

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**TERMOELEKTRİK GENERATÖRLER İÇİN DEĞİŞKEN
KOŞULLAR ALTINDA ETKİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
İZLEYİCİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

KHALID YAHYA

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TERMOELEKTRİK GENERATÖRLER İÇİN DEĞİŞKEN
KOŞULLAR ALTINDA ETKİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
İZLEYİCİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

KHALİD YAHYA

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zeki BİLGİN
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Bekir ÇAKIR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.
Prof. Dr. Nejat YUMUŞAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezde açıklanan Termoelektrik Generatörler için Değişken Koşullar Altında Etkin Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Geliştirilmesi herkese faydalı olmasını ve bu konularda çalışacak kişilere yol gösterici olmasını dilerim.

Öncelikle, çalışmanın gereklerini yerine getirmekte beni teşvik eden ve akademik kariyerim boyunca zorlukların üstesinden gelmekte sunduğu sonsuz nimetler için yüce Allah'a minnettarım. Ayrıca Doktora eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen, yoğun çalışma temposuna rağmen beni hiç geri çevirmeyen, zorlandığım anlarda problemleri çözmeme yardımcı olan değerli hocam ve danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet Zeki Bilgin'e, doktora tezim sürecinde beni takip eden ve yol gösteren sayın Prof.Dr. Bekir Çakır'a, Prof.Dr. Engin Özdemir'e ve Yrd.Doç.Dr. Tarık Erfidan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bana bütün ömrