T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO ŞEBEKELERDE FARKLI DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Berkkan DÜNDAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman

Doç. Dr. Ali DURUSU

Mayıs, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO ŞEBEKELERDE FARKLI DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Berkkan DÜNDAR tarafından hazırlanan tez çalışması 18.05.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali DURUSU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali DURUSU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Erdem AKBOY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA, Üye
Ege Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Ali DURUSU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "NANO ŞEBEKELERDE FARKLI DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim.

Bu tez çalışmasının kavramsallaştırılması, planlanması, yürütülmesi, değerlendirilmesi ve metnin yazım süreci dâhil olmak üzere hiçbir aşamasında Üretken Yapay Zekâ teknolojilerinden yararlanılmamış, çalışma tamamen kendi özgün çabamla gerçekleştirilmiştir.

Beyanımın aksinin tespiti hâlinde doğabilecek her türlü idari ve hukuki sorumluluğu kabul ederim.

Berkkan DÜNDAR

İmza

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılması sürecinde değerli bilgi, öneri ve yönlendirmeleriyle her aşamada bana destek olan danışmanım Doç. Dr. Ali Durusu' ya içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışma sürecinde sağladıkları görüş ve katkılar ile tez çalışmama dolaylı ya da doğrudan destek veren tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca, tez sürecinde birlikte çalıştığım ve teknik konularda fikir alışverişinde bulunduğum çalışma arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ve bu tez çalışmasının hazırlanması süresince her zaman yanımda olan, sabır ve anlayışlarıyla bana güç veren aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Berkkan DÜNDAR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Çalışmanın Konusu ve Önemi 1

1.2 Problem Tanımı 2

1.3 Çalışmanın Amacı 3

1.4 Çalışmanın Kapsamı ve Sınırları 3

2 GENEL BİLGİLER 5

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Modellemesi 5

2.1.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Matematiksel Modeli 5

2.1.2 Li-Ion Batarya Karakteristikleri ve Eşdeğer Devre Modeli 7

2.2 DC-DC Dönüştürücülerin Nano Şebekelerdeki Rolü 8

2.2.1 İzolesiz Dönüştürücüler: Yükseltici (Boost) Dönüştürücü 9

2.2.2 İzoleli Dönüştürücüler: Faz Kaydırmalı Tam Köprü (PSFB) 11

2.2.3 Push-Pull Dönüştürücü 12

3 MATERYAL VE YÖNTEM 15

3.1 Önerilen Nano Şebeke Mimarisi 15

3.2 Senaryo Matrisi ve Çalışma Koşulları 16
3.2.1 Senaryo Tanımı ve Sınıflandırma 16
3.2.2 Ortak Çalışma Koşulları ve Varsayımlar 17
3.3 Dönüştürücü Tasarım Kriterleri 18
3.3.1 Genel Tasarım Yaklaşımı 18
3.3.2 Boost Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı 18
3.3.3 Push-Pull Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı 19
3.3.4 PSFB Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı 19
3.3.5 Tasarım Yaklaşımı Genel Değerlendirme 20
3.4 Sayısal Tasarım Yaklaşımı 20
3.4.1 Genel Hesaplama Yaklaşımı 20
3.4.2 Boost Dönüştürücü için Tasarım Bağıntıları 21
3.4.3 PSFB Dönüştürücü için Sayısal Hesaplar 22
3.4.4 Push-Pull Dönüştürücü için Sayısal Hesaplar 23
3.4.5 Sayısal Tasarım Genel Değerlendirme 24
3.5 Nano Şebeke Senaryoları 25
3.6 Dönüştürücü Kontrol Stratejileri 26
3.6.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları için MPPT Yaklaşımı 26
3.6.2 DC Bara Gerilimi Regülasyonu 26
3.7 Senaryolar Arası Kontrol Tutarlılığı ve Karşılaştırma Yaklaşımı 27
4 BENZETİM BULGULAR VE TARTIŞMA 29
4.1 Benzetim Ortamı ve Sistem Yapısı 29
4.1.1 Sistem Mimarisi 29
4.1.2 Ortak Sistem Parametreleri 30
4.1.2 Test Senaryosu ve Işınım Profili 30
4.2 Performans Değerlendirme Kriterleri 31
4.2.1 DC Bara Minimum Gerilimi (Vdc, min) 32

4.2.2 Maksimum Gerilim Sapması ($\Delta VDC, max$) 32
4.2.3 Toparlanma Süresi ($trec$) 32
4.2.4 Batarya Maksimum Güç Desteği ($Pbat, max$) 33
4.3 PV Tabanlı Nano Şebekede Dönüştürücü Topolojilerinin Benzetim Sonuçları 33
4.3.1 DC Bara Gerilimi Kararlılığı Analizi 33
4.3.2 Dinamik Tepki Analizi 36
4.3.3 Batarya Güç Desteği Analizi 39
4.3.4 Genel Değerlendirme 42
4.4 DC-DC Dönüştürücü Topolojilerinin Karşılaştırılması 43
4.4.1 Topolojilerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 43
4.4.2 Dönüştürücü Topolojilerinin Göreli Maliyet ve Karmaşıklık Değerlendirmesi 44
4.5 Çok Kriterli Performans Değerlendirmesi 45
4.5.1 Ağırlıklandırma 46
4.5.2 Topolojilerin Puanlandırılması 46
4.5.3 Ağırlıklı Toplam Puanlar 46
4.5.4 Genel Değerlendirme 47
4.6 Bölüm Sonucu 47
5 SONUÇ **49**
5.1 Sonuçlar 49
5.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 50
KAYNAKÇA **51**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **53**

SİMGE LİSTESİ

f_s	Anahtarlama frekansı
I_{bat}	Batarya akımı
P_{bat}	Batarya gücü
R_0	Batarya iç direnci
R_1	Batarya RC dalı direnci
C_1	Batarya RC dalı kapasitansı
SOC	Batarya şarj durumu
V_{bat}	Batarya terminal gerilimi
I_{dc}	DC bara akımı
V_{dc}	DC bara gerilimi
t_{rec}	DC bara gerilimi toparlanma süresi
P_{dc}	DC bara gücü
V_i	DC-DC dönüştürücü giriş gerilimi
V_0	DC-DC dönüştürücü çıkış gerilimi
w_e	Elektriksel açısal hız
L	Endüktans
I_{pv}	Fotovoltaik sistem çıkış akımı
P_{pv}	Fotovoltaik sistem çıkış gücü
V_{pv}	Fotovoltaik sistem çıkış gerilimi
t_{rise}	Gerilim yükselme süresi
D	Görev oranı
ρ	Hava yoğunluğu
C	Kapasitans
L_m	Manyetleme endüktansı
L_r	Rezonans endüktansı
C_r	Rezonans kapasitansı
w_r	Rotor açısal hız
C_p	Rüzgâr türbini güç katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
CCM	Sürekli İletim Modu
DC	Doğru Akım
dq	Döner Referans Çerçevesi
ECM	Eşdeğer Devre Modeli
EMI	Elektromanyetik Girişim
LLC	LLC Rezonans Dönüştürücü
MPPT	Maksimum Güç Noktası İzleme
OCV	Açık Devre Gerilimi
PMSG	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
PSFB	Faz Kaydırmalı Tam Köprü
PV	Fotovoltaik
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SOC	Şarj Durumu
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Boost dönüştürücü devre şeması **9**
Şekil 2.2 PSFB dönüştürücü devre şeması **11**
Şekil 2.3 Push-Pull dönüştürücü devre şeması **13**
Şekil 3.1 DC nano şebeke sistemine ait genel blok diyagram **16**
Şekil 3.2 DC bara gerilim kontrol blok diyagramı **27**
Şekil 4.1 Benzetimde kullanılan ışınım profili **31**
Şekil 4.2 Boost dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi **34**
Şekil 4.3 Push-Pull dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi **35**
Şekil 4.4 PSFB dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi **36**
Şekil 4.5 Boost dönüştürücü dinamik tepki **37**
Şekil 4.6 Push pull dönüştürücü dinamik tepki **38**
Şekil 4.7 PSFB dönüştürücü dinamik tepki **39**
Şekil 4.8 Boost dönüştürücü batarya güç değişimi **40**
Şekil 4.9 Push pull dönüştürücü batarya güç değişimi **41**
Şekil 4.10 PSFB dönüştürücü batarya güç değişimi **42**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Nano şebeke senaryoları ve kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojileri **17**

Tablo 4.1 Ortak sistem parametreleri **30**

Tablo 4.2 Dönüştürücülerin dinamik performans karşılaştırması **44**

Tablo 4.3 Dönüştürücü topolojilerinin göreli karşılaştırması **45**

Tablo 4.4 Performans kriterleri ve ağırlıkları **46**

Tablo 4.5 Topolojilerin kriter bazlı puanları **46**

Tablo 4.6 Ağırlıklı performans değerlendirmesi **47**

ÖZET

Nano Şebekelerde Farklı Dönüştürücülerin Karşılaştırmalı Analizi

Berkkan DÜNDAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali DURUSU

Bu tez çalışmasında, stand-alone işletim koşulları altında çalışan PV tabanlı ve batarya destekli DC nano şebeke yapısında farklı DC–DC dönüştürücü topolojilerinin sistem davranışı benzetim ortamında incelenmiştir. Çalışmada, 96 V DC seviyesindeki PV kaynağından elde edilen enerjinin 400 V DC bara üzerinden yük beslemesinde kullanıldığı bir sistem modeli oluşturulmuştur.

Karşılaştırmalı analiz kapsamında izolesiz Boost dönüştürücü ile izoleli Push-Pull ve faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücü topolojileri aynı çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir. Analizler, ışınım değişimleri altında DC bara gerilimi kararlılığı, dinamik tepki ve batarya güç desteği kriterleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, dönüştürücü topolojisinin sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. PSFB dönüştürücüde DC bara geriliminin daha kararlı tutulduğu ve sistemin daha hızlı toparlanma gösterdiği gözlemlenmiştir. Boost ve Push-Pull dönüştürücülerde ise gerilim sapmalarının daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Batarya sisteminin güç dengesizliğini

dengelediği, ancak kullanım seviyesinin topolojiye bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Sonuç olarak, DC nano şebeke tasarımında dönüştürücü topolojisi seçiminin gerilim kararlılığı, dinamik performans ve batarya kullanımı açısından kritik olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: DC nano şebeke, DC–DC dönüştürücü, PSFB, Push-Pull, Boost

ABSTRACT

Comparative Analysis of Different Converters in Nano Grids

Berkkan DÜNDAR

Department of Electrical engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali DURUSU

In this thesis, the effects of different DC–DC converter topologies on system behavior in a stand-alone, PV-based and battery-supported DC Nano grid are investigated through simulation studies. The system is modeled to supply a load from a common 400 V DC bus using energy generated from a 96 V DC photovoltaic source.

Within the scope of the comparative analysis, a non-isolated Boost converter and isolated Push-Pull and phase-shifted full-bridge (PSFB) converter topologies are evaluated under identical operating conditions. The analyses are conducted based on DC bus voltage stability, dynamic response, and battery power support under varying irradiance conditions.

The results indicate that the converter topology has a significant impact on system performance. The PSFB converter demonstrates superior DC bus voltage regulation and faster dynamic response, while the Boost and Push-Pull converters exhibit more pronounced voltage deviations. It is also observed that the battery system effectively compensates for power imbalances, although its utilization varies depending on the converter topology.

In conclusion, the selection of DC–DC converter topology plays a critical role in DC nanogrid design, affecting voltage stability, dynamic performance, and battery utilization.

Keywords: DC nanogrid, DC–DC converter, PSFB, Push-Pull, Boost

1
GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu ve Önemi

Dünya genelinde artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisine olan talebin sürekli olarak artmasına neden olmaktadır. Mevcut enerji üretim yapısının büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanması; sera gazı emisyonları, iklim değişikliği ve kaynakların tükenmesi gibi çevresel ve ekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Bu durum, enerji üretiminde daha sürdürülebilir ve çevre dostu çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [1], [3].

Yenilenebilir enerji kaynakları, düşük karbon salımı ve tükenmez yapıları sayesinde enerji sistemlerinin dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle güneş enerjisi, teknolojik gelişmeler ve maliyetlerdeki düşüş ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artacağı öngörülmektedir [1], [2].

Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim karakteristikleri kesintili ve değişken yapıdadır. Bu durum, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sağlanmasını zorlaştırmakta ve sistem kararlılığı açısından çeşitli teknik zorluklar oluşturmaktadır [2].

Bu bağlamda, merkezi üretim yapılarının yerini dağıtık enerji sistemleri almaya başlamıştır. Mikro ve nano şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının yerel ölçekte entegrasyonunu sağlayarak enerji arz güvenliğini artırmakta ve iletim kayıplarını azaltmaktadır. Özellikle stand-alone çalışan nano şebekeler, düşük güçlü uygulamalarda esnek ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır [3].

Yenilenebilir enerji tabanlı nano şebekelerde güç elektroniği dönüştürücüleri, enerji dönüşümü, kontrolü ve sistem kararlılığının sağlanmasında kritik bir rol

oynamaktadır. Bu nedenle, farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin incelenmesi ve karşılaştırılması, güncel ve önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.

1.2 Problem Tanımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemlerine entegrasyonu, çevresel faydalar sağlamasına rağmen üretim karakteristikleri açısından önemli teknik zorluklar içermektedir. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, doğaları gereği kesintili bir üretim yapısına sahiptir. Bu durum, üretimin zamana bağlı olarak değişmesine ve sistemde güç dengesizliğinin oluşmasına neden olmaktadır [4], [5].

Stand-alone çalışan nano şebekelerde bu dengesizlik daha belirgin hale gelmektedir. Üretim ve tüketim arasındaki uyumsuzluk, sistem kararlılığını olumsuz etkileyerek güç paylaşımı ve kontrol problemlerine yol açmaktadır [4].

DC nano şebekelerde tüm bileşenler genellikle ortak bir DC bara üzerinden bağlanmaktadır. Bu nedenle, üretim ve tüketim arasındaki anlık dengesizlikler doğrudan DC bara geriliminde dalgalanmalara neden olmaktadır. Uygun kontrol sağlanamadığında bu durum sistem kararsızlığına yol açabilmektedir [6]. Bu nedenle DC bara gerilim kararlılığı, sistem tasarımında kritik bir problem olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte, fotovoltaik sistemlerin düşük gerilim seviyelerinde çalışması, yüksek DC bara gerilimlerine ulaşmak için yüksek yükseltme oranına sahip dönüştürücülerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Klasik Boost dönüştürücüler ile yüksek dönüşüm oranlarının elde edilmesi; yüksek görev oranı, artan kayıplar ve gerilim stresi gibi dezavantajlara neden olmaktadır [7].

Yüksek güç seviyelerinde çalışan sistemlerde, yalnızca gerilim dönüşümü değil aynı zamanda galvanik izolasyon da önemli bir gereksinimdir. İzolasyon, sistem güvenliği ve güvenilirliği açısından kritik rol oynamaktadır [8].

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısı, DC bara gerilim kararlılığı, yüksek gerilim dönüşüm ihtiyacı ve izolasyon gereksinimi, DC nano şebekelerde birlikte ele alınması gereken temel mühendislik problemlerini oluşturmaktadır.

1.3 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, fotovoltaik (PV) tabanlı ve batarya destekli, stand-alone çalışan bir DC nano şebeke yapısında farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin sistem davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada, düşük gerilim seviyesinde (96 V DC) çalışan PV kaynağından elde edilen enerjinin 400 V DC bara seviyesine yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu gerilim seviyeleri, DC nano şebeke uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmekte olup yüksek gerilim dönüşüm oranı gereksinimini ortaya koymaktadır [7].

