T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN İZOLESİZ DC-DC ÇEVİRİCİLERİN YÜKE BAĞLI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Çiğdem AKYILDIZ

Prof. Dr. Hayati MAMUR

MANİSA–2023

ÇİĞDEM AKYILDIZ	**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN İZOLESİZ DC-DC ÇEVİRİCİLERİN YÜKE BAĞLI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**	**2023**

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ II
TABLOLAR DİZİNİ V
TEŞEKKÜR VI
ÖZET VII
ABSTRACT VIII
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 8
2.1. Termoelektrik Jeneratörler 8
2.2. DC–DC Çeviriciler 10
2.3. Mikrodenetleyiciler 12
2.4. TEG'den Enerji Elde Edinimi 13
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER 16
3.1. Materyal 16
3.1.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Jeneratör 16
3.1.2. Soğutma-Isıtma Blokları 17
3.1.3. ATmega2560 Mikrodenetleyicisi 18
3.1.4. National Instruments NI USB-6211 Veri Edinim Kartı 19
3.1.5. TEG Çıkışı Akım Algılama Sensörü 20
3.1.6. Çevirici Çıkışı Akım Algılama Sensörü 20
3.1.7. TEG Çıkışı ve Çevirici Çıkışı Gerilim Algılama Sensörleri 21
3.1.8. Yük Devresi 22
3.1.9. Sıcaklık Sensörleri 23
3.2. Metot 24
3.2.1. MPPT Prensibi 24
3.2.2. DC–DC Çevirici Yük Bağlantısı 25
3.2.3. P&O MPPT Algoritması 27
3.2.4. İzolesiz DC–DC Çevirici Eşitlikleri 29
3.2.5. DC–DC Çeviricilerin Tasarımı 36
3.2.6. DC–DC Çeviricilerin MATLAB/Simulink Modellemesi 40
3.2.7. Deneysel Çalışmadaki Verilerinin Aktarılması 42
3.2.8. DC–DC Çeviricilerin Deneysel Kurulumları 44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 45
4.1. DC–DC Yükselten Çevirici Benzetim Sonuçları 45
4.2. DC–DC Alçaltan Çevirici Benzetim Sonuçları 47
4.3. DC–DC Alçaltan-Yükselten Çevirici Benzetim Sonuçları 49
4.4. DC–DC Çeviricilerin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması 52
4.5. DC–DC Yükselten Çevirici Deney Sonuçları 54
4.6. DC–DC Alçaltan Çevirici Deney Sonuçları 56
4.7. DC–DC Alçaltan-Yükselten Çevirici Deney Sonuçları 58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 60
KAYNAKLAR 64
ÖZGEÇMİŞ 67
EKLER 68
5.1. EK A. P&O kodları 68
5.2. EK B. ATmega2560 Kodları 69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$C_{out(min)}$	Minimum çıkış kondansatörü
D	Görev doluluk oranı
f_s	DC-DC dönüştürücü çalışma frekansı
I_F	Doğrultucu diyotun ortalama ileri akımı
I_{in}	DC-DC çevirici giriş akımı
$I_{(L1)(AVG)}$	Ortalama bobin akımı
$I_{LIM(min)}$	DC-DC çeviricinin izin verilen minimum anahtarlama akımı
I_{MPP}	TEG'in maksimum güç noktasındaki akımı
I_o	DC-DC çevirici çıkış akımı
$I_{o(max)}$	DC-DC çeviricinin maksimum izin verilen çıkış akımı
I_{SC}	MPP kısa devre akımı
$I_{SW(max)}$	Maksimum anahtarlama akımı
I_{TEG}	TEG akımı
L	Bobin endüktansı
P_{TEG_MAX}	TEG'den elde edilen maksimum güç
$R_{converter}$	DC-DC çeviricinin giriş direnci
R_L	Yük direnci
R_{PROG}	Programlanabilir dahili direnç
R_{TEG}	TEG sisteminin toplam iç direnci
T_c	Soğuk yüzey sıcaklığı
T_h	Sıcak yüzey sıcaklığı
V_{in}	DC-DC giriş gerilimi
$V_{in(min)}$	DC-DC çeviricinin minimum giriş gerilimi
V_{MPP}	Maksimum güç noktası gerilimi
V_o	DC-DC çevirici çıkış gerilimi
$V_{o(max)}$	DC-DC çeviricinin maksimum izin verilen çıkış gerilimi
V_{OC}	TEG'in açık devre gerilimi
V_{TEG}	TEG'den elde edilen gerilim
$V_{TEG/MAX}$	MPP'deki TEG çıkış gerilimi

$\boldsymbol{\rho_n}$	n elektriksel öz direnç
$\boldsymbol{\rho_p}$	p elektriksel öz direnç
$\boldsymbol{\rho_C}$	Metalik temasın elektriksel öz direnci
$\boldsymbol{L_n}$	n termoelemanın ısı akışının geçtiği kol uzunluğu
$\boldsymbol{L_p}$	p termoelemanın ısı akışının geçtiği kol uzunluğu
$\boldsymbol{L_C}$	Temas uzunluğu
$\boldsymbol{S_n}$	n termoelemanın birleşim yerinin kesit alanı
$\boldsymbol{S_p}$	p termoelemanın birleşim yerinin kesit alanı
$\boldsymbol{S_c}$	Termoelemanların birleşim yerinin kesit alanı
$\Delta\boldsymbol{I_L}$	Bobinin dalgalanma akımı
$\Delta\boldsymbol{T}$	Sıcaklık farkı
$\Delta\boldsymbol{V_o}$	Çeviricinin çıkış dalgalanma gerilimi
η	DC-DC çeviricinin verimi

KISALTMALAR

DC	Doğru akım
ESR	Çıkış kondansatörünün eşdeğer seri direnci
I	Akım
IC	Artımlı iletkenlik
OCV	Açık devre gerilimi
MPPT	Maksimum güç noktası takibi
MCU	Mikrodenetleyici
P&O	Karıştır ve Gözlemle (Perturb&Observe)
TE	Termoeleman
TEC	Termoelektrik soğutucu
TEG	Termoelektrik jeneratör
TEM	TEG'den elde edilen maksimum güç
PV	Fotovoltaik sistem
P	Güç
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
SC	Kısa devre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. TEG iç yapısı ve elektriksel bağlantısı [1] 8
Şekil 2.2. TEG elektrik eşdeğer devresi [1] 8
Şekil 2.3. Yükselten çevirici.....11
Şekil 2.4. Alçaltan çevirici 11
Şekil 2.5. Alçaltan–yükselten çevirici 12
Şekil 2.6. TEG yük bağlantısı.....13
Şekil 2.7. Yükün bir fonksiyonu olarak akım-gerilim ve güç eğrisi 13
Şekil 2.8. Yükün ve sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEG MPP değerleri.....14
Şekil 3.1. Sistemde kullanılan soğutma-ısıtma blokları ve TEG yerleşimi 17
Şekil 3.2. INA169 Akım algılama sensörü 20
Şekil 3.3. Çeviricilerin çıkışındaki akım algılama sensörü.....21
Şekil 3.4. TEG çıkışındaki ve çevirici çıkışındaki gerilim sensörleri 22
Şekil 3.5. Yük devresi.....23
Şekil 3.6. K tipi BRYMEN BKP-60 ölçü aleti termokupl probu.....24
Şekil 3.7. MPPT prensibi 24
Şekil 3.8. TEG güç grafiği 27
Şekil 3.9. P&O MPPT algoritması 28
Şekil 3.10. Yükselten çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2 29
Şekil 3.11. Alçaltan çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2.....32
Şekil 3.12. Alçaltan-yükselten çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2.....34
Şekil 3.13. Yükselten çevirici.....37
Şekil 3.14. Alçaltan çevirici 38
Şekil 3.15. Alçaltan–yükselten çevirici.....39
Şekil 3.16. TEG sistemi, yükselten çevirici ve yük bağlantısı 41
Şekil 3.17. TEG sistemi, alçaltan çevirici ve yük bağlantısı.....41
Şekil 3.18. TEG sistemi, alçaltan-yükselten çevirici ve yük bağlantısı.....41
Şekil 3.19. TEG sistemi giriş çıkış güçlerinin ölçülmesi için blok diyagramı 42
Şekil 3.20. MATLAB/Simulink NI USB-6211 kartı blok şeması.....43
Şekil 3.21. TEG sistemi deneysel kurulumu 44
Şekil 4.1. Yük değişimine göre yükselten çevirici çıkışı I, V ve P değişimi.....46
Şekil 4.2. Değişken yükler altında görev doluluk oranı.....46
Şekil 4.3. Yük değişimine göre alçaltan çevirici çıkışı I, V ve P değişimi 48
Şekil 4.4. Yük değişimine göre alçaltan çevirici görev doluluk oranı.....48
Şekil 4.5. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici çıkışı I, V ve P değişimi50
Şekil 4.6. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı.....50
Şekil 4.7. Yük değişimine göre çeviricilerin görev doluluk oranı karşılaştırılması ...52
Şekil 4.8. Yük değişimine göre TEG sistemi için çeviricilerin güç karşılaştırması ...53
Şekil 4.9. Yük değişimine göre yükselten çevirici I, V ve P değişimi.....54
Şekil 4.10. Yük değişimine göre yükselten çevirici görev doluluk oranı 55
Şekil 4.11. Yük değişimine göre alçaltan çevirici I, V ve P değişimi.....56
Şekil 4.12. Yük değişimine göre alçaltan çevirici görev doluluk oranı.....57
Şekil 4.13. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici I, V ve P değişimi.....58
Şekil 4.14. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı.....59

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. TEG modülü ve TEG sistemi özellikleri 16
Tablo 3.2. Çeviriciler için kullanılan direnç değerleri 22
Tablo 3.3. Termokupl türleri ve çalıştıkları sıcaklık değerleri 23
Tablo 3.4. P&O MPPT algoritma olasılıkları 28
Tablo 3.5. Yükselten çevirici tasarımı 36
Tablo 3.6. Alçaltan çevirici tasarımı 38
Tablo 3.7. Alçaltan-yükselten çevirici tasarımı 39
Tablo 4.1. Yük değişimlerine göre üretilen ortalama D değerleri 46
Tablo 4.2. Yük değişimlerine göre üretilen ortalama D değerleri 49
Tablo 4.3. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı 51
Tablo 4.4. Yük değişimine göre çeviricilerin görev doluluk oranı karşılaştırması 52
Tablo 4.5. Yük değişimlerine göre çeviricilerin maksimum güç karşılaştırması 53

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hayati MAMUR'a, yüksek lisans eğitimim sırasında desteğini ve MATLAB/Simulink konusunda her türlü imkan ve desteği veren Sayın Arş. Gör. Mehmet Ali ÜSTÜNER'e, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan eşim İsmail ve oğlum Ömer Selim AKYILDIZ'a, annem Menekşe ve babam Osman AKPUNAR'a yürekten teşekkür ederim.

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi tarafından (Proje No: 2022-027) desteklenmiştir.

Çiğdem AKYILDIZ
Manisa, 2023

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER İÇİN İZOLESİZ DC-DC ÇEVİRİCİLERİN YÜKE BAĞLI DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Çiğdem AKYILDIZ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayati MAMUR

Termoelektrik jeneratörler (TEG) atık ısıların bulunduğu yerlerdeki sıcaklık farkını elektrik enerjisine çeviren yarıiletken materyallerdir. TEG'lerin verimlerinin düşük olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, bunlardan maksimum gücün elde edilmesi büyük öneme sahiptir. TEG'lerden maksimum gücün elde edilmesi için maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmaları kullanılır. Ayrıca TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı sürekli değişken olduğu için üretilen gerilim değeri değişkenlik gösterir. Gerilim düzenlemesi ve MPPT için TEG'ler ile birlikte çeviriciler kullanılır. MPPT algoritmaları her çeviricide değişken yüklere bağlı olarak yeterli performansı sağlamaz. Bu çalışmada, izolesiz karıştır ve gözlemle (P&O) MPPT algoritmalı DC–DC yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviricilerin değişken yüklerdeki MPPT performanslarının benzetim ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Uygulamalarda ve benzetim çalışmalarında TEG sistemindeki P&O algoritmalı yükselten çeviriciye değişken yükler bağlandığında P&O algoritması TEG iç direnci ve üzerindeki yük direnci değerlerinde MPPT yapmıştır. TEG sistemine P&O algoritmalı alçaltan çevirici bağlandığında ve yük değerleri kademeli olarak değiştirildiğinde, yük değeri TEG iç direncine eşit ve altındaki değerlerde P&O algoritması MPPT yapmıştır. Sisteme alçaltan–yükselten çevirici ve buna değişken yükler bağlandığında, her değişken yükte P&O algoritması iyi bir MPPT performansı sergilemiştir. Benzetim çalışmalarında yükselten çeviricide MPPT hata oranı en az %5,16, alçaltan çeviricide %0,24 ve alçaltan–yükselten çeviricide %0,45 olmuştur. Benzetim çalışmalarındaki üç çeviricinin P&O algoritmasının yük değişimlerindeki oluşturduğu karakteristikler deneysel olarak doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Termoelektrik jeneratör, DC-DC çevirici, maksimum güç noktası izleme, yükselten çevirici, alçaltan çevirici, alçaltan– yükselten çevirici

2023, 69 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE LOAD DEPENDENT BEHAVIOR OF NON-INSULATED DC-DC CONVERTERS FOR THERMOELECTRIC GENERATORS

Çiğdem AKYILDIZ
Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hayati MAMUR

Thermoelectric generators (TEG) are semiconductor materials that convert the temperature difference in places where waste heat is found into electrical energy. Considering the fact that TEGs have low efficiency, it is of great importance to obtain maximum power from them. Maximum power point tracking (MPPT) algorithms are used to extract maximum power from TEGs. In addition, since the temperature difference between the surfaces of the TEGs is continuously variable, the voltage value produced varies. Converters are used with TEGs for voltage regulation and MPPT. MPPT algorithms do not provide adequate performance in every converter due to variable loads. In this study, simulation and experimental studies of the MPPT performances of DC-DC converters that are a boost, a buck and a buck-boost converters with perturb & observation (P&O) MPPT algorithm at variable loads were carried out. In applications and simulation studies, when variable loads are connected to the boost converter with P&O algorithm in the TEG system, the P&O algorithm carried out MPPT at the TEG internal resistance and the load resistance values above it. When a buck converter with P&O algorithm was connected to the TEG system and the load values were changed gradually, the P&O algorithm fulfilled MPPT at values equal to or below the TEG internal resistance. When a buck-boost converter with P&O algorithm and variable loads were connected to the system, the P&O algorithm executed good MPPT performance at every variable load. In the simulation studies, the MPPT error rate was at least 5.16% in the boost converter, 0.24% in the buck converter, and 0.45% in the buck–boost converter. The characteristics of the P&O algorithm of the three converters in the simulation studies in the load changes have been experimentally verified.

Keywords: Thermoelectric generator, DC-DC converter, maximum power point tracking, boost converter, buck converter, buck-boost converter

2023, 69 pages

1. GİRİŞ

Enerji, hareket ettirici güç ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle üretim ve tüketimin gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan kaynaktır. İnsanlar zaman içinde enerji üretmek için birçok farklı malzemeden yararlanmışlardır. Enerji, insanların ihtiyaçlarının karşılanmasında ve onun daha yüksek bir yaşam düzeyine ulaştırılmasında gereksinim duyulan vazgeçilmezlerdendir.

Gelişen teknoloji ile birlikte enerji ihtiyacı da artış göstermiştir. Bu sebeple enerji üretmek için yeni kaynak arayış çabaları artmıştır [1]. Einstein 20. yüzyılın sonlarına doğru enerjinin madde olduğunu ispatlamıştır. Bu temel ilkeden hareketle enerjinin her maddenin yapısında var olduğu, bir enerjinin yok olmadığı ve diğer enerji kaynağına dönüştüğünü kanıtlamıştır. Bu ilke, doğadaki enerjinin daima sabit kaldığını ve miktarının hiçbir şekilde değiştirilemeden sabit bir oran içinde korunacağını da ortaya koymaktadır. Her maddenin içinde enerji var olduğu bilinmesine rağmen, maddedeki bu potansiyel enerjinin insanların ihtiyaç duyduğu enerjiye dönüştürülmesi her zaman mümkün olmamakta ya da belli koşullar sağlandığında gerçekleşmektedir. Enerji çeşitleri; kimyasal, termal, potansiyel, kinetik, mekanik, elektrik, manyetik, nükleer, ışık ve ses enerjileridir [2].

Artan dünya nüfusu ve şehirleşmeye bağlı olarak, ihtiyaç duyulan enerji miktarı hızlı bir şekilde yükselmektedir. Fosil yakıtların kullanılmasıyla oluşan çevre sorunlarından bütün canlılar etkilenmekte ve çevre dengesi bozulmaktadır [3]. İnsanlığın gereksinim duyduğu sanayileşme ve ekonomik kalkınma için vazgeçilmez kaynakların başında gelen enerjinin, üretiminden tüketimine kadar geçen her aşamasında çevre sorunlarına neden olan atıklar ortaya çıkmaktadır [4]. Bu sebeple insanlık yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelmiştir [5].

Yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynakları doğadan doğrudan temin edildiği için tükenmeleri mümkün değildir. Bunların en başında gelen yenilenebilir enerji kaynağı yaklaşık beş milyar yıldan beri dünyamıza hayat veren ve yeryüzündeki bütün enerji kaynaklarının varlığının da sebebi olan güneştir [6].

Alternatif enerji kaynakları olarak da isimlendirilen yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgâr, jeotermal, biyo-kütle, dalga, hidrojen, gel-git akıntı enerjileridir. Yenilenebilir enerji kaynakları günümüzde farklı alanlarda kullanılmaktadır. Akarsular, elektrik elde edilmesi amacıyla kullanılırken, güneş enerjisinden konutların ısıtılmasında, elektrik enerjisi üretilmesinde ve tarımsal ürünlerin kurutulması gibi birçok farklı alanda yararlanılmaktadır [7].

Bir enerji çeşidi olan termal enerji, ortam veya sistem sıcaklığı sonucunda ortamdaki veya sistemdeki bir cismin veya maddenin potansiyel ve kinetik enerjileri toplamını ifade eden bir enerji biçimidir [8]. Isı, termal enerjinin akışıdır. Gerçek dünyadaki fiziksel sistemlerde gerçekleşen neredeyse her enerji transferi %100'den az verimliliğe sahiptir ve bir atık termal enerji ile sonuçlanır. Bu enerji genellikle düşük seviyeli termal enerji biçimindedir. Buradaki düşük seviye, termal enerjiyle bağlantılı olan sıcaklığın çevrenin sıcaklığına çok yakın olması demektir.

Atık ısıların bulunduğu yerler olarak fabrikaların bacaları, sıcak su atıkları, egzozlar ve insan vücudu örnek verilebilir [9]. Bu atık ısıların çevre sıcaklığı ile arasındaki sıcaklık farkını kullanarak elektrik enerjisine çeviren cihazlardan biri termoelektrik jeneratörlerdir (TEG) [10]. TEG'ler "Seebeck Etki"yi kullanırlar. Bu etki 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından ortaya konulmuştur. Thomas Johann Seebeck, iki farklı malzeme arasında sıcaklık farkı olduğunda termoelektrik potansiyel enerjinin geliştirilebileceğini bildirmiştir [11].

TEG'lerin diğer güç üretim sistemlerine göre avantajları; ömürlerinin uzun olması, hareketli parçalarının olmaması, çalışma sırasında zararlı kirletici emisyon yaymamaları, işletim ve bakım maliyetlerine gereksinim duymamaları, çevre ile kimyasal reaksiyona girmemeleri, güvenilir çalışmaları ve düşük termal enerji potansiyelinin kullanılmasıdır [12]. TEG'lerin dezavantajları ise ilk kurulumlarının pahalı ve enerji dönüşüm verimlerinin <%10 olmasıdır [13]. Ayrıca her ortamda istenilen sıcaklık farkına ulaşılamamasından dolayı kullanım alanı kısıtlı kalmaktadır. Arabaların egzoz çıkışları ve sıcak su kazanlarının bulunduğu ortamlarda sıcaklık farkı yüksek olduğundan çıkış gücü yüksek elde edilirken insan vücudu ve ortam sıcaklığı gibi yerlerde daha az enerji elde üretilebilmektedir.

TEG'lerin enerji verimlerinin düşük olması nedeniyle maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırılmaları büyük önem arz etmektedir. TEG'leri MPP'de çalıştırmak için DC–DC (Doğru Akım) çeviriciler kullanılır [14]. Bu DC–DC çeviriciler hem güç regülasyonu hem de MPP izlemesi (MPPT) yaparlar. MPPT için çeşitli algoritmalar kullanılır [15]. Bunlardan en yaygın kullanılanı Karıştır & Gözlemle (Perturb & Observe – P&O) metodudur [16]. Ayrıca, bu DC–DC çeviriciler; TEG'ler ve bataryalar arasında kullanıldığında batarya yönetim sistemini de gerçekleştirirler [17].

TEG'in en yüksek verimi; TEG'in yük direnç değeri ile TEG'in iç direnç değerinin eşit olduğu andadır [18]. Bu durum, yükün her zaman aynı olmaması ve TEG'in iç direncinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi nedenlerinden dolayı her zaman sağlanamaz. Ama bu eşitlik sürekli arzu edilir. Bunun sağlanması için hem gerilim regülasyonunu yapan hem de batarya yönetim sistemini gerçekleştiren bir DC–DC çevirici kullanılır. Bu durumda TEG'in yükü DC–DC çevirici olur [19]. TEG ve yük arasına bağlanan DC–DC çeviricinin TEG'in yükü olması nedeniyle TEG iç direnci ve DC–DC çevirici direncinin eşit yapılması, kontrolörüne yazılan MPPT algoritması vasıtasıyla gerçekleştirilir. Böylece TEG'den en yüksek verim elde edilirken gerilim regülasyonu da sağlanmış olur [20].

TEG'lerin gerilim regülasyonu ve batarya yönetim sistemi için bağlanılan DC–DC çeviriciler izoleli ve izolesiz olarak ikiye ayrılır [21]. İzolesiz DC–DC çeviriciler yaygın bir şekilde bu sistemlerde kullanılırlar. Bunların en sık tercih edilenleri yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten DC–DC çeviricilerdir [22].

TEG'ler için geliştirilen MPPT algoritmalarının fotovoltaik (PV) sistemlerden uyarlandığı görülmektedir. Bu algoritmaları geleneksel ve geleneksel olmayan algoritmalar olarak iki grupta sınıflandırmak mümkündür. Araştırmacıların ve mühendislerin literatürde DC–DC çeviriciler ile yaptıkları birçok MPPT algoritmasına rastlamak mümkündür. Bu algoritmalardan en temel olanı P&O'dur. **Bunlar incelendiğinde bu DC–DC çeviricilerdeki MPPT algoritmalarının yük değişimlerine verdikleri cevaplar ayrı bir çalışma olarak incelenmemiştir.**

Bijukumar ve ark. [19] TEG sistemleri için DC–DC yükselten çevirici kullanarak parabolik ekstrapolasyona dayalı MPPT tekniği sunmuşlardır. P&O algoritmasının MPP değerini hızlı bir şekilde yakalayabildiğini ama osilasyonlara neden olduğunu belirtmişlerdir. Onlar yeni bir yöntem olarak kararlı durum salınımlarını azaltmak amacıyla parabolik P–I (Güç–Akım) eğrisi üzerinde üç çalışma noktası seçip MPP'nin koordinatlarını doğrudan tahmin etmişlerdir. Çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için farklı sıcaklık değerleri ve yükler kullanmışlardır. Sonuçta MPP'yi izlemek için P&O algoritmasına göre %15 daha hızlı olduğunu göstermişlerdir.

Tsai ve ark. [20] MATLAB/Simulink programını kullanarak termoelektrik soğutucu (TEC) ve TEG modüllerinin uygulamalarını yapmışlardır. Önerdikleri modeller ile TEC ve TEG uygulamalarının; simülasyonlarının yapılması ve bunların davranışlarının analiz edilmesini kolaylaştırmışlardır.

Başoğlu ve Çakır [21], izoleli ve izolesiz DC-DC dönüştürücülerin PV sistemlerdeki MPPT performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, DC-DC çevirici tarafındaki direnç ile darbe genişlik modülasyonunun (PWM) görev oranı arasındaki ilişki için yeni matematiksel yaklaşım kullanmışlardır. Ayrıca alçaltan-yükselten çevirici için sabit ışınım durumunda yanıt süresini araştırmışlardır. Literatürdeki çalışmalardan faydalanarak; güç ve kontrol gereksinimleri, MPPT yeteneği, PV modül akımının ölçülmesi, güneş ışınımı sınır değerleri ve yük direncinden oluşan sistem karşılaştırmaları yapmışlardır. Sonuçta, PV sistemlerdeki MPPT uygulamasında uygun topolojinin seçilmesi için yeni bir ölçüt önermişlerdir.

Taghvaee ve ark. [22] PV sistemlerde çeşitli çeviricileri MPPT performansının karşılaştırılması için araştırmışlardır. Çeviricilerin ve MPPT algoritmalarının seçiminin PV sisteminin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. İzolesiz DC–DC alçaltan, yükselten ve alçaltan-yükselten çeviriciler üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. DC–DC alçaltan-yükselten çeviricilerin verimliliğinin diğerlerine göre yüksek olması ve bağlanan tüm yük değerlerinde MPP yapmasından dolayı PV sistemler için uygun bir çözüm sunacağını ifade etmişlerdir.

Singh [23], DC–DC dönüştürücülerin seçiminin PV sistemin çalışma performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğundan yaptıkları çalışmada izolesiz farklı DC–DC çeviricilerin özelliklerini karşılaştırmışlardır. MPPT tekniği uygulanmış PV sistemler için çeşitli araştırma sonuçlarını incelemişlerdir. PV sistemler de kullanılacak DC–DC dönüştürücülerin seçimi için araştırma ve yapılan karşılaştırma doğrultusunda seçim kıstasları açıklamıştır.

Sing ve ark. [24] TEG kullanarak alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarından enerjinin geri kazanımını araştırmışlardır. Onlar TEG'lerin atık ısılardan elektrik enerjisi üretebilmesi, temin edilme kolaylığı ve maliyetinin düşük olması nedeniyle ekonomik bir seçenek olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmada, TEG'lerin çeşitli yönlerini, ihtiyaç duyulma sebeplerini, parametrelerini, karşılaşılan zorluklarını ve kullanımındaki çevericileri ifade etmişlerdir.

Laird ve ark. [25], kesirli kısa devre (SC) MPPT algoritması ile çalışan yeni ve yüksek kademeli bir DC–DC çevirici topolojisini 270°C sıcaklık farkında 4,2 V, 3,4 A çıkış veren bir TEG sisteminde kullanmışlardır. Kullandıkları yöntem ile çeviricilerinin çıkışı oldukça yüksek bir değerde olmuştur. Bu çeviricinin çıkışı 180 V olarak gerçekleşmiştir. Mevcut yüksek kademeli DC–DC çeviriciler ile bu çevirici karşılaştırıldığında, önerilen çevirici benzer eleman sayısıyla daha yüksek kazanç elde etmiştir.

Wu ve ark. [26], TEG'lerden alınan enerjinin depo edilme verimliliğini artırmak için bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının değişkenlik göstermesi TEG sisteminin ürettiği gücün kararlılığını bozduğunu açıklamışlardır. Güç üretimini kararlı hale getirmek ve sistemin verimliliğini artırmak amacıyla pil ve süper kapasitörden oluşan depolama birimlerini sistemlerine dahil etmişlerdir. TEG sistemi için dahil edilen pil üretilen güç miktarı yüksek olduğunda yedek bir enerji kaynağı olarak görev yaparken süper kapasitör enerji dalgalanmalarını ve gerilimdeki geçişleri azaltmıştır. Elemanlar arasındaki enerji dengesini korumak için ise MPPT ve yük güç takibi içeren bara gerilim aralıklarına dayalı eşik kontrol stratejisi önermişlerdir.

Twaha ve ark. [27] artımlı iletkenlik (IC) tabanlı MPPT algoritmalı DC–DC çevirici kullanarak TEG'in performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarını P&O MPPT algoritmalı literatürdeki önceki bir araştırmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmışlardır. IC'nin P&O'ya göre MPPT izlemedeki verimliliğinin daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Sistemlerinde yükselten DC–DC çevirici kullanmışlardır. Ama hangi yüklerde MPPT'nin başarıldığına değinmemişlerdir.

Liu ve ark. [28], endüstriyel atık ısıların geri kazanımında MPPT algoritmalı DC–DC alçaltan çeviriciyi kullanarak 1,2 kW gücünde bir uygulama yapmışlardır. P&O ve açık devre gerilimi (OCV) tekniklerini birleştirerek yeni bir MPPT algoritması önermişlerdir. Sistemlerinde 60°C ve 180°C sıcaklık farkını kullanmışlardır. Sistemlerinden ürettikleri elektrik enerjisini doğrudan bataryada depolamışlardır. Dolayısı ile çıkışlarındaki yükün değişimi sabit olarak kalmıştır.

Montecucco ve Knox [29] TEG'ler için arayüz oluşturan alçaltan–yükselten çeviricinin çalışması esnasında OCV'nin ölçümü ile MPP izlemenin yenilikçi bir yolunu sunmuşlardır. MPPT algoritması ile alçaltan–yükselten çeviricideki anahtarların açılıp-kapanma sürelerini düzenlemişlerdir. Deneysel bir düzenek hazırlayarak önerdikleri MPPT algoritmasının doğrulamasını yapmışlardır. Burada kullandıkları yükleri belirli aralıklarda belirlemişlerdir. Böylece çeviricinin MPP'yi doğru bir şekilde izlediğini kanıtlamışlardır. Yapılan hassas ölçümler sırasında çeviricinin MPP'yi %99,85'lik bir verimle izlediğini bulmuşlardır.

Bond ve Park [30] TEG'ler için akım algılayıcısız güç tahmini ve MPPT uygulaması sunmuşlardır. Geleneksel MPPT yöntemlerinde OCV ve akımı ölçmek için kaynağın ve yükün bağlantısının kesilerek güç verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Onlar önerdikleri sistem ile bu dezavantajı ortadan kaldırmışlar ve aynı zamanda MPP değerini en iyi şekilde elde etmişlerdir. Belirlenen sıcaklık değerinde histerezis gerilim regülatörü, TEG'in çıkış gerilimini belirlenen referans seviyesinde tutarak maksimum gücün elde edilmesine olanak sağlamıştır. Basit, ucuz, güç tüketiminin düşük olması ve başka jeneratör tipleri için de kullanılabilmesi önerdikleri uygulamanın avantajlarıdır. Önerdikleri devre yapısını teorik ve deneysel olarak doğrulamışlardır.

Yukarıdaki çalışmalar bir bütün olarak değerlendirildiğinde PV sistemler için yapılan çalışmalarda; 1) MPPT algoritması yükselten çeviricide kullanıldığında, bağlanan yük değeri PV iç direnç değerinden daha yüksek değerlere kadar işlev görebilir, 2) MPPT algoritması alçaltan çeviricide kullanılırsa, MPPT algoritması sıfırdan yük direnci değerine kadar fonksiyoneldir ve 3) yükselten–alçaltan çeviricide MPPT algoritması uygulandığında, bu algoritma sıfırdan en yüksek değerlere kadar yük direncinde işlev görebilir şeklinde ifade edilmektedir.

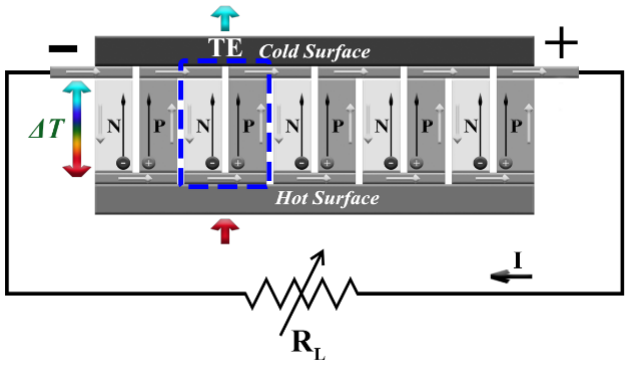
PV sistemler için yapılan farklı yük değerlerinde izolesiz DC–DC yükselten, alçaltan ve yükselten–alçaltan çeviricilerin farklı yük değerlerinde MPPT algoritmasının çalışması hakkında literatür çalışmalarına rastlanılmana rağmen TEG'ler için böyle bir çalışmanın yapılmadığı araştırmalar sonucunda belirlenmiştir [23].

Bu tezin amacı, TEG'ler için P&O MPPT algoritması ile çalışan izolesiz yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten DC–DC çeviricilerin yüke bağlı davranışlarının incelenmesi ve analizlerinin yapılmasıdır. Böylece bu çalışma yardımıyla P&O MPPT algoritmasının uygulandığı izolesiz yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten DC–DC çeviricilerdeki en iyi yük aralığı değerlerinin belirlenmesi için öneriler sunulmuştur. Bunun sayesinde yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten DC–DC çeviricilerin MPPT özelliğini kaybedilmeksizin en verimli yük aralığı eğrileri çıkarılmıştır.

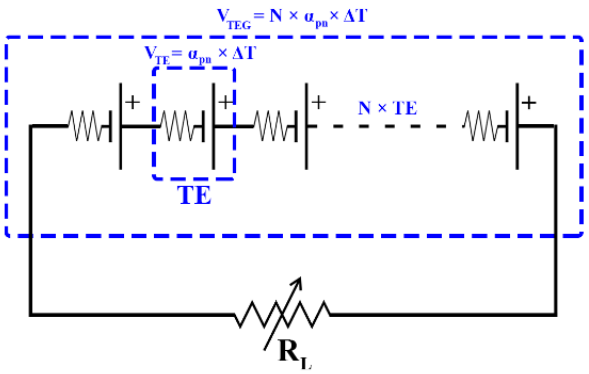
2. GENEL BİLGİLER

2.1. Termoelektrik Jeneratörler

TEG'lerin çalışma mantığı üretilen gerilimin sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğu termoelektrik malzemelerin Seebeck etkisi kavramına dayanmaktadır. TEG'lerde, çıkış gücünü arttırmak amacıyla birçok termoeleman (TE) birbirine bağlanmaktadır. Gerilimin arttırılması için TE'ler birbirleri ile seri bağlanırken, ısıl iletkenliğin arttırılması için seramik plakalar yoluyla paralel bağlanmaktadırlar [24]. Bu birleşimden termoelektrik modül (TEM) oluşur. TEM'in uçları arasına bir yük bağlanır ve yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşturulur ise yük üzerinden bir güç alınır [20]. Bu sayede TEM TEG modunda çalışmış olur. Tipik bir TEG'in içyapısı ve elektriksel bağlantısı Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekil 2.2'de TEG'in elektriksel eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.1. TEG iç yapısı ve elektriksel bağlantısı [1]



Şekil 2.2. TEG elektrik eşdeğer devresi [1]

TE, ters Seebeck katsayısına sahip, birer uçları birleştirilen iki farklı p ve n tipi yarıiletken malzemeden yapılmaktadır. TE'nin açık uçları arasındaki gerilim (V_{out}), sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkına ($\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{out} = N \times \alpha_{np} \times \Delta T \tag{2.1}$$

Burada N seri bağlı TE çift sayısını, α_{np} TE'yi oluşturan n ve p malzemelerinin Seebeck katsayılarını (VK^{-1}) ($\alpha_{np} = \alpha_n - \alpha_p$) ve ΔT K cinsinden TE'nin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını ifade eder. TE'ler elektriksel olarak seri bağlandığında, gerilim artarken toplam iç direnç kullanılan TE sayısı ile doğru orantılı olarak artar. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Dolayısıyla TEG'lerin iç direnci aşağıdaki eşitlik ile açıklanır**:**

$$R_{TEG} = \frac{\rho_n L_n}{S_n} + \frac{\rho_p L_p}{S_p} + 2\frac{\rho_C L_C}{S_C} \tag{2.2}$$

Burada ρ_n, ρ_p ve ρ_C sırasıyla, n, p ve metalik temasın elektriksel öz dirençleridir. L_n ve L_p TE'lerin ısı akışının geçtiği kol uzunlukları ve L_C temas uzunluğudur. S_n, S_p ve S_C sırasıyla, n ve p TE'lerin ve birleşim yerinin kesit alanlarıdır. TEG'den elde edilen çıkış gücü (P) aşağıdaki gibidir:

$$P = V_{out}^2 \frac{R_L}{(R_{TEG}+R_L)^2} \tag{2.3}$$

Burada R_L ve R_{TEG} sırasıyla dış yük ve iç dirençtir.

TEG'den alınan güç MPP'de olduğu andaki türevi sıfırdır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\frac{dP}{dV_{TEG}}\Big|_{max} = \frac{V_{OC}-2V_{TEG}}{R_{TEG}} = 0 \tag{2.4}$$

Burada V_{OC} TEG'in açık devre gerilimini ve V_{TEG} TEG'den elde edilen gerilimi ifade etmektedir. Bu nedenle, MPP'deki TEG çıkış gerilimi $V_{TEG/MAX}$ TEG V_{OC} geriliminin (2.5)'te verildiği gibi yarısıdır. Maksimum çıkış gücü, P_{TEG_MAX}, yük direnci ve TEG'in iç direnç eşitliğinde alınır. P_{TEG_MAX} aşağıda verilmiştir:

$$V_{TEG/MAX} = \frac{V_{OC}}{2} \tag{2.5}$$

$$P_{TEG_MAX} = \frac{V_{OC}^2}{4R_{TEG}} \tag{2.6}$$

TEG'den elde edilen güç ΔT sıcaklık farkına, yarıiletken malzemenin özelliklerine ve TEG çıkış uçlarına bağlanan harici R_L yük direncinin değerlerine bağlıdır.

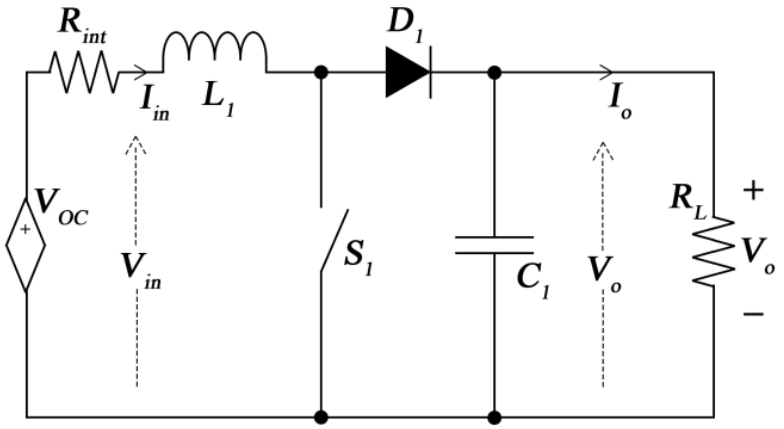
2.2. DC–DC Çeviriciler

DC–DC çeviriciler doğru akım kaynağını bir gerilim seviyesinden diğer bir gerilim seviyesine dönüştüren elektronik devrelerdir. DC–DC çeviricilerin genel prensibi, elektrik enerjisinin depolanmasını ve depolanan enerjinin yüke gönderilmesini içermektedir [2]. Enerji depolama ve bırakma süresi kontrol edilerek, çevirici yükünde ortaya çıkan ortalama gerilim seviyesi kontrol edilebilir. Ortalama yük gerilim seviyesi güç kaynağının gerilim seviyesinden daha yüksek veya daha düşük olabilir. Bunun için ortalama DC çıkış gerilimi istenen bir seviyeye eşit olacak şekilde kontrol edilmelidir [3]. TEG'lerin en iyi verimle çalışması için uygun çevirici seçimi önemli bir role sahiptir. Yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten DC–DC çeviriciler maksimum güç noktası takibi için MPPT denetleyicisi ile birlikte yaygın olarak kullanılırlar.

Yükselten çevirici, DC gerilim seviyesini düşük gerilimden yüksek gerilim seviyesine çıkaran çeviriciler grubundadır. Yükselten çevirici, çıkış gerilimini yükseltirken akımı düşüren bir DC–DC çeviricidir. Bobin, anahtarlama elemanı ve diyottan oluşmaktadır [4]. Tipik bir yükselten çeviricinin dönüşüm eşitliği aşağıda verilmiştir:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \tag{2.7}$$

Burada V_o çeviricinin çıkış gerilimi, V_{in} giriş gerilimi ve D anahtarlama elemanının görev doluluk oranıdır. Şekil 2.3'te yükselten çeviricinin şeması gösterilmiştir.

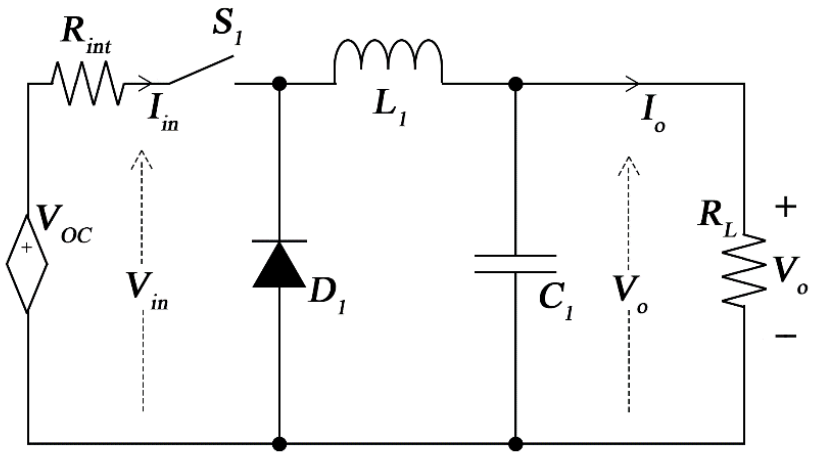


Şekil 2.3. Yükselten çevirici

Alçaltan çevirici, çıkış geriliminin giriş geriliminden daha düşük olduğu bir DC–DC çevirici türüdür. Çıkış gerilimi giriş geriliminden küçük olduğu için düşürücü çevirici olarak da adlandırılır [5]. Tipik bir alçaltan çeviricinin dönüşüm eşitliği aşağıda gösterilmiştir:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = D \tag{2.8}$$

Burada I_{in} çeviricinin giriş akımı ve I_o çıkış akımıdır. Şekil 2.4'te alçaltan çeviricinin şeması gösterilmiştir.

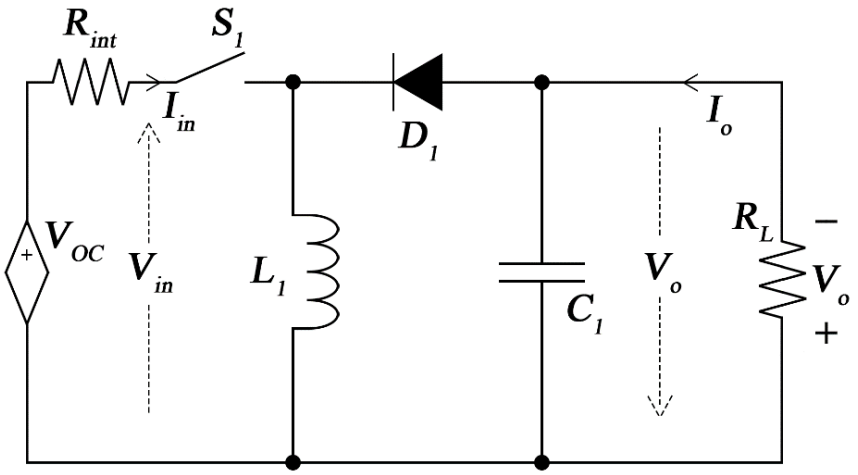


Şekil 2.4. Alçaltan çevirici

Alçaltan–yükselten çevirici, çıkış geriliminin giriş geriliminden daha düşük veya büyük yapılması için kullanılır. Ama çıkış polaritesi terstir [6]. Tipik bir alçaltan–yükselten çeviricinin dönüşüm eşitliği aşağıda gösterilmiştir:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = \frac{D}{1-D} \tag{2.9}$$

Şekil 2.5'te alçaltan–yükselten çeviricinin şeması sunulmuştur.



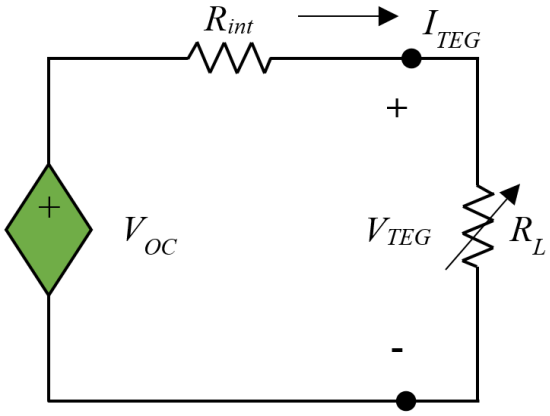
Şekil 2.5. Alçaltan–yükselten çevirici

2.3. Mikrodenetleyiciler

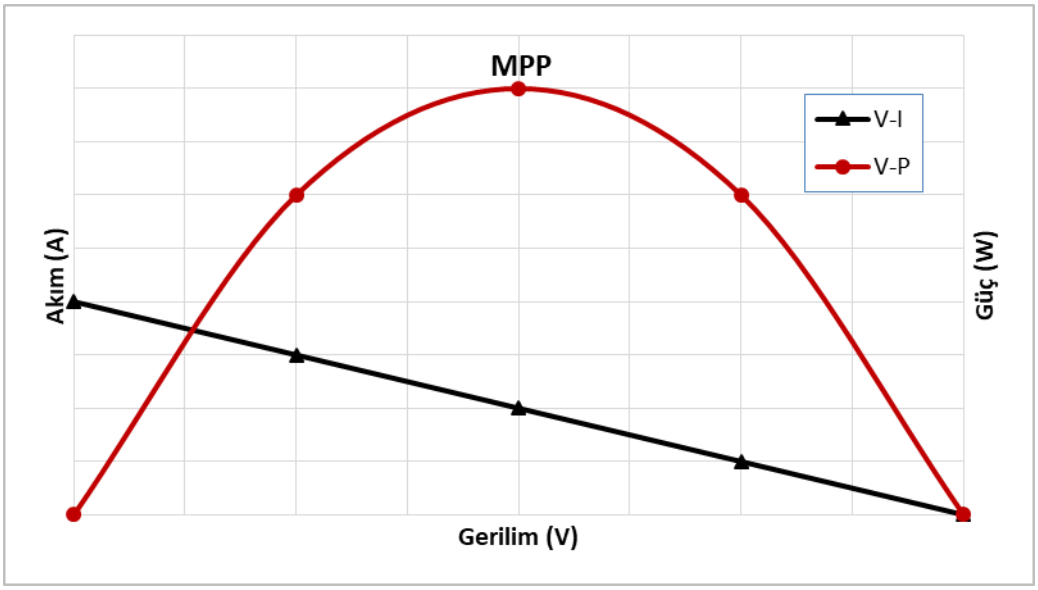
Mikrodenetleyiciler (MCU) gömülü sistemler olarak isimlendirilirler. MCU'lar içlerinde merkezi işlem birimi, rastgele erişimli bellek, aritmetik lojik birim ve giriş-çıkış (I/O) birimi gibi bilgisayara ait olan hemen hemen tüm birimleri içerisinde bulunduran tümleşik bir devre şeklindedirler. MCU'lar program belleğine yazılan algoritmalar ile giriş bilgilerine bağlı olarak çıkışı yönlendirirler. Çeviricilerdeki kullanım amacı anahtarlama elemanlarının darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile açma-kapama yapması içindir. Ayrıca içerisine MPPT algoritmaları gömülür. Belirli bir frekans ile anahtarlama elemanının çalıştırılmasını sağlarlar. MCU'nun PWM çıkışı doğrudan anahtar elemanına bağlanmaz. Genelde, bir anahtar sürücü elemanlar ile kullanılırlar.

2.4. TEG'den Enerji Elde Edinimi

TEG'lerin verimleri düşük olduğundan çalışma performanslarını iyileştirmek ve tam kapasiteye yakın çalışmasını sağlamak için maksimum gücü çıkarmak önemlidir. Maksimum güç TEG sisteminin toplam iç direnci ile TEG sistemine bağlı harici yük direnci arasındaki dengeyi sağlamayı içerir. Şekil 2.6'da TEG yük bağlantısı ve Şekil 2.7'de TEG yük direncinin bir fonksiyonu olarak TEG güç değişim eğrisi verilmiştir.

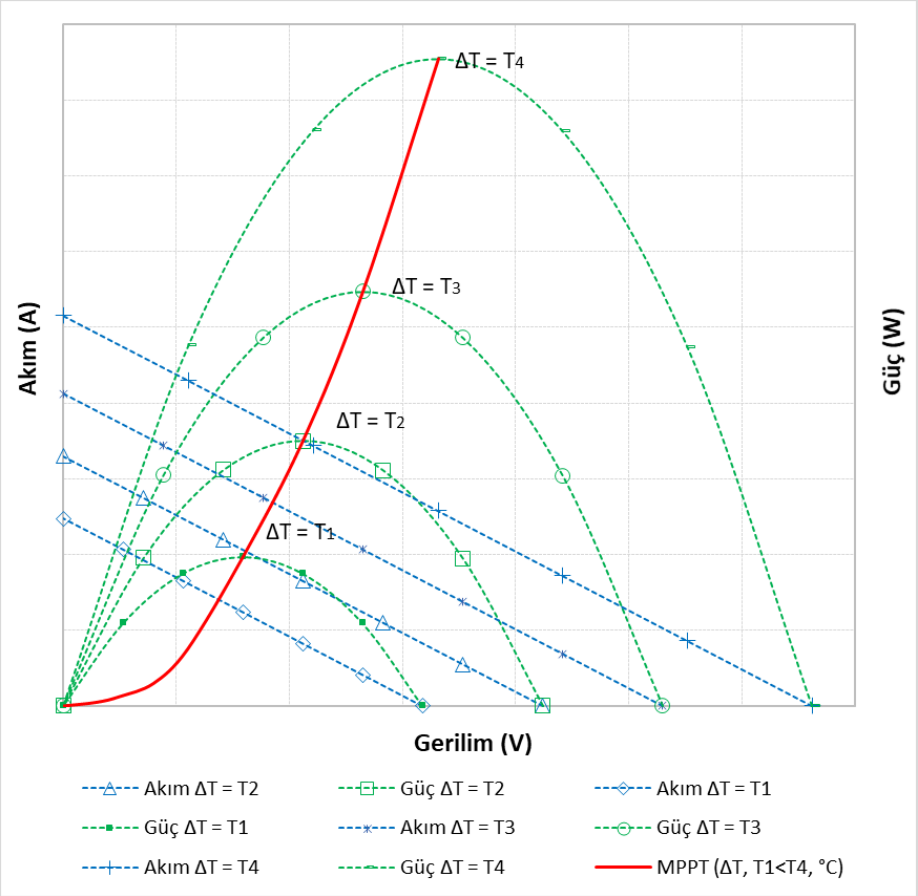


Şekil 2.6. TEG yük bağlantısı



Şekil 2.7. Yükün bir fonksiyonu olarak akım-gerilim ve güç eğrisi

TEG devrelerindeki yük direnci sürekli değişkendir. TEG'in yük değişiminin ve sıcaklık farkı değişiminin bir fonksiyonu olarak elde edilebilecek güç değerlerini ve MPP noktalarını gösteren eğri Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Yükün ve sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEG MPP değerleri

TEG akımı (I_{TEG}) ve TEG gerilimi (V_{TEG}) yüke bağlı olarak doğrusal değişir. MPP kısa devre akımının (I_{SC}) veya açık devre geriliminin (V_{OC}) yarısının izlenmesiyle de elde edilebilir. Bu durumda MPP gerilimi (V_{MPP}), MPP akımı (I_{MPP}) ve TEG maksimum gücü (P_{MPP}) aşağıdaki eşitliklerle açıklanır:

$$V_{MPP} = V_{TEG/MAX} = \frac{V_{OC}}{2} \tag{2.10}$$

$$I_{MPP} = I_{TEG/MAX} = \frac{I_{SC}}{2} \tag{2.11}$$

$$P_{MPP} = \frac{V_{OC}}{2} \times \frac{I_{SC}}{2} = \frac{V_{OC} I_{SC}}{4} \tag{2.12}$$

TEG deneyleri ile TEG'in iç direnç değeri belirlenebilir. Bu iç direnç değeri aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$R_{TEG} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \tag{2.13}$$

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

3.1.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Jeneratör

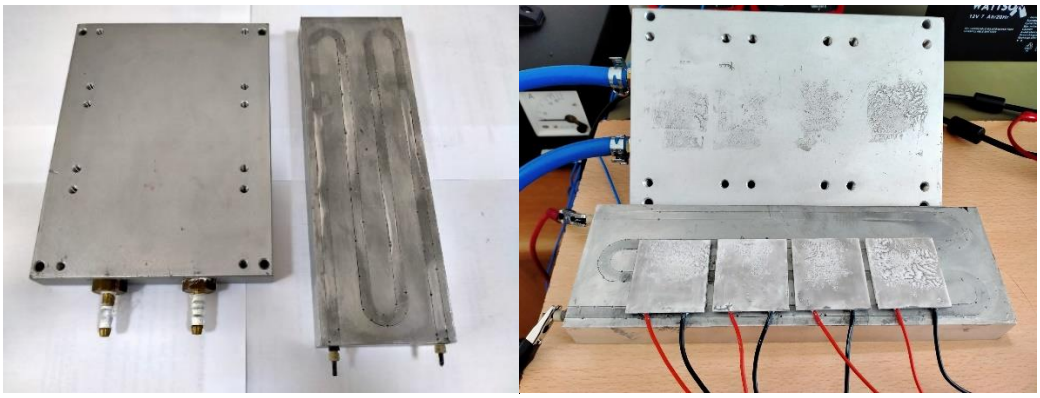
Bu çalışma kapsamında Kyroterm marka TGM-199-1.4-0.8 model TEG'ler kullanılmıştır. Bu modüller düşük sıcaklık güç üretim modülleri olarak isimlendirilmektedir. Bunların sıcak yüzey sıcaklığı 220°C değerine kadar artırılabilmesine rağmen, üretici firma en yüksek 200°C sıcak yüzeye uygulanmasının daha iyi olacağını önermiştir. Ayrıca kullanılan yüzeyin düz ve pürüzsüz olmasına ve 12–15 kg/cm^2 değerine kadar bir basınç ile TEG modüllerinin sıcak ve soğuk yüzey plakaları ile sıkıştırılmasına özen gösterilmesini istemiştir. Kyroterm firması soğuk yüzey sıcaklığını 30°C, 50°C ve 80°C olmak üzere üç farklı değerde sabit tutarak sıcak yüzey sıcaklıklarını 200°C değerine kadar kademe kademe artırılmış bir şekildeki TEG modüllerinin çıkış karakteristiklerini kullanım kitapçıklarında yayınlamıştır. Bu sıcaklıklarda %5 toleransın olabileceğini göz önünde bulundurulmasının iyi olacağını belirtmiştir. Bu TEG modülünün özellikleri ve kullanılan değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu TGM-199-1.4-0.8 modülünden benzetim çalışmasında ve uygulamada dört tane kullanılmıştır.

Tablo 3.1. TEG modülü ve TEG sistemi özellikleri

Özellikler	TGM-199-1.4-0.8	TEG Sistemi
TE çift	199	4 × 199
Termoelektrik modül	1	4
Çıkış Gücü MPP	11,44 W	4 × 11,44 W
Çıkış Gerilimi MPP	4,1 V	4 × 4,1 V
Çıkış Akımı	2,8 A	2,8 A
Açık devre gerilimi	8,19 V	4 × 8,19 V
Kısa devre akımı	5,61 A	5,61 A
İç direnç	1,46 Ω	4 × 1,46 Ω
Sıcak taraf sıcaklığı	200°C	200°C
Soğuk taraf sıcaklığı	30°C	30°C

3.1.2. Soğutma-Isıtma Blokları

TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarının sağlanması için alüminyumdan yapılan iki blok kullanılmıştır. Soğutma için kullanılan bloğun içerisine soğutma kanalları açılmıştır. Bunun ölçüleri 13 × 20 × 1,5 cm değerlerindedir. Bu soğutucunun kanallarının giriş ve çıkışlarına soğutma hortumlarının rahat takılabilmesi için iki adet giriş-çıkış bağlantısı yerleştirilmiştir. Soğutma için şehir şebeke suyu hortumlar yardımıyla soğutucuya iletilmiştir. Şehir şebeke suyunun sıcaklığı sistem tarafından ölçüldüğünde yaklaşık 20°C olmuştur. Böylece TEG'lerin soğuk taraf sıcaklığı yaklaşık 20°C değerinde kararlı bir şekilde sabit tutulabilmiştir. Bu soğutma suyunun debisinin ayarlanması musluğun oransal olarak açılıp kapatılması ile yapılmıştır. Sistemde kullanılan dört tane TEG'in sıcak yüzey sıcaklıklarının sağlanması için 8 × 24 × 2 cm ebatlarındaki alüminyum blok kullanılmıştır. Bu alüminyum bloğun içerisine kanal açılarak 50 Ω değerinde krom-nikel telden yapılma bir ısıtıcı direnç yerleştirilmiştir. Bu ısıtıcı dirence 220 V AC verildiğinde en yüksek 250°C yüzey sıcaklığı değeri elde edilmiştir. Bu TEG modülleri için üretici firmanın önerdiği sıcaklık değerinden yüksektir. Bunun düşürülmesi için 1 kVA gücünde bir oto trafosu kullanılarak ayarlı bir gerilim verilmiştir. Oto trafosunun çıkış gerilimi 140 V AC olduğunda TEG modüllerin sıcak yüzey sıcaklıklarına iletilen yüzey sıcaklığı 170°C olmuştur. Bu sıcak yüzey sıcaklık değerlerine yakın değerlerde deneylerin gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Sonuçta bu soğutma ve ısıtma bloklarında elde edilen sıcaklık farkı yaklaşık 150°C olmuştur. Şekil 3.1'de soğutma-ısıtma blokları ve TEG yerleşimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Sistemde kullanılan soğutma-ısıtma blokları ve TEG yerleşimi

3.1.3. ATmega2560 Mikrodenetleyicisi

Microchip firmasının üretmiş olduğu ATmega2560 MCU 8 bitlik kaydedicilere sahiptir. Sitemde National Instruments NI USB-6211 veri edinim kartından gelen *D* değerini 31,39 kHz değerindeki PWM değerine çevirip 9 nolu PWM çıkışından TC4420 MOSFET sürücüsüne göndermek için kullanılmıştır.

ATmega2560 düşük güç tüketen bir MCU'dur. Toplamda 135 assembler komutu ile programlanabilmektedir. Bu komutların işlenmesinin çoğunu da tek komut saykılında gerçekleştirebilmektedir. 32 tane genel amaçlı çalışma saklayıcısına sahiptir. Tüm işlemler statik çalışma ile gerçekleşir. 16 MHz değerine kadar osilatör girişine izin verir. 64 KByte değerinde bir program hafızasını barındırır. Verilerin enerji kesildiğinde silinmemesi için 4 KByte boyutunda EEPROM hafıza alanı bulundurur. Kullanıcıların tanımlayabileceği ve verilerini MCU çalışırken tutabilecekleri 8 KByte büyüklüğünde SRAM hafızaya sahiptir. 25°C değerinde 100 yıl boyunca veriler kalıcıdır. Bu sıcaklık değeri 80°C olduğunda 20 yıl boyunca verileri saklayabilmektedir. EEPROM hafıza 100 bin defa silinip yazılabilirken program hafızasına 10 bin defa program yüklenilip silinebilmektedir. Yazılan programlara kod koruması konulabilmektedir. 64 KByte değerine kadar seçenekli olarak harici hafıza takılabilmektedir.

ATmega2560 MCU çevresel donanımlar olarak da birçok donanımı içinde barındırmaktadır. İki tane 8 bitlik frekans bölme ve karşılaştırma modlarına sahip zamanlayıcı/sayıcıya sahiptir. Bunlar ek olarak yine 16 bitlik frekans bölme, karşılaştırma ve yakalama modlarına sahip zamanlayıcı/sayıcı bulundurur. Ayrı bir osilatör kullanarak gerçek zaman saati barındırır. PWM kanallarına çok ihtiyaç duyanlar için 8 tane PWM kanal çıkış birimlerini barındırır. Bu kanallardan altı ve on ikinci kanallarının çözünürlükleri 2 ve 16 bit olarak ayarlanabilmektedir. Analog girişlerin yapılması için 16 tane giriş bulundurmaktadır. Haberleşme yapmak için ise dört tane seri arayüz barındırır. Bunlara ek olarak ana veya ikinci olarak çalıştırılabilecek seri çevresel arayüz haberleşmesi sağlamaktadır. Bunlara ek olarak çeşitli kesmeleri içermektedir.

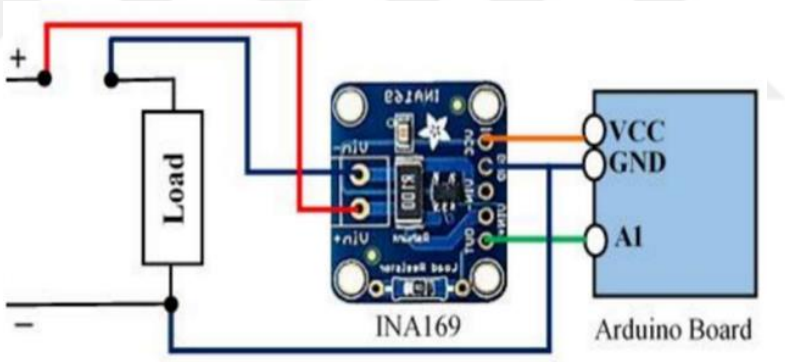
3.1.4. National Instruments NI USB-6211 Veri Edinim Kartı

NI USB-6211 National Instruments firmasının ürettiği bir veri edinim kartıdır. Taşınabilir bir şekilde sistemlerin I/O işlemlerinin yapılmasını sağlar. Bu veri edinim kartı Windows, Linux ve Mac işletim sistemleri ile LabVIEW, Measurement Studio ve LabWindows/CVI programlarının altında kullanılabilir. 16 tane analog giriş kanalı ve 2 tane analog çıkış kanalı vardır. Örnekleme hızı ve yenileme oranı 250 kS/s değerindedir. Analog saklayıcılarının çözünürlüğü 16 bittir. Bu USB-6211 cihazı 4 dijital giriş kanalı ve 4 tane dijital çıkış kanalına sahiptir. Analog girişler için 2,69 mV değerinde doğruluk sağlar. Yine bu cihaz 32 bit çözünürlüğünde 2 tane sayaca sahiptir. USB konnektörlü 2 adet 16 konumlu birleşik I/O konnektörü ile bağlantı sağlanabilir. USB 2.0 yüksek hızlı veya tam hızlı veri yolu arayüzü kullanır. Bağlantılar için çok işlevli vidalı terminaller kullanılmaktadır. Bu cihaz 4,5 V ile 5,25 V arasında bir giriş gerilimi ister. Cihazın fiziksel boyutları 16,9 × 9,4 × 3 cm'dir. Çalışma koşullarının 0-40°C arasında olması, 15 dk. ısınması ve yılda iki defa kalibrasyonunun yapılması önerilmektedir.

Bu NI USB-6211 veri edinim kartı MATLAB/Simulink yazılımından rahatlıkla verileri alıp diğer çevre birimlerine gönderebilmektedir. Bu sistemde MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan P&O algoritmasının ürettiği *D* değeri bu USB yoluyla karta iletilmiştir. Yine bu karta TEG'in ürettiği akım ve gerilim değerleri kurulan bir devre ile analog olarak taşınmış ve bu kart vasıtasıyla MATLAB/Simulink ortamına P&O algoritması için iletilmiştir. TEG'in çıkışındaki akım ve gerilim değerleri 0-5 V DC aralığında sınırlandırılarak iletilmiştir. TEG çıkış akımı için NI USB-6211 veri edinim kartının analog giriş 4 nolu kanalı, TEG çıkış gerilimi için analog giriş 5 numaralı kanalı kullanılmıştır. Ayrıca bu veri edinim kartına yükün üzerindeki akım ve gerilim değerlerinin taşınması da gerçekleştirilmiştir. Bunun için NI USB-6211 veri edinim kartının analog giriş 2 ve 3 nolu kanalları tercih edilmiştir. Bu akım ve gerilim değerleri 0–5 V DC değer aralığına indirgenerek karta ulaştırılmıştır. MATLAB/Simulink yazılımından gelen *D* değeri analog çıkış 0 kanalı ile ATmega2560 MCU'ya götürülmüştür. Bu ATmega2560 MCU ile bu değer 0–255 arasına çevrilmiştir.

3.1.5. TEG Çıkışı Akım Algılama Sensörü

TEG çıkışındaki akımın algılanması için INA169 sensörü kullanılmıştır. Bunun değerleri LM358 ile 11 kat artırılarak NI USB-6211 kartının AI4 kanalına ulaştırılmıştır. INA169 akım algılama sensörü, yüksek kenarlı, tek kutuplu, akım şönt monitörleridir. Giriş ortak mod gerilim aralığının geniş olması, yüksek hız, düşük durgun akım ve küçük SOT23 paketi içerir. Çeşitli uygulamalarda kullanıma olanak sağlar. INA169'un güç kaynağı gerilimi ve giriş ortak modu bağımsızdır. 2,7 V ile 60 V arasında değişebilir. Durağan akımının 60 µA olması güç kaynağının minimum hata ile akım ölçüm şöntünün her iki tarafına bağlanmasına olanak sağlar. Cihaz diferansiyel giriş gerilimini çıkış akımına dönüştürür. Çıkış akımı kazancı 1'den 100'ün üzerine ayarlayan harici bir yük direnci ile tekrar gerilime dönüştürülür. INA169, SOT23-5 paketinde mevcuttur ve –40°C ila +85°C endüstriyel sıcaklık aralığı için kullanılabilmektedir. Şekil 3.2'de INA169 akım algılama sensörü verilmiştir.

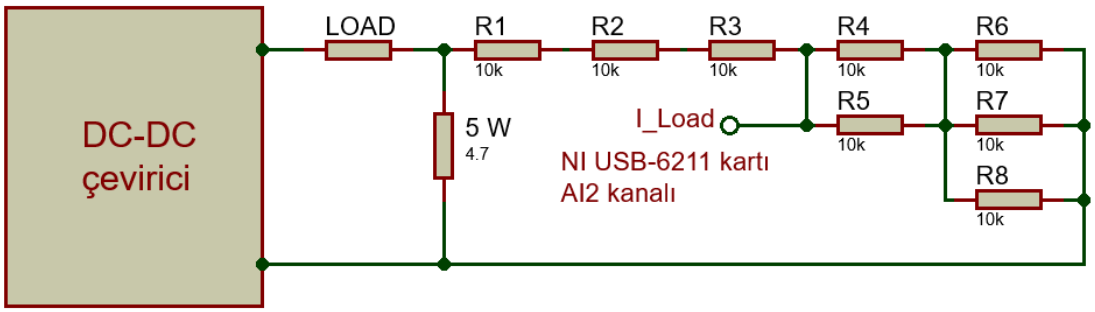


Şekil 3.2. INA169 Akım algılama sensörü

3.1.6. Çevirici Çıkışı Akım Algılama Sensörü

Çevirici çıkışındaki akımın algılanması için yüke seri bağlı gerilim bölücüler kullanılmıştır. Gerilim bölücü devresinin toplam direnci 38,3 kΩ'dur. Burada sekiz tane ¼ W gücündeki 10 kΩ direnç kullanılmıştır. Bunlardan üç tanesi paralel ve yine iki tanesi paralel bağlıdır. Bu iki paralel devre birleştirilmiş ve 8,3 kΩ elde edilmiştir. Bunlara seri üç tane 10 kΩ ilave edilerek 38,3 kΩ oluşturulmuştur. Bunların ara bağlantısı olan 8,3 kΩ üzerinden ölçüm sinyali alınmıştır.

Gerilim bölücü devre ile toplam direncin 1/4,6 oranına sahip olan 8,3 kΩ ile gerilim 4,6 kat azaltılmıştır. Bunun üzerindeki gerilim okunarak NI USB-6211 kartının AI2 kanalına ulaştırılmıştır. MATLAB/Simulink'te bunun değeri 4,6 ile çarpılmıştır. Gerilim bölücü devresinin toplam direncine paralel bağlı 5 W'lık taş direnç olan 4,7 Ω direnç takılmıştır. Gerilim bölücü ve bu taş direnç üzerinde düşen gerilim paralellikten dolayı aynıdır. Ölçüm değeri MATLAB/Simulink'te 4,6 ile çarpılarak gerçek gerilim değeri elde edilmiştir. Bu gerilim değeri 4,7 Ω üzerinde düşen değere eşittir. Bu gerilim 4,7 değerine bölünerek akım değeri bulunmuştur. Çeviricilerin çıkışındaki akım değerlerini ölçmek için kullanılan gerilim bölücü devresi Şekil 3.3'te gösterilmiştir. INA169 yüksek taraf akım sensörü gerilim kaynağının yüksek tarafına bağlanması gerektiğinden dolayı bu çeviricilerin yüksek taraflarında kullanılamamıştır. Bu DC–DC çeviricinin çıkışındaki gerilim ölçümü için kullanılan gerilim bölücü devre gösterilmemiştir.

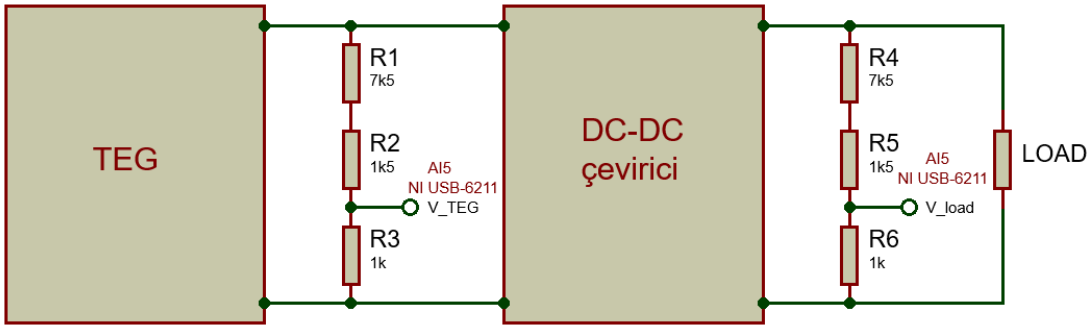


Şekil 3.3. Çeviricilerin çıkışındaki akım algılama sensörü

3.1.7. TEG Çıkışı ve Çevirici Çıkışı Gerilim Algılama Sensörleri

TEG çıkışındaki ve çevirici çıkışındaki gerilim değerlerinin belirlenmesi için iki tane gerilim bölücü devre kullanılmıştır. Bu gerilim bölücülerden biri TEG çıkışındadır. Diğer gerilim bölücü devre de DC–DC çeviricinin hemen çıkışına bağlanmıştır. Gerilim bölücü devrelerinde kullanılan dirençler ¼ W değerindedir. Gerilim bölücülerin toplam direnç değeri 10 kΩ'dur. Bunu oluşturan dirençlerin biri 1,5 kΩ, diğeri 7,5 kΩ ve sonuncusu 1 kΩ'dur. Burada TEG'in maksimum verebileceği ve çeviricilerin üreteceği maksimum gerilim değerleri 50 V değerini geçmeyecek şekilde düşünülmüştür.

TEG'in ürettiği gerilim değeri 50 V olduğunda $50\,V \times 1\,k\Omega\,/\,(7{,}5\,k\Omega + 1{,}5\,k\Omega)$ eşitliği ile NI USB-6211 kartının AI5'e ve çeviricinin ürettiği gerilim 50 V olduğunda NI USB-6211 kartının AI3 kanalına gelecek analog veri 5 V olacaktır. Şekil 3.4'te TEG çıkışındaki ve çevirici çıkışındaki gerilim değerlerinin ölçülmesi için kullanılan gerilim bölücüler gösterilmiştir.



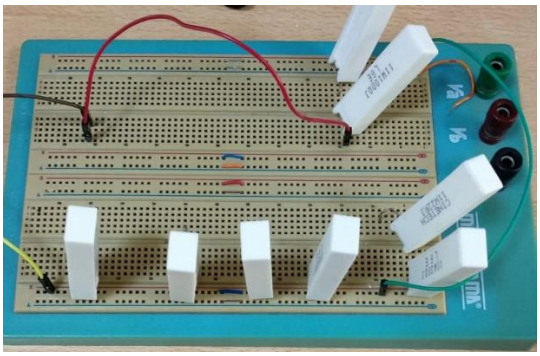
Şekil 3.4. TEG çıkışındaki ve çevirici çıkışındaki gerilim sensörleri

3.1.8. Yük Devresi

Çeviricilerin P&O MPPT algoritmasına yüklere bağlı olarak verebileceği tepkilerin belirlenmesi için farklı yüklerin bağlanması gerekmektedir. Deneylerde çeviriciler için kullanılan direnç değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. 11 W değerindeki taş dirençler ile yapılan kurulum Şekil 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Çeviriciler için kullanılan direnç değerleri

Yükselten çevirici	Alçaltan Çevirici	Alçaltan Yükselten Çevirici
4,7 Ω	1 Ω	4,7 Ω
7,6 Ω	4,7 Ω	10 Ω
10,6 Ω	7,6 Ω	15 Ω
12,5 Ω	9 Ω	23 Ω
19,7 Ω	10,6 Ω	33 Ω
31,4 Ω	31,4 Ω	55 Ω
55 Ω	55	100 Ω
104,7 Ω	104,7 Ω	-
214,7 Ω	214,7	-



Şekil 3.5. Yük devresi

3.1.9. Sıcaklık Sensörleri

İki farklı metal alaşımın uçlarının kaynatılmasıyla oluşan sıcaklık sensörü termokupl olarak ifade edilir. Termokuplun birleştirilen noktası sıcak tarafı iken açıkta kalan uçları soğuk tarafı oluşturur. Birleştirilen uç ısıtılırsa açıkta kalan soğuk uçlarda sıcaklık farkından dolayı mV mertebesinde gerilim meydana gelir. Elde edilen gerilim değeri kullanılan metal alaşımların sıcaklığa verdiği tepkiye göre değişmektedir. Termokupların maliyetleri oldukça düşük ve kullanım alanları geniştir. Bunların sıcaklık sensörü olarak tipleri ve sıcaklık değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeylerinin sıcaklıklarının belirlenmesi için BRYMEN BKP-60 ölçü aleti ile kullanılabilen iki tane nokta uçlu K tipi Termokuplun probu Şekil 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.3. Termokupl türleri ve çalıştıkları sıcaklık değerleri

Tür	Sıcaklık değeri °C (sürekli)	Sıcaklık değeri °C (ani)
K	0–1100	-180–1300
J	0–750	-180–800
N	0–1100	-270–1300
R	0–1600	-50–1700
S	0–1600	-50–1750
B	200–1700	0–1820
T	-185–300	-250–400
E	0–800	-400–900
Kromel-Au/Fe	-272–300	Uygulanabilir değil

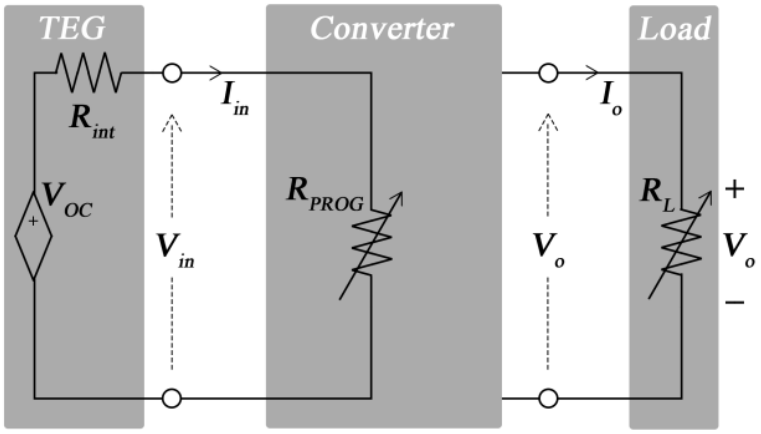


Şekil 3.6. K tipi BRYMEN BKP-60 ölçü aleti termokupl probu

3.2. Metot

3.2.1. MPPT Prensibi

TEG'lerde MPP yakalamak için güç koşullandırma yöntemleri kullanılmaktadır. Güç koşullandırma yöntemi empedans eşleştirmesini ve DC–DC dönüştürücülerin uygulamasını içerir. Empedans uyumu, TEG sisteminin toplam iç direnci (R_{TEG}) ile TEG sistemine bağlı harici yük direnci (R_L) arasındaki dengeyi sağlamayı içerir. Şekil 3.7'de MPPT prensibinin DC–DC çevirici ile kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. MPPT prensibi

MPPT, TEG atık ısı geri kazanım güç sisteminin çeşitli yükler ve sıcaklık farkları altında maksimum güç kapasitesinde çalışmasını sağlayabilen bir kontrol tekniğidir. MPPT tekniklerinin uygulanabilmesi için, kullanılacak MPPT yöntemine göre izlenecek parametreler belirlenip sürekli izlenmelidir. Yük değeri değiştikçe alınan güç değeri de değişir. Bu yük sonsuz olduğunda TEG uçlarından açık devre gerilimi ölçülür. Benzer şekilde, yük sıfır olduğunda TEG uçları kısa devre olur ve kısa devre akımı TEG'den geçer. MPPT tekniklerini uygulayabilmek için TEG'in yük direncinin bir fonksiyonu olarak gerilim-akım (V-I) ve gerilim-güç (P-V) karakteristiklerini de yorumlamak gerekir [31].

3.2.2. DC–DC Çevirici Yük Bağlantısı

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi **yükselten DC–DC çevirici** TEG ile yük arasına bağlandığında TEG'in yük direncini yükselten çevirici oluşturmaktadır. TEG'in yük direnci değeri çeviricinin iç direnç değeri karşılığıdır. Bu R_{PROG} ile ifade edilir. Yani, Şekil 3.7'deki R_{PROG} değeri çeviricinin iç direnç değerine eşittir, $R_{converter} = R_{PROG}$. Yükselten çevirici eşitliği kullanılarak aşağıdaki eşitliklere ulaşılır:

$$V_{in} = V_o(1 - D) \tag{3.1}$$

$$I_{in} = \frac{I_o}{1 - D} \tag{3.2}$$

Buradan çeviricinin iç direnç eşitliğine gidilir:

$$R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_o(1 - D)}{I_o/(1 - D)} = \frac{V_o(1 - D)^2}{I_o} = R_L(1 - D)^2 \tag{3.3}$$

Bu eşitlik yükselten çevirici için yorumlandığında, TEG'in yükünü oluşturan yükselten DC–DC çeviricinin $R_{converter}$ değerinin D değeri ile belirli bir aralıkta **programlanabilir bir şekilde** değiştirilebileceğini gösterir. $\boldsymbol{D}$ **değeri [1–0] aralığında değerler alabileceği için** $\boldsymbol{R_{converter}}$ **değeri 0 →** $\boldsymbol{R_L}$ **arasında olur.** Bu $[0,\ R_L]$ ile ifade edilir.

Yine Şekil 3.7'de görüldüğü gibi **alçaltan DC–DC çevirici** TEG ile yük arasına bağlandığında TEG'in yük direncini alçaltan çevirici oluşturacaktır. Alçaltan çevirici eşitlikleri kullanılarak kullanılabilecek yük direnci aralığı aşağıdaki gibi bulunur:

$$V_{in} = \frac{V_o}{D} \tag{3.4}$$

$$I_{in} = D I_o \tag{3.5}$$

$$R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_o/D}{I_o\, D} = \frac{V_o/I_o}{D^2} = \frac{R_L}{D^2} \tag{3.6}$$

Buna göre TEG yük direncinin oluşturan alçaltan DC–DC çeviricinin $R_{converter}$ değeri *D* ile **programlanabilir bir şekilde** değiştirilebilir. Bir diğer konu, (3.6)'daki eşitliğe dikkat edildiğinde, ***D* değeri [1–0] aralığında değer alabileceği için $R_{converter}$ değeri $R_L \rightarrow \infty$ arasında değiştirilebilir.** Bu [R_L, ∞] ile ifade edilir.

Son olarak, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi **alçaltan-yükselten DC–DC çevirici** TEG ile yük arasına bağlandığında, yine TEG'in yük direnci çevirici olur. Alçaltan–yükselten çevirici eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$V_{in} = \frac{V_o \times (1 - D)}{D} \tag{3.7}$$

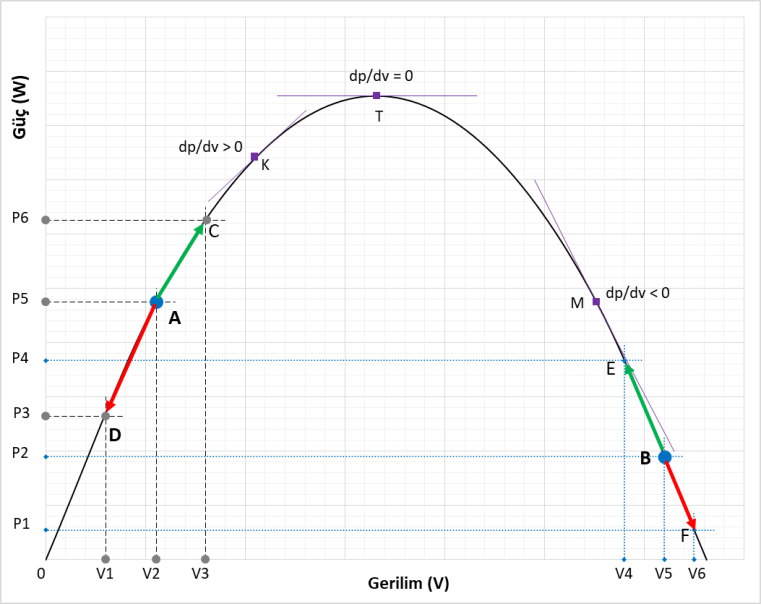
$$I_{in} = \frac{I_o \times D}{1 - D} \tag{3.8}$$

$$R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_o(1-D)/D}{I_o\, D/(1-D)} = \frac{V_o(1-D)^2}{I_o D^2} = R_L\left(\frac{1-D}{D}\right)^2 \tag{3.9}$$

Bu eşitlik alçaltan-yükselten çevirici için yorumlandığında, $R_{converter}$ değeri *D* değerinin değiştirilmesi ile belirli bir aralıkta **programlanabilir bir şekilde** değiştirilebileceği görülmektedir. Bir diğer husus, **(3.9)**'daki eşitliğe dikkat edildiğinde, ***D* değeri [1–0] aralığında değer alabileceği için $R_{converter}$ değeri $0 \rightarrow \infty$ arasında değiştirilebilir.** Bu $[0, \infty]$ ile ifade edilir.

3.2.3. P&O MPPT Algoritması

MPPT'nin gerçekleştirilmesi çevirici anahtarı *D* değerinin değiştirilmesiyle yapılır. Bu durum MPPT için Şekil 3.8'deki TEG güç grafiğinde açıklanmıştır. Gerilim-güç eğrisinde ilk önce TEG'in çalışmaya A noktasında başladığını varsayılsın. Hedef MPP olan T'nin yakalanmasıdır. A noktasındaki gerilim V2 ve güç P5'tir. Gerilim değeri arttırılıp V2'den V3 noktasına getirilirse güç değeri de P5'ten P6'ya gelir. Güç eğrisindeki yeni çalışma noktası C olur. Yine A noktasında iken gerilim değeri azaltılıp V2'den V1'e getirilirse güç değeri de P5'ten P3'e gelir. Çalışma noktası güç eğrisinde D olur ve bu da güç değerinde düşmeye işarettir. Buna göre A noktasından T noktasına çıkılabilmesi için gerilimin sürekli arttırılması gerekecektir. Diğer bir ifadeyle, gerilime göre gücün türevinin pozitif olduğu bölgede MPP'nin yakalanması için gerilim değeri arttırılmalıdır. Diğer taraftan, B noktasında çalışıldığını düşünürsek. Gerilim azaltılıp V5'ten V4'e getirilirse, güç değeri de P2'den P4'e gelir. Yeni çalışma noktası E olur ve bu da güç değerinde bir artıştır. Ama B noktasında iken gerilim değeri V5'ten V6'ya arttırılırsa güç değeri P2'den P1'e gelir güç değeri azalır ve yeni çalışma noktası güç eğrisinde F olur. Diğer bir deyişle, gerilime göre gücün türevinin negatif olduğu bölgede MPP'nin yakalanması için gerilim değeri düşürülmelidir. Bu olasılıklar Tablo 3.2'de verilmiştir.

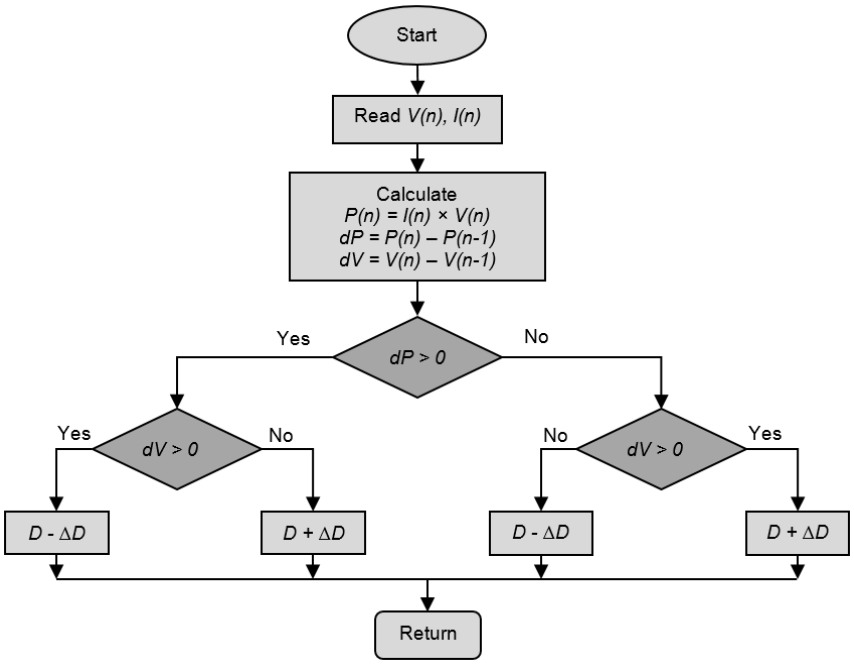


Şekil 3.8. TEG güç grafiği

Tablo 3.4. P&O MPPT algoritma olasılıkları

Gerilim değişimi ΔV	Güç değişimi ΔP	P&O MPPT yönü
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken P&O MPPT algoritması Şekil 3.9'da gösterilmiştir. İlk olarak akım ve gerilim değerleri ölçülür. İkinci olarak da güç değeri hesaplanır ve güçteki ve gerilimdeki değişim bulunur. Daha sonra güçteki değişim değeri sorgulanır. Eğer güç değişimi pozitif ise gerilim değişimi sorgulanır bu da pozitif ise D değeri ΔD kadar azaltılır. Burada gerilim değişimi negatif ise D değeri ΔD kadar arttırılır. Tekrar başa dönülür. Yeni bir ölçüm yapılarak güç değeri hesaplanır ve yeni güç ve gerilim değişimleri bulunur. Bu bulunan değerlere göre, güç değişimi negatif ise gerilim değişimi yine sorgulanır. Gerilim değişimi pozitif ise D değeri ΔD kadar arttırılır. Gerilim değişimi negatif ise D değeri ΔD kadar azaltılır. Bu süreç MPP değerine kadar devam ettirilir [8].



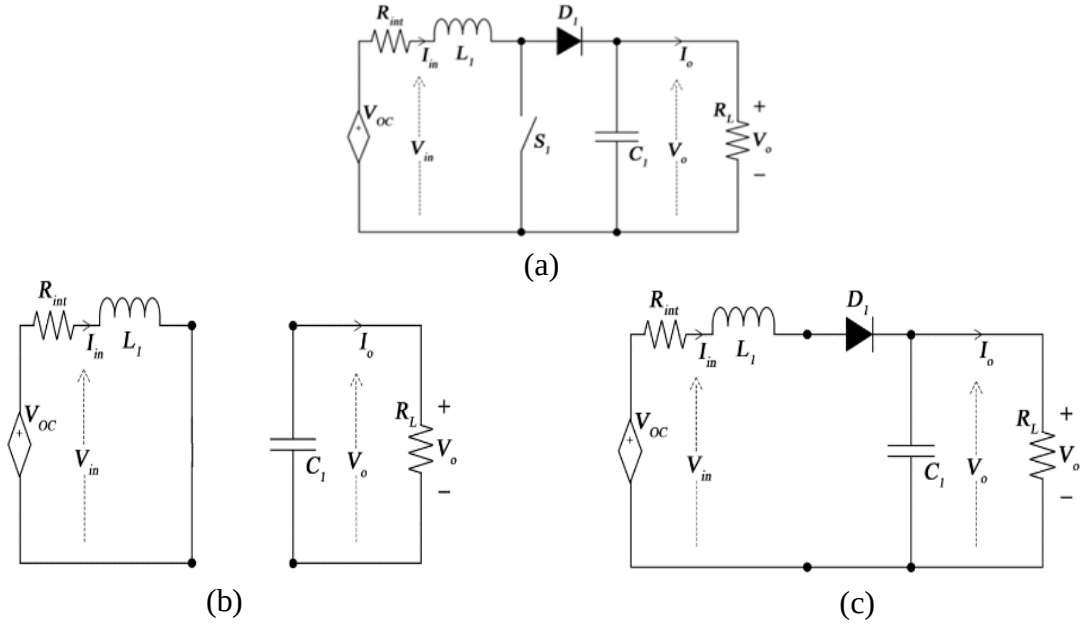
Şekil 3.9. P&O MPPT algoritması

Bu P&O algoritmasında bir dezavantaj olarak MPP noktası bulunmasına rağmen bu noktada hala süreç çalıştığı için bu nokta etrafında salınımlar meydana gelir. Büyük ΔD aralıkları, hızlı MPP yakalanmasını netice verirken MPP'de salınımların büyük olmasına neden olur. Diğer taraftan, küçük ΔD aralıkları yavaş MPP yakalanmasını netice verirken MPP salınımların büyüklüğünü azaltır. Diğer bir çekince de sıcaklık farkı değiştiğinde MPP değişecek ve bu durumda yeni MPP'nin bulunması için ayrı bir salınım da meydana gelecektir [32].

Sonuçta, MPPT'li **yükselten** DC–DC çevirici kullanıldığında, TEG'in iç direnci ile empedans eşlemesi yapabilmek için yük direncinin değeri TEG iç direncinden başlanarak **yükseltilir** ise MPPT çalışır. MPPT'li **alçaltan** DC–DC çevirici kullanıldığında, TEG'in iç direnci ile empedans eşlemesi yapabilmek için yük direncinin değeri TEG iç direncinden başlanarak **düşürülür** ise MPPT çalışır. MPPT'li **alçaltan–yükselten** DC–DC çevirici kullanıldığında, **MPPT izlemesi yük direncinin her değerinde** yapılabilir.

3.2.4. İzolesiz DC–DC Çevirici Eşitlikleri

Yükselten çevirici Şekil 3.10a'da verilmiştir. Mod1 ve Mod2 olmak üzere, Şekil 3.10b ve 3.11c'de görüldüğü gibi, iki modda incelenebilirler.



Şekil 3.10. Yükselten çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2

Mod1'de, anahtar iletimdeyken, akım kaynaktan gelip bobin ve anahtarlama elemanı üzerinden akar. Bu sayede bobin üzerinde enerji depolanmış olur.

Mod2'de, anahtar kesimde olduğunda, akım devresini anahtarlama elemanı üzerinden değil diyot ve kondansatör üzerinden tamamlar. Bobin anahtar iletimdeyken üzerinde depoladığı enerjiyi diyot üzerinden kondansatöre ve yüke aktarır. Kondansatör ise anahtar kesimdeyken dolar, anahtar iletimdeyken boşalır. Anahtarlama işlemi çok hızlı yapıldığında bobin enerji dolma ve boşalma sırasında tamamen boşalmaz ve hep yüklü olur. Bu sayede kaynak ve bobinin enerjisi kondansatöre yüklenir [22]. Yük, anahtar iletim konumundayken kondansatörden, kesim durumundayken kaynak ve bobinden beslenir. Böylece düşük seviyeli bir DC gerilim daha yüksek seviyeli bir DC gerilime dönüşmüş olur.

Yükselten çeviriciye ait hesaplamalar için (3.1), (3.2) ve (3.3) eşitlikleri ile aşağıdaki eşitlikler de kullanılarak tasarım hesaplamaları yapılmıştır. D değeri aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$D = 1 - \frac{V_{in(\min)} \times \eta}{V_o} \tag{3.10}$$

Burada, $V_{in(\min)}$ çeviricinin minimum giriş gerilimi ve η çeviricinin verimidir. Bobinin dalgalanma akımı aşağıdaki eşitlikte gösterilir:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in(\min)} \times D}{f_S \times L} \tag{3.11}$$

Burada, ΔI_L bobinin dalgalanma akımı (A), f_S anahtarlama frekansı (Hz) ve L bobinin endüktansıdır (H). Çeviricinin çıkış akımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = \frac{D \times (1-D) \times V_{in}}{2 \times L \times f_S} + (1-D) \times I_{min} \tag{3.12}$$

Çeviricinin maksimum izin verilen çıkış akımı iki farklı eşitlikle hesaplanabilir. Bunlar aşağıda verilmiştir:

$$I_{o(max)} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2}\right) \times (1-D) \tag{3.13}$$

$$I_{o(max)} = \sqrt{P_{TEG_MAX}/R_L} \tag{3.14}$$

Burada, $I_{o(max)}$ ve $I_{LIM(min)}$, sırasıyla, çeviricinin maksimum izin verilen çıkış akımı (A), izin verilen minimum anahtarlama akımıdır (A). Diğer taraftan, çeviricinin maksimum izin verilen çıkış gerilimi aşağıda verilmiştir:

$$V_{o(max)} = \sqrt{P_{TEG_MAX} \times R_L} \tag{3.15}$$

Burada, $V_{o(max)}$ çeviricinin maksimum çıkış gerilim değeridir (V). Maksimum anahtarlama akımı aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{o(max)}}{1-D} \tag{3.16}$$

Burada, $I_{SW(max)}$ maksimum anahtarlama akımıdır. Çeviricinin bobin endüktans denklemi aşağıda verilmiştir:

$$L = \frac{V_{in} \times (V_o - V_{in})}{\Delta I_L \times f_S \times V_o} \tag{3.17}$$

Burada, L bobin endüktasıdır (H). (3.17)'de ΔI_L değeri bilinmediğinden bobin değeri hesaplanamaz. Bu yüzden, aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$\Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) \times I_{o(max)} \times \frac{V_o}{V_{in}} \tag{3.18}$$

ΔI_L değeri çıkış akımının %20–%40'ı arasında dalgalanır ve bu değerler arasında alınır. Diğer taraftan yükselten çeviricide kullanılacak olan gerekli kondansatörün minimum değeri aşağıdaki eşitlikle bulunur:

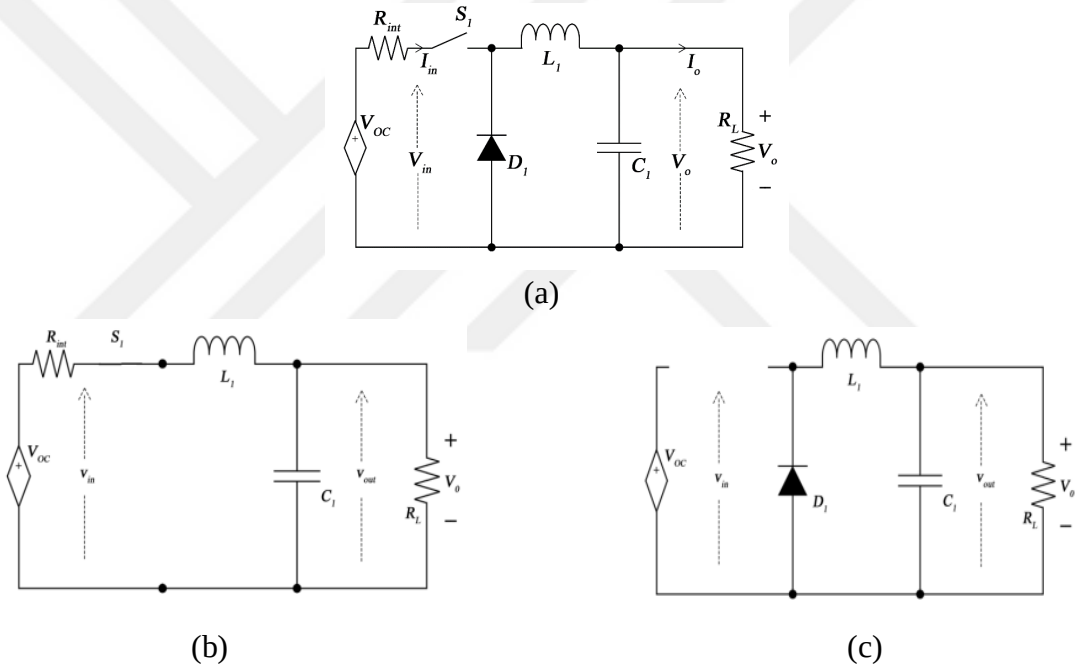
$$C_{out(min)} = \frac{I_{o(max)} \times (1-D)}{f_S \times \Delta V_o} \tag{3.19}$$

Burada, $C_{out(min)}$ çıkış kondansatörüdür (F). Yükselten çeviricinin çıkış dalgalanma gerilimi aşağıda verilmiştir:

$$\Delta V_o = ESR \times \frac{I_{o(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \tag{3.20}$$

Burada, ΔV_o ve ESR, sırasıyla, çıkış dalgalanma gerilimi (V) ve kullanılan çıkış kondansatörünün eşdeğer seri direncidir.

Alçaltan çevirici Şekil 3.11a'da verilmiştir. Mod1 ve Mod2 olmak üzere, **Şekil 3.11b** ve **3.11c**'de görüldüğü gibi, iki modda incelenir.



Şekil 3.11. Alçaltan çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2

Mod1'de anahtarlama elemanı iletimdeyken diyot kesimdedir. Bu devrede indüktör (bobin) doğrudan giriş ile çıkış arasına bağlanmıştır. Mod2'de ise anahtarlama elemanı kesimdeyken diyot iletimdedir. Anahtarın iletimde kaldığı durumdaki endüktans üzerindeki gerilim ile kesimde kaldığı durumdaki endüktans üzerindeki gerilim birbirine eşittir. Yarı iletken anahtarın kaynak ve bobin arasına seri olarak bağlanmasından dolayı giriş akımı süreksizdir. Bunun dışında, bobinin ve kapasitenin her durumda yükü beslemesinden dolayı çıkış akımı da süreklidir.

(3.4), (3.5) ve (3.6) eşitlikleri ile alçaltan çeviriciye ait çıkış gerilimi, görev doluluk oranı, çıkış akımı, maksimum çıkış akımı, maksimum anahtarlama akımı ve bobin endüktans denklemleri tasarım hesaplamalarında kullanılmış ve dönüşüm eşitlikleri aşağıda sırası ile verilmiştir:

$$(V_{in} - V_o) \times D \times T - V_o \times (1 - D) \times T = 0 \tag{3.21}$$

$$V_o - D \times V_{in} = 0 \tag{3.22}$$

$$D = \frac{V_o}{V_{in(max)\times \eta}} \tag{3.23}$$

$$I_o = I_{ort} = \frac{V_o}{R} \tag{3.24}$$

$$I_{o(max)} = (I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2}) \tag{3.25}$$

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + I_{maxout} \tag{3.26}$$

$$L = \frac{V_o \times (V_{in} - V_o)}{\Delta I_L \times f_S \times V_{in}} \tag{3.27}$$

Denklem (3.27)'de bobin değeri bilinmediği için bobin dalgalanma akımı ΔI_L hesaplanamaz. Bu nedenle bobin dalgalanma akımı aşağıdaki eşitlik ile bulunur:

$$\Delta I_L = (0.2 - 0.4) \times I_{maxout} \tag{3.28}$$

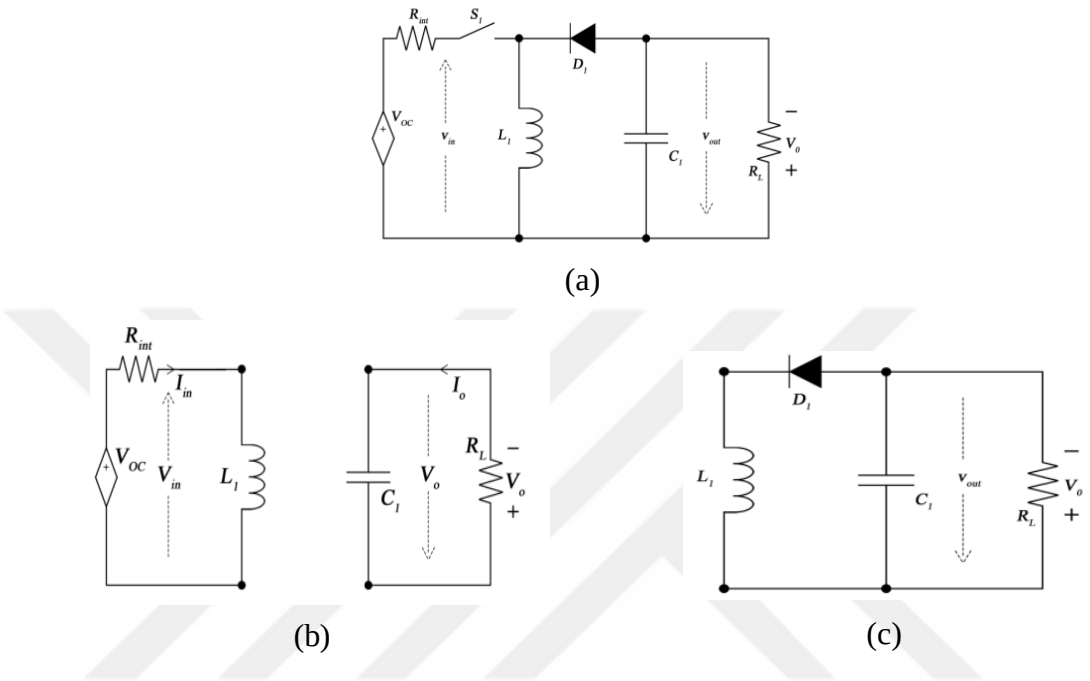
Bu akım değeri çıkış akımının %20–%40 arasındadır.

Çıkış kondansatörü ve gerilim dalgalanması aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$C_{out(min)} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_S \times \Delta V_{out}} \tag{3.29}$$

$$\Delta V_o = ESR \times \Delta I_L \quad (3.30)$$

Alçaltan-yükselten çevirici Şekil 3.12a'da verilmiştir. Mod1 ve Mod2 olmak üzere, Şekil 3.12b ve 3.12c'de görüldüğü gibi, iki modda incelenir.



Şekil 3.12. Alçaltan-yükselten çevirici (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2

Mod1'de anahtarlama elemanı iletimdeyken diyot ters gerilime maruz kaldığı için kesimdedir. Bu devrede giriş kaynak akımı anahtar ve indüktans üzerinden akar. Mod2'de anahtarlama elemanı kesimdeyken diyot iletimdedir. İndüktanstan akan akım; kapasitans, diyot ve yük üzerinden akar. İndüktansta depolanan enerji böylelikle yüke aktarılır.

Alçaltan-yükselten çevirici için (3.7), (3.8) ve (3.9) eşitlikleri ile değerler belirlenir. Sonrasında alçaltan-yükselten çeviriciye ait çıkış gerilimi, DC dönüşüm oranı, görev doluluk oranı, maksimum anahtarlama akımı, maksimum çıkış akımı, bobin endüktans değeri, ortalama bobin akımı, maksimum bobin akımı, bobin dalgalanma akımı, minimum giriş kapasitesi ve minimum çıkış kapasitesinin denklemleri aşağıda sırası ile verilmiştir:

$$V_o = \frac{-D \times V_{in}}{1 - D} \tag{3.31}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1 - D} \tag{3.32}$$

$$D = \frac{-V_o + V_F}{-V_o + V_F + V_{in(min)}} \tag{3.33}$$

$$I_{SW(max)} = (I_{maxout} \times \frac{V_{in(min)} + V_F - V_o}{V_{in(min)}}) + \frac{\mathrm{I}_{(L1)(PP)}}{2} \tag{3.34}$$

$$I_{maxout} = \left(I_{SW(min)(\mathrm{lim})} + \frac{\mathrm{I}_{(L1)(PP)}}{2}\right) \times \frac{V_{in(min)}}{V_{in(min)} + V_F - V_o} \tag{3.35}$$

$$L_1 = \frac{V_{in} \times \mathrm{D}}{I_{(L1)(PP)} \times f_{(SW)}} \tag{3.36}$$

$$I_{(L1)(AVG)} = \frac{I_O}{1 - D} \tag{3.37}$$

$$I_{(L1)M} = I_{(SW)M} = I_{(L1)(AV)} + \frac{\mathrm{I}_{(L1)(PP)}}{2} \tag{3.38}$$

$$\mathrm{I}_{(L1)(PP)} = \frac{V_{in} \times \mathrm{D}}{f_S \times L_1} \tag{3.39}$$

$$C_{in(min)} = \frac{I_{(L1)(AVG)} \times D}{f_S \times [\mathrm{v}_{in}(PP) - (\mathrm{I}_{(L1)(PP)} \times ESR_{C1})]} \tag{3.40}$$

$$C_{o(min)} = \frac{I_o \times D}{f_S \times [\mathrm{V}_o(PP) - \left(\frac{\mathrm{I}_o}{1-D} + \frac{\mathrm{I}_{(L1)(PP)}}{2}\right) \times ESR_{CO}]} \tag{3.41}$$

3.2.5. DC–DC Çeviricilerin Tasarımı

MATLAB/Simulink ortamında yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviriciler ile oluşturulan devrelerin üçünde de yük direnç değerleri 1–45 Ω arasında değiştirilmiştir. MATLAB/Simulink üzerinden alınan grafikler yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviriciler için bu yük direnç değerleri kullanılarak elde edilmiştir.

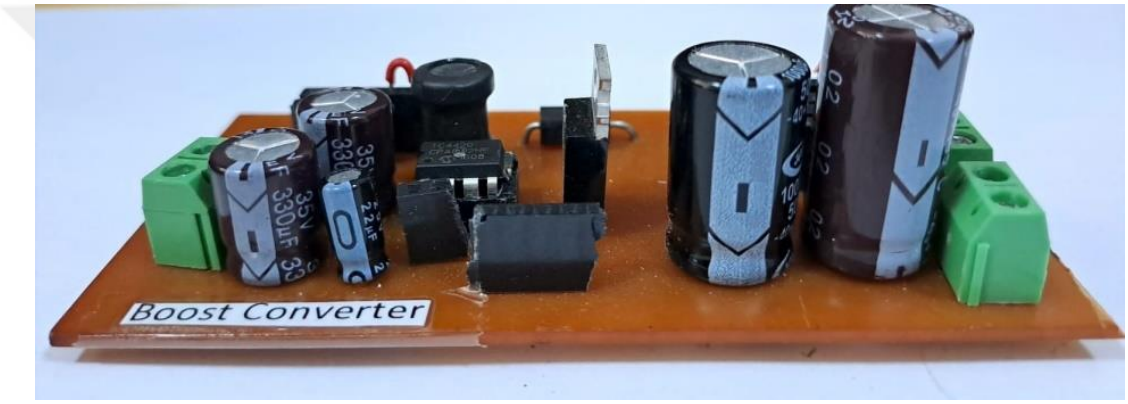
Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7 için hesaplanan değerler ve kullanılan devre elemanları kurulan deney düzenekleri için verilmiştir. Benzetim çalışmalarındaki ve deneysel uygulamalardaki yük dirençlerinin değerleri birbirinden farklıdır. Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'deki TEG verileri Tablo 3.1'den alınmıştır.

Yükselten çevirici için (3.10)–(3.20) arasındaki eşitlikler kullanılarak hesaplanan değerler Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Yükselten çevirici tasarımı

Parametre	Değer	Birim	Tanımlama
P_{TEG_MAX}	45,76	W	MPP'deki güç
P_{conv}	50	W	Çeviricinin gücü
V_{in}	16,4	V	Giriş gerilimi
R_L	4,7–214,7	Ω	Yük direnci
$I_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX}/R_L}$	A	Maksimum çıkış akımı
$V_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX} \times R_L}$	V	Maksimum çıkış gerilimi
ΔI_L	I_o'ın 30%	A	Maksimum salınım akımı
ΔV_o	V_o'ın 5%	A	MPP'deki maksimum gerilim salınımı
η	0,8		Çevirici verimi
f_s	20	kHz	Frekans
L_1	~62	µH	Bobin
C_1	~2400	µF	Kondansatör

Yükselten çevirici için yük direnç değerleri 4,7–214,7 Ω arasında değişkenlik göstermektedir. Deney düzeneği için grafikler bu yük direnç değerlerine göre elde edilmiştir. Anahtarlama elemanı olarak devrede N kanal IRFZ44N MOSFET kullanılmıştır. TC4420 ile IRFZ44N MOSFET sürülmüştür. Kurulan deney düzeneği için TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını sağlamak amacıyla TEG'in T_h değeri 185°C ve T_c değeri ise 21°C de sabit tutulmaya çalışılmıştır. Fakat akım verme miktarı arttıkça deney düzeneğinde T_h 185°C değerinden 170°C değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni yüzeylerin birbiri ile daha fazla ısı iletimine geçmesidir. Şekil 3.13'te Tablo 3.5'teki verilere göre hesaplanan ve tasarlanan yükselten çevirici verilmiştir.

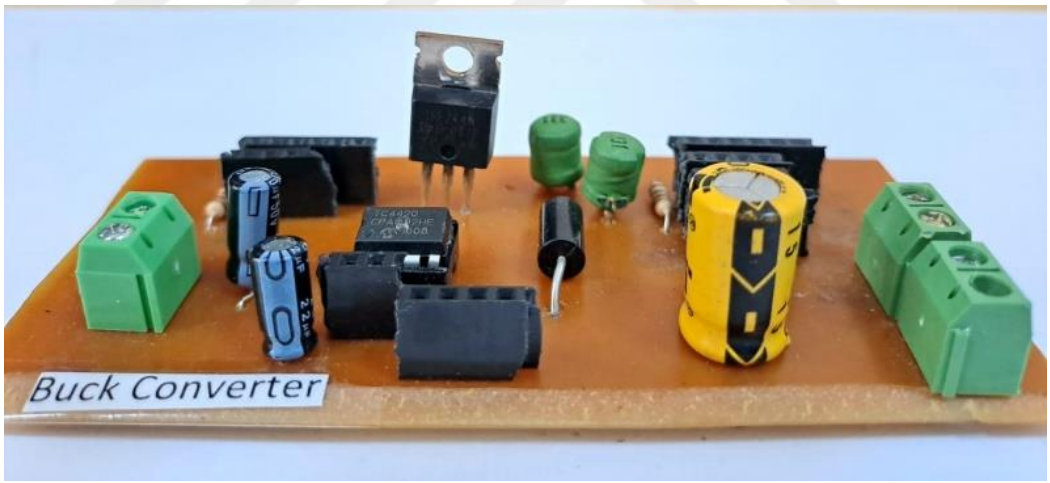


Şekil 3.13. Yükselten çevirici

Alçaltan çevirici için (3.21)–(3.30) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan değerler Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Alçaltan çevirici için kurulan deney düzeneğinde yük direnç değerleri 11,5–100 Ω arasında değişkenlik göstermektedir. Deney düzeneği için grafikler bu yük direnç değerlerine göre alınmıştır. Anahtarlama elemanı olarak devrede N kanal IRFZ44N MOSFET kullanılmıştır. TC4420 ile IRFZ44N MOSFET sürülmüştür. Kurulan deney düzeneği için TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını sağlamak amacıyla TEG'in T_h değeri 175°C ve T_c değeri ise 21°C değerinde sabit tutulmuştur. Deney düzeneğinde akım verme miktarı arttıkça TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.14'te Tablo 3.6'daki verilere göre hesaplanan ve tasarlanan alçaltan çevirici verilmiştir.

Tablo 3.6. Alçaltan çevirici tasarımı

Parametre	Değer	Birim	Tanımlama
P_{TEG_MAX}	45,76	W	MPP'deki güç
P_{conv}	50	W	Çeviricinin gücü
V_{in}	16,4	V	Giriş gerilimi
R_L	11,5–100	Ω	Yük direnci
$I_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX}/R_L}$	A	Maksimum çıkış akımı
$V_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX} \times R_L}$	V	Maksimum çıkış gerilimi
ΔI_L	I_o'ın 30%	A	Maksimum salınım akımı
ΔV_o	V_o'ın 5%	A	MPP'deki maksimum gerilim salınımı
η	0,8		Çevirici verimi
f_s	20	kHz	Frekans
L_1	680~	µH	Bobin
C_1	100~	µF	Kondansatör



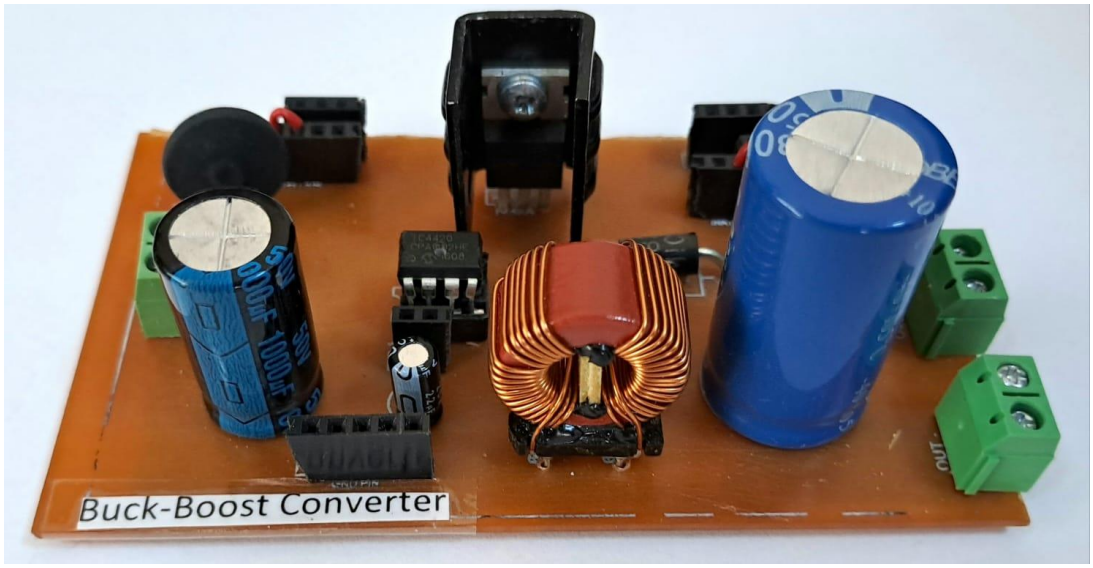
Şekil 3.14. Alçaltan çevirici

Alçaltan-yükselten çevirici için (3.31)–(3.41) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan değerler Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Alçaltan yükselten çevirici için kurulan deney düzeneğinde 10–200 Ω arasındaki yük dirençleri kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak devrede P kanal IRF4905 MOSFET kullanılmıştır. TC4420 ile IRF4905 MOSFET sürülmüştür.

Kurulan deney düzeneğinde TEG yüzey sıcaklıkları T_h değeri 160°C ve T_c 20°C değerlerinde sabit tutulmuştur. Şekil 3.15'te alçaltan–yükselten çevirici verilmiştir.

Tablo 3.7. Alçaltan-yükselten çevirici tasarımı

Parametre	Değer	Birim	Tanımlama
P_{TEG_MAX}	45,76	W	MPP'deki güç
P_{conv}	50	W	Çeviricinin gücü
V_{in}	16,4	V	Giriş gerilimi
R_L	10–200	Ω	Yük direnci
$I_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX}/R_L}$	A	Maksimum çıkış akımı
$V_{o(max)}$	$\sqrt{P_{TEG_MAX} \times R_L}$	V	Maksimum çıkış gerilimi
ΔI_L	I_o'ın 30%	A	Maksimum salınım akımı
ΔV_o	V_o'ın 5%	A	MPP'deki maksimum gerilim salınımı
η	0,8		Çevirici verimi
f_s	20	kHz	Frekans
L_1	2~	mH	Bobin
C_1	3300~	µF	Kondansatör

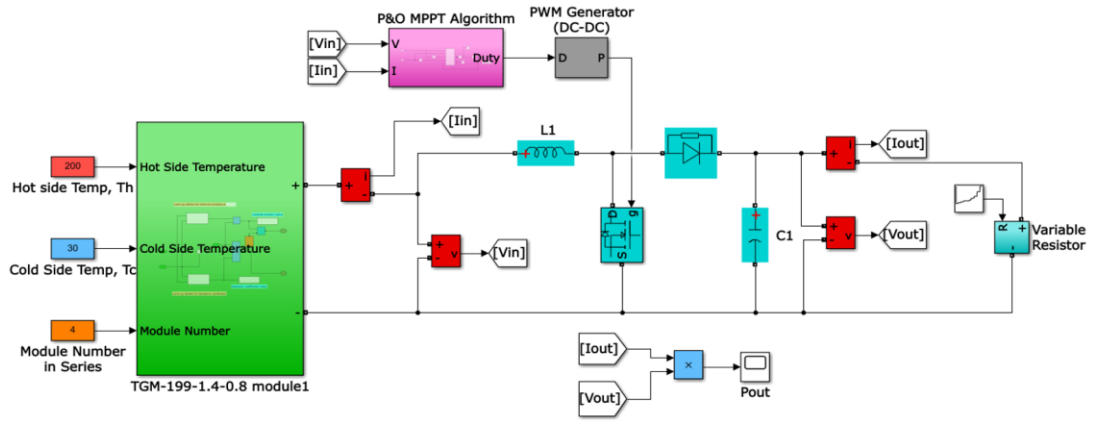


Şekil 3.15. Alçaltan–yükselten çevirici

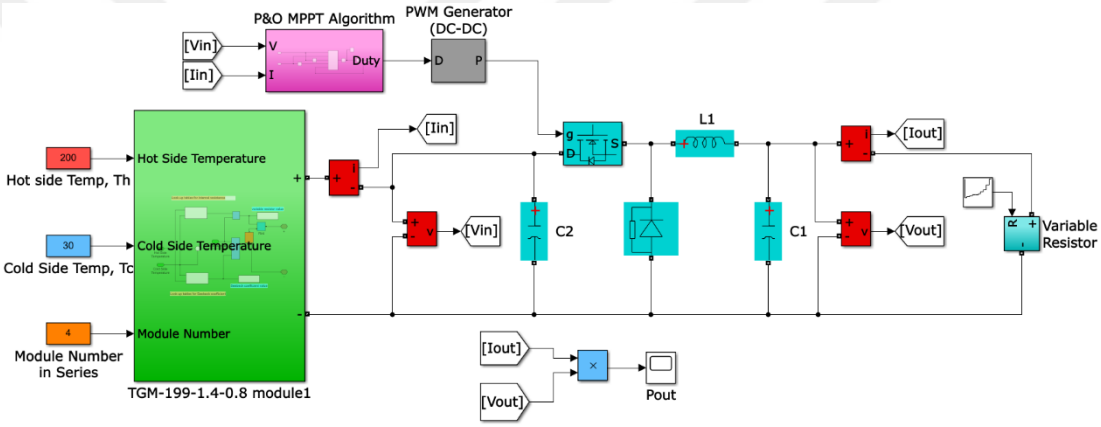
3.2.6. DC–DC Çeviricilerin MATLAB/Simulink Modellemesi

Çeviricilerin benzetimlerinin yapılması için MATLAB/Simulink ortamında bir TEG sistemi geliştirilmiştir. TEG Simulink modeli olarak iç direnci ve Seebeck katsayısı yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak değişen bir model kullanılmıştır [33]. Bu TEG sisteminde istenildiği kadar TEG modülleri seri ve paralel olarak bağlanabilmektedir. Seri ve paralel bağlantıya göre elde edilen güç miktarları değişmektedir. Uygulamalarda TEG modüllerinin sıcaklığa bağlı olarak iç direnç değerleri değiştiği gibi bu modellenen sistem ile de bu özellik TEG modeline kazandırılmıştır. İstenilen sıcaklık aralıkları giriş değerleri ile verilebilmektedir. Yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviricilerin anahtarlama elemanına gönderilen görev doluluk oranı değerleri P&O MPPT metodu ile ayarlanmıştır. Benzetim çalışmasında TEG'in ürettiği güç ve çeviriciler vasıtası ile yük direnci üzerinden elde edilen güç değerleri ölçülmüştür. MATLAB/Simulink ortamındaki TEG sisteminin iç direnci 5,84 Ω'dur. Benzetimdeki **yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviricilerin** çıkışına bağlanan yük dirençlerinin değerleri kademeli olarak 1, 3, 5,84, 7, 9, 11, 15, 20, 30 ve 45 Ω şeklinde değiştirilmiştir. Burada 5,84 değeri özel bir değerdir ve TEG iç direncine eşittir.

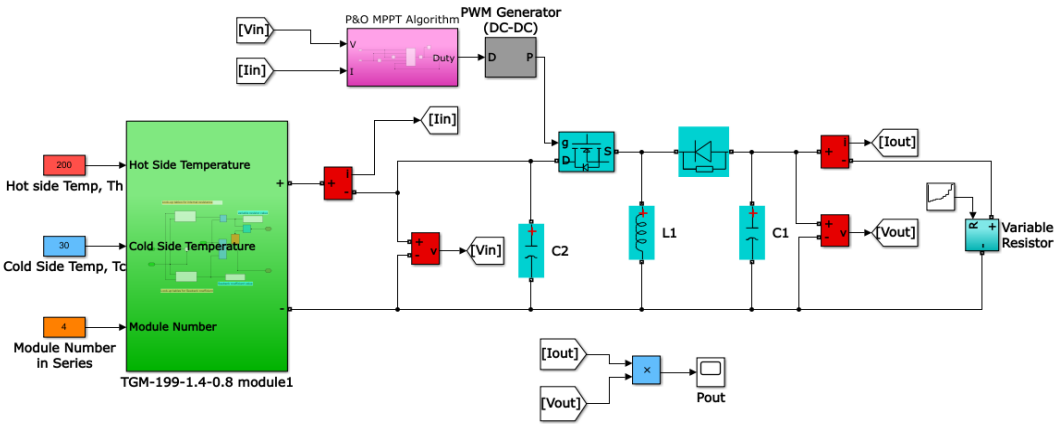
MATLAB/Simulink ortamındaki TEG sisteminin TEG'in sıcak yüzey sıcaklığı $T_h = 200°C$ ve soğuk yüzey sıcaklığı $T_C = 30°C$ değerinde sabit tutulmuştur. İstenildiğinde bu değerler rahatlıkla kullanılacak TEG'in markasına göre değiştirilebilmektedir. Maksimum ve minimum sıcaklık değerleri ayarlanabilmektedir. Daha sonra, değişen yüklere göre elde edilen çıkış gücünün değişimi her bir çevirici için gözlemlenmiştir. P&O MPPT algoritması yükün değişkenliğine bağlı olarak üretilen görev doluluk oranı D değerlerini MATLAB/Simulink ortamında düzenlemiştir. Bu sistemlerde P&O MPPT algoritması sabittir. Sıcaklık farkları sabit tutulmuştur. Ayrıca aynı sayıda TEG kullanılmıştır. Bobin ve kondansatör değerleri için tasarlanan değerler kullanılmıştır. Bu bobin ve kondansatör değerleri deneylerde de aynı tutulmuştur. Her üç benzetim çalışmasında TEG'in giriş gücü ve yükler üzerindeki güç değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de, sırasıyla, **yükselten**, **alçaltan** ve **alçaltan–yükselten** çeviriciler için yapılan benzetim devreleri verilmiştir.



