, Tampa.
 69. Hung, C., Lee, C. Q., Lee, and H. T. (1995, 8-12 October). *Analysis and modeling of Weinberg converter system with output current limiter*. Paper presented at Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando.

70. Hawasly, S., Moussaoui, Z., Kornetzky, P., Batarseh, I., Lee, H., and Kennedy, C. (1996, 11-14 April). *Dynamic modelling of parallel connected DC to DC converters using Weinberg topologies*, Paper presented at Proceedings of SOUTHEASTCON '96, Tampa.
71. Carrasco, J. A., Weinberg, A. H., Maset, E., and Dede, E. J. (1998). A high-efficiency regulation technique for a zero-voltage zero-current power switching converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13(4), 739 – 747.
72. Carrasco, J. A., Weinberg, A. H., Sanchis, E., and Dede, E. J. (1999). A conductance-controlled variable transformer turns ratio regulator for a zero-voltage-zero-current power switching converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14(6), 1070 – 1077.
73. Bruemmer, J. E., Williams, F. R., and Schmitz, G. V. (2002, 29-31 July). *Efficient design in a DC to DC converter unit*. Paper presented at 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington.
74. Maset, E., Ferreres, A., Ejea, J. B., Kilders, E.S., Jordan, J., and Esteve, V. (2005, 16 June). *5 kW Weinberg converter for battery discharging in high power communication satellites*. Paper presented at IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Recife.
75. Maset, E., Ejea, J. B., Ferreres, A., Kilders, E.S., Jordan, J., and Esteve, V. (2006, 19-23 March). *High-efficiency Weinberg converter for battery discharging in aerospace applications*. Paper presented at Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas.
76. Weinberg, S. H., (2006, 25-27 April). *A new high-efficiency zero-voltage, zero-current switching topology*. Paper presented at 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey.
77. Garrigos, A., Blanes, J. M., Carrasco, J. A., Weinberg, A. H., Maset, E., Kilders, E. S., Ejea, J. B., and Ferreres, A. (2007, 17-21 June). *The sequential switching shunt maximum power regulator and its application in the electric propulsion system of a spacecraft*. Paper presented at PESC 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando.
78. Mazumder, S. K., Acharya, K., and Tan, C. M. (2007, 17-21 June). *Design of an all-SiC radio-frequency controlled parallel DC-DC converter unit*. Paper presented at PESC 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando.
79. Mazumder, S. K., Acharya, K., and Tan, C. M. (2008). Design of an all-SiC parallel DC/DC Weinberg converter unit using RF control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(6), 2893–2904.
80. Weinberg, A. H., and Schreuders, J. (1986). A high-power high-voltage DC-DC converter for space applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1(3), 148–160.

81. Delshad, M., and Fani, B. (2009, 4-6 October). *A new active clamping soft switching Weinberg converter*. Paper presented at IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Kuala Lumpur.
82. Larico, H. R. E., and Barbi, I. (2012). Three-phase Weinberg isolated DC–DC converter: analysis, design, and experimentation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 888–896.
83. Blanes, J. M., Garrigos, A., Carrasco, J. A., Weinberg, A. H., Maset, E., Kilders, E. S., Ejea, J. B., and Ferreres, A. (2011). Two-stage MPPT power regulator for satellite electrical propulsion system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3), 1617–1630.
84. Weinberg, A. H. (1974, 20-22 May). *A boost regulator with a new energy-transfer principle*. Paper presented at Proceedings of the Spacecraft Power Conditioning Electronics Seminar, Frascati.
85. Weijun, L., and Yanjun, L. (2009). Small signal modeling and analysis of the Weinberg converter for high-power satellites bus application. *Chinese Journal of Electronics*, 18(1), 171-176.
86. Clark, C. (2005, 9-13 May). *The design and performance of a power system for the Galileo system test bed (GSTB-V2/A)*. Paper presented at 7th European Space Power Conference, Stresa.
87. Weinberg, A.H. (2005, 9-13 May). *The battery discharge regulator of the Galileo satellite test bed–V2/A power system using the Weinberg topology*. Paper presented at 7th European Space Power Conference, Stresa.
88. Ciccolella, A. (2005, 9-13 May). *Model of a 6.25 kW Weinberg converter with current programming control, featuring automatic CCM and DCM detection for space station application*. Paper presented at 7th European Space Power Conference, Stresa.
89. Soubrier, L., Besdel, P., Daubresse, T., and Trehet, E. (2008, 14-19 September). *High performance BDR for the PCU of Alphabus*. Paper presented at 8th European Space Power Conference, Constance.
90. Soubrier, L., and Trehet, E. (2011, 6-10 June). *High power PCU for Alphabus: PSR100V*, Paper presented at 9th European Space Power Conference, Saint Raphael.
91. Llorente, J. G., Vecino, A. R., Rodriguez, L. A. G., Balda, J. C., and Rivera, E. I. O. (2016, 20-24 March). *Simple and efficient low power photovoltaic emulator for evaluation of power conditioning systems*. Paper presented at 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach.
92. Capua, G. D., Femia, N., and Stoyka, K. (2016, 27-30 June). *Power magnetics volume and weight reduction in aerospace power supply units*. Paper presented at IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Trondheim.

93. Armbruster, C., Schoener, C., Schoenbett, T., Kloenne, A., and Merz, R. (2017, 16-18 May). *Development of a high efficient MPPT for space applications using GaN power transistors*. Paper presented at PCIM Europe 2017, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg.
94. Tulsyan, B., and Zaheer, M. M.. (2018, 14-15 September). *Maximum power point tracking based solar charge regulator*. Paper presented at International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES), Lucknow.
95. Navarro, A. E., Perol, P., Dede, and E. J., Hurtado, F. J. (1996, 23-27 June). *A new efficiency low mass bi-directional battery discharge-charge regulator for low voltage batteries*. Paper presented at 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Baveno.
96. Yamamoto, H., Hiraki, E., Konishi, Y., Nishida, K., Horiuchi, T., Sugawara, Y., and Nakaoka, M. (1999, 29 November-3 December). *Utility-interactive three-phase soft-switching pulse width modulated converter with active resonant snubbers in bridge leg sides for energy storage devices*. Paper presented at The 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, San Jose.
97. Calvente, J., Salamero, L. M., Garces, P., Leyva, R., and Capel, A. (2001, 17-21 June). *Dynamic optimization of bidirectional topologies for battery charge/discharge in satellites*. Paper presented at IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver.
98. Li, H., and Peng, F. Z. (2004). Modeling of a new ZVS bi-directional DC-DC converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(1), 272–283.
99. Kilders, E.S., Ferreres, A., Maset, E., Ejea, J. B., Esteve, V., Jordan, J., Garrigos, A., and Calvente, J. (2006, 19-23 March). *Soft switching bidirectional converter for battery discharging-charging*. Paper presented at Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas.
100. Kilders, E.S., Ferreres, A., Maset, E., Ejea, J. B., Esteve, V., Jordan, J., Calvente, J., and Garrigos, A. (2006, 18-22 June). *Bidirectional high-power high-efficiency non-isolated step-up DC-DC converter*. Paper presented at 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju.
101. Das, P., Laan, B., Mousavi, S. A., and Moschopoulos, G. (2009). A nonisolated bidirectional ZVS-PWM active clamped DC–DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(2), 553–558.
102. Ma, G., Qu, W., Yu, G., Liu, Y., Liang, N., and Li, W. (2009). A zero-voltage-switching bidirectional DC–DC converter with state analysis and soft-switching-oriented design consideration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 2174–2184.