Bu kapsamda, izolesiz Boost dönüştürücü ile izoleli Push-Pull ve faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücü topolojileri aynı çalışma koşulları altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu topolojiler, yüksek gerilim dönüşüm oranı sağlama kabiliyeti, galvanik izolasyon gereksinimi ve uygulama yaygınlığı açısından literatürde sıkça incelenmektedir [6], [8].

Çalışmanın bir diğer amacı, farklı dönüştürücü topolojilerinin ışınım değişimleri altındaki dinamik davranışlarının benzetim ortamında incelenmesi ve sistem performansına etkilerinin ortaya konmasıdır. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili üretim karakteristiğinin DC bara gerilimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir [7].

1.4 Çalışmanın Kapsamı ve Sınırları

Bu tez çalışması, fotovoltaik (PV) tabanlı ve batarya destekli, stand-alone çalışan bir DC nano şebeke sisteminin güç elektroniği tabanlı yapısını incelemektedir. Çalışma kapsamında ele alınan sistem, yaklaşık 10 kW güç seviyesinde modellenmiş olup küçük ölçekli DC nano şebeke uygulamalarını temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır.

Tüm analizlerde, PV kaynağının çıkış gerilimi 96 V DC, ortak DC bara gerilimi ise 400 V DC olarak belirlenmiştir. Bu gerilim seviyeleri, yüksek gerilim yükseltme oranı gereksinimini ortaya koymak ve farklı dönüştürücü topolojilerinin aynı çalışma koşulları altında karşılaştırılabilmesini sağlamak amacıyla seçilmiştir.

Çalışma yalnızca batarya destekli ve stand-alone çalışan sistemler ile sınırlandırılmıştır. Şebeke bağlantılı yapılar, bataryasız senaryolar ve alternatif yenilenebilir enerji kaynakları bu tez kapsamında ele alınmamıştır.

İncelenen DC-DC dönüştürücü topolojileri; izolesiz Boost, izoleli Push-Pull ve faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücü ile sınırlandırılmıştır. Bu topolojiler, yüksek gerilim dönüşüm oranı ve galvanik izolasyon gereksinimlerini karşılayabilmeleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Tüm sistemler MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş olup analizler yalnızca benzetim sonuçlarına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel doğrulama, donanım uygulamaları, termal analizler ve elektromanyetik etkiler çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

2
GENEL BİLGİLER

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Modellemesi

Bu tez çalışmasında, DC nano şebeke yapısında kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı ve enerji depolama sistemi matematiksel modeller yardımıyla temsil edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili üretim karakteristiği, sistem davranışının doğru şekilde incelenebilmesi için uygun modelleme yaklaşımlarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda fotovoltaik sistemler ve enerji depolama birimi olarak kullanılan Li-ion bataryalar ele alınmış, benzetim çalışmalarında kullanılan matematiksel modeller ve temel karakteristikleri açıklanmıştır.

2.1.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Matematiksel Modeli

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken tabanlı enerji üretim sistemleridir. PV hücrelerin elektriksel davranışı, ışınım ve sıcaklık gibi çevresel parametrelere bağlı olup doğrusal olmayan karakteristikler sergilemektedir. Bu nedenle güç elektroniği uygulamaları ve benzetim çalışmaları için hücre davranışını temsil eden matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde PV hücrelerin modellenmesinde farklı yaklaşımlar bulunmakla birlikte, doğruluk–karmaşıklık dengesi açısından en yaygın kullanılan yöntem tek diyot eşdeğer devre modelidir [9]. Bu model, PV hücrenin temel elektriksel özelliklerini yeterli doğrulukla temsil edebilmektedir.

Tek diyot modeline göre bir PV hücre; bir fotokaynak akımı, bir diyot, seri direnç (Rs) ve paralel dirençten (Rp) oluşan eşdeğer bir devre ile ifade edilmektedir. Fotokaynak akımı ışınıma bağlı olarak üretilen akımı temsil ederken, diyot yarı

iletken davranışını, seri ve paralel dirençler ise iletim kayıpları ve kaçak akımları modellemektedir.

Bu eşdeğer devreye göre PV hücrenin akım–gerilim ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [9], [10]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1\right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Burada I_{ph} foto kaynak akımını, I_0 diyot doyma akımını, n idealite faktörünü ve Vt termal gerilimi ifade etmektedir. Termal gerilim, sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (2.2)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T hücre sıcaklığı (Kelvin cinsinden) ve q elektron yüküdür.

Fotokaynak akımı, hem ışınım hem de sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir ve genellikle aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir [9]:

$$I_{ph} \approx \left(I_{sc,ref} + K_i(T - T_{ref})\right)\frac{G}{G_{ref}} \quad (2.3)$$

Burada Isc,ref referans koşullardaki kısa devre akımını, Ki sıcaklık katsayısını, G anlık ışınım değerini ve $Gref$ referans ışınım seviyesini temsil etmektedir.

PV hücrenin çıkış gücü, akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile elde edilmektedir:

$$P = V \times I \quad (2.4)$$

Bu doğrusal olmayan yapı nedeniyle PV hücrelerde güç–gerilim (P–V) karakteristiği üzerinde maksimum güç noktası oluşmakta olup, bu nokta çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir.

Uygulamada tek bir PV hücrenin ürettiği gerilim ve güç seviyeleri düşük olduğundan, hücreler seri ve paralel bağlanarak modül ve dizi yapıları oluşturulmaktadır. Seri bağlantılar gerilim seviyesini artırırken, paralel bağlantılar akım kapasitesini artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında PV sistemler, tek diyot eşdeğer devre modeli kullanılarak modellenmiş ve benzetim ortamında uygulanmıştır [10].

2.1.2 Li-Ion Batarya Karakteristikleri ve Eşdeğer Devre Modeli

Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısından kaynaklanan güç dengesizliklerinin giderilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. DC nano şebeke uygulamalarında bataryalar, kaynak ve yük arasındaki güç farkını dengeleyen enerji tamponları olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek enerji yoğunluğu ve verim avantajları nedeniyle lityum-iyon (Li-ion) bataryalar tercih edilmiştir.

Li-ion bataryaların modellenmesinde yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modelleri (Equivalent Circuit Models, ECM), düşük hesaplama maliyeti ve yeterli doğruluk sağlamaları nedeniyle sistem seviyesinde yapılan benzetim çalışmalarına uygundur [11], [12].

Bu çalışmada batarya, birinci dereceden Thevenin tipi eşdeğer devre modeli (1RC ECM) ile temsil edilmiştir. Bu model; açık devre gerilimi (OCV), iç direnç ($R0$) ve dinamik davranışı temsil eden bir RC dalından ($R1$–$C1$) oluşmaktadır [11].

Batarya terminal gerilimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{bat} = V_{OCV}(SOC) - I_{bat}R_0 - V_{RC} \tag{2.5}$$

Burada I_{bat} batarya akımını, V_{RC} ise RC dalı üzerindeki gerilimi temsil etmektedir. RC dalının dinamik davranışı aşağıdaki diferansiyel denklemle ifade edilir:

$$\frac{dV_{RC}}{dt} = -\frac{1}{R_1C_1}V_{RC} + \frac{1}{C_1}I_{bat} \tag{2.6}$$

Bataryanın şarj durumu (SOC), genellikle Coulomb sayımı yöntemi ile hesaplanmakta olup, başlangıç SOC değeri bilindiği varsayımı altında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{nom}}\int_{t_0}^{t} I_{bat}(\mathrm{T})\, d\mathrm{T} \tag{2.7}$$

Burada $Qnom$ bataryanın nominal kapasitesini ifade etmektedir. Bu çalışmada Coulombik verim birime yakın kabul edilerek kayıplar ihmal edilmiştir [12].

Li-ion bataryalar için daha yüksek doğruluk sağlamak amacıyla 2RC veya 3RC gibi daha karmaşık eşdeğer devre modelleri de literatürde yer almaktadır. Ancak bu modeller, artan parametre sayısı ve hesaplama yükü nedeniyle her uygulama için

gerekli değildir. Özellikle DC nano şebeke benzetimlerinde, bataryanın enerji tamponu olarak davranışının incelendiği durumlarda 1RC eşdeğer devre modeli, doğruluk ve hesaplama karmaşıklığı arasında uygun bir denge sunmaktadır [13].

Bu tez kapsamında Li-ion batarya, eşdeğer devre modeli kullanılarak modellenmiş ve DC nano şebeke içerisindeki dinamik davranışı benzetim ortamında incelenmiştir.

2.2 DC-DC Dönüştürücülerin Nano Şebekelerdeki Rolü

DC nano şebekeler, farklı karakteristiklere sahip enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve yüklerin ortak bir doğru akım (DC) bara üzerinde bir araya getirildiği yapılardır. Bu sistemlerde fotovoltaik paneller ve batarya sistemleri genellikle farklı gerilim seviyelerinde çalışmakta olup, yüklerin gereksinim duyduğu DC bara gerilimi ile doğrudan uyumlu değildir. Bu durum, gerilim seviyeleri arasındaki uyumsuzluğun giderilmesi için DC-DC dönüştürücülerin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

DC-DC dönüştürücüler, nano şebekelerde yalnızca gerilim seviyesini dönüştürmekle kalmayıp, aynı zamanda güç akışının kontrol edilebilirliğini ve sistemin kararlı çalışmasını sağlayan temel bileşenlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısı, DC bara gerilimi üzerinde dalgalanmalara neden olabilmektedir. Bu dalgalanmaların sınırlandırılması ve yüklerin kararlı bir şekilde beslenebilmesi için uygun dönüştürücü topolojilerinin seçilmesi kritik öneme sahiptir.

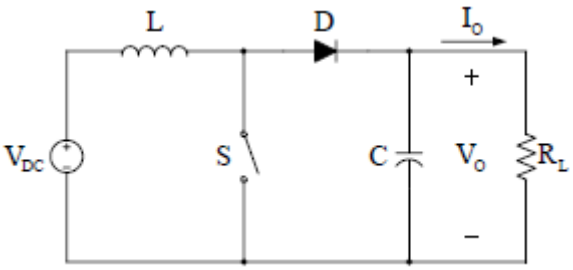
Nano şebeke mimarilerinde dönüştürücü seçimi yapılırken; güç seviyesi, giriş ve çıkış gerilim oranı, izolasyon gereksinimi, verimlilik ve kontrol karmaşıklığı gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır. Düşük ve orta güç seviyelerinde izolesiz topolojiler tercih edilebilirken, galvanik izolasyon gerektiren uygulamalarda izoleli dönüştürücüler önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında DC-DC dönüştürücüler; PV ve batarya tabanlı DC nano şebeke yapısı kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, izolesiz yapısı ve basitliği nedeniyle Boost dönüştürücü referans topoloji olarak ele alınmış; galvanik izolasyon ve yüksek gerilim dönüşüm oranı avantajları nedeniyle PSFB dönüştürücü incelenmiştir. Ayrıca alternatif izoleli bir yapı olarak Push-Pull

dönüştürücü de analiz kapsamına dâhil edilmiştir. Bu topolojiler, aynı çalışma koşulları altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.2.1 İzolesiz Dönüştürücüler: Yükseltici (Boost) Dönüştürücü

Yükseltici (Boost) dönüştürücü, giriş gerilimini daha yüksek bir doğru akım gerilimine dönüştüren temel izolesiz DC-DC dönüştürücü topolojilerinden biridir. Basit devre yapısı, düşük maliyetli bileşen gereksinimi ve kontrol kolaylığı nedeniyle düşük ve orta güç seviyelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. DC nano şebeke uygulamalarında, özellikle fotovoltaik sistemlerden elde edilen düşük seviyeli gerilimin DC bara seviyesine yükseltilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Boost dönüştürücünün temel devre yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Boost dönüştürücü devre şeması [14]

Boost dönüştürücü; bir endüktans (L), anahtarlama elemanı (S), diyot (D) ve çıkış kapasitöründen (C) oluşmaktadır. Çalışma prensibi, anahtarlama elemanının periyodik olarak iletime ve kesime geçirilmesine dayanmaktadır [15].

Boost dönüştürücünün çalışma prensibi, anahtarlama elemanının periyodik olarak iletime (ON) ve kesime (OFF) geçirilmesine dayanmaktadır. Bu kapsamda dönüştürücü iki temel çalışma durumuna sahiptir.

Anahtar iletimdeyken (ON durumu), endüktans giriş kaynağına doğrudan bağlanır ve üzerinde enerji depolanır. Bu durumda diyot ters polarmada kaldığı için çıkış tarafına enerji aktarımı gerçekleşmez ve yük, çıkış kapasitörü tarafından beslenir.

Anahtar kesime geçtiğinde (OFF durumu), endüktansta depolanan enerji diyot üzerinden çıkışa aktarılır. Bu süreçte endüktans gerilimi giriş gerilimine eklenerek çıkış geriliminin yükselmesini sağlar. Bu nedenle Boost dönüştürücü, giriş geriliminden daha yüksek bir çıkış gerilimi üretmektedir.

Bu iki çalışma durumunun periyodik olarak tekrarlanması sonucunda, görev oranına bağlı olarak istenilen çıkış gerilimi elde edilmektedir.

Boost dönüştürücü genellikle sürekli iletim modunda (CCM) çalıştırılmaktadır. Bu çalışma modunda iki temel durum söz konusudur. Anahtar iletimdeyken endüktans üzerinde enerji depolanmakta, anahtar kesime geçtiğinde ise bu enerji diyot üzerinden çıkışa aktarılmaktadır. Bu süreç sonucunda çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek bir değere ulaşmaktadır.

İdeal bir Boost dönüştürücü için gerilim kazancı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \tag{2.8}$$

Burada D, anahtarlama elemanının görev oranını ifade etmektedir [15].

Endüktans ve kapasitör değerleri, akım ve gerilim dalgalanmalarını sınırlandırmak amacıyla belirlenmektedir. Bu kapsamda endüktans ve kapasitör için temel tasarım bağıntıları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f_S \times \Delta I_L} \tag{2.9}$$

Burada:

f_S: anahtarlama frekansı

ΔI_L: endüktans akım dalgalanmasıdır

$$C = \frac{I_{out}}{f_s \times \Delta V_{out}} \tag{2.10}$$

Burada:

I_{out}: yük akımı

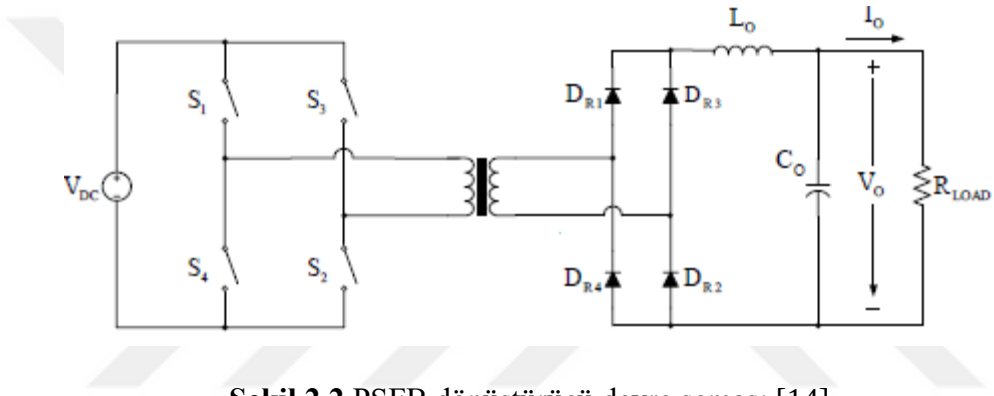
ΔV_{out}: çıkış gerilim dalgalanmasıdır

Boost dönüştürücüler, basit yapıları ve kontrol kolaylıkları nedeniyle avantaj sağlamakla birlikte, izolesiz yapıları nedeniyle galvanik izolasyon sağlamamaları ve yüksek gerilim kazançlarında artan akım stresleri gibi sınırlamalara sahiptir.

Bu tez çalışmasında Boost dönüştürücü, referans bir topoloji olarak değerlendirilmiş ve izoleli dönüştürücü yapılar ile karşılaştırmalı analizlerde kullanılmıştır.

2.2.2 İzoleli Dönüştürücüler: Faz Kaydırmalı Tam Köprü (PSFB)

Faz kaydırmalı tam köprü (Phase-Shifted Full Bridge, PSFB) dönüştürücü, galvanik izolasyon sağlayarak yüksek güç seviyelerinde verimli enerji dönüşümü gerçekleştiren izoleli DC-DC dönüştürücü topolojilerinden biridir. Sabit frekansta çalışabilmesi ve yumuşak anahtarlama (soft-switching) özelliği sayesinde özellikle orta ve yüksek güç uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [16], [17]. PSFB dönüştürücünün devre yapısı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 PSFB dönüştürücü devre şeması [14]

PSFB dönüştürücü; dört anahtardan oluşan tam köprü yapısı, yüksek frekanslı bir transformatör ve çıkış doğrultucu–filtre katından oluşmaktadır. Enerji transferi, köprü kolları arasındaki anahtarlama sinyallerinin faz kaydırılması ile kontrol edilmektedir.

PSFB dönüştürücüde çıkış gücü, köprü kolları arasındaki faz kaydırma açısı ile belirlenmektedir. Faz kaydırma miktarı arttıkça transformatör primerine uygulanan etkin gerilim artmakta ve buna bağlı olarak çıkış gücü yükselmektedir.

Bu topolojinin en önemli avantajlarından biri, uygun çalışma koşullarında anahtarlama elemanlarının sıfır gerilim altında anahtarlanabilmesidir (Zero Voltage Switching, ZVS). Bu sayede anahtarlama kayıpları azaltılmakta ve sistem verimi artırılmaktadır [16].

PSFB dönüştürücüde enerji transferi, tam köprü yapısındaki anahtarların belirli bir faz kaydırma açısı ile sürülmesi ile kontrol edilmektedir. Köprü kolları arasındaki

faz farkı arttıkça, transformatör primerine uygulanan efektif gerilim artmakta ve buna bağlı olarak çıkış gücü yükselmektedir.

Uygun çalışma koşullarında, anahtarlama elemanlarının çıkış kapasiteleri ve transformatör kaçak endüktansı sayesinde anahtar uçlarındaki gerilim sıfıra yakın seviyeye düşürülebilmekte ve anahtarlama bu noktada gerçekleştirilmektedir. Bu durum anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltmakta ve sistem verimini artırmaktadır.

Bu çalışma prensibi sayesinde PSFB dönüştürücü, yüksek güç ve yüksek gerilim dönüşüm oranı gerektiren uygulamalarda kararlı ve verimli bir çözüm sunmaktadır.

İdeal durumda PSFB dönüştürücü için çıkış gerilimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

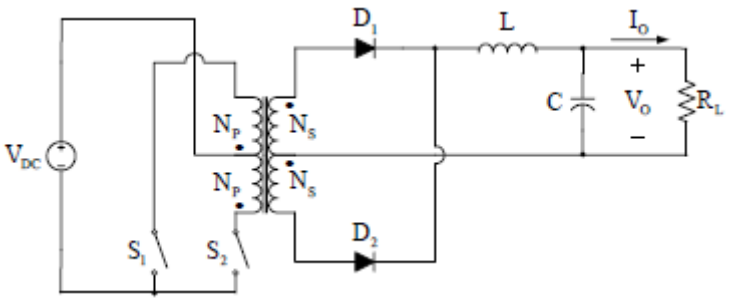
$$V_{out} = n \times V_{in} \tag{2.11}$$

PSFB dönüştürücü tasarımında temel parametreler; transformatör dönüş oranı, anahtarlama frekansı ve çıkış filtre elemanlarıdır. Bu parametreler, sistemin verim, gerilim dalgalanması ve dinamik davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

PSFB dönüştürücüler, galvanik izolasyon sağlamaları, yüksek gerilim dönüşüm oranlarına uygun olmaları ve kararlı çalışma özellikleri nedeniyle DC nano şebeke uygulamalarında önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında PSFB dönüştürücü, izoleli bir topoloji olarak diğer dönüştürücüler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.2.3 Push-Pull Dönüştürücü

Push-Pull dönüştürücü, galvanik izolasyon sağlayan ve orta güç seviyelerinde yaygın olarak kullanılan izoleli DC-DC dönüştürücü topolojilerinden biridir. Yapı olarak iki anahtarlama elemanı ve merkez tapalı (center-tapped) bir transformatör içermektedir. Bu topoloji, giriş geriliminin alternatif olarak transformatör primerine uygulanması prensibine dayanmaktadır [15], [18]. Push-Pull dönüştürücünün devre yapısı Şekil 2.X'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Push-Pull dönüştürücü devre şeması [14]

Push-Pull dönüştürücüde enerji transferi, iki anahtarlama elemanının dönüşümlü olarak iletime geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Birinci anahtar iletimdeyken transformatörün primer sargısının bir yarısı enerjilenir ve manyetik akı oluşur. İkinci anahtar iletime geçtiğinde ise akım yönü değişerek primer sargının diğer yarısı enerjilenir.

Bu alternatif çalışma sayesinde transformatör çekirdeğinde çift yönlü manyetik akı oluşmakta ve enerji sürekli olarak çıkış tarafına aktarılmaktadır. Bu yapı, transformatörün etkin kullanımını sağlamakla birlikte, sargılar arasındaki dengesizlik durumunda çekirdek doyumu riski oluşturmaktadır.

Bu nedenle Push-Pull dönüştürücülerde görev oranı genellikle %50'nin altında tutulmakta ve simetrik sürme sağlanarak manyetik denge korunmaktadır.

Push-Pull dönüştürücüde iki anahtarlama elemanı dönüşümlü olarak iletime geçirilir. Her bir anahtar iletimdeyken transformatörün primer sargısının bir yarısı enerjilenir ve manyetik akı oluşur. Anahtarların dönüşümlü çalışması ile enerji transferi süreklilik kazanır ve giriş gerilimi transformatör aracılığıyla çıkış tarafına aktarılır.

İdeal durumda Push-Pull dönüştürücü için çıkış gerilimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{out} = 2 \times n \times D \times V_{in} \tag{2.12}$$

Burada:

n: transformatör dönüş oranı

D: görev oranı

Bu bağıntı, transformatör oranı ve görev oranının birlikte gerilim kazancını belirlediğini göstermektedir [18].

Push-Pull dönüştürücü tasarımında, transformatör sargılarının dengeli çalışması kritik öneme sahiptir. Dengesizlik durumunda çekirdek doyumu ve anahtarlama elemanları üzerinde ek gerilim stresleri oluşabilmektedir. Bu nedenle görev oranı genellikle %50'nin altında tutulmaktadır.

Push-Pull dönüştürücüler, basit izoleli yapıları ve düşük bileşen sayıları nedeniyle avantaj sağlamakla birlikte, yüksek gerilim dönüşüm oranı ve yüksek güç uygulamalarında sınırlı performans gösterebilmektedir.

Bu tez çalışmasında Push-Pull dönüştürücü, izoleli bir alternatif topoloji olarak değerlendirilmiş ve diğer dönüştürücüler ile karşılaştırmalı analiz kapsamında incelenmiştir.

3
MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Önerilen Nano Şebeke Mimarisi

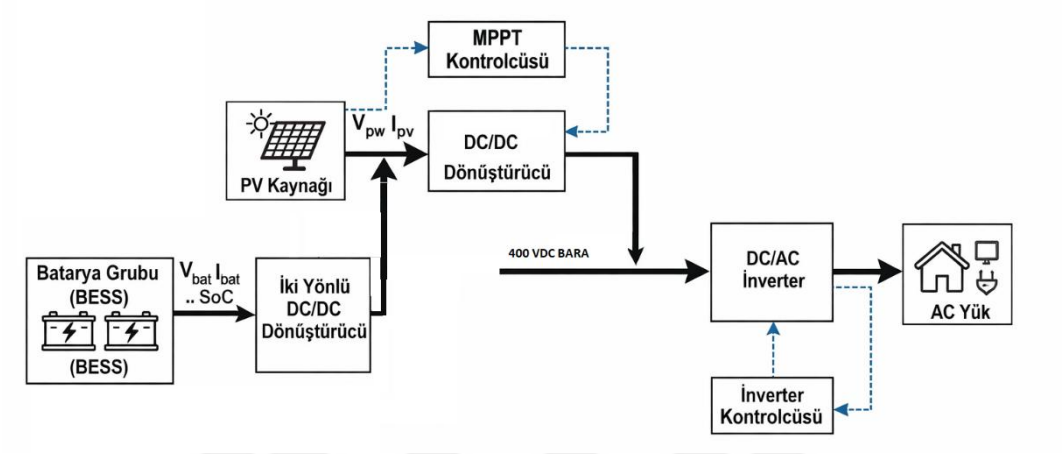
Bu tez çalışmasında, farklı yenilenebilir enerji kaynağı kombinasyonlarının karşılaştırılmasına imkân tanıyan, DC tabanlı ve stand-alone bir nano şebeke mimarisi önerilmiştir. Önerilen mimaride, tüm sistemler herhangi bir AC şebeke bağlantısı olmaksızın çalışacak şekilde modellenmiş olup, enerji üretimi, dönüşümü ve yük beslemesi tamamen DC yapı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, sistem mimarisinin sadeleştirilmesine ve farklı senaryoların ortak bir çerçeve altında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Önerilen nano şebeke yapısında, fotovoltaik (PV) sistemler ve batarya grupları, senaryoya bağlı olarak enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Tüm senaryolarda yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya tarafında 96 V DC seviyesinde çalışma kabul edilmiş; yük tarafında ise ortak bir 400 V DC bara oluşturulmuştur. Bu sayede farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin aynı gerilim seviyeleri altında karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Nano şebeke mimarisinde, enerji kaynakları ile DC bara arasında yer alan DC-DC dönüştürücüler, hem gerilim seviyesinin dönüştürülmesinden hem de güç akışının kontrol edilmesinden sorumludur. Kullanılan dönüştürücü topolojisi, enerji kaynağı türüne ve senaryo tanımına bağlı olarak değişmekte olup, tüm senaryolarda ortak bir mimari yapı korunmaktadır. Böylece farklı dönüştürücü topolojilerinin sistem performansı üzerindeki etkileri, mimari farklardan bağımsız olarak incelenebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında önerilen nano şebeke mimarisi, benzetim tabanlı bir yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Yük modeli, kontrol yapıları ve dönüştürücü parametreleri, karşılaştırmalı analizlere imkân verecek şekilde tanımlanmış;

performans değerlendirmeleri ilerleyen bölümlerde sunulacak benzetim sonuçları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu tür DC tabanlı nano şebeke mimarileri, literatürde yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji depolama sistemlerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Çalışma kapsamında oluşturulan DC nano şebeke sisteminin genel blok diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 DC nano şebeke sistemine ait genel blok diyagram

3.2 Senaryo Matrisi ve Çalışma Koşulları

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen nano şebeke senaryoları ve benzetim çalışmalarında kullanılan ortak çalışma koşulları açıklanmaktadır. Farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin aynı sistem yapısı altında karşılaştırılabilmesi amacıyla senaryolar belirlenmiş ve tüm analizlerde ortak varsayımlar kullanılmıştır.

3.2.1 Senaryo Tanımı ve Sınıflandırma

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik (PV) enerji kaynağı ve batarya entegrasyonu içeren DC nano şebeke yapısı ele alınmış ve farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tanımlanan senaryolarda amaç, 96 V DC seviyesindeki kaynak geriliminin 400 V DC bara gerilimine dönüştürülmesi ve bu gerilim seviyesinde yük beslemesinin kararlı bir şekilde sağlanmasıdır.

Çalışma kapsamında, PV tabanlı ve batarya destekli tek bir nano şebeke mimarisi altında farklı DC-DC dönüştürücü topolojileri kullanılarak karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Boost, PSFB ve Push-Pull dönüştürücü

topolojileri aynı çalışma koşulları altında değerlendirilmiş ve sistem davranışları incelenmiştir.

Batarya sistemi, enerji sürekliliğinin sağlanması ve yenilenebilir enerji kaynağındaki değişimlerin DC bara gerilimine etkisinin azaltılması amacıyla modele dâhil edilmiştir. Bu yapı sayesinde, özellikle ışınım değişimlerine karşı sistemin dinamik tepkisi ve gerilim kararlılığı analiz edilmiştir.

Bu çalışmada ele alınan senaryolar, aynı enerji kaynağı yapısı ve batarya entegrasyonu altında yalnızca kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojisine göre farklılık göstermekte olup, oluşturulan senaryo yapısı Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Bu yaklaşım, benzetim sonuçlarının tutarlı ve karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır.

Tablo 3.1 Nano şebeke senaryoları ve kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojileri

Senaryo No	Enerji Kaynağı Yapısı	Batarya	DC-DC Dönüştürücü
S1	PV (10 kW) + Batarya (5 kWh)	Var	PSFB
S2	PV (10 kW) + Batarya (5 kWh)	Var	Boost
S3	PV (10 kW) + Batarya (5 kWh)	Var	Push Pull

3.2.2 Ortak Çalışma Koşulları ve Varsayımlar

Tanımlanan tüm nano şebeke senaryolarında, sistemler stand-alone yapı olarak modellenmiş ve herhangi bir AC şebeke bağlantısı varsayılmamıştır. DC bara gerilimi tüm senaryolar için 400 V olarak belirlenmiş, yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya tarafında ise 96 V DC seviyesinde çalışma kabul edilmiştir. Bu yaklaşım ile farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin aynı gerilim ve güç koşulları altında karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Tüm senaryolarda fotovoltaik enerji sistemleri için nominal güç seviyesi 10 kW olarak belirlenmiş, batarya sistemi ise 5 kWh enerji kapasitesine sahip olacak şekilde modellenmiştir. Benzetimler MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, anahtarlama frekansları, filtre elemanları ve kontrol parametreleri her bir dönüştürücü topolojisi için karşılaştırmaya imkân verecek şekilde tutarlı olarak seçilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların, sistematik ve adil bir değerlendirmeye olanak sağlaması hedeflenmiştir.

3.3 Dönüştürücü Tasarım Kriterleri

Bu çalışmada kullanılan dönüştürücü topolojilerinin parametreleri, ortak çalışma koşulları esas alınarak belirlenmiştir. Tasarım sürecinde amaç ayrıntılı donanım optimizasyonu yapmak değil, farklı topolojilerin sistem davranışlarını karşılaştırmaktır. Bu nedenle tüm dönüştürücüler için benzer giriş-çıkış koşulları korunmuştur.

3.3.1 Genel Tasarım Yaklaşımı

Bu çalışmada kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojileri, aynı giriş ve çıkış gerilim seviyeleri altında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla ortak tasarım ölçütleri esas alınarak belirlenmiştir. Tüm senaryolarda kaynak tarafında 96 V DC, yük tarafında ise 400 V DC bara gerilimi hedeflenmiştir. Anahtarlama frekansı 5 kHz olarak seçilmiş ve dönüştürücü parametreleri bu çalışma koşullarına göre belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında amaç ayrıntılı bir donanım optimizasyonu yapmak değil, farklı topolojilerin sistem davranışını karşılaştırmak olduğundan, parametre seçimlerinde temel tasarım bağıntıları esas alınmış ve tüm topolojiler için benzer çalışma koşulları korunmuştur.

3.3.2 Boost Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı

Boost dönüştürücü, PV kaynağından elde edilen gerilimin yükseltilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sistem yapısında ilk kademede MPPT kontrollü boost dönüştürücü ile PV gerilimi 96 V DC seviyesine yükseltilmiş, ikinci kademede ise dönüştürücü yapıları ile 400 V DC bara gerilimi elde edilmiştir.

İdeal boost dönüştürücü için gerilim kazancı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \tag{3.1}$$

Burada D görev oranını göstermektedir. Bu çalışmada PV dizi gerilimi yaklaşık maksimum güç noktası çevresinde değerlendirilmiş ve boost dönüştürücü çıkışı 96 V olacak şekilde görev oranı belirlenmiştir.

Endüktans seçimi, sürekli iletim modunun korunması ve akım dalgalanmasının sınırlandırılması amacıyla aşağıdaki bağıntıya göre yapılmıştır:

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_L} \tag{3.2}$$

Burada ΔI_L, endüktans akım dalgalanmasını ifade etmektedir. Çıkış kapasitörü ise DC gerilim dalgalanmasını sınırlandırmak amacıyla seçilmiş ve aşağıdaki bağıntı esas alınmıştır:

$$C = \frac{I_{out}}{f_s \times \Delta V_{out}} \tag{3.3}$$

Boost dönüştürücü, bu çalışmada basit yapısı ve düşük donanım karmaşıklığı nedeniyle referans bir topoloji olarak değerlendirilmiştir.

3.3.3 Push-Pull Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı

Push-Pull dönüştürücü, 96 V giriş seviyesinin yüksek frekanslı transformatör yardımıyla 400 V DC bara seviyesine dönüştürülmesi amacıyla kullanılmıştır. İdeal durumda çıkış gerilimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{out} = 2 \times n \times D \times V_{in} \tag{3.4}$$

Burada n transformatör dönüş oranını, D ise görev oranını ifade etmektedir. Push-Pull dönüştürücü tasarımında, transformatör sargılarının dengeli çalışması kritik öneme sahiptir. Dengesizlik durumunda çekirdek doyumu ve anahtarlama elemanları üzerinde ek gerilim stresleri oluşabilmektedir. Bu nedenle görev oranı sınırlandırılmış ve sistem karşılaştırmalarında aynı anahtarlama frekansı korunmuştur.

Bu topoloji, izoleli bir yapı sunması ve orta güç seviyelerinde uygulanabilir olması nedeniyle karşılaştırma kapsamında değerlendirilmiştir.

3.3.4 PSFB Dönüştürücü Tasarım Yaklaşımı

PSFB dönüştürücü, yüksek gerilim dönüşüm oranı ve galvanik izolasyon gereksinimi nedeniyle bu çalışmada temel izoleli topoloji olarak değerlendirilmiştir. PSFB yapısında enerji transferi, köprü kolları arasındaki faz kaydırma miktarı ile kontrol edilmektedir. Çıkış gerilimi ideal olarak transformatör dönüş oranına bağlı olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_{out} = n \times V_{in} \tag{3.5}$$

PSFB dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri, uygun çalışma koşullarında sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) imkânı sunmasıdır. Bu özellik sayesinde anahtarlama kayıpları azalmakta ve sistem verimi artırılmaktadır.

Bu topoloji, yüksek güç seviyelerinde kararlı çalışma sağlaması ve dinamik performans açısından avantaj sunması nedeniyle bu çalışmada temel karşılaştırma topolojisi olarak değerlendirilmiştir.

3.3.5 Tasarım Yaklaşımı Genel Değerlendirme

Bu çalışmada dönüştürücü parametreleri, tüm topolojilerin aynı giriş-çıkış gerilim seviyeleri ve anahtarlama koşulları altında karşılaştırılabilmesi amacıyla seçilmiştir. Böylece benzetim sonuçlarında gözlenen farkların, ağırlıklı olarak dönüştürücü topolojisinden kaynaklanması hedeflenmiştir.

3.4 Sayısal Tasarım Yaklaşımı

Bu bölümde, dönüştürücü parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan temel tasarım bağıntıları ve sayısal hesaplamalar sunulmaktadır. Hesaplamalar, benzetim modellerinde kullanılacak ilk boyutlandırma değerlerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3.4.1 Genel Hesaplama Yaklaşımı

Bu çalışmada dönüştürücü parametrelerinin belirlenmesinde, temel tasarım bağıntılarına dayalı sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda giriş gerilimi 96 V, çıkış gerilimi 400 V ve çıkış gücü yaklaşık 3 kW olarak alınmıştır. Anahtarlama frekansı tüm topolojiler için 5 kHz olarak sabit tutulmuştur.

Bu kapsamda çıkış akımı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{3000}{400} = 7{,}5\ A \tag{3.6}$$

$$R_{yük} = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} = \frac{400^2}{3000} = 53.33\ \Omega \tag{3.7}$$

olarak elde edilmiştir. Bu değer benzetim modelinde kullanılan yaklaşık 55 Ω yük ile uyumludur.

Bu çalışmada kullanılan sayısal bağıntılar, ayrıntılı donanım optimizasyonundan ziyade, benzetim modelinde kullanılacak parametrelerin ilk boyutlandırmasını yapmak amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan akım ve gerilim dalgalanma oranları, dönüştürücü performansı ile bileşen boyutlandırması arasında denge sağlamak amacıyla seçilmiştir. Akım dalgalanması genellikle ortalama akımın %10–30'u aralığında seçilmekte olup, bu çalışmada %20 civarında kabul edilmiştir.

Gerilim dalgalanması ise DC bara geriliminin kararlılığını bozmayacak şekilde düşük tutulmuş ve genellikle %1–3 aralığında seçilmiştir. Bu yaklaşım, hem sistem kararlılığının korunmasını hem de filtre elemanlarının makul boyutlarda kalmasını sağlamaktadır.

3.4.2 Boost Dönüştürücü için Tasarım Bağıntıları

Boost dönüştürücü, bu çalışmada PV kaynağından elde edilen gerilimin yükseltilmesi ve referans bir topoloji olarak karşılaştırma yapılması amacıyla kullanılmıştır. Boost dönüştürücü tasarımında temel bağıntılar kullanılarak endüktans ve kapasitör değerleri belirlenmiştir.

İdeal durumda boost dönüştürücü için gerilim kazancı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \tag{3.8}$$

$$D = 1 - \frac{96}{400} \approx 0.76 \tag{3.9}$$

Burada D, görev oranını ifade etmektedir.

Endüktans değeri, sürekli iletim modunun sağlanması ve akım dalgalanmasının sınırlandırılması amacıyla aşağıdaki bağıntıya göre belirlenmektedir:

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f_s \times \Delta I_L} \tag{3.10}$$

Burada ΔI_L, endüktans akım dalgalanmasını ifade etmekte olup genellikle ortalama akımın %20–30'u olarak seçilmektedir.

$$\Delta I_L = 0.2 \times I_{out} = 0.2 \times 7.5 = 1.5\ A \tag{3.11}$$

Bu değerler kullanılarak endüktans yaklaşık olarak:

$$L \approx \frac{96 \times 0.76}{5000 \times 1.5} \approx 9.7\ mH \tag{3.12}$$

Çıkış kapasitörü ise gerilim dalgalanmasını sınırlamak amacıyla aşağıdaki bağıntıya göre belirlenmektedir:

$$C = \frac{I_{out}}{f_s \times \Delta V_{out}} \tag{3.13}$$

Bu çalışmada gerilim dalgalanması çıkış geriliminin %2'si olarak alınmıştır:

$$\Delta V_{out} = 0.02 \times 400 = 8\ V \tag{3.14}$$

Bu durumda kapasitör değeri yaklaşık olarak:

$$C \approx \frac{7.5 \times 0.76}{5000 \times 8} \approx 142\ \mu F \tag{3.15}$$

olarak elde edilmektedir.

Elde edilen bu değerler, boost dönüştürücü için ilk tasarım yaklaşımını temsil etmekte olup, bu çalışmada dönüştürücü referans bir topoloji olarak değerlendirilmiştir.

3.4.3 PSFB Dönüştürücü için Sayısal Hesaplar

PSFB dönüştürücü için yapılan tasarım hesaplarında, çıkış geriliminin üst sınırı $Vout,max$=1.25·$Vout$ olarak kabul edilmiştir. Bu kabul doğrultusunda transformatör dönüş oranı:

$$n = \frac{V_{out,max}}{Vin} = \frac{500}{96} \approx 5.21 \tag{3.16}$$

Olarak belirlenmiştir. Görev oranı:

$$D = 0.5 \times \frac{V_{out}}{V_{out,max}} \approx 0.4 \tag{3.17}$$

Olarak alınmıştır.

PSFB dönüştürücüde filtre elemanlarının boyutlandırılmasında akım ve gerilim dalgalanmaları temel tasarım kriteri olarak alınmaktadır. Bu kapsamda genel olarak:

$$L \propto \frac{V \times D}{f_s \times \Delta I} \tag{3.18}$$

$$\mathrm{C} \propto \frac{\Delta I}{f_s \times \Delta V} \tag{3.19}$$

bağıntıları esas alınmaktadır.

Bu çalışmada akım dalgalanması çıkış akımının %20'si, gerilim dalgalanması ise çıkış geriliminin %1'i olarak seçilmiştir:

$$\Delta I = 0.2 \times I_out = 1.5\ A \tag{3.20}$$

$$\Delta V = 0.01 \times V_{out} = 4\ V \tag{3.21}$$

Bu değerler kullanılarak filtre elemanları yaklaşık olarak:

$$L \approx 5.33\ mH \tag{3.22}$$

$$C \approx 30\ \mu F \tag{3.23}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu parametreler, PSFB dönüştürücünün temel çalışma koşullarını sağlayacak şekilde ilk tasarım değerleri olarak belirlenmiş ve benzetim modelinde kullanılmıştır.

3.4.4 Push-Pull Dönüştürücü için Sayısal Hesaplar

Push-Pull dönüştürücü için yapılan hesaplamalarda transformatör dönüş oranı n=9 olarak seçilmiştir. Bu durumda görev oranı yaklaşık olarak:

$$D = \frac{V_{out} \div n}{2V_s} = \frac{400/9}{2 \times 96} \approx 0.2315 \tag{3.24}$$

olarak hesaplanmıştır.

Push-Pull dönüştürücüde de filtre elemanlarının belirlenmesinde akım ve gerilim dalgalanmaları temel tasarım kriteri olarak alınmaktadır. Bu doğrultuda genel tasarım bağıntıları:

$$L \propto \frac{V \times D}{f_s \times \Delta I} \tag{3.25}$$

$$C \propto \frac{\Delta I}{f_s \times \Delta V} \tag{3.26}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bu çalışmada akım dalgalanması çıkış akımının %10'u, gerilim dalgalanması ise çıkış geriliminin %3'ü olarak seçilmiştir:

$$\Delta I = 0.1 \times I_{out} = 0.75\ A \tag{3.27}$$

Bu değerler kullanılarak filtre endüktansı yaklaşık:

$$L \approx 14.32\ mH \tag{3.28}$$

ve kapasitör değeri yaklaşık:

$$C \approx 1.56\ \mu F \tag{3.29}$$

olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen bu değerler ideal tasarım bağıntılarına dayalı ilk boyutlandırma sonuçları olup, benzetim modelinde sistem davranışı dikkate alınarak doğrulanmıştır.

3.4.5 Sayısal Tasarım Genel Değerlendirme

Bu çalışmada kullanılan sayısal tasarım bağıntıları, dönüştürücü parametrelerinin karşılaştırılabilir bir şekilde belirlenmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Tüm topolojiler için aynı giriş-çıkış gerilim seviyeleri ve anahtarlama frekansı

korunmuş, böylece elde edilen performans farklarının ağırlıklı olarak dönüştürücü topolojisinden kaynaklanması hedeflenmiştir.

Hesaplanan parametreler benzetim modeline uygulanmış ve sistemin dinamik davranışı üzerinden değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, ayrıntılı donanım optimizasyonundan ziyade topoloji karşılaştırmasına odaklanan bu çalışmanın amacı ile uyumludur.

3.5 Nano Şebeke Senaryoları

Bu senaryoda, fotovoltaik (PV) enerji kaynağı ve batarya entegrasyonu içeren DC tabanlı bir nano şebeke yapısı ele alınmıştır. Sistem, stand-alone çalışma koşulu altında modellenmiş olup, PV sistemden elde edilen enerji ve batarya birlikte kullanılarak yük beslemesi gerçekleştirilmiştir.

PV sistem 10 kW nominal güç seviyesinde ve 96 V DC çıkış gerilimine sahip olacak şekilde modellenmiştir. Enerji depolama sistemi olarak kullanılan batarya grubu ise 5 kWh kapasiteye sahip olup, batarya tarafında da 96 V DC gerilim seviyesi kabul edilmiştir. Yük tarafında ise tüm karşılaştırmalar için ortak bir 400 V DC bara oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, aynı nano şebeke mimarisi korunarak farklı DC-DC dönüştürücü topolojileri ayrı ayrı uygulanmış ve karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Kullanılan dönüştürücü topolojileri Boost, PSFB ve Push-Pull olarak belirlenmiştir. Böylece dönüştürücü topolojisinin sistem davranışı üzerindeki etkisinin doğrudan incelenmesi amaçlanmıştır.

Batarya sistemi, enerji sürekliliğinin sağlanması ve PV üretimindeki değişimlerin sistem üzerindeki etkilerinin azaltılması amacıyla modele dâhil edilmiştir. PV üretiminin yük talebini aştığı durumlarda fazla enerji bataryaya aktarılırken, üretimin yetersiz olduğu durumlarda batarya sistemden destek sağlamaktadır. Bu sayede DC bara geriliminin daha kararlı bir şekilde tutulması hedeflenmiştir.

Bu senaryo kapsamında elde edilen benzetim sonuçları, dönüştürücü topolojilerinin DC bara gerilim kararlılığı ve dinamik sistem tepkisi üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

3.6 Dönüştürücü Kontrol Stratejileri

Nano şebeke sistemlerinde enerji üretimi ve güç akışının etkin şekilde yönetilebilmesi için uygun kontrol stratejilerinin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada PV sistem tarafında maksimum güç noktası izleme yaklaşımı uygulanırken, sistem seviyesinde DC bara geriliminin regülasyonu gerçekleştirilmiştir.

3.6.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları için MPPT Yaklaşımı

Fotovoltaik (PV) sistemlerde maksimum güç noktası (Maximum Power Point – MPP), ışınım ve sıcaklık gibi çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle PV sistemlerin her çalışma koşulunda maksimum güçte işletilebilmesi için maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarının kullanılması gerekmektedir [20].

MPPT algoritmaları, sistem gerilimi veya görev oranı üzerinde küçük değişiklikler uygulayarak bu değişimlerin çıkış gücü üzerindeki etkisini izlemeye dayanmaktadır [20].

Bu çalışmada MPPT yöntemi olarak Perturb and Observe (P&O) algoritması tercih edilmiştir. Bu yöntemde, sistem çalışma noktası küçük adımlarla değiştirilmekte ve güçteki değişime göre bir sonraki adım yönü belirlenmektedir. Bu sayede çalışma noktası maksimum güç noktası etrafında tutulmaktadır [20], [21].

P&O algoritması, basit yapısı ve düşük hesaplama gereksinimi nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında da dönüştürücü topolojilerinin karşılaştırılmasına odaklanıldığı için, MPPT tarafında bu yöntem kullanılmıştır.

MPPT algoritması, PV sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlamak amacıyla DC-DC dönüştürücü kontrol yapısına entegre edilmiştir.