Şekil 3.16. TEG sistemi, yükselten çevirici ve yük bağlantısı



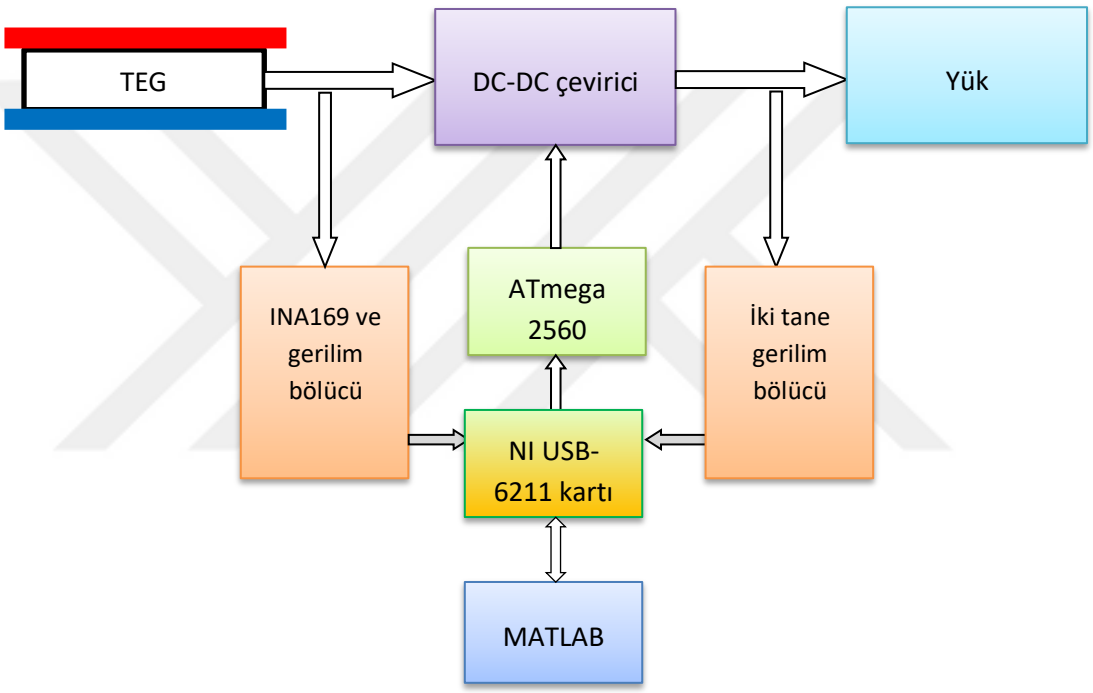
Şekil 3.17. TEG sistemi, alçaltan çevirici ve yük bağlantısı



Şekil 3.18. TEG sistemi, alçaltan-yükselten çevirici ve yük bağlantısı

3.2.7. Deneysel Çalışmadaki Verilerinin Aktarılması

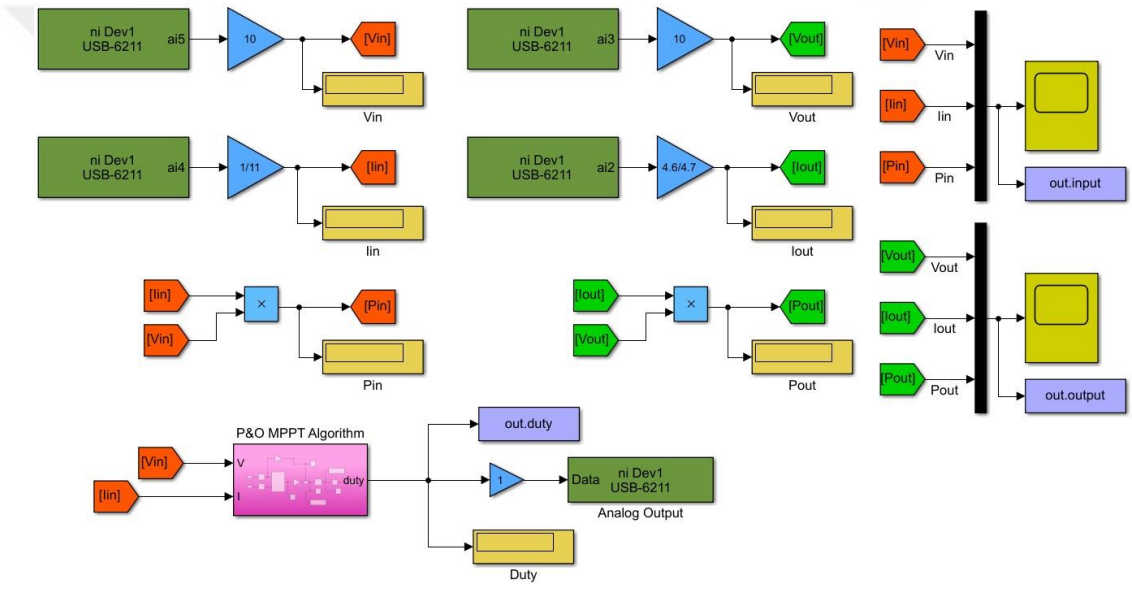
Burada P&O MPPT algoritmasının uygulanabilmesi için TEG'in çıkışındaki akım ve gerilimin belirlenmesi ve dijitale çevrilmesi gerekmektedir. Ayrıca yükün üzerindeki veya çeviricilerin çıkışındaki akım ve gerilim değerlerinin belirlenip dijitale çevrilmesi ile ne kadar güç iletiminin yapıldığı bulunabilmektedir. Bu ölçümlerin yapıldığı yerleri gösteren şema Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. TEG sistemi giriş çıkış güçlerinin ölçülmesi için blok diyagramı

TEG'in çıkışındaki akımın belirlenmesi için INA169 akım sensörü kullanılmıştır. Yine TEG'in çıkışındaki geriliminin belirlenmesi için gerilim bölücü devre kullanılmıştır. Yükün üzerindeki veya çeviricilerin çıkışındaki akım ve gerilim verilerinin belirlenmesi iki tane gerilim bölücü ile yapılmıştır. TEG çıkışındaki akım bilgisi NI USB-6211 kartının AI4 kanalına, gerilim bilgisi AI5 kanalına iletilmiştir. Yükün üzerindeki veya çeviricinin çıkışındaki gerilim NI USB-6211 kartının AI3 kanalına ve akım AI2 kanalına iletilmiştir.

National Instruments NI USB-6211 veri edinim kartı MATLAB/Simulink yazılımından rahatlıkla verileri alıp diğer çevre birimlerine gönderebilmektedir. Bu sistemde MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan P&O algoritmasının ürettiği D değeri NI USB-6211 veri edinim kartı AO0 kanalı ile ATmega2560 MCU'ya iletilmiştir. Yine bu kart TEG'in ürettiği akım ve gerilim değerleri bu veri edinim kartı ile MATLAB/Simulink ortamına P&O algoritması için taşınmıştır. Akım ve gerilim değerleri 0-5 V DC aralığında olmuştur. MATLAB/Simulink yazılımından gelen D değeri NI USB-6211 veri edinim kartı analog çıkış AO0 kanalı ile ATmega2560 MCU'ya iletilmiştir. NI USB-6211 kartında oluşturulan bağlantılar Şekil 3.20'de verilmiştir.



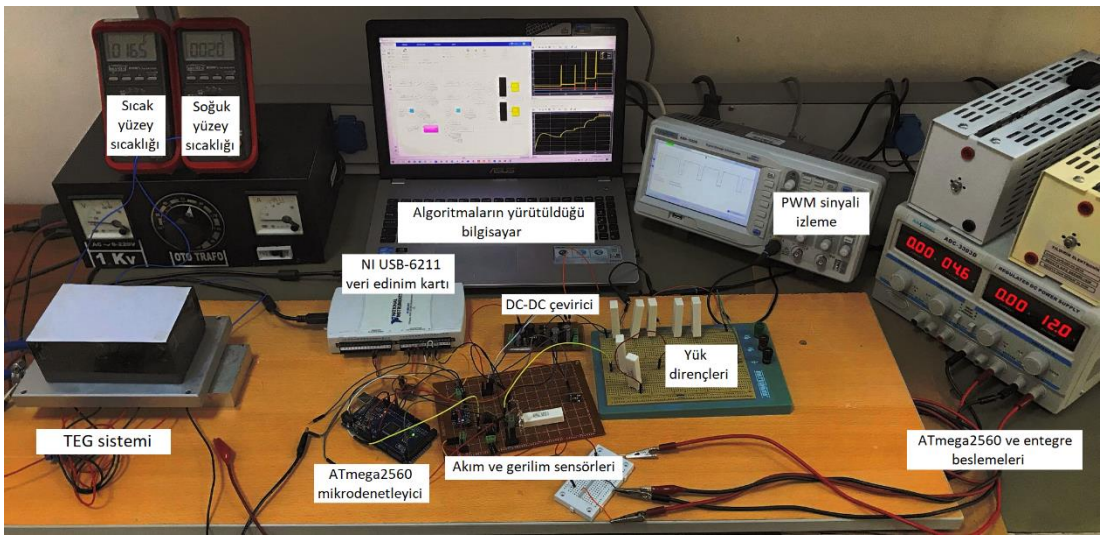
Şekil 3.20. MATLAB/Simulink NI USB-6211 kartı blok şeması

MATLAB/Simulink NI USB-6211 kartı blok şemasında veri akışları detaylıca görülmektedir. P&O MPPT algoritmasından üretilen D değeri bir kazancı ile niDev1 USB-6211'e iletilmiştir. Bu değer 0–1 V arasında bir analog değerdir. Buradan bu analog veri ATmega2560 denetleyicisine gönderilerek 31,39 kHz frekansında 8 bitlik çözünürlükteki PWM sinyaline çevrilmiştir. Bu PWM sinyali MOSFET sürücülere iletilerek MOSFET'lerin tetiklenmeleri sağlanmıştır. niDev1 USB-6211 ai5 kanalından gelen veri 10 kazancı ile çarpılarak MATLAB/Simulink'teki V_{in} oluşturulmuştur. niDev1 USB-6211 ai4 kanalından gelen veri 1/11 kazancı ile çarpılarak I_{in} girişi elde edilmiştir.

niDev1 USB-6211 ai3 ve ai2 kanallarından gelen veriler, sırasıyla, 10 ve 4,6/4,7 kazançları ile çarpılıp V_{out} ve I_{out} oluşturulmuştur. Bu değerler matematiksel hesaplamalara tabi tutulup ekrandan sürekli izlenmesi ve kayıt altına alınarak analizlerinin yapılması sağlanmıştır.

3.2.8. DC–DC Çeviricilerin Deneysel Kurulumları

Deneysel kurulumlar laboratuvar imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurulumlarda dört tane TEG'in sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarının elde edilmesi için, sırasıyla, 50 Ω değerinde krom-nikel telden yapılma bir ısıtıcı dirençli plaka ve yine soğuk suyun geçirildiği diğer bir alüminyum plaka kullanılmıştır. Bu TEG'ler birbirine seri bağlanarak gerilim değerleri yükseltilmiştir. Deneyler sırasında TEG sıcak yüzey sıcaklığı en çok 185°C ve soğuk yüzey sıcaklığı 20°C değerinde sabit tutulmuştur. Sıcak yüzey sıcaklığının sıcaklık değeri bir oto trafosu ile ayarlanarak istenilen sıcaklık değerini getirilebilmiştir. Soğuk yüzey sıcaklığının sabit tutulmasında kullanılan şebeke suyu etkili olmuştur. Bu alüminyum plakaların TEG yüzeylerine tam temaslarının sağlanması için termal macun yüzeylerine sürülmüştür. Ayrıca üzerine bir ağırlık konularak yüzey temasının artırılması sağlanmıştır. Şekil 3.21'de sırasıyla yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviriciler için deneysel kurulum verilmiştir.



Şekil 3.21. TEG sistemi deneysel kurulumu

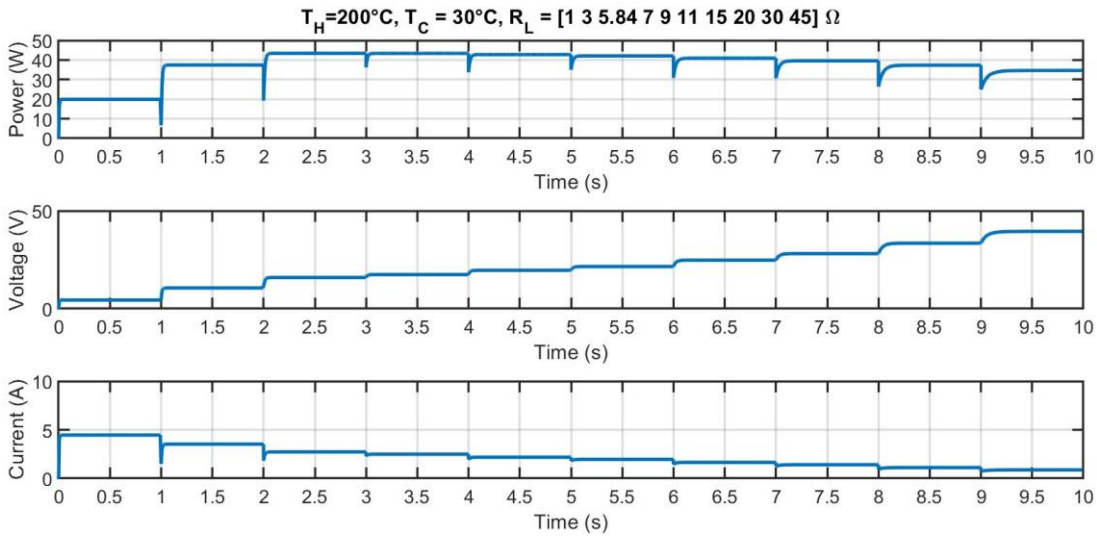
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın hem MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları hem de deneysel çalışmaları yapılmıştır. Bunlardan elde edilen veriler benzetim ve deneysel veriler olarak sunulmuştur.

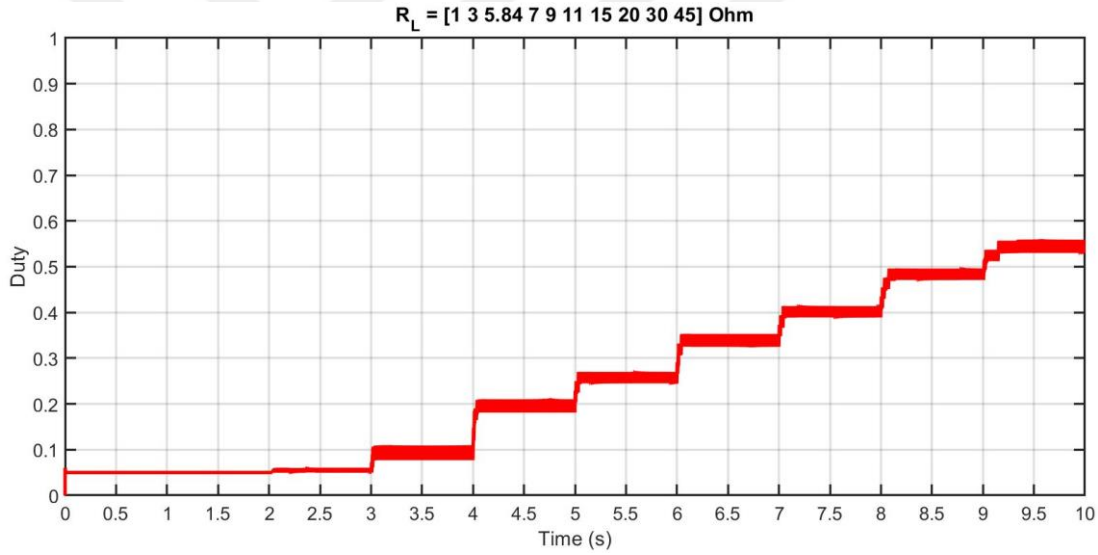
MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmasında, yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviricilerdeki TEG'in yük değerleri kademeli olarak değiştirilmiştir. Bu üç çevirici için aynı olan yük değerlerini, TEG sisteminin iç direncinin altındaki ve üstündeki değerler olarak düşünmek daha iyi olacaktır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, 5,84 **Ω**'un altındaki değerler TEG sisteminin iç direncinin altındaki, 5,84 **Ω** ve üzerindeki değerler ise TEG sisteminin iç direncinin üzerindeki değerlerdir. Ayrıca eşit olduğu $R_{int} = R_L$ durumu için de analiz yapılmıştır. Modellenen TEG sisteminin MPP değeri **45,76 W**'tır.

4.1. DC–DC Yükselten Çevirici Benzetim Sonuçları

P&O MPPT algoritması tarafından üretilen D değerinin, 5,84 **Ω**'un altındaki yük direnci değerlerinde, maksimum yük değerini elde etmek için (3.3) denklemine göre, sıfır olması gerekir. Simülasyon çalışmalarında çeviricinin devreden çıkmaması için veya sürekli devrede kalması için minimum D değeri 0,05 olarak belirlenmiştir. Yük direncinin iç dirençten küçük olduğu durumlarda, yükselten çevirici anahtarının minimum D değeri ile çalışması beklenmektedir. Yük direncinin değeri artırıldığında, iç direncin yük direncine eşit olduğu durumundan itibaren, P&O MPPT algoritmasının yükselten çevirici anahtarının D değerini artırarak sürekli $R_{int} = R_L$ durumunu koruması ve böylece sistemin MPP değerinde kalması umulmaktadır. MATLAB/Simulink benzetim ortamında yapılan, TEG'in sabit yüzey sıcaklıkları ve değişken yükler altındaki TEG sistemindeki akım, gerilim ve güçteki değişim eğrileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu yük değişimlerine bağlı olarak P&O MPPT algoritmasının MPP değerini yakalamak için ürettiği yükselten çevirici anahtarının D değerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Ayrıca, yük değişimlerine göre üretilen ortalama D değerleri Tablo 4.1'de sunulmuştur. Bu Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'nin birlikte değerlendirilmesi uygun olacaktır.



Şekil 4.1. Yük değişimine göre yükselten çevirici çıkışı ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.2. Değişken yükler altında görev doluluk oranı

Tablo 4.1. Yük değişimlerine göre üretilen ortalama ***D*** değerleri

	R_L değerleri (Ω)									
	1	3	5,84	7	9	11	15	20	30	45
D	0,05	0,05	0,06	0,097	0,199	0,27	0,348	0,414	0,496	0,547
P_{MPP}(W)	19,88	37,42	43,4	43,38	42,76	42,11	40,93	39,55	37,32	34,53
Hata (%)	56,56	18,23	5,16	5,20	6,56	7,98	10,56	13,57	18,44	24,54

TEG sisteminde yük direncinin iç dirençten küçük olduğu iki durum vardır. Bunlar 1 Ω ve 3 Ω değerleridir. Bu iki durumda D değeri 0,05 olmuştur. Empedans eşlemesi için sistem minimum D değeri ile çalışmıştır. Bu iki durumda elde edilen güç, sırasıyla; 19,88 W ve 37,42 W'tır.

Üçüncü durumda, $R_{int} = R_L$ durumu istenilen bir durumdur. P&O MPPT algoritması ortalama 0,06 D değeri üreterek empedans eşlemesi durumu korumuş ve 43,4 W ile MPP değerine ulaşmıştır.

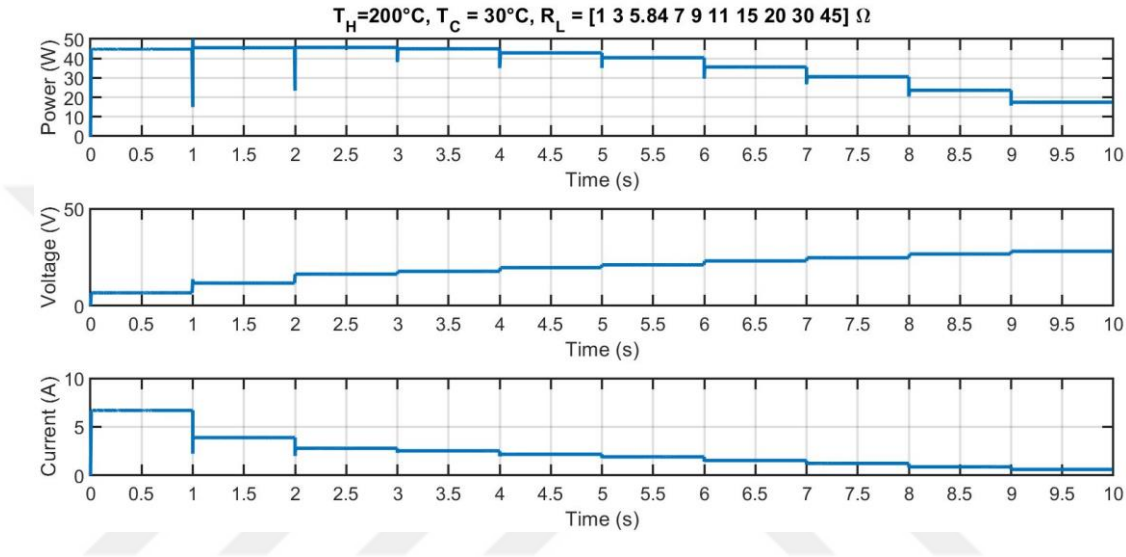
Yük direnci 7 Ω, 9 Ω, 11 Ω ve 15 Ω olarak değiştirildiğinde, P&O MPPT algoritması, sırasıyla, 0,097, 0,199, 0,27 ve 0,348 D değerlerini üreterek empedans eşlemesi yapabilmiştir. Bu durumlarda TEG sisteminden elde edilen MPP değerleri, sırasıyla; 43,38 W, 42,76 W, 42,11 W ve 40, 93 W olmuştur.

MATLAB/Simulink ortamında uygulanan kademeli TEG sistemindeki yük direncinin değeri 20 Ω, 30 Ω ve 45 Ω değerlerine değiştirildiğinde elde edilen güçler, sırasıyla; 39,55 W, 37,32 W ve 34,53 W olmuştur. Bu yük değerlerine bağlı olarak üretilen D değerleri, sırasıyla; 0,414, 0,496 ve 0,547'dir.

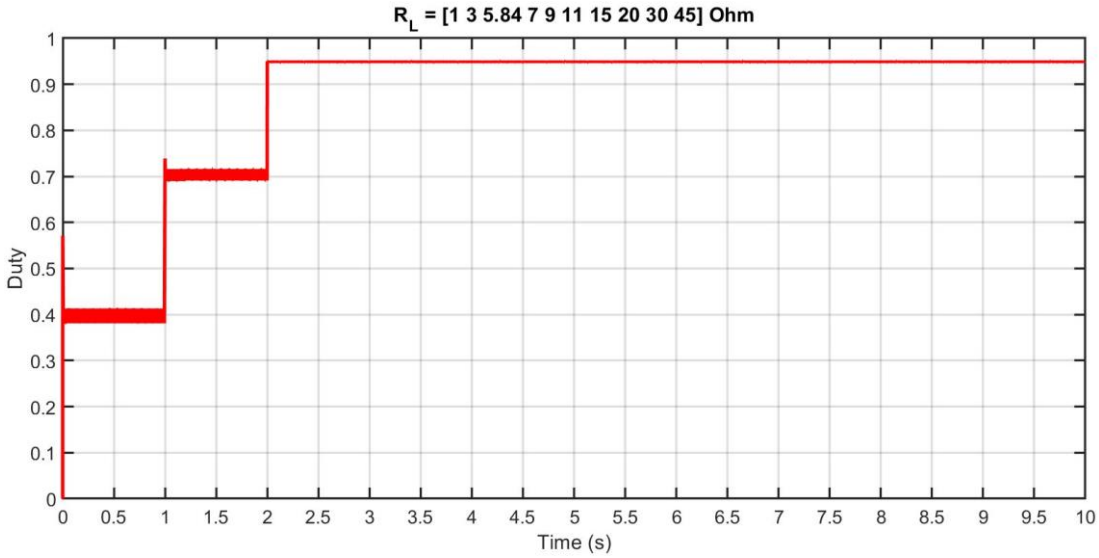
4.2. DC–DC Alçaltan Çevirici Benzetim Sonuçları

P&O MPPT algoritması tarafından üretilen D değerinin, 5,84 Ω'un üstündeki yük direnci değerlerinde, maksimum yük değerini elde etmek için (3.6) denklemine göre, sıfır olması gerekir. Simülasyon çalışmalarında çeviricinin devreden çıkmaması için veya sürekli devrede kalması için maksimum D değeri 0,95 olarak belirlenmiştir. Yük direncinin iç dirençten büyük olduğu durumlarda, alçaltan çevirici anahtarının maksimum D değeri ile çalışması beklenmektedir. Yük direncinin değeri iç dirence kadar artırıldığında alçaltan çevirici anahtarının D değerini artırdığı, iç direncin yük direncine eşit olduğu durumundan itibaren ise P&O MPPT algoritmasının alçaltan çevirici anahtarının D değerini sabit tutarak sürekli $R_{int} = R_L$ durumunu koruması ve böylece sistemin MPP değerinde kalması umulmaktadır.

TEG'in sabit yüzey sıcaklıkları ve değişken yükler altındaki TEG sistemindeki akım, gerilim ve güçteki değişim eğrileri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu yük değişimlerine bağlı olarak P&O MPPT algoritmasının MPP değerini yakalamak için ürettiği alçaltan çevirici anahtarının *D* değerinin değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Ayrıca, yük değişimlerine göre üretilen ortalama *D* değerleri Tablo 4.2'de sunulmuştur. Bu **Şekil 4.3** ve **Şekil 4.2**'nin birlikte değerlendirilmesi uygun olacaktır.



Şekil 4.3. Yük değişimine göre alçaltan çevirici çıkışı ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.4. Yük değişimine göre alçaltan çevirici görev doluluk oranı

Tablo 4.2. Yük değişimlerine göre üretilen ortalama $\boldsymbol{D}$ değerleri

$\boldsymbol{R_L}$ **değerleri (Ω)**										
	1	3	5,84	7	9	11	15	20	30	45
$\boldsymbol{D}$	0,4	0,7	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
P_{MPP}(W)	44,78	45,49	45,65	44,95	42,85	40,37	35,58	30,59	23,62	17,48
Hata (%)	2,14	0,59	0,24	1,77	6,36	11,78	22,25	33,15	48,38	61,8

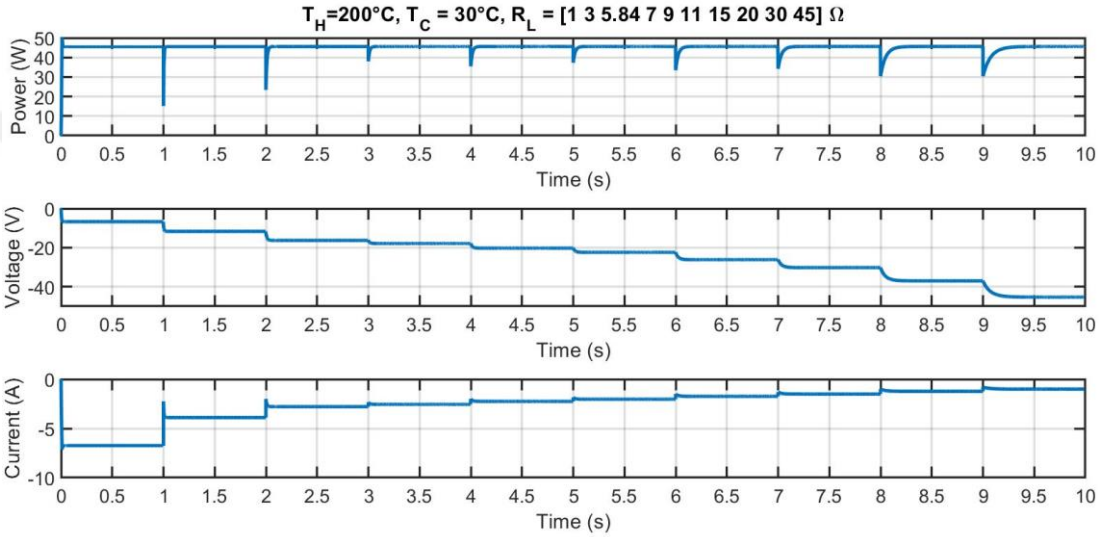
TEG sisteminde yük direncinin iç dirençten küçük olduğu iki durum vardır. Bunlar 1 Ω ve 3 Ω değerleridir. 1 Ω için D değeri 0,4 ve 3 Ω için D değeri 0,7 olarak P&O algoritması tarafından üretilmiştir. Bu iki durumda, sırasıyla, üretilen güç değerleri, 44,78 W ve 45,49 W'tır.