103. Zhang, L., Kang, W., Jia, L., Zhao, M., and Xu, R. (2010, 28-31 March). *Control of bidirectional current source SVPWM converter in the power accumulator battery testing system*. Paper presented at 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu.
104. Sanchis, E., Maset, E., Ferreres, A., Ejea, J. B., Esteve, V., Jordan, J., Calvente, J., Garrigos, A., and Blanes, J. M. (2011). Bidirectional high-efficiency nonisolated step-up battery regulator. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3), 2230–2239.
105. Juan, H., Jianlin, L., Dong, H. (2011, 12-14 August). *Research on bi-directional converter for lithium battery energy storage system*. Paper presented at 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin.
106. Nejabatkhah, F., Danyali, S., Hosseini, S. H., Sabahi, M., and Niapour, S. M. (2012). Modeling and control of a new three-input DC–DC boost converter for hybrid PV/FC/battery power system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(5), 2309–2324.
107. Macellari, M., Palmerini, G. B., and Schirone, L. (2012, 3-10 March). *Bidirectional converter for single-cell Li-ion batteries in a small space vehicle*. Paper presented at IEEE Aerospace Conference, Big Sky.
108. Verma, A. K., Singh, B., and Shahani, D. T. (2012, 6-9 August). *Vehicle to grid and grid to vehicle bidirectional power flow at unity power factor with DC ripple compensation*. Paper presented at 7th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Chennai.
109. Yang, S., Goto, K., Imamura, Y., and Shoyama, M. (2012, 30 September-4 October). *Dynamic characteristics model of bi-directional DC-DC converter using state-space averaging method*. Paper presented at IEEE 34th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Scottsdale.
110. Veerachary, M., and Singh, A. K. (2013, 22-25 April). *Robust digital controller for fourth-order bidirectional charger/discharger*. Paper presented at International Conference for Convergence of Technology (I2CT), Kitakyushu.
111. Thummala, P., Schneider, H., Zhang, Z., Knott, A., and Andersen, M. A. E. (2014, 16-20 March). *Optimization of bi-directional flyback converter for a high voltage capacitor charging application*. Paper presented at 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014, Fort Worth.
112. Sun, A., Zhang, W., Lin, X., and Li, J. (2014, 31 August-3 September). *Modeling and stability analysis of high voltage ratio bidirectional DC/DC converter applied to electric vehicle*. Paper presented at IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing.
113. Loche, D., and Cosculluela, V. (2005, 9-13 May). *Power subsystem in-flight behaviour*. Paper presented at 7th European Space Power Conference, Stresa.

114. Loche, D. (2008, 14-19 September). *Mars express and venus express power subsystem in-flight behaviour*. Paper presented at 8th European Space Power Conference, Constance.
115. Bouhours, G., Asplanato, R., Rebuffel, C., Pasquet, J. M., Bardin, B., Deplus, N., and Lempereur, V. (2014, 3-5 June). *A new generation of electrical power supply for telecom satellites*. Paper presented at 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Noordwijkerhout.
116. Schirone, L., and Macellari, M. (2014, 15-17 April). *Design issues for the power system of a lunar rover*. Paper presented at 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout.
117. Swamy, H. M.M., Guruswamy, K.P., and Singh, S.P. (2013). Design and implementation of two phase interleaved DC-DC boost converter with digital PID controller. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3(1), 99-104.
118. Ellabban, O., Hegazy, O., Mierlo, J. V., and Lataire, P. (2010, 20-22 May). *Dual loop digital control design and implementation of a DSP based high power boost converter in fuel cell electric vehicle*. Paper presented at 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Basov.
119. Suresh, K., and Sankaraiah, M. (2012). Interleaved DC-DC converter for fuel cell hybrid electric vehicles. *International Journal of Computational Science, Mathematics and Engineering*, 27(11), 4445-4458.
120. Kabalo, M., Paire, D., Blunier, B., Bouquain, D., Simoes, M. G., and Miraoui, A. (2013). Experimental evaluation of four-phase floating interleaved boost converter design and control for fuel cell applications. *IET Power Electronics*, 6(2), 215–226.
121. Zaitis, R. (2009). Voltage mode boost converter small signal control loop analysis using the TPS61030; TI SLVA274A Application Report. Texas. 1-21.
122. Veerachary, M., Senjyu, T., and Uezato, K. (2001). Small-signal analysis of interleaved dual boost converter. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 29, 575–589.
123. Lee, P.W., Lee, Y.S., Cheng, D.K.W., and Liu, X.C. (2000). Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(4), 787-795.
124. Bryant, B., and Kazimierczuk, M. K. (2004, 23-26 May). *Small-signal duty cycle to inductor current transfer function for boost PWM DC-DC converter in continuous conduction mode*. Paper presented at International Symposium on Circuits and Systems, Vancouver.
125. Lee, Y. J., Emadi, A. (2008, 3-5 September). *Phase shift switching scheme for DC/DC boost converter with switches in parallel*. Paper presented at 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin.