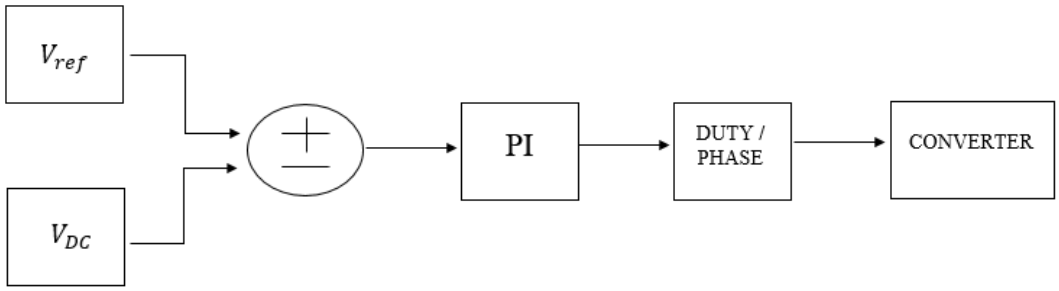
3.6.2 DC Bara Gerilimi Regülasyonu

DC nano şebekelerde ortak DC bara gerilimi, sistem kararlılığı ve güç akışı açısından kritik bir büyüklüktür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısı ve yük taleplerindeki ani değişimler, DC bara geriliminde sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle DC bara geriliminin belirlenen referans değer etrafında regüle edilmesi gerekmektedir [22].

Bu çalışmada DC bara gerilimi referans değeri 400 V olarak belirlenmiş ve gerilim regülasyonu DC-DC dönüştürücüler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla gerilim geri beslemeli kapalı çevrim bir kontrol yapısı kullanılmıştır. DC bara gerilimi ölçülerek referans değer ile karşılaştırılmış ve elde edilen hata bir PI kontrolör aracılığıyla işlenmiştir.

PI kontrolör çıkışı, kullanılan dönüştürücü topolojisine bağlı olarak uygun kontrol değişkenine dönüştürülerek sisteme uygulanmıştır. Bu kapsamda Boost ve Push-Pull dönüştürücülerde görev oranı, PSFB dönüştürücüde ise faz kaydırma oranı kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır.

Bu kontrol yaklaşımı sayesinde, farklı dönüştürücü topolojileri aynı kontrol felsefesi altında değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların yalnızca dönüştürücü yapısından kaynaklanması hedeflenmiştir. Ayrıca batarya sistemi, doğrudan gerilim regülasyonu yerine enerji dengeleme amacıyla kullanılmıştır. DC bara gerilim kontrolüne ait blok diyagram Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 DC bara gerilim kontrol blok diyagramı

3.7 Senaryolar Arası Kontrol Tutarlılığı ve Karşılaştırma Yaklaşımı

Bu tez çalışmasında ele alınan tüm nano şebeke senaryoları, ortak bir sistem mimarisi ve kontrol yaklaşımı altında modellenmiştir. Böylece elde edilen benzetim sonuçlarının, ağırlıklı olarak kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojilerinden kaynaklanan farkları yansıtması hedeflenmiştir.

Tüm senaryolarda DC bara gerilimi 400 V olarak belirlenmiş, kaynak tarafında ise 96 V DC seviyesinde çalışma kabul edilmiştir. Yük koşulları ve benzetim parametreleri senaryolar arasında tutarlı tutulmuştur. Bu sayede farklı topolojilerin performansları aynı işletme koşulları altında değerlendirilmiştir.

Kontrol yapısı açısından, PV sistem tarafında MPPT algoritması kullanılırken, sistem seviyesinde DC bara gerilimi kapalı çevrim gerilim kontrolü ile regüle edilmiştir. Kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojisine bağlı olarak kontrol değişkeni görev oranı veya faz kaydırma oranı olarak belirlenmiştir.

Batarya sistemi, doğrudan gerilim regülasyonu yerine enerji dengeleme amacıyla kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde DC bara geriliminin regülasyonu dönüştürücü kontrolü üzerinden sağlanmış ve sistem davranışı tutarlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Bu çalışmada tüm senaryolarda aynı kontrol hedeflerinin ve çalışma koşullarının korunması, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırmakta ve dönüştürücü topolojilerinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin daha net bir şekilde ortaya konulmasını sağlamaktadır.

4
BENZETİM BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Benzetim Ortamı ve Sistem Yapısı

Bu bölümde, PV tabanlı stand-alone DC nano şebeke sistemine ait benzetim modeli, sistem mimarisi ve tüm senaryolarda kullanılan ortak test koşulları sunulmuştur. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin aynı işletim koşulları altında karşılaştırılabilir olması hedeflenmiştir.

4.1.1 Sistem Mimarisi

Çalışma kapsamında ele alınan DC nano şebeke yapısı, fotovoltaik (PV) enerji kaynağı, iki kademeli güç dönüştürme yapısı, enerji depolama sistemi ve DC yükten oluşmaktadır. PV enerji kaynağı, 2 seri ve 25 paralel bağlı PV modüllerinden oluşturulmuş olup, düşük gerilim seviyesinde enerji üretmektedir.

PV dizisinden elde edilen gerilim, ilk kademede maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması ile kontrol edilen izolesiz bir boost dönüştürücü aracılığıyla 96 V DC seviyesine yükseltilmiştir. Bu kademede, PV kaynağından maksimum güç çekilmesi sağlanmıştır.

İkinci kademede ise 96 V DC seviyesindeki gerilim, farklı DC-DC dönüştürücü topolojileri kullanılarak 400 V DC bara seviyesine yükseltilmiştir. Bu çalışmada karşılaştırmalı analiz kapsamında üç farklı topoloji incelenmiştir:

- İzolesiz Boost dönüştürücü
- Push-Pull dönüştürücü
- Faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücü

Sistem içerisinde ayrıca 96 V nominal gerilim seviyesine ve 5 kWh kapasiteye sahip bir batarya sistemi yer almaktadır. Batarya, çift yönlü DC-DC dönüştürücü

aracılığıyla DC baraya bağlanmış olup, ayrıntılı bir enerji yönetim stratejisi kapsamında değil, kısa süreli güç dengesizliğini sönümleyen bir enerji tamponu olarak modellenmiştir.

DC bara çıkışına yaklaşık 3 kW güce karşılık gelen 55 Ω direnç yük bağlanmıştır. Bu çalışmada inverter yapısı modele dahil edilmemiş olup, analizler doğrudan DC bara gerilimi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Ortak Sistem Parametreleri

Benzetim çalışmalarında kullanılan ortak sistem parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu parametreler tüm dönüştürücü topolojileri için sabit tutulmuş ve böylece karşılaştırmaların aynı koşullar altında yapılması sağlanmıştır.

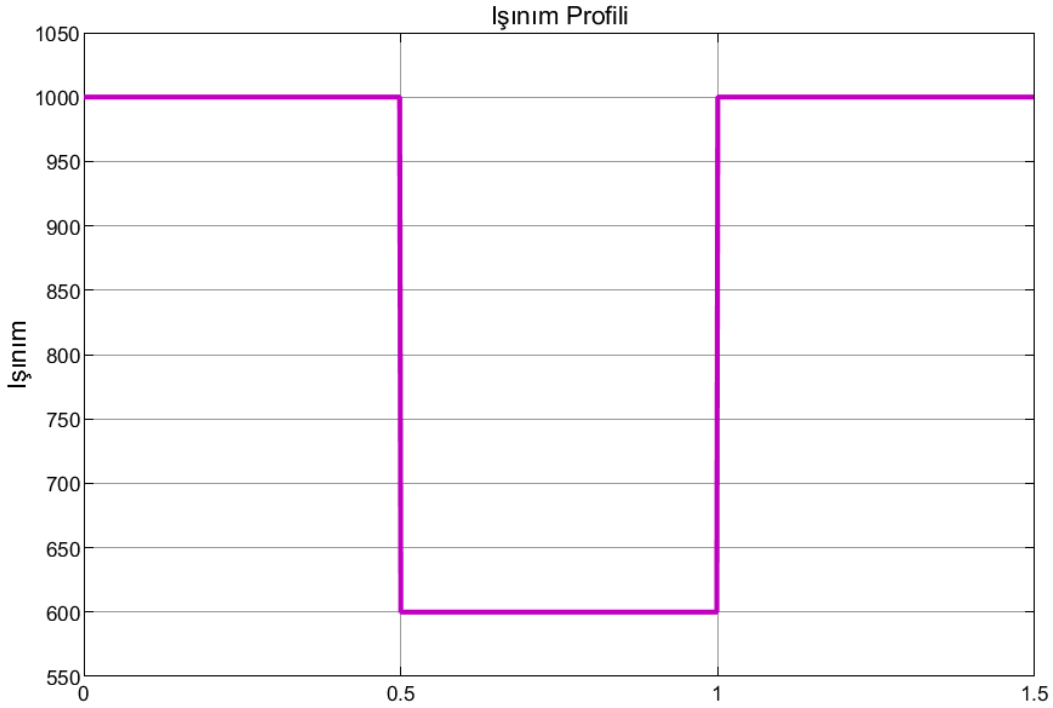
Tablo 4.1 Ortak sistem parametreleri

Parametre	Değer
PV dizi yapısı	2 seri – 25 paralel
PV nominal güç	10 kW
MPPT çıkış gerilimi	96 V DC
DC bara hedef gerilimi	400 V DC
Batarya gerilimi	96 V DC
Batarya kapasitesi	5 kWh
Yük direnci	55 Ω
Anahtarlama frekansı	5 kHz
Simülasyon süresi	1.5 s
Simülasyon tipi	Powergui discrete

Tablo 4.1 incelendiğinde, tüm dönüştürücü topolojileri için aynı çalışma koşullarının sağlandığı görülmektedir.

4.1.2 Test Senaryosu ve Işınım Profili

Benzetimlerde sistemin dinamik davranışının incelenebilmesi amacıyla PV kaynağına değişken ışınım profili uygulanmıştır. Işınım değişimi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş olup, hem üretim düşüşü hem de toparlanma durumu analiz edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan ışınım değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Benzetimde kullanılan ışınım profili

Bu kapsamda ışınım profili aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- 0 – 0.5 s aralığında: 1000 W/m²
- 0.5 – 1.0 s aralığında: 600 W/m²
- 1.0 – 1.5 s aralığında: 1000 W/m²

t = 0.5 s anında ışınım değerinin 1000 W/m²'den 600 W/m²'ye düşürülmesi ile sistemde ani bir güç azalması oluşturulmuş, t = 1.0 s anında ise ışınımın tekrar 1000 W/m² seviyesine yükseltilmesi ile sistemin toparlanma davranışı gözlemlenmiştir.

Bu test senaryosu, stand-alone işletim koşullarında DC nano şebeke sisteminin hem gerilim kararlılığı hem de dinamik tepki performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

4.2 Performans Değerlendirme Kriterleri

Bu çalışmada farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin performansı, stand-alone DC nano şebeke işletiminde sistem güvenilirliğini doğrudan temsil eden temel göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir. Performans analizi, DC bara gerilim kararlılığı, dinamik tepki ve batarya destek ihtiyacını ifade eden dört ana parametreye dayandırılmıştır.

Stand-alone DC nano şebekelerde en kritik performans kriteri, DC bara geriliminin hedef değer çevresinde kararlı bir şekilde tutulabilmesidir. Bu nedenle, değerlendirme kriterleri doğrudan DC bara gerilim davranışı ile ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışmada DC bara için kabul edilebilir çalışma bandı ±%2 olarak tanımlanmış olup, bu değer 400 V nominal gerilim için 392–408 V aralığına karşılık gelmektedir.

4.2.1 DC Bara Minimum Gerilimi (Vdc, min)

DC bara minimum gerilimi, ışınım değişimi sırasında DC bara geriliminin ulaştığı en düşük değeri ifade etmektedir.

Bu parametre, sistemin ani üretim kayıpları karşısında ne ölçüde gerilim çökmesi yaşadığını gösterdiğinden, stand-alone işletimde sistem kararlılığının en kritik göstergelerinden biridir. Düşük $V_{DC,min}$ değerleri, sistemin yükü besleme kabiliyetinin zayıfladığını ve gerilim kararlılığının bozulduğunu göstermektedir.

4.2.2 Maksimum Gerilim Sapması ($\Delta V_{DC,max}$)

Maksimum gerilim sapması, DC bara geriliminin nominal değer olan 400 V'tan gösterdiği en büyük mutlak sapmayı ifade etmektedir.

Bu parametre, dönüştürücü topolojisinin gerilim regülasyon performansını temsil etmektedir. Daha düşük sapma değerleri, DC bara geriliminin hedef değere daha yakın tutulabildiğini ve sistemin daha kararlı çalıştığını göstermektedir.

4.2.3 Toparlanma Süresi (t_{rec})

Toparlanma süresi, ışınım düşüşü sonrasında DC bara geriliminin tekrar ±%2 gerilim bandı içerisine dönmesi için geçen süreyi ifade etmektedir.

Bu parametre, sistemin geçici rejim davranışını ve dinamik performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Daha kısa toparlanma süreleri, sistemin değişen çalışma koşullarına daha hızlı ve etkin bir şekilde uyum sağlayabildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada toparlanma süresi yalnızca ışınımın 1000 W/m²'den 600 W/m²'ye düştüğü ilk geçici rejim için değerlendirilmiştir.

4.2.4 Batarya Maksimum Güç Desteği ($P_{bat,max}$)

Batarya maksimum güç desteği, geçici rejim sırasında bataryanın sisteme sağladığı en yüksek güç değerini ifade etmektedir.

Bu parametre, incelenen dönüştürücü topolojisinin batarya sistemine olan bağımlılığını göstermektedir. Yüksek batarya güç değerleri, ilgili topolojinin DC bara gerilimini koruyabilmek için daha fazla enerji desteğine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Dolayısıyla, daha düşük batarya güç gereksinimi, sistemin daha etkin bir şekilde regüle edildiğini ve batarya üzerindeki yükün daha az olduğunu ifade etmektedir.

4.3 PV Tabanlı Nano Şebekede Dönüştürücü Topolojilerinin Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, PV tabanlı stand-alone DC nano şebeke yapısında farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin sistem performansı üzerindeki etkileri benzetim sonuçları üzerinden incelenmiştir. Karşılaştırma kapsamında izolesiz Boost, Push-Pull ve faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücü topolojileri ele alınmış ve tüm topolojiler aynı sistem parametreleri ve test koşulları altında değerlendirilmiştir.