Üçüncü durumda, $R_{int} = R_L$ durumu istenilen bir durumdur. P&O MPPT algoritması ortalama 0,95 D değeri üreterek empedans eşlemesi durumu korumuş ve 45,65 W ile MPP değerine ulaşmıştır. Bundan sonraki 7 Ω, 9 Ω, 11 Ω, 15 Ω, 20 Ω, 30 Ω ve 45 Ω yük direnci değerlerinde, P&O MPPT algoritması hepsi için 0,95 D değerlerini üreterek empedans eşlemesi yapmaya çalışmıştır. Ancak bu durumlarda TEG sisteminden elde edilen MPP değerleri, sırasıyla; 44,95 W, 42,85 W, 40,37 W, 35,58 W, 30,59 W, 23,62 W, 17.48 W olmuştur. Bu durumlarda, dönüştürücü maksimum D değeri ile çalışmaktadır. Yük direnci değerinin arttırılması D değeri daha fazla arttırılamayacağı için, yük direnci değeri arttıkça MPP'den uzaklaşılmaktadır.

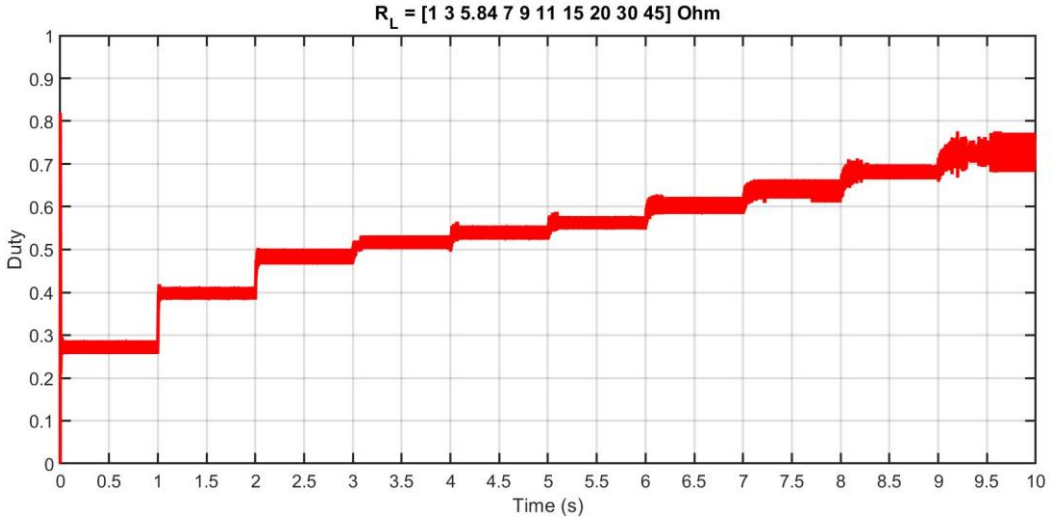
4.3. DC–DC Alçaltan-Yükselten Çevirici Benzetim Sonuçları

D değerinin, 5,84 Ω'un altındaki ve üstündeki yük dirençleri değerlerinde, maksimum yük değerini elde etmek için (3.9) denklemine göre, sıfır ile bir arasında olması gerekir. Alçaltan-yükselten çeviricinin simülasyon çalışmalarında çeviricinin devreden çıkmaması veya sürekli devrede kalması için maksimum D değeri aralığı 0,05–0,95 olarak belirlenmiştir. Yük direncinin iç dirençten küçük olduğu durumlarda alçaltan-yükselten çevirici anahtarının yükselten çeviricideki gibi minimum D değeri ile çalışması ve büyük olduğu durumlarda ise alçaltan çeviricide olduğu gibi maksimum D değeri ile çalışması gerekir. Yük direncinin değeri arttıkça D değeri P&O algoritması tarafından artırılır.

MATLAB/Simulink benzetim ortamında yapılan, TEG'in sabit yüzey sıcaklıkları ve değişken yükler altındaki TEG sistemindeki akım, gerilim ve güçteki değişim eğrileri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu yük değişimlerine bağlı olarak P&O MPPT algoritmasının MPP değerini yakalamak için ürettiği alçaltan-yükselten çevirici anahtarının *D* değerinin değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Ayrıca, yük değişimlerine göre üretilen ortalama *D* değerleri Tablo 4.3'te sunulmuştur. Değerlendirme yapılırken, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'nın birlikte ele alınması uygun olacaktır.



Şekil 4.5. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici çıkışı ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.6. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı

Tablo 4.3. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı

R_L değerleri (Ω)										
	1	3	5,84	7	9	11	15	20	30	45
D	0,27	0,40	0,48	0,52	0,54	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72
P_{MPP}(W)	45,42	45,50	45,55	45,56	45,57	45,59	45,59	45,60	45,60	45,58
Hata (%)	0,74	0,56	0,45	0,43	0,41	0,37	0,37	0,34	0,34	0,39

TEG sisteminde yük direncinin iç dirençten küçük olduğu iki durum vardır. Bunlar 1 Ω ve 3 Ω değerleridir. 1 Ω için *D* değeri 0,27 ve 3 Ω için *D* değeri 0,40 olarak P&O algoritması tarafından üretilmiştir. Bu iki durumda sırasıyla üretilen güç değerleri; 45,42 W ve 45,50 W'tır.

Üçüncü yük direnci durumunda, $R_{int} = R_L$ değeri istenilen bir değerdir. Alçaltan-yükselten çeviricinin P&O MPPT algoritması 0,48 *D* değeri üreterek empedans eşlemesi durumunu korumuş ve 45,55 W ile MPP değerine ulaşmıştır.

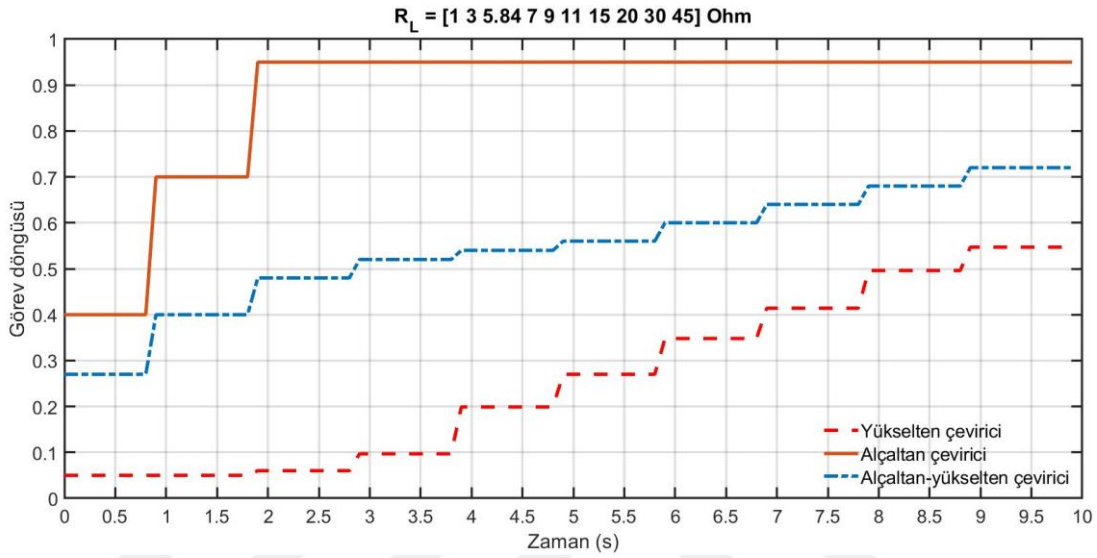
TEG sisteminde yük direncinin iç dirençten büyük olduğu 7 Ω için *D* değeri 0,52, 9 Ω için *D* değeri 0,54 ve 11 Ω için *D* değeri 0,56 olarak P&O MPPT algoritması tarafından üretilmiştir. Bu üç durumda sırasıyla üretilen güç değerleri; 45,56 W, 45,57 W ve 45,59 W'tır.

TEG sistemindeki yük direncinin iç dirençten büyük olduğu diğer 15 Ω, 20 Ω, 30 Ω ve 45 Ω yük direnci değerlerinde ise sırasıyla *D* değerleri; 0,60, 0,64, 0,68 ve 0,72 olarak alçaltan-yükselten çeviricinin P&O MPPT algoritması tarafından üretilmiştir. Bu dört durumda sırasıyla üretilen güç değerleri; 45,59 W, 45,60 W, 45,60 W ve 45,58 W'tır.

D değeri 30 Ω yük direnci değerine kadar belirli aralıklarla artırılabilirken bu değerin üzerindeki yük direnci değerlerinde *D* değerinin kararlılığı bozulmaktadır. Yük direnci arttıkça *D* değerinde dalgalanmalar artmakta ve buna bağlı olarak güç değerindeki değişimler artmaktadır. Bununla birlikte sistemin kararlı duruma ulaşma süresi artmaktadır.

4.4. DC–DC Çeviricilerin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

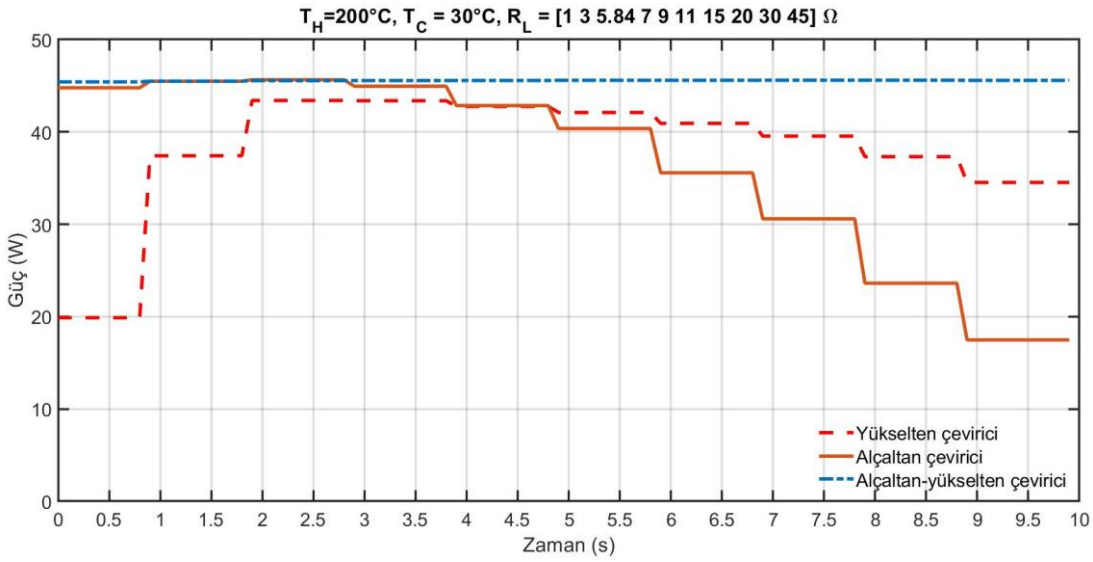
TGM–199–1.4–0.8 modülü ile yük direnci arasına sırasıyla yükselten, alçaltan ve alçaltan yükselten çevirici bağlanarak oluşturulan TEG sistemi için D değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.7'de gösterilmiş ve Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.7. Yük değişimine göre çeviricilerin görev doluluk oranı karşılaştırılması

Tablo 4.4. Yük değişimine göre çeviricilerin görev doluluk oranı karşılaştırması

	R_L değerleri (Ω)									
	1	3	5,84	7	9	11	15	20	30	45
Yükselten çevirici	0,05	0,05	0,06	0,097	0,199	0,27	0,348	0,414	0,496	0,547
Alçaltan çevirici	0,4	0,7	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Alçaltan–yükselten çevirici	0,27	0,40	0,48	0,52	0,54	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72



Şekil 4.8. Yük değişimine göre TEG sistemi için çeviricilerin güç karşılaştırması

Tablo 4.5. Yük değişimlerine göre çeviricilerin maksimum güç karşılaştırması

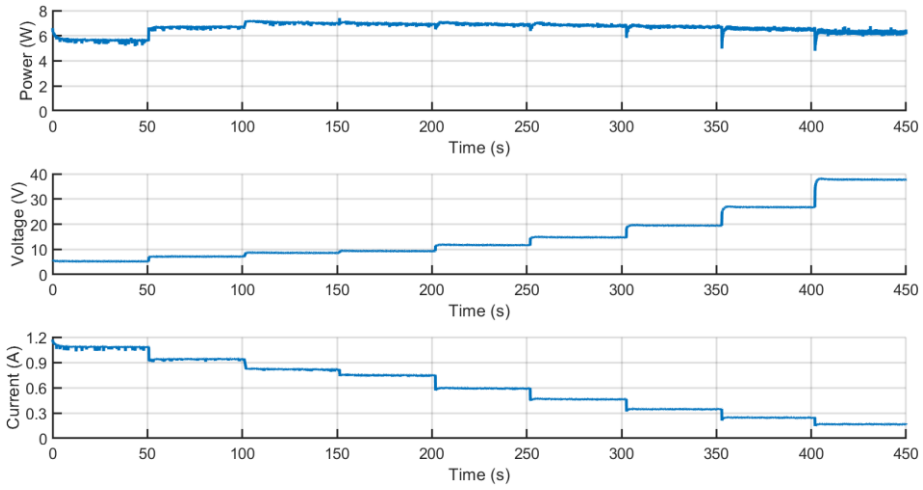
	R_L değerleri (Ω)									
	1	3	5,84	7	9	11	15	20	30	45
Yükselten çevirici	19,88	37,42	43,4	43,38	42,76	42,11	40,93	39,55	37,32	34,53
Alçaltan çevirici	44,78	45,49	45,65	44,95	42,85	40,37	35,58	30,59	23,62	17,48
Alçaltan-yükselten çevirici	45,42	45,50	45,55	45,56	45,57	45,59	45,59	45,60	45,60	45,58

Yükselten çeviricide D değeri; çeviriciye bağlanan yük direnci değeri TEG iç direnci değerine kadar olan değerlerde 0,05 olarak sabit kalmıştır. Bu TEG iç direnci değerinin üzerindeki yük direnci değişimlerinde kademeli olarak artmıştır. Alçaltan çeviricide ise yükselten çeviricideki durumun tam tersi gerçeklemiştir. Alçaltan–yükselten çeviricide yük direnci ile sürekli değişim göstermiştir. Bir başka ifade ile, yükselten çevirici TEG iç direnci ve bu değerden büyük direnç değerlerinde MPPT yapabilmiştir. Alçaltan çevirici TEG iç direncine kadar olan yük direnci değerlerinde MPPT yapabilmiştir. Bu TEG direncinin üzerindeki değerlerde MPPT yapamamıştır. Son olarak alçaltan–yükselten çevirici yük direncinin her durumunda MPPT yapabilmiştir.

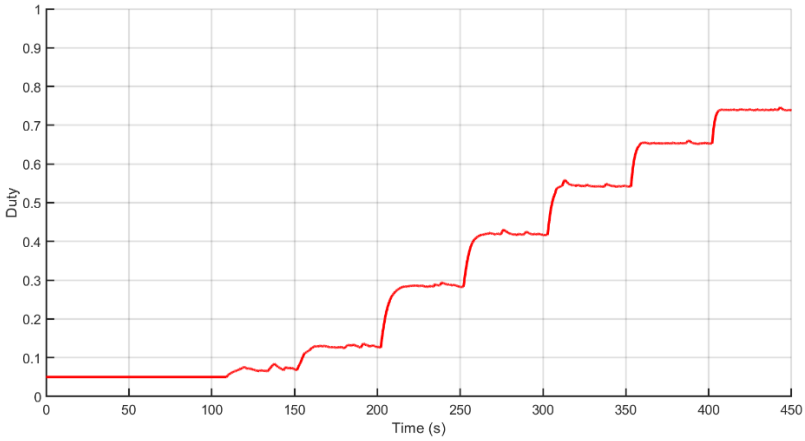
4.5. DC–DC Yükselten Çevirici Deney Sonuçları

İzolesiz DC–DC yükselten çeviricinin P&O MPPT algoritmasına değişken yükler için verdiği tepkiler belirlenmiştir. Deneyde dört tane TEG kullanılmıştır. Bu TEG'lerin sıcak yüzey sıcaklıkları 185°C değerine ve soğuk yüzey sıcaklıkları 21°C değerine getirilmiştir. Bu dörtlü TEG sisteminin toplam iç direnç değerinin belirlenmesi için ilk olarak TEG uçları kısa devre edilmiştir. Bu durumda kısa devre akımı 2,17 A ölçülmüştür. Yine TEG uçları açık devre edilerek açık devre gerilimi 21,14 V olarak belirlenmiştir. Bu iki değer kullanılarak (2.12) eşitliğinden TEG'den elde edilebilecek maksimum güç 11,46 W olarak belirlenmiştir. Yine bu verilere göre TEG'in iç direnç değeri (2.13) eşitliğinden 9,74 Ω olarak bulunmuştur. Deneysel sistemde TEG uçları kısa devre edildiğinde veya kısa devreye yakın yük dirençleri kullanıldığında bu sıcaklık farkının tam olarak korunması mümkün olmamıştır. Bunun nedeni TEG yüzeyleri arasındaki sıcaklık geçişlerinin artmasıdır. Bu durum elde edilecek güç değerinde belirli bir azalmaya neden olmuştur. Kısa devre edildiğinde veya küçük direnç değerlerinde sıcaklık farkındaki azalma yaklaşık 15°C olmuştur.

Şekil 4.9'da değişken yükler altındaki yükselten çeviricili TEG sistemi akım, gerim ve güçteki değişim eğrileri verilmiştir. Şekil 4.10'da görev doluluk oranı gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Yük değişimine göre yükselten çevirici ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.10. Yük değişimine göre yükselten çevirici görev doluluk oranı

Yükselten çeviricide kullanılan yük dirençleri 4,7–214,7 Ω aralığındadır. Bu aralıkta 4,7 Ω, 7,6 Ω, 10,6 Ω, 12,5 Ω, 19,7 Ω, 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω direnç değerleri vardır. P&O güç takibi TEG iç direnç değeri 9,74 Ω değerine kadar tam yapılamamıştır. Bu değer ve yukarısındaki yük değerlerinde başarılı bir şekilde MPPT gerçekleştirilebilmiştir. Ama 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω gibi çok yüksek yük direnci değerlerine çıkıldığında yine MPPT değerinden kaymalar salınımlar artmıştır.

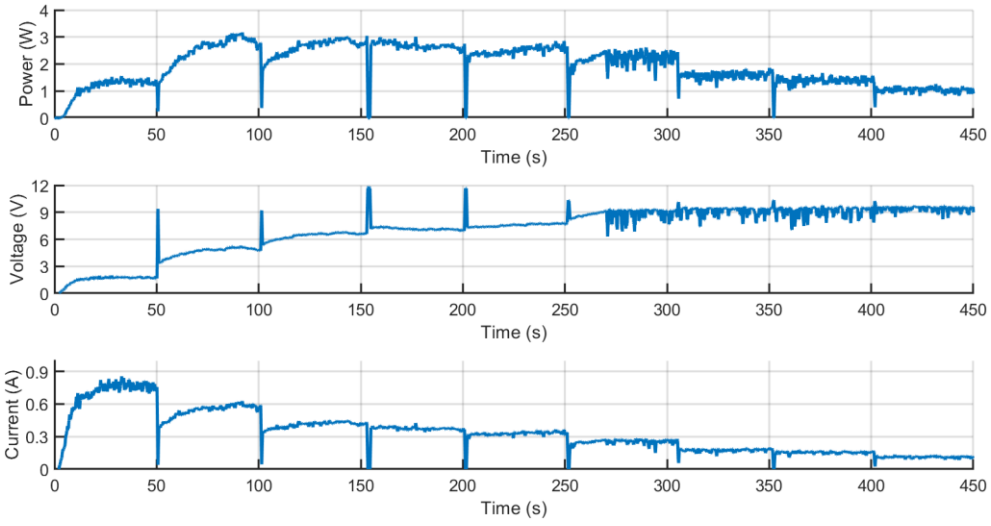
Bu değerler TEG iç direncinin üç katı değerinden sonraki yük değerlerine karşılık gelmektedir. Deneysel verilerdeki anahtarlama kayıpları ve diğer kayıplar nedeniyle tam MPP noktasına ulaşma verilere dikkat edildiğinde gerçekleşmemiştir. Ama yükselten çeviricinin tipik MPPT eğrileri değişken yükler altında elde edilmiştir.

Yükselten çeviricide TEG iç direncine kadar olan değerlerde görev doluluk oranı en düşük değerde MPPT algoritması tarafından tutulmuştur. Bu değer yaklaşık 0,05 gibi bir değerde kalmıştır. 10,6 Ω değerinde sisteme yük bağlandığında görev doluluk oranında artma meydana gelmiş ve bu değer yaklaşık 0,075 olmuştur. Bu değer iç direnç değerine çok yakın bir değer olduğu için fazla bir görev doluluk oranı artışı olmamıştır. Bunun üzerindeki değerlerde MPP değerini yakalamak için P&O algoritması görev doluluk oranını belirgin bir şekilde benzetim çalışmalarında olduğu gibi artırmıştır.

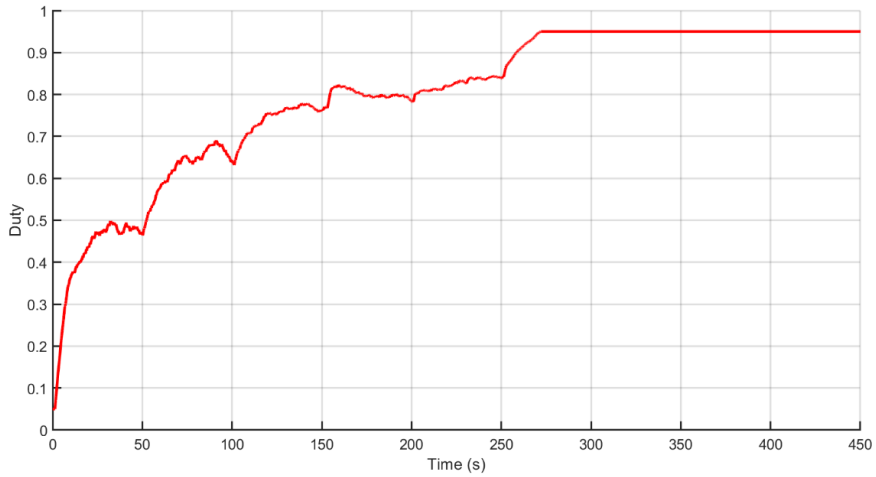
4.6. DC–DC Alçaltan Çevirici Deney Sonuçları

İzolesiz DC–DC alçaltan çeviricinin P&O MPPT algoritmasına değişken yükler için verdiği tepkiler belirlenmiştir. Deneyde dört tane TEG kullanılmıştır. Bu TEG'lerin sıcak yüzey sıcaklıkları 175°C değerine ve soğuk yüzey sıcaklıkları 21°C değerine getirilmiştir. Bu dörtlü TEG sisteminin toplam iç direnç değerinin belirlenmesi için ilk olarak TEG uçları kısa devre edilmiştir. Bu durumda kısa devre akımı 2,1 A ölçülmüştür. Yine TEG uçları açık devre edilerek açık devre gerilimi 19,44 V olarak belirlenmiştir. Bu iki değer kullanılarak (2.12) eşitliğinden TEG'den elde edilebilecek maksimum güç 10,21 W olarak belirlenmiştir. Yine bu verilere göre TEG'in iç direnç değeri (2.13) eşitliğinden 9,25 Ω olarak bulunmuştur. Yine bu deney düzeneğinde küçük dirençler yük direnci olarak kullanıldığında TEG yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkında 15°C gibi belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir.

Şekil 4.11'de değişken yükler altındaki alçaltan çeviricili TEG sistemi akım, gerim ve güçteki değişim eğrileri verilmiştir. Şekil 4.12'de görev doluluk oranı gösterilmiştir. Alçaltan çevirici deneylerinde çeviricinin giriş kondansatörü kullanıldığında çıkış verisi alınamamıştır. Bu kondansatör devreden çıkarılarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda da alınan güç verilerinde oldukça büyük salınımlar olmuştur.



Şekil 4.11. Yük değişimine göre alçaltan çevirici ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.12. Yük değişimine göre alçaltan çevirici görev doluluk oranı

Alçaltan çeviricide kullanılan yük dirençleri 1–214,7 Ω aralığında dokuz kademede uygulanmıştır. Bu aralıkta 1 Ω, 4,7 Ω, 7,6 Ω, 9 Ω, 10,6 Ω, 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω direnç değerleri vardır. Yükselten çeviricide P&O güç takibi yük direnci 1 Ω olduğunda tam yapılamamıştır. Bu değer TEG iç direncinde oldukça düşük bir değerdedir. Yük direnç değerleri 4,7 Ω, 7,6 Ω, 9 Ω ve 10,6 Ω olduğunda P&O güç takibi yapabilmiştir. 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω yük direnci değerlerinde TEG iç direncinden çok uzak değerlerde olduğu için P&O'nun güç takibi yapması oldukça zorlaşmıştır.