126. Hegazy, O., Mierlo, J. V., and Lataire, P. (2011, 30 August-1 September). *Analysis, control and comparison of DC/DC boost converter topologies for fuel cell hybrid electric vehicle applications*. Paper presented at 14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham.
127. Ohta, Y., Adachi, Y., Mochizuki, Y., and Higuchi, K. (2012, 3-5 December). *Design of robust digital controller for interleaved PFC boost converter*. Paper presented at 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC), Bangkok.
128. Kolluri, S., and Narasamma, N. L. (2013, 22-25 April). *Analysis, modeling, design and implementation of average current mode control for interleaved boost converter*. Paper presented at IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Kitakyushu.
129. Bae, S. H., Choi, S. C., Kim, B. J., Kim, Y. R., and Won, C. Y. (2015, 1-5 June). *Control method of modular interleaved boost converter for SOC balancing in EV*. Paper presented at 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul.
130. Kiran, N., Rangavalli, V., and Vanajakshi, B. (2014). Modeling, analysis and simulation of 4-phase boost converter. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 8(9), 1499-1509.
131. Carbonnier, H., Fernandez, A., Triggianese, M., and Tonicello, F. (2014, 15-17 April). *Interleaved boost converter used as a battery discharge regulator for space applications*. Paper presented at 10th European Space Power Conference, Noordwijkerhout.
132. Sanchis, E., Maset, E., Ferreres, A., Ejea, J. B., Esteve, V., Jordan, J., Garrigos, A., and Blanes, J. M. (2010). High-power battery discharge regulator for space applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 3935–3943.
133. Kilders, E. S., Esteve, V., Jordan, J., Gil, R. G., Maset, E., Ejea, J. B., Ferreres, A., and Sandia, J. (2004, 22-26 February). *Soft switched interleaved boost converters used as high-power battery discharge regulator for space power systems*. Paper presented at Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim.
134. Genç, N. (2010). *Birim güç katsayılı ve sıfır gerilim geçişli yeni bir sarmaşık yükselten dönüştürücünün tasarımı ve gerçekleştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 35-59.
135. N. M. Ibrahim, J. V. Gangadhar, M. Partho, and K. Deepa (2016, 26-27 August). *High frequency SEPIC-Weiberg converter for space applications*. Paper presented at International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore.
136. M. Fu, D. Zhang, T. Li, and Y. Li (2017, 29 October-1 November). *High direction-changing frequency bidirectional DC-DC converter for charging/discharging*