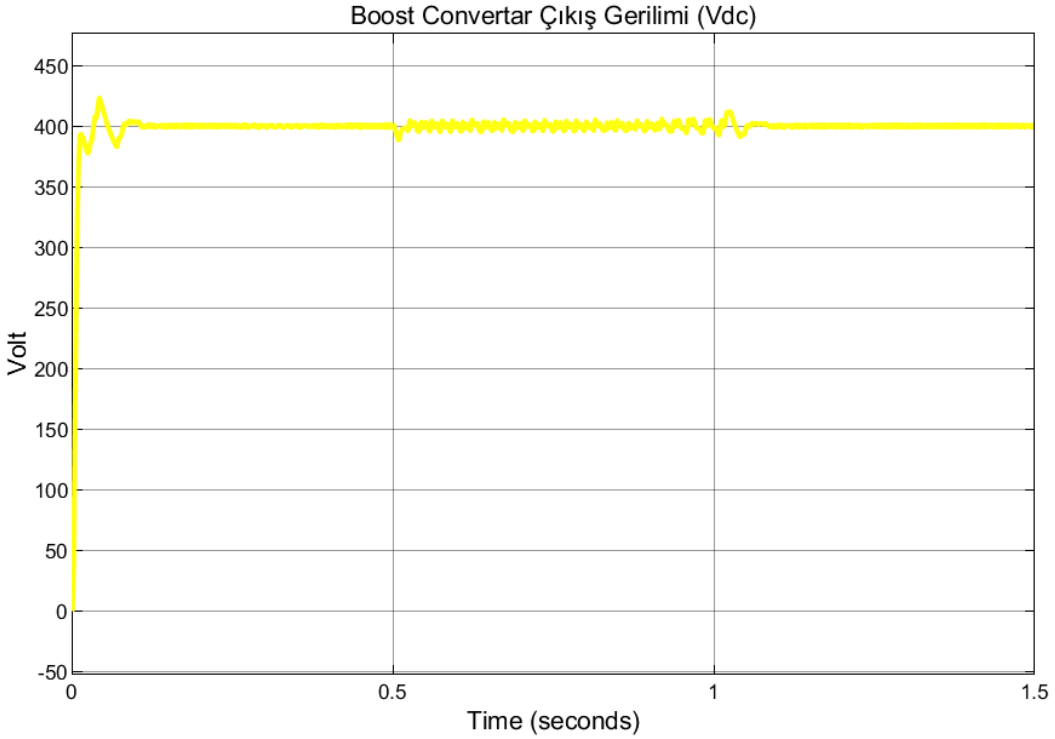
Analizler, DC bara gerilimi kararlılığı, dinamik tepki ve batarya güç desteği olmak üzere üç temel başlık altında gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 DC Bara Gerilimi Kararlılığı Analizi

DC bara gerilimi, stand-alone DC nano şebekelerde sistem kararlılığını doğrudan belirleyen en kritik parametredir. Bu nedenle, farklı dönüştürücü topolojilerinin gerilim regülasyon performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Boost dönüştürücü kullanılan yapıda, sistem nominal koşullarda yaklaşık 400 V seviyesinde çalışmaktadır. Ancak ışınımın t = 0.5 s anında düşmesiyle birlikte DC bara geriliminde ani bir düşüş meydana gelmiş ve gerilim yaklaşık 389 V seviyesine kadar gerilemiştir. Bu durum, sistemin ±%2 gerilim bandı dışına çıktığını göstermektedir. Her ne kadar sistem kısa süre içerisinde toparlanarak tekrar kabul edilebilir gerilim aralığına dönse de, ışınımın düşük olduğu süre boyunca DC bara geriliminde belirgin dalgalanmaların devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum,

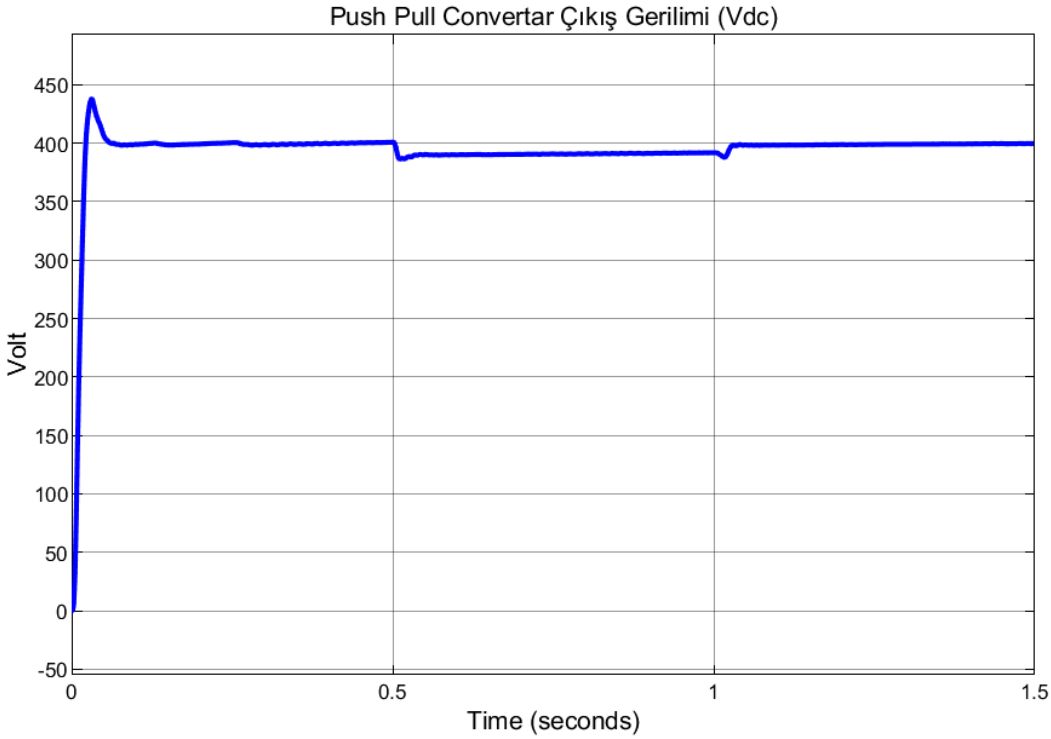
Boost dönüştürücünün gerilim regülasyon kabiliyetinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Boost dönüştürücüye ait DC bara gerilim değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Boost dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi

Şekil 4.2'te görüldüğü üzere, ışınım düşüşü sırasında DC bara gerilimi yaklaşık 389 V seviyesine kadar düşmektedir ve ±%2 bandı dışına çıkmaktadır.

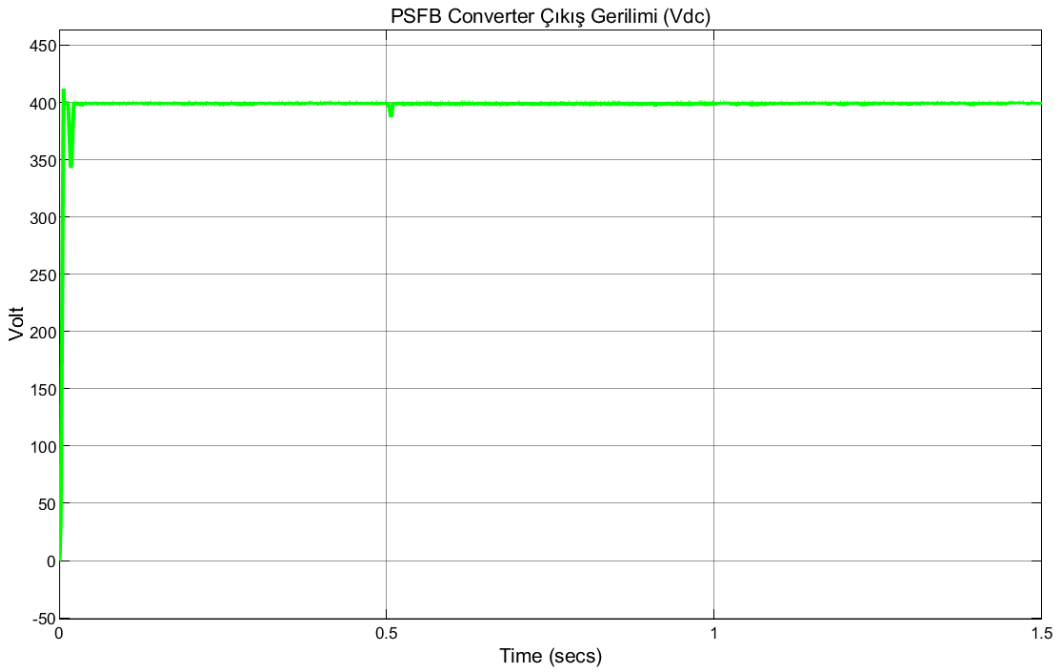
Push-Pull dönüştürücü kullanılan yapıda ise gerilim düşüşü daha belirgin gerçekleşmiş ve DC bara gerilimi yaklaşık 386 V seviyesine kadar gerilemiştir. Bu değer, incelenen topolojiler arasında en yüksek gerilim sapmasına karşılık gelmektedir. Ayrıca sistemin toparlanma süresinin daha uzun olduğu ve geçici rejim sonrasında gerilimin yaklaşık 390 V seviyesinde kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, Push-Pull dönüştürücünün nominal gerilim seviyesine tam olarak ulaşamadığını ve regülasyon performansının sınırlı olduğunu göstermektedir. Push-Pull dönüştürücüye ait gerilim değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Push-Pull dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi

Bu yapıda gerilim yaklaşık 386 V seviyesine kadar düşmekte olup en yüksek sapma gözlemlenmektedir.

PSFB dönüştürücü kullanılan yapıda ise gerilim düşüşü yaklaşık 387 V seviyesine kadar gerçekleşmiştir. Bu değer diğer topolojilerle benzer büyüklükte olmakla birlikte, sistemin daha hızlı toparlandığı ve toparlanma sonrasında DC bara geriliminin kararlı bir şekilde 400 V seviyesine yakın tutulabildiği gözlemlenmiştir. Gerilim dalgalanmalarının sınırlı olması, PSFB dönüştürücünün etkin bir regülasyon performansı sunduğunu göstermektedir. PSFB dönüştürücüye ait DC bara gerilim değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 PSFB dönüştürücü için DC bara gerilim değişimi

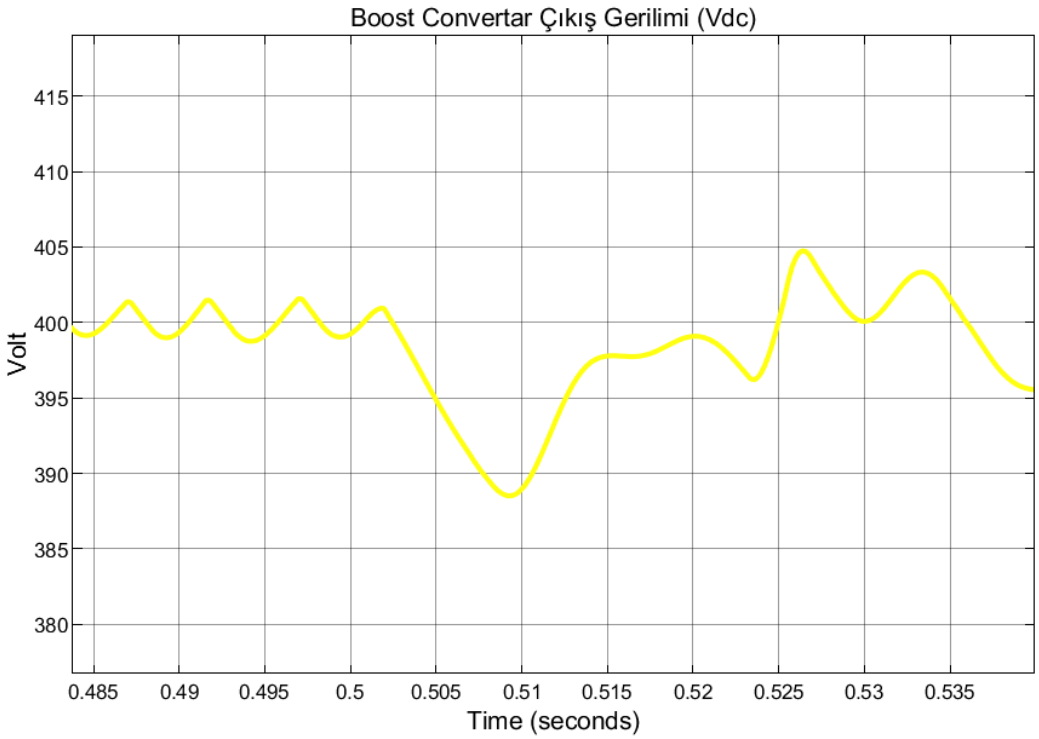
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, sistem daha hızlı toparlanmakta ve gerilim kararlılığı daha iyi sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, DC bara gerilimi kararlılığı açısından PSFB dönüştürücü en iyi performansı sergilerken, Push-Pull dönüştürücü en zayıf performansı göstermiştir. Boost dönüştürücü ise bu iki topoloji arasında yer almaktadır.

4.3.2 Dinamik Tepki Analizi

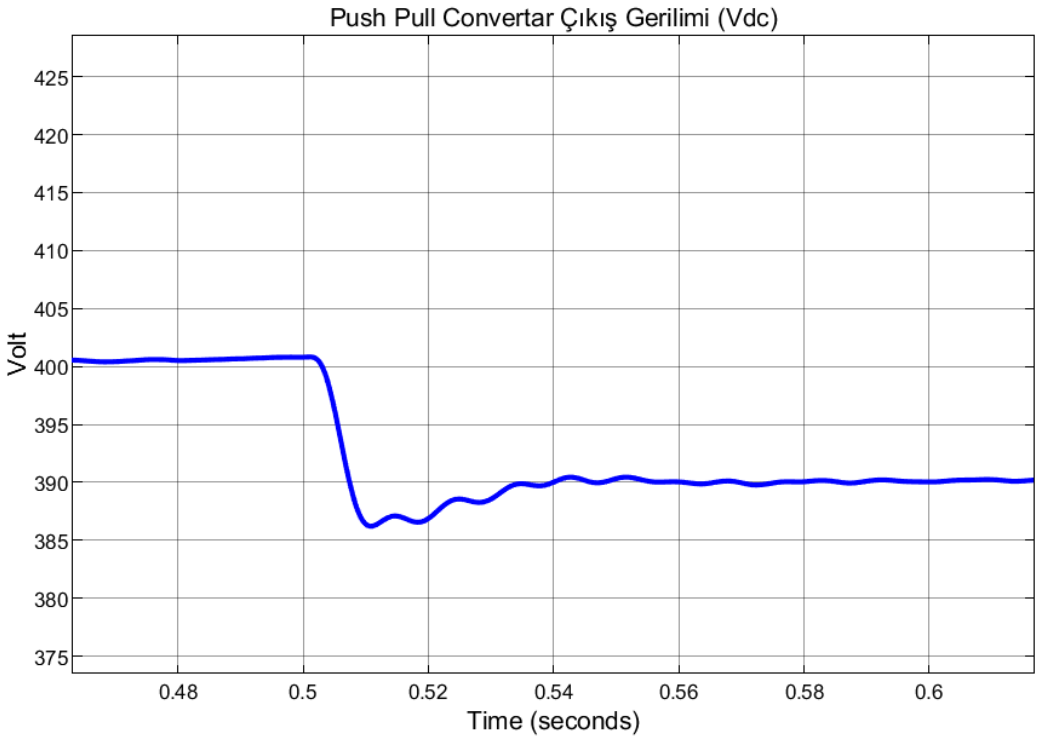
Dinamik tepki analizi kapsamında, ışınım değişimleri karşısında sistemin geçici rejim davranışı ve toparlanma süresi incelenmiştir. Bu analiz, sistemin değişen çalışma koşullarına ne kadar hızlı uyum sağlayabildiğini değerlendirmek açısından önemlidir.

Boost dönüştürücü kullanılan yapıda, ışınım düşüşü sonrasında sistemin toparlanma süresi yaklaşık 40 ms olarak belirlenmiştir. Bu değer, sistemin belirli bir dinamik tepki kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak toparlanma sonrasında gerilim dalgalanmalarının devam etmesi, sistemin tam anlamıyla kararlı bir çalışma noktasına ulaşamadığını göstermektedir. Boost dönüştürücüye ait dinamik tepki değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir.