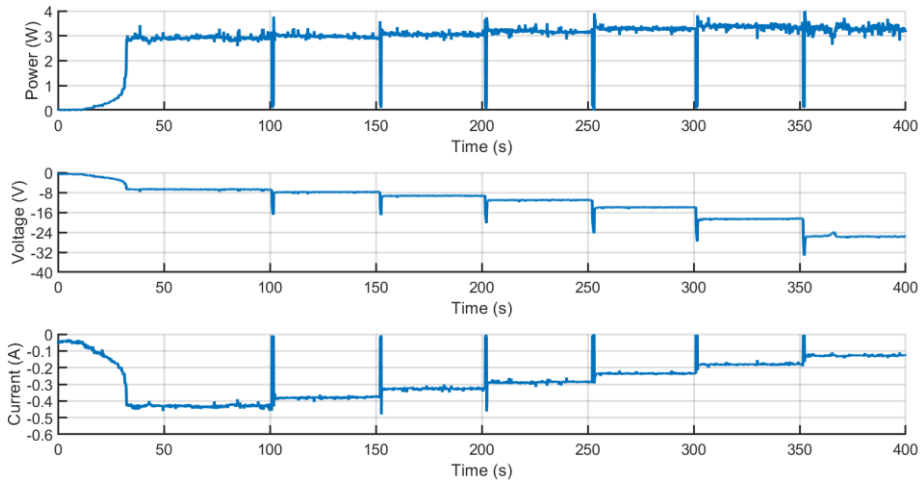
Bu değerlerde elde edilen güç değerlerinde salınımlar çok belirgin bir şekilde artmıştır. Deneysel verilerdeki anahtarlama kayıpları ve diğer kayıplar nedeniyle tam MPP noktasına ulaşma verilere dikkat edildiğinde gerçekleşmemiştir. Ama alçaltan çeviricinin tipik MPPT eğrileri değişken yükler altında elde edilmiştir.

Alçaltan çeviricide TEG iç direncine kadar olan değerlerde görev doluluk oranı en düşük değerden başlayarak MPPT yapmak için bir anda yükselmiştir. 1 Ω yük değerinde görev doluluk oranı 0,5 değerine gelmiştir. 4,7 Ω, 7,6 Ω, 9 Ω ve 10,6 Ω yük dirençlerinde görev doluluk oranı MPPT yapmak için artmıştır. 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω yük direnci değerlerinde görev doluluk oranı maksimum değerinde sabit kalmıştır. Bu verilerin karakteristiği ile benzetim karakteristikleri uyuşmaktadır.

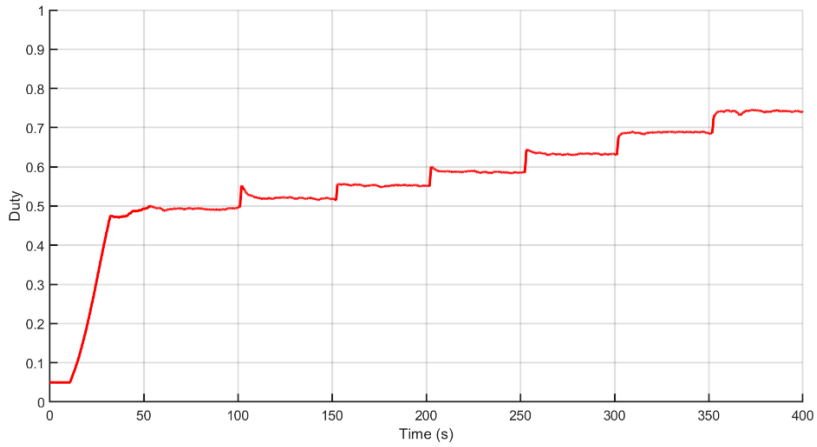
4.7. DC–DC Alçaltan-Yükselten Çevirici Deney Sonuçları

İzolesiz DC–DC alçaltan–yükselten çeviricinin P&O MPPT algoritmasına değişken yükler için verdiği tepkiler belirlenmiştir. Deneyde dört tane TEG kullanılmıştır. Bu TEG'lerin sıcak yüzey sıcaklıkları 160°C değerine ve soğuk yüzey sıcaklıkları 20°C değerine getirilmiştir. Bu sıcaklık değerlerindeki dörtlü TEG sisteminin toplam iç direnç değerinin belirlenmesi için ilk olarak TEG uçları kısa devre edilmiştir. Bu durumda kısa devre akımı 1,8 A ölçülmüştür. Yine TEG uçları açık devre edilerek açık devre gerilimi 15,23 V olarak belirlenmiştir. Bu iki değer kullanılarak (2.12) eşitliğinden TEG'den elde edilebilecek maksimum güç 6,85 W olarak belirlenmiştir. Yine bu verilere göre TEG'in iç direnç değeri (2.13) eşitliğinden 8,46 Ω olarak bulunmuştur. Alçaltan, yükselten ve alçaltan–yükselten çeviricilerde sıcaklık farkının azalması TEG iç direncinin de azalmasını netice vermiştir.

Şekil 4.13'te değişken yükler altındaki alçaltan–yükselten çeviricili TEG sistemi akım, gerim ve güçteki değişim eğrileri verilmiştir. Şekil 4.13'te görev doluluk oranı gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici ***I***, ***V*** ve ***P*** değişimi



Şekil 4.14. Yük değişimine göre alçaltan-yükselten çevirici görev doluluk oranı

Alçaltan–yükselten çeviricide kullanılan yük dirençleri 4,7–100 Ω aralığında sekiz kademede uygulanmıştır. Bu aralıkta 4,7 Ω, 10 Ω, 15 Ω, 23 Ω, 33 Ω, 55 Ω ve 100 Ω direnç değerleri vardır. Alçaltan–yükselten çeviricide P&O güç takibi yük direnci 4,7 Ω değerinden başlamıştır. Yük direnç değerleri 10 Ω, 15 Ω, 23 Ω, 33 Ω, 55 Ω ve 100 Ω olduğunda P&O güç takibi yapabilmiştir. TEG'den elde edilen MPPT güç değeri 3 W civarında olmuştur. Bu değer elde edilebilecek MPP değerinden biraz uzaktır. Bunun nedeni TEG sisteminde ve çeviricide meydana gelen anahtarlama kayıplarıdır. Ama karakteristik eğriler olarak düşünüldüğünde alçaltan-yükselten çevirici her yük direnci değerinde MPPT yapabilmiştir.

Alçaltan–yükselten çeviricide 4.7 Ω yük direnci değerinde görev doluluk oranı hızlı bir şekilde MPPT yapmak için P&O algoritması tarafından artırılmıştır. Bu değerden sonraki yedi kademe yük direnci değişimlerinde P&O algoritması görev doluluk oranını belirgin artışlarla yükseltmeye başlamıştır. En yüksek yük direnci değerinde bu görev doluluk oranı 0,7 değerine gelmiştir. Alçaltan–yükselten çeviricideki giril kondansatörü yüksek seçildiğinde güç çıkışında çok düşme meydana gelmektedir. Düşük seçildiğinde salınımlar artmaktadır. 470 µF kondansatör değerinde daha iyi çıkış sonuçları elde edilebilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu çalışmada, izolesiz DC–DC yükselten, alçaltan ve alçaltan–yükselten çeviricilerin P&O MPPT algoritması kullanıldığında yüke bağlı MPPT davranışları MATLAB/Simulink benzetim çalışması ve deneysel olarak araştırılmıştır. İlk olarak yükselten, alçaltan ve yükselten–alçaltan çeviricilerin MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda daha önceden modellenen TEG modeli kullanılmıştır. Yazılan P&O MPPT algoritmaları bu üç çeviricide sırası ile değişken yükler kullanılarak bu yüklerdeki MPPT davranışları belirlenmiştir. Sonrasında dört tane TGM-199-1.4-0.8 TEG modülü kullanılarak oluşturulan deneysel düzenek yardımıyla bu izolesiz P&O MPPT algoritmalı DC–DC çeviricilerin yüke bağlı davranışları incelenmiştir.

MATLAB/Simulink ortamında TEG sisteminin verileri ilk olarak P&O MPPT algoritmalı **yükselten** çeviriciye girilmiştir. Yük bağlanmadığında 170°C sıcaklık farkında TEG sisteminin maksimum gücü 45,76 W ve iç direnci 5,84 Ω değerlerindedir. Bu TEG sistemine bağlanan yükselten çeviricinin çıkışına 1 Ω, 3 Ω, 5,84 Ω, 7 Ω, 9 Ω, 11 Ω, 15 Ω, 20 Ω, 30 Ω ve 45 Ω değerlerindeki değişken yükler sırası ile belirli aralıklarla bağlanmıştır. Bu yükselten çevirici TEG iç direnci ve üzerindeki değerlerde MPPT yapabilmiştir. TEG iç direncinin altındaki değerlerde MPPT yapamamıştır. TEG iç direncinin altındaki değerlerde MPPT yapamamasının nedeni yükselten çeviricinin empedans eşlemesi için uygun görev doluluk oranının olmamasıdır. Görev doluluk oranı en küçük değerinde olduğu için bunun altında görev doluluk oranının üretilmesi yükselten çeviricinin doğası gereği mümkün değildir. TEG iç direncinin yaklaşık üç katı değerine kadar olan değişken yük değerlerinde MPPT hata oranı %5,16 ile %10,56 arasında gerçekleşmiştir. TEG iç direncinin üç katı üzerindeki değişken yük değerlerinde bu hata oranı %13,57 ve üzerindeki değerlerde olmuştur.

İzolesiz P&O MPPT'li DC–DC **yükselten** çeviricinin deneysel kurulumu yapıldığında TEG sisteminin sıcaklık farkı 164°C olduğunda TEG sisteminden elde edilebilecek maksimum güç değeri deneysel olarak 11,46 W ve iç direnç değeri 9,74 Ω bulunmuştur. Bu değerler MATLAB/Simulink çalışmaları ile karşılaştırıldığında oldukça farklı değerlerdir.

Bu izolesiz **yükselten çeviriciye deneylerde** 4,7 Ω, 7,6 Ω, 10,6 Ω, 12,5 Ω, 19,7 Ω, 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω değişken yük dirençleri sıra ile bağlanmıştır. Yine iç direnç değerine kadar olan değişken yük dirençlerinde P&O algoritması çeviricinin yapısı gereği MPPT yapamamıştır. 9,74 Ω değerine yakın değerlerden başlayarak 31,4 Ω değerine kadar P&O algoritmalı yükselten çevirici düzgün MPPT yapmıştır. Bunun üzerindeki değerlerde MPPT salınımlı olmuştur. Elde edilen MPP yaklaşık 7 W değerinde olmuştur. Burada çevirici çıkışından veriler okunduğu için çeviricinin anahtarlama kayıplarından dolayı beklenilenden daha az güç elde edilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmaların eğrileri incelendiğinde aynı karakteri verdikleri belirlenmiştir. Sonuçta izolesiz P&O MPPT'li DC–DC yükselten çevirici değişken yükler altında TEG iç direnci üzerindeki değerlerde MPPT yapmıştır.

MATLAB/Simulink benzetiminde modellenmiş TEG sistemine değişken yüklerin uygulandığı izolesiz P&O MPPT'li DC–DC **alçaltan** çevirici bağlanarak veriler analiz edilmiştir. Modellenen TEG'in maksimum gücü 170°C sıcaklık farkında 45,76 W ve iç direnci 5,84 Ω'dur. Yükselten çevirici için kullanılan değişken yüklerin aynısı alçaltan çeviricide kullanılmıştır. P&O algoritmalı alçaltan çevirici TEG iç direnci değerine kadar olan yük direnci değişimlerinde MPPT yapmıştır. TEG iç direncinin üzerindeki yük direnci değişimlerinde MPPT'de azalmalar olmuştur. Çok küçük yük direnci değerinde %2,14 hata oranı ile beklenenden fazla olmuştur. TEG iç direncine kadar olan yük direnci değerlerinde hata oranı %2,14–%0,24 arasında gerçekleşmiştir. Bu TEG iç direncinin üzerindeki yük direnci değerlerinde MPPT hata oranı yük ile belirgin bir şekilde artmıştır. 45 Ω yük değerinde MPPT hata oranı %61,8 olarak gerçekleşmiştir. Alçaltan çeviricinin empedans eşitlemesi için P&O algoritması yeterli görev çevrimi oranını TEG iç direncinin altındaki değerlerde gerçekleştirebilmiştir. TEG iç direncinin üzerindeki değerlerde P&O algoritmalı izolesiz DC–DC alçaltan çeviricinin MPPT yapamamasının nedeni empedans eşlemesi için uygun görev doluluk oranının olmamasıdır. Çünkü iç direnç değerinden sonra görev doluluk oranı maksimum seviye olan 0,95 değerine ulaşmıştır. Alçaltan çevirici iç direncin altındaki değerlerde MPPT yapabildiği için yükselten çeviriciye göre kullanılabilirliği daha sınırlıdır.

Bu izolesiz P&O MPPT DC–DC **alçaltan çeviriciye deneylerde** 1 Ω, 4,7 Ω, 7,6 Ω, 9 Ω, 10,6 Ω, 31,4 Ω, 55 Ω, 104,7 Ω ve 214,7 Ω değerlerinde dokuz farklı yük direnci bağlanmıştır. TEG sisteminin sıcaklık farkı 154°C iken TEG'den elde edilebilen güç değeri 10,21 W ve iç direnci 9,25 Ω ölçülmüştür. Buna alçaltan çevirici bağlandığında yaklaşık 3 W olmuştur. Bu çeviricide deneyler sırasında çıkış gücünün alınması için çevirici girişindeki kondansatör çıkartılmıştır. Bu nedenle elde edilen güç değerinde oldukça büyük salınımlar meydana gelmiştir. 1 Ω yük direnci değerinde MPPT hata oranı oldukça yüksektir. Bunun üzerindeki 4,7 Ω, 7,6 Ω, 9 Ω ve 10,6 Ω yük direnci değerlerinde MPPT hata oranı düşüktür. Çok yüksek yük direnci değerlerinde MPPT hata oranı oldukça büyüktür. Yine çeviricinin kayıplarından dolayı çıkıştan alınan güç değerinde düşme meydana gelmiştir. Fakat benzetim çalışmaları ile karşılaştırıldığında yük direnci değişimlerine aynı karakteristiği sergilemiştir. P&O algoritması MPPT yapamadığında güçte meydana gelen salınımlar oldukça fazla olmuştur. Benzetim çalışması ile deneysel sonuçlar benzer karakteristiği göstermiştir. Sonuç olarak, izolesiz P&O MPPT'li DC–DC alçaltan çevirici değişken yükler altında TEG iç direnci altındaki değerlerde MPPT yapmıştır.

MATLAB/Simulink benzetiminde modellenmiş TEG sistemine değişken yüklerin uygulandığı izolesiz P&O MPPT'li DC–DC **alçaltan–yükselten** çevirici bağlanarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Modellenen TEG'in maksimum gücü 170°C sıcaklık farkında 45,76 W ve iç direnci 5,84 Ω'dur. Yükselten ve alçaltan çeviricideki değişken yüklerin aynısı alçaltan–yükselten çevirici için de kullanılmıştır. P&O algoritması değişken yüklerin hepsinde MPPT yapabilmiştir. 1 Ω – 45 Ω değişken yük aralıklarında MPPT hata oranı %0,34 ile %0,74 arasında değişmiştir. En yüksek MPPT hata oranı 1 Ω yük değerinde olurken en düşük MPPT hata oranı 20 Ω ve 30 Ω değerlerinde gerçekleşmiştir. İzolesiz P&O MPPT'li DC–DC alçaltan–yükselten çevirici empedans eşitlemesi için P&O algoritması yeterli görev çevrimi oranını TEG iç direncinin değerine bağlı kalmaksızın bağlanılan yük direnç değerlerinin hepsinde gerçekleştirebilmiştir. Çeviricide kullanılan anahtarın görev doluluk oranı 0,27 ile 0,72 arasında değişmiştir. Çok yüksek yük direnci değerlerinin değişiminde MPPT yakalanması için geçen sürede uzamalar meydana gelmiştir.

Bu izolesiz P&O MPPT DC–DC **alçaltan–yükselten çeviriciye deneylerde** 4,7 Ω, 10 Ω, 15 Ω, 23 Ω, 33 Ω, 55 Ω ve 100 Ω değerlerinde yedi farklı yük direnci bağlanmıştır. TEG sisteminin sıcaklık farkı 140°C iken TEG'den elde edilebilen güç değeri 6,85 W ve iç direnci 8,46 Ω olarak belirlenmiştir. P&O MPPT DC–DC alçaltan–yükselten çevirici çalışmaya başladığında bağlanılan yüke göre MPPT yapmıştır. Bağlanılan her yük değerinde MPPT olayı gerçekleşmiştir. Yük değeri arttıkça elde edilen güç değerinde artma meydana gelmiştir. Güçteki ani azalmalar yük değişimlerinde meydana gelmiştir. Yüksek yük değerlerinde salınımların attığı gözlemlenmiştir. Elde edilen en yüksek güç değeri yaklaşık 3,5 W olmuştur. En yüksek güce ulaşılamaması çevirici kayıplarındandır. Sonuçta, izolesiz P&O MPPT'li DC–DC alçaltan–yükselten çevirici kullanılan değişken yükler altında TEG iç direncine bağlı kalmaksızın tüm değerlerde MPPT yapmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda P&O algoritmalı yükselten çevirici TEG iç direnci ve üzerindeki yük direnci değerlerinde, P&O algoritmalı alçaltan çevirici TEG iç direnci ve altındaki yük direnci değerlerinde ve P&O algoritmalı alçaltan–yükselten çevirici bağlanan her yük direnci değerinde MPPT yapmıştır. Genel olarak çok yüksek ve çok düşük direnç değerlerinde çeviricilerin MPPT performansları düşük kalmıştır. Yük dirençleri arttıkça P&O algoritmalı çeviricilerdeki alınan güçteki salınımlar artmıştır.

Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, çeviricilerdeki kayıpların azaltılması için gerekli önlemleri alıcı çalışmalar yapılabilir. Çeviricilere bağlanılan yüklerin hassas olması için elektronik yükler kullanılabilir. Bağlanılan yükler yerine batarya sistemi yerleştirilerek batarya şarjındaki P&O MPPT algoritmasının performansları test edilebilir. Geliştirilen TEG sistemi elektrik şebekesinden uzakta olan bölgeler için tasarlanarak kullanım alanı artırılabilir. Farklı MPPT algoritmalarının çeviriciler üzerindeki performansları araştırılabilir. PV sistemler elektrik enerjisi üretirken ısınmaları bir problem oluşturmaktadır. Bu PV sistemin yüzeyi çevredeki sıcaklık ile bir fark oluşturmaktadır. Buradaki sıcaklık farkını azaltmak ve elektrik enerjisine çevirmek için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Troup, L., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Simulating future energy consumption in office buildings using an ensemble of morphed climate data. *Applied Energy*, 255, 113821.

[2] Kok, B., & Benli, H. (2017). Energy diversity and nuclear energy for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 111, 870-877.

[3] Al-Ghussain, L. (2019). Global warming: Review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(1), 13-21.

[4] Sorgulu, F., & Dincer, I. (2018). *A renewable source based hydrogen energy system for residential applications*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5842-5851.

[5] Mannekote, J. K., Kailas, S. V., Venkatesh, K., & Kathyayini, N. (2018). Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1787-1801.

[6] Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., & Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy*, 146, 2430-2437.

[7] Armin Razmjoo, A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2020). Energy sustainability analysis based on SDGs for developing countries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(9), 1041-1056.

[8] Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.

[9] Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268-289.

[10] Mamur, H., & Ahiska, R. (2014). A review: Thermoelectric generators in renewable energy. Int*ernational Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 128-136.

[11] Mamur, H., Bhuiyan, M. R. A., Korkmaz, F., & Nil, M. (2018). A review on bismuth telluride (Bi2Te3) nanostructure for thermoelectric applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4159-4169.

[12] Mamur, H., Üstüner, M. A., & Bhuiyan, M. R. A. (2022). Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101824.

[13] Mamur, H., Dilmaç, Ö. F., Begum, J., & Bhuiyan, M. R. A. (2021). Thermoelectric generators act as renewable energy sources. *Cleaner Materials*, 2, 100030.

[14] Mamur, H., & Ahiska, R. (2015). Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 97, 265-272.

[15] Li, F., Lin, D., Yu, T., Li, J., Wang, K., Zhang, X., ... & Wu, Y. (2021). Adaptive rapid neural optimization: A data-driven approach to MPPT for centralized TEG systems. *Electric Power Systems Research*, 199, 107426.

[16] A. Qasim, M., T. Alwan, N., PraveenKumar, S., Velkin, V. I., & Agyekum, E. B. (2021). A new maximum power point tracking technique for thermoelectric generator modules. *Inventions*, 6(4), 88.

[17] Dalala, Z. M., Hamdan, Z. S., Al-Taani, H., Al-Addous, M., & Albatayneh, A. (2019). Battery charging application with thermoelectric generators as energy harvesters. *The Academic Research Community Publication*, 3(1), 248-259.

[18] Mamur, H., & Coban, Y. (2020). Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(1), 124-139.

[19] Bijukumar, B., Raam, A. G. K., Ilango Ganesan, S., Nagamani, C., & Reddy, M. J. B. (2019). MPPT algorithm for thermoelectric generators based on parabolic extrapolation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(6), 821-828.

[20] Tsai, H. L., & Lin, J. M. (2010). Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink. *Journal of Electronic Materials*, 39(9), 2105.

[21] Başoğlu, M. E., & Çakır, B. (2016). Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC–DC converters by using a new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1100-1113.

[22] Taghvaee, M. H., Radzi, M. A. M., Moosavain, S. M., Hizam, H., & Marhaban, M. H. (2013). A current and future study on non-isolated DC–DC converters for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 216-227.

[23] Singh, S. N. (2017). Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1230-1247.

[24] Singh, Y., Singh, S. K., & Hazra, P. (2021). The quest for high-efficiency thermoelectric generators for extracting electricity from waste heat. *JOM*, 1-15.

[25] Laird, I., & Lu, D. D. C. (2012). High step-up DC/DC topology and MPPT algorithm for use with a thermoelectric generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(7), 3147-3157.

[26] Wu, S. J., Wang, S., Yang, C. J., & Xie, K. R. (2018). Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking. *Energy Conversion and Management*, 177, 55-63.

[27] Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B., & Huang, K. (2017). Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*, 37, 86-98.

[28] Liu, Y. H., Chiu, Y. H., Huang, J. W., & Wang, S. C. (2016). A novel maximum power point tracker for thermoelectric generation system. *Renewable Energy*, 97, 306-318.

[29] Montecucco, A., & Knox, A. R. (2014). Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 828-839.

[30] Bond, M., & Park, J. D. (2015). Current-sensorless power estimation and MPPT implementation for thermoelectric generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5539-5548.

[31] Mamur, H., & Çoban, Y. (2020). Termoelektrik jeneratörler için alçaltan-yükselten çeviricili maksimum güç noktası takibi benzetimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 916-926.

[32] Akyildiz, Ç., Üstüner, M. A., & Mamur, H. (2023, February). Termoelektrik Jeneratörler İçin İzolesiz Alçaltan Yükselten Çevirici ile Maksimum Güç Noktası İzlemedeki Yük Değişimlerinin Etkisi. *In International Conference on Frontiers in Academic Research* (Vol. 1, pp. 150-154).

[33] Üstüner, M. A., Mamur, H., & Taşkin, S. (2022). Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(7), 2688-2706.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çiğdem AKYILDIZ

Doğum Yeri ve Yılı :

Medeni Hali :

Yabancı Dili :

E-posta :

Eğitim Durumu

Lise :Bolu Gerede Anadolu Öğretmen Lisesi

Lisans :Karabük Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Lisans :Karabük Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

Formasyon :Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Pedagojik Formasyon

Yüksek Lisans :Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2021- Devam ediyor

Yayınları

[1] Mamur, H., Akyıldız, Ç, & Üstüner, M. A. (2022). Investigation of load dependent behavior of boost converter with perturb and observe maximum power point tracking for thermoelectric generators. *Internatıonal Conferences on Science and Technology*, September 7-9, 88-92.

[2] Akyıldız, Ç, Üstüner, M. A., & Mamur, H., (2023). Termoelektrik jeneratörlerde kullanılan izolesiz alçaltan çeviricinin yük değişimlerinde maksimum güç noktası izleme davranışının incelenmesi. *International Conference on Frontiers in Academic Research*, February 18-21, 145-149.

[3] Akyıldız, Ç, Üstüner, M. A., & Mamur, H., (2023). Termoelektrik jeneratörler için izolesiz alçaltan yükselten çevirici ile maksimum güç noktası izlemedeki yük değişimlerinin etkisi. *International Conference on Frontiers in Academic Research*, February 18-21, 150-154.

[4] Mamur, H, Akyıldız, Ç., & Üstüner, M. A., (2023). Simulation of load behavior based on perturb-observation method in non-ısolated boost converter for maximum power point tracking of thermoelectric generators. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 7(1), 70-77.

EKLER

5.1. EK A. P&O kodları

```
function duty = POMPPT(u,i,uo,io,D)

du=u-uo;
dp=(u*i)-(uo*io);
d=0.001;

if dp>0
   if du>0
      m=D-d;
   else
      m=D+d;
   end
else
   if du>0
      m=D+d;
   else
      m=D-d;
   end
end

duty = m;

end
```

5.2. EK B. ATmega2560 Kodları

```
const int duty = A3;
const int PWM_PIN = 9; // PWM pin
int PWM = 0;
float from_ni = 0.05;

void setup()
{
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  Serial2.begin(9600);
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001;
  while (!Serial)
  {
    delay(1);
  }
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  from_ni = analogRead(duty);
  PWM = from_ni;
  analogWrite(PWM_PIN, PWM);
  Serial.print("Duty:        "); Serial.println(from_ni);
}
```