- applications*. Paper presented at 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2017), Beijing.
137. AIAA S-122-2007 (2007). Electrical Power Systems for unmanned spacecraft. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1-62.
 138. ECSS-E-ST-60-10C (2008). Space engineering-control performance. *European Cooperation for Space Standardization*, 24-29.
 139. Arora, S., Balsara, P., and Bhatia, D. (2019). Input–output linearization of a boost converter with mixed load (constant voltage load and constant power load). *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1), 815–825.
 140. Bose, S., Hote, Y. V., and Hanwate, S. D. (2018, 9-11 May). *Analysis of effects due to right half plane zeros in PI controller based hydro turbine*. Paper presented at 3rd IFAC Conference on Advances in ProportionalIntegral-Derivative Control, Ghent.
 141. Dermott, J. K. M. (2005). Spacecraft Subsystems-Power. In W. J. Larson and J.R. Wertz (Eds.), *Space Mission, Analysis and Design*. Seventh Edition. California. Microcosm Press, 407-427.
 142. Daimer, M. (2017). Simplify low EMI design with power modules; TI SLYY123 Application Report. Texas. 1-10.
 143. ECSS-E-ST-20C (2008). Space engineering-electrical and electronic. *European Cooperation for Space Standardization*, 56-77.
 144. Asy'ari, M. K., and Musyafa, A. (2018, 30-31 August). *Design of Buck converter based on interval type-2 fuzzy logic controller*. Paper presented at 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Bali.
 145. Errouissi, R., Durra, A. A., and Muyeen, S. M. (2017). Experimental validation of a novel PI speed controller for AC motor drives with improved transient performances. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(4), 1414-1421.
 146. Li, H., Ravey, A., N'Diaye, A., and Djerdir, A. (2017, 22-24 June). *Equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering fuel cell degradation*. Paper presented at 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago.
 147. Cultura, A.B., and Salameh, Z. M. (2015, 28-29 June) *Modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application*. Paper presented at International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA 2015), Bangkok.
 148. Gauchia, L., Castano, S., and S., Javier (2010, 1-3 September). *New approach to supercapacitor testing and dynamic modelling*. Paper presented at 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille.

149. Goh, C.T., and Cruden, A. (2012, 20-22 June). *Automated high current cycling test system for supercapacitor characterisation*. Paper presented at International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento.
150. Reichbach, N., and Kuperman, A. (2016). Recursive least squares based real time estimation of supercapacitor parameters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2), 810-812.
151. Dotelli, G., Ferrero, R., Stampino, P. G., Latorrata, S., and Toscani, S. (2016). Supercapacitor sizing for fast power dips in a hybrid supercapacitor—PEM fuel cell system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(10), 2196-2203.
152. Ciocan, I., Farcaş, C., Grama, A., and Tulbure, A. (2016, 20-23 October). *An improved method for the electrical parameters identification of a simplified PSpice supercapacitor model*. Paper presented at 2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Oradea.
153. Yang, H. (2019, 19-21 June). *Evaluation of cell balancing circuits for supercapacitor-based energy storage systems*. Paper presented at 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Detroit.
154. Zhang, K., Li, Y., Bai, L., Yang, D., Li, G., and Pei, C. (2020, 12-14 June). *An iterative algorithm of linear least squares to identify nline the capacity of supercapacitor*. Paper presented at 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing.
155. Han, X., Ai, X., and Sun, Y. (2014). Research on large-scale dispatchable grid-connected PV systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2(1), 69-76.
156. L.E. Helseth (2019). Modelling supercapacitors using a dynamic equivalent circuit with a distribution of relaxation times. *Journal of Energy Storage*, 25(1), 1-7.
157. Zhanga, L., Huc, X., Wanga, Z., Suna, F., and Dorrel, D. G. (2018). A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), 1868-1878.
158. Eroğlu, H. H., and Hava, A. M. (2010, 2-5 December). *Energy management of ultracapacitors with power electronics converters*. Paper presented at National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, Bursa.
159. Palma, L. (2015, 16-18 June). *Analysis of supercapacitor connection to PV power conditioning systems for improoved performance*. Paper presented at 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina.
160. Nikkhoo, M., Farjah, E., and Ghanbari, T. (2016, 10-12 May). *A simple method for parameters identification of three branches model of supercapacitors*. Paper presented at 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Shiraz.

161. Patel, M.R. *Spacecraft Power Systems*. Florida: CRC Press, 431-434.
162. Zhang, X., and Liao, H. (2018, 30 October-2 November). *Reliability assessment of power converters with partial redundancy and variable power distribution*. Paper presented at 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Singapore.
163. Department of Defense (1991). *MIL-HDBK-217F, Military Handbook – Reliability Prediction of Electronic Equipment Notice 1*. USA: Department of Defense, 4-5.
164. Department of Defense (1995). *MIL-HDBK-217F, Military Handbook – Reliability Prediction of Electronic Equipment Notice 2*. USA: Department of Defense, 5-10.







GAZİ GELECEKTİR..