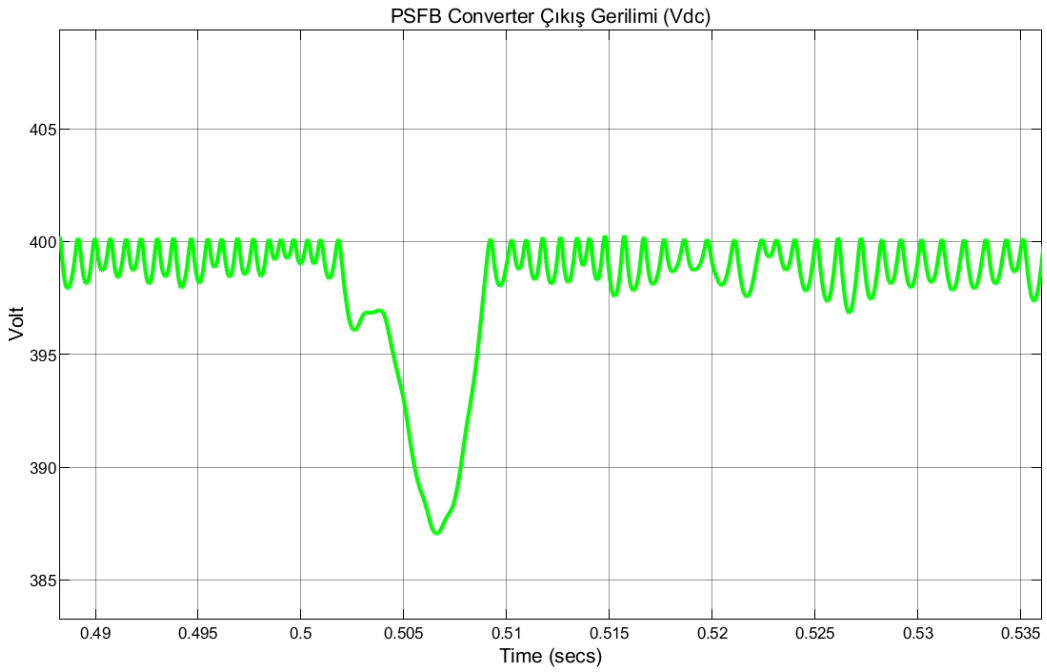
Şekil 4.5 Boost dönüştürücü dinamik tepki

Push-Pull dönüştürücü kullanılan yapıda ise toparlanma süresi yaklaşık 90 ms olarak ölçülmüş olup, bu değer incelenen topolojiler arasında en yüksek değere karşılık gelmektedir. Bu durum, Push-Pull dönüştürücünün geçici rejim koşullarında daha yavaş bir tepki verdiğini göstermektedir. Ayrıca sistemin toparlanma sonrasında nominal gerilim seviyesine ulaşamaması, dinamik performansının sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Push pull dönüştürücüye ait dinamik tepki değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Push pull dönüştürücü dinamik tepki

PSFB dönüştürücü kullanılan yapıda ise toparlanma süresi yaklaşık 34 ms olarak belirlenmiştir. Bu değer, incelenen topolojiler arasında en düşük toparlanma süresine karşılık gelmektedir. Ayrıca sistemin toparlanma sonrasında hızlı bir şekilde kararlı hale gelmesi, PSFB dönüştürücünün geçici rejim koşullarında üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. PSFB dönüştürücüye ait dinamik tepki değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 PSFB dönüştürücü dinamik tepki

Toparlanma süreleri incelendiğinde:

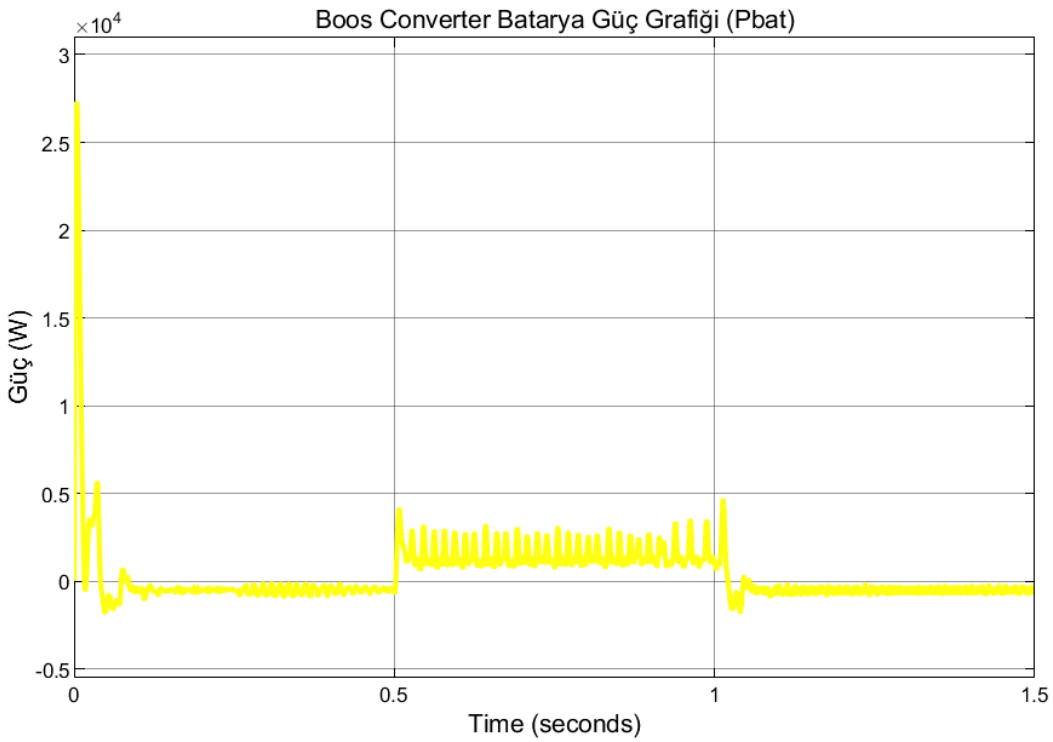
- Boost → ~40 ms
- Push-Pull → ~90 ms
- PSFB → ~34 ms

PSFB dönüştürücünün hem hızlı dinamik tepki hem de kararlı çalışma davranışı açısından diğer topolojilere göre daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.3.3 Batarya Güç Desteği Analizi

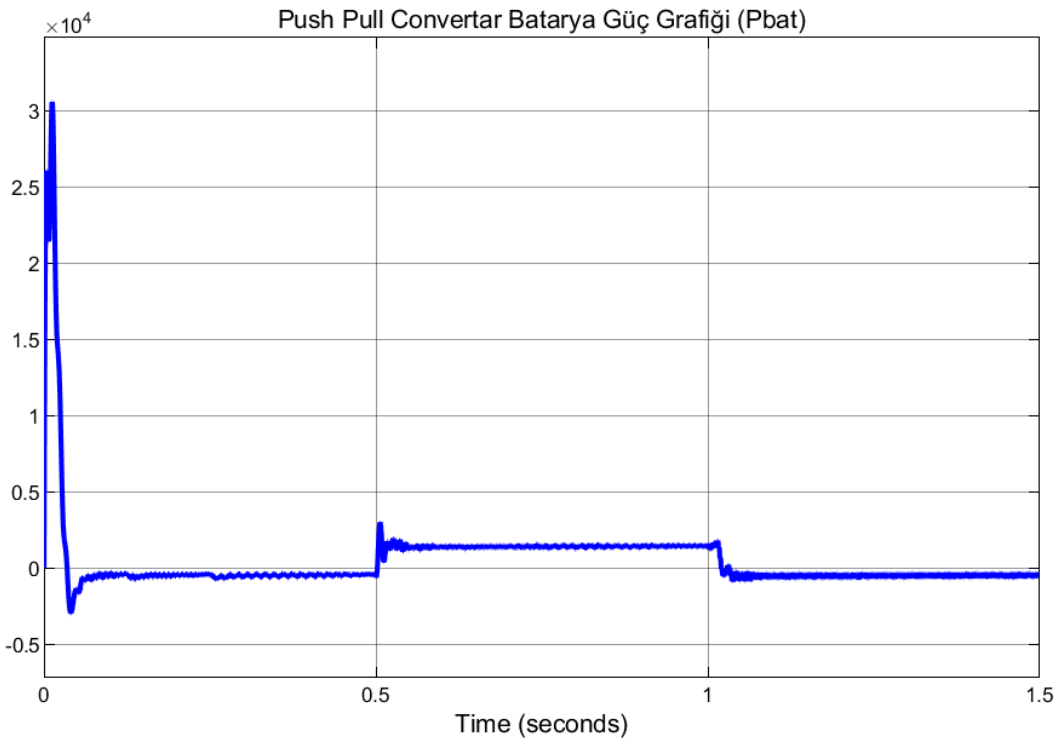
Batarya güç desteği analizi, sistemin geçici rejimlerde bataryaya ne ölçüde ihtiyaç duyduğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, dönüştürücü topolojilerinin enerji yönetimi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Boost dönüştürücü kullanılan yapıda, ışınım düşüşü sonrasında batarya gücünün yaklaşık 4 kW seviyesine kadar yükseldiği ve ışınımın düşük olduğu süre boyunca bataryanın sürekli olarak sisteme güç sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca batarya güç profilinde belirgin dalgalanmaların oluşması, sistemin kararlılığının büyük ölçüde batarya üzerinden sağlandığını göstermektedir. Boost dönüştürücü batarya güç değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



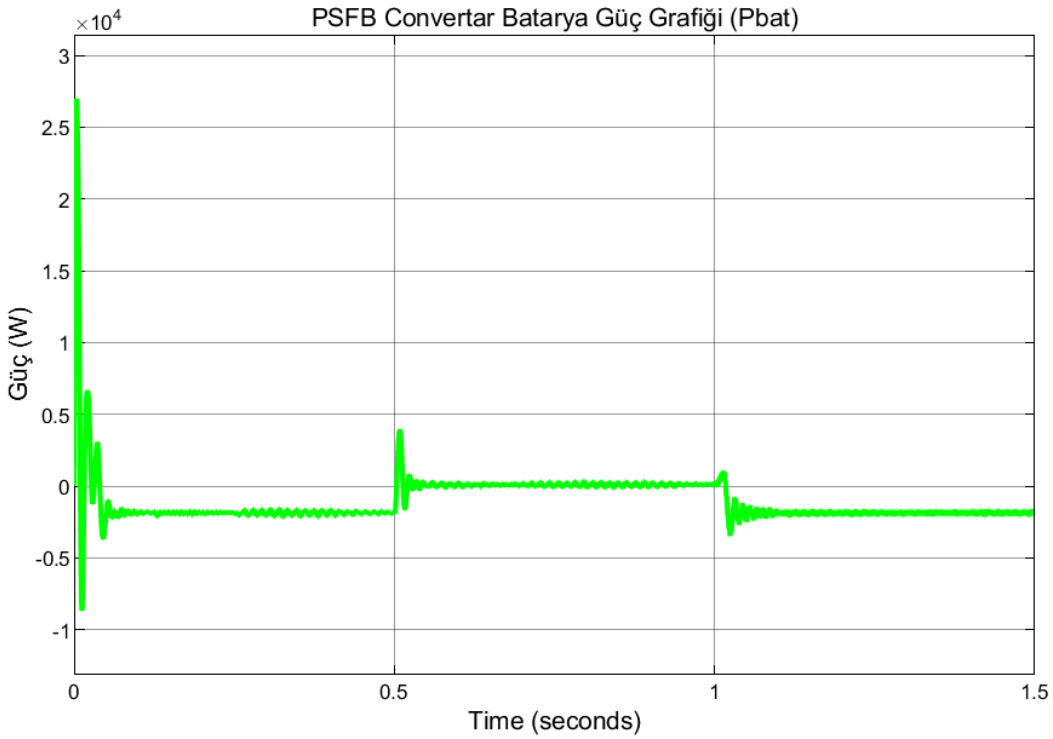
Şekil 4.8 Boost dönüştürücü batarya güç değişimi

Push-Pull dönüştürücü kullanılan yapıda ise batarya gücünün yaklaşık 3 kW seviyesine ulaştığı ve ışınımın düşük olduğu süreçte bataryanın sürekli olarak 1–1.5 kW seviyelerinde güç sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, sistemin Boost topolojisine kıyasla daha az ancak yine de önemli ölçüde batarya desteğine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Ayrıca batarya güç profilinde dalgalanmaların devam etmesi, sistem kararlılığının tam olarak sağlanamadığını ortaya koymaktadır. Push pull dönüştürücü batarya güç değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Push pull dönüştürücü batarya güç değişimi

PSFB dönüştürücü kullanılan yapıda ise batarya gücünün kısa süreli olarak 3.5–4 kW seviyesine ulaştığı, ancak bu durumun yalnızca geçici rejimle sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Işınımın düşük olduğu süreçte batarya gücünün düşük seviyelerde kaldığı ve dalgalanmaların sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu durum, PSFB dönüştürücünün DC bara gerilimini büyük ölçüde kendi kontrol mekanizması ile regüle edebildiğini ve batarya üzerindeki yükü minimize ettiğini göstermektedir. PSFB dönüştürücü batarya güç değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 PSFB dönüştürücü batarya güç değişimi

Sonuç olarak, batarya güç desteği açısından PSFB dönüştürücü en düşük sürekli batarya kullanımını sağlarken, Boost dönüştürücü en yüksek batarya bağımlılığına sahip topoloji olarak öne çıkmaktadır. Push-Pull dönüştürücü ise bu iki topoloji arasında yer almaktadır.

4.3.4 Genel Değerlendirme

Elde edilen benzetim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, DC-DC dönüştürücü topolojisinin stand-alone DC nano şebeke performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir.

Boost dönüştürücü, basit yapısına rağmen DC bara gerilimini kararlı bir şekilde regüle edememekte ve sistemin büyük ölçüde batarya desteğine bağımlı çalışmasına neden olmaktadır. Push-Pull dönüştürücü ise Boost topolojisine kıyasla daha iyi bir performans sunmakla birlikte, hem gerilim sapması hem de toparlanma süresi açısından sınırlı bir performans sergilemektedir.

PSFB dönüştürücü ise daha hızlı toparlanma süresi, daha kararlı DC bara gerilim profili ve daha düşük sürekli batarya güç gereksinimi ile diğer topolojilere kıyasla üstün bir performans göstermektedir. Bu nedenle, stand-alone DC nano şebeke uygulamaları için en uygun topolojinin PSFB olduğu değerlendirilmektedir.

Elde edilen benzetim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, DC-DC dönüştürücü topolojisinin stand-alone DC nano şebeke performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir.

Boost dönüştürücü, basit yapısına rağmen DC bara gerilimini kararlı bir şekilde regüle edememekte ve sistemin büyük ölçüde batarya desteğine bağımlı çalışmasına neden olmaktadır. Push-Pull dönüştürücü ise Boost topolojisine kıyasla daha iyi bir performans sunmakla birlikte, hem gerilim sapması hem de toparlanma süresi açısından sınırlı bir performans sergilemektedir.

PSFB dönüştürücü ise daha hızlı toparlanma süresi, daha kararlı DC bara gerilim profili ve daha düşük sürekli batarya güç gereksinimi ile diğer topolojilere kıyasla üstün bir performans göstermektedir. Bu nedenle, stand-alone DC nano şebeke uygulamaları için en uygun topolojinin PSFB olduğu değerlendirilmektedir.

4.4 DC-DC Dönüştürücü Topolojilerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, önceki alt bölümlerde elde edilen benzetim sonuçları bir araya getirilerek incelenen DC-DC dönüştürücü topolojilerinin performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme, DC bara gerilim kararlılığı, dinamik tepki ve batarya güç desteği kriterleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4.4.1 Topolojilerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Gerilim kararlılığı açısından değerlendirildiğinde, Push-Pull dönüştürücü en yüksek gerilim sapmasına sahip olup en zayıf performansı göstermektedir. Boost ve PSFB dönüştürücülerde gerilim sapması benzer seviyelerde gerçekleşmiş olmakla birlikte, PSFB dönüştürücünün toparlanma sonrası daha kararlı bir gerilim profili sunduğu gözlemlenmiştir.

Dinamik tepki açısından incelendiğinde, PSFB dönüştürücü yaklaşık 34 ms ile en kısa toparlanma süresine sahip topoloji olarak öne çıkmaktadır. Boost dönüştürücü yaklaşık 40 ms toparlanma süresi ile orta seviyede bir performans sergilerken, Push-Pull dönüştürücü yaklaşık 90 ms ile en yavaş tepkiyi veren topoloji olmuştur.

Batarya güç desteği açısından değerlendirildiğinde ise, Boost dönüştürücünün ışınım düşüşü sırasında yüksek seviyede ve sürekli batarya desteğine ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Push-Pull dönüştürücü, Boost topolojisine kıyasla daha

düşük ancak yine de sürekli bir batarya kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Buna karşılık PSFB dönüştürücü, yalnızca geçici rejim sırasında bataryayı yüksek güçte kullanmakta, sistem kararlılığı sağlandıktan sonra batarya üzerindeki yükü önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PSFB dönüştürücünün diğer topolojilere kıyasla daha dengeli ve etkin bir performans sunduğu açıkça görülmektedir. Özellikle kısa toparlanma süresi ve düşük sürekli batarya güç gereksinimi, bu topolojinin stand-alone DC nano şebeke uygulamaları için daha uygun olduğunu göstermektedir.

Boost dönüştürücü, basit yapısına rağmen sistem kararlılığını sağlamak için yüksek oranda batarya desteğine ihtiyaç duymakta ve bu durum enerji yönetimi açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Push-Pull dönüştürücü ise belirli bir iyileşme sağlamakla birlikte, hem gerilim sapması hem de dinamik tepki açısından PSFB topolojisinin gerisinde kalmaktadır.

Tablo 4.2 Dönüştürücülerin dinamik performans karşılaştırması

Topoloji	$V_{DC,min}$ (V)	$\Delta V_{DC,max}$ (V)	t_{rec} (ms)	$P_{bat,max}$ (kW)	Genel Değerlendirme
Boost	~389	11	~40	~4	Zayıf
Push-Pull	~386	14	~90	~3	Orta
PSFB	~387	13	~34	~3.5–4	İyi

Tablo 4.2 incelendiğinde, PSFB'nin en dengeli performansı sunduğu görülmektedir.

4.4.2 Dönüştürücü Topolojilerinin Göreli Maliyet ve Karmaşıklık Değerlendirmesi

Bu çalışmada incelenen DC-DC dönüştürücü topolojilerinin maliyet değerlendirmesi, doğrudan sayısal fiyatlandırma yapılmaksızın; anahtar sayısı, manyetik eleman gereksinimi ve kontrol karmaşıklığı gibi tasarımsal kriterler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

İzolesiz Boost dönüştürücü, basit devre yapısı ve düşük bileşen sayısı sayesinde göreli olarak düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Buna karşılık izoleli dönüştürücülerde yüksek frekanslı transformatör ve sürücü devrelerinin kullanılması, donanım karmaşıklığını ve maliyeti artırmaktadır.

Push-Pull dönüştürücü, daha az anahtar sayısına sahip olmasına rağmen transformatör tasarımında dengeleme gereksinimleri nedeniyle orta seviyede bir karmaşıklık ve maliyet sunmaktadır. PSFB dönüştürücü ise daha fazla anahtar sayısı ve karmaşık sürücü yapısı nedeniyle yüksek performans avantajına karşılık daha yüksek bir maliyet eğilimi göstermektedir.

Genel olarak, izolesiz topolojiler düşük maliyet avantajı sağlarken, izoleli topolojiler daha yüksek performans karşılığında artan donanım ve kontrol karmaşıklığına sahiptir. Bu durum, DC nano şebeke tasarımında topoloji seçiminin yalnızca performans açısından değil, maliyet ve uygulanabilirlik kriterleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 4.3 Dönüştürücü topolojilerinin göreli karşılaştırması

Kriter	Boost	Push-Pull	PSFB
Anahtar sayısı	1	2	4
Manyetik yapı	Endüktör	HF trafo	HF trafo + L
Donanım karmaşıklığı	Düşük	Orta	Yüksek
Kontrol zorluğu	Düşük	Orta	Orta–Yüksek
Sürücü karmaşıklığı	Basit	Orta	Karmaşık
Genel maliyet eğilimi	Düşük	Orta	Yüksek

4.5 Çok Kriterli Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde, incelenen DC-DC dönüştürücü topolojilerinin performansı çok kriterli bir değerlendirme yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Amaç, farklı performans kriterlerinin birlikte değerlendirilerek stand-alone DC nano şebeke uygulamaları için en uygun topolojinin belirlenmesidir.

Bu kapsamda değerlendirme, DC nano şebeke performansını doğrudan etkileyen dört temel kriter üzerinden gerçekleştirilmiştir:

- DC bara gerilim kararlılığı
- Dinamik tepki performansı
- Batarya güç gereksinimi
- Sistem karmaşıklığı

Stand-alone işletim koşullarında en kritik performans göstergesinin DC bara gerilim kararlılığı olması nedeniyle, bu kriter diğerlerine kıyasla daha yüksek

ağırlıkla değerlendirilmiştir. Dinamik tepki, sistemin değişken çalışma koşullarına uyum kabiliyetini temsil ederken, batarya güç gereksinimi enerji depolama sisteminin kullanım etkinliğini göstermektedir. Sistem karmaşıklığı ise pratik uygulanabilirlik ve maliyet açısından değerlendirilmiştir.

4.5.1 Ağırlıklandırma

Dönüştürücü topolojilerinin performanslarının bütüncül olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ağırlıklı karar matrisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde farklı performans kriterleri belirli ağırlıklar ile değerlendirilmiş ve her topoloji için toplam performans skoru elde edilmiştir. Performans kriterlerine atanan ağırlık değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Performans kriterleri ve ağırlıkları

Kriter	Açıklama	Ağırlık
DC Bara Gerilim Kararlılığı	Gerilim sapmasının düşük olması	0.40
Dinamik Tepki	Toparlanma süresi	0.30
Batarya Kullanımı	Batarya güç ihtiyacı	0.20
Maliyet & Karmaşıklık	Donanım ve kontrol zorluğu	0.10

Bu ağırlıklar, stand-alone DC nano şebekelerde gerilim kararlılığının birincil öneme sahip olması dikkate alınarak belirlenmiştir.

4.5.2 Topolojilerin Puanlandırılması

Her bir dönüştürücü topolojisi, belirlenen kriterler açısından 1 ile 5 arasında puanlandırılmıştır. Bu puanlandırmada 5 en iyi performansı, 1 ise en düşük performansı temsil etmektedir.

Tablo 4.5 Topolojilerin kriter bazlı puanları

Topoloji	Gerilim Kararlılığı	Dinamik Tepki	Batarya Kullanımı	Maliyet
Boost	2	2	2	5
Push-Pull	3	2	3	3
PSFB	5	5	4	2

4.5.3 Ağırlıklı Toplam Puanlar

Her bir topoloji için ağırlıklı toplam puanlar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6 Ağırlıklı performans değerlendirmesi

Topoloji	Toplam Puan
Boost	2.7
Push-Pull	2.8
PSFB	4.5

4.5.4 Genel Değerlendirme

Dönüştürücü topolojilerinin performanslarının bütüncül olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ağırlıklı karar matrisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, sistem performansını etkileyen temel kriterler belirlenmiş ve her bir kritere önem derecesine göre ağırlık atanmıştır.

Tablo 4.5 incelendiğinde, PSFB dönüştürücünün en yüksek toplam skoru elde ettiği görülmektedir. Bu durum, PSFB topolojisinin DC bara gerilim kararlılığı ve dinamik tepki açısından sağladığı üstün performansın, artan maliyet ve karmaşıklık dezavantajına rağmen genel sistem performansına daha yüksek katkı sağladığını göstermektedir.

Push-Pull dönüştürücü orta seviyede bir performans sergilerken, Boost dönüştürücünün düşük maliyet avantajına rağmen sistem kararlılığı ve dinamik performans açısından daha düşük bir skor elde ettiği görülmektedir.

Bu değerlendirme, DC nano şebeke tasarımında topoloji seçiminin yalnızca tek bir kritere göre değil, çoklu performans kriterlerinin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.6 Bölüm Sonucu

Bu bölümde, PV tabanlı stand-alone DC nano şebeke yapısında farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin sistem performansı üzerindeki etkileri benzetim sonuçları üzerinden incelenmiştir. Boost, Push-Pull ve PSFB dönüştürücü topolojileri; DC bara gerilim kararlılığı, dinamik tepki ve batarya güç gereksinimi kriterleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, dönüştürücü topolojisinin stand-alone DC nano şebeke performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Boost dönüştürücü, basit yapısına rağmen DC bara gerilimini kararlı bir şekilde regüle

edememekte ve sistemin yüksek oranda batarya desteğine bağımlı çalışmasına neden olmaktadır. Push-Pull dönüştürücü ise Boost topolojisine kıyasla daha iyi bir performans sunmakla birlikte, hem gerilim sapması hem de toparlanma süresi açısından sınırlı bir performans sergilemektedir.

PSFB dönüştürücü ise daha kısa toparlanma süresi, daha kararlı DC bara gerilim profili ve daha düşük sürekli batarya güç gereksinimi ile diğer topolojilere kıyasla üstün bir performans göstermektedir. Özellikle geçici rejim sonrasında sistemin hızlı bir şekilde kararlı çalışma noktasına ulaşması ve batarya üzerindeki yükün azalması, bu topolojinin stand-alone nano şebeke uygulamaları için önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çok kriterli performans değerlendirmesi sonuçları da PSFB dönüştürücünün en yüksek toplam puana sahip olduğunu göstermiş ve bu bulguyu desteklemiştir. Bu doğrultuda, incelenen sistem yapısı ve işletim koşulları altında PSFB dönüştürücünün en uygun topoloji olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5
SONUÇ

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, stand-alone işletim koşulları altında PV tabanlı ve batarya destekli DC nano şebeke yapısında farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri benzetim ortamında incelenmiştir. Çalışma kapsamında Boost, Push-Pull ve PSFB dönüştürücü topolojileri aynı çalışma koşulları altında karşılaştırılmış ve performans değerlendirmesi DC bara gerilimi kararlılığı, dinamik tepki ve batarya güç desteği kriterleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, ışınım değişimleri altında DC bara gerilimi davranışının kullanılan dönüştürücü topolojisine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Boost ve Push-Pull dönüştürücülerde ışınım düşüşü sırasında gerilim sapmalarının daha belirgin olduğu ve sistemin toparlanma süresinin uzadığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık PSFB dönüştürücüde DC bara geriliminin hedef değer çevresinde daha kararlı tutulduğu ve sistemin daha hızlı toparlanma gösterdiği belirlenmiştir.

Batarya sisteminin, tüm senaryolarda güç dengesizliğini dengeleyen bir enerji tamponu olarak görev yaptığı görülmüştür. Ancak batarya kullanım miktarının dönüştürücü topolojisine bağlı olarak değiştiği ve PSFB topolojisinde sistemin daha düşük batarya desteği ile kararlı çalışabildiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, DC nano şebeke tasarımında dönüştürücü topolojisi seçiminin yalnızca gerilim dönüşümü açısından değil; aynı zamanda sistem kararlılığı, dinamik performans ve batarya kullanım profili açısından da kritik olduğu ortaya konmuştur. Bu bulgular, PV ve batarya tabanlı DC nano şebeke sistemlerinde

uygun topoloji seçiminin sistem performansını doğrudan etkilediğini göstermektedir.

5.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Enerji yönetimi ve batarya modellemesi:

Bu çalışmada batarya sistemi, kısa süreli dinamik koşullarda DC bara gerilimini destekleyen bir tampon eleman olarak ele alınmıştır. Gelecek çalışmalarda, batarya için ayrıntılı şarj/deşarj modellerinin ve durum-of-charge (SOC) tabanlı enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi, sistem performansının daha gerçekçi ve kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

Deneysel doğrulama ve verim analizi:

DC-DC dönüştürücü topolojilerinin karşılaştırılması benzetim ortamı ile sınırlı tutulmuştur. Gerçek donanım bileşenlerini içeren deneysel çalışmalar ile anahtarlama kayıpları, verimlilik ve termal etkilerin incelenmesi, elde edilen bulguların pratik uygulamalara aktarılabilirliğini ve güvenilirliğini artıracaktır.

Hibrit nano şebeke yapıları:

PV ve rüzgâr tabanlı sistemlerin birlikte kullanıldığı hibrit DC nano şebeke yapılarının, farklı enerji yönetim stratejileri ve yük profilleri altında değerlendirilmesi, sistem esnekliği ve sürekliliği açısından önemli bir araştırma alanı olarak görülmektedir.

Farklı güç seviyeleri ve yük profilleri:

Farklı yük karakteristikleri ve değişken güç seviyelerinde gerçekleştirilecek analizler, dönüştürücü topolojilerinin farklı çalışma koşullarındaki performanslarının daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

[1] G. E. Halkos and E. C. Gkampoura, "Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources," Energies, vol. 13, no. 11, 2906, 2020.

[2] H. Daneshi, "Overview of Renewable Energy Portfolio in CAISO - Operational and Market Challenges," in Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, 2018, pp. 1-5.

[3] Md K. G. Deshmukh et al., "Renewable energy in the 21st century: A review," Materials Today: Proceedings, vol. 80, pp. 1756-1759, 2023.

[4] Y. Wang, Z. Chen, and F. Deng, "Dynamic droop scheme considering effect of intermittent renewable energy source," in Proc. 2016 IEEE 7th Int. Symp. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2016, pp. 1-6.

[5] A. Mamen and U. Supatti, "A survey of hybrid energy storage systems applied for intermittent renewable energy systems," in Proc. 2017 14th Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017, pp. 729-732.

[6] T. L. Nguyen and G. Griepentrog, "Modeling, control and stability analysis for a DC nanogrid system," in Proc. 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2018, pp. 1-8.

[7] M. L. Alghaythi et al., "A multiphase-interleaved high step-up DC-DC boost converter with voltage multiplier and reduced voltage stress on semiconductors for renewable energy systems," in Proc. 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conf. (ISGT), 2020, pp. 1-5.

[8] M. C. Mira et al., "Power flow control of a dual-input interleaved buck/boost converter with galvanic isolation for renewable energy systems," in Proc. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC), 2015.

[9] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.

[10] Y. Belkassmi et al., "Modeling and simulation of photovoltaic module based on one diode model using Matlab/Simulink," in Proc. 2017 Int. Conf. Engineering & MIS (ICEMIS), 2017.

[11] G. L. Plett, Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Artech House, 2015.

[12] X. Hu, S. Li and H. Peng, “A Comparative Study of Equivalent Circuit Models for Li-Ion Batteries,” IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 246–256, 2015.

[13] R. R. Thakkar, Y. S. Rao, and R. R. Sawant, "Performance analysis of electrical equivalent circuit models of lithium-ion battery," in Proc. 2020 IEEE Pune Section Int. Conf. (PuneCon), 2020, pp. 103-107.

[14] M. Uslu, “Analysis, Design, and Implementation of A 5 Kw Zero Voltage Switching Phase-Shifted Full-Bridge DC/DC Converter Based Power Supply For ARC Welding Machines,” M.S. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.

[15] R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics. Springer Science & Business Media, 2007.

[16] J. A. Sabaté, R. W. Steigerwald and W. McMurray, “Design Considerations for High-Voltage, High-Power Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 5, no. 4, pp. 425–433, 1990.

[17] Ş. Küçük and E. Akboy, "A basic phase shift full bridge dc-dc converter design and simulation," in Proc. 2022 57th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC), 2022, pp. 1-7.

[18] M. R. Prathibha and H. S. Sridhar, "High step-up high frequency push pull DC-DC converter using MPPT with DC motor load," in Proc. 2017 Int. Conf. Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), 2017, pp. 677-680.

[19] R. H. Lasseter et al., "Integration of distributed energy resources: The CERTS microgrid concept," in Proc. IEEE Power Engineering Society, 2002.

[20] D. Rekioua and E. Matagne, Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control. Springer Science & Business Media, 2012.

[21] A. J. Alrubaie, A. Al-Khaykan, R. Q. Malik, S. H. Talib, M. I. Mousa, and A. M. Kadhim, "Review on MPPT techniques in solar system," in Proc. 2022 8th Int. Engineering Conf. on Sustainable Technology and Development (IEC), 2022, pp. 123-128.

[22] F. S. Al-Ismail, "A critical review on DC microgrids voltage control and power management," IEEE Access, vol. 12, pp. 30345-30361, 2024.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

B. Dündar and A. Durusu, "DC nano şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi: Bataryalı PSFB ve bataryasız boost dönüştürücü topolojilerinin karşılaştırmalı analizi," 16. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, Türkiye, 20–22 Aralık 2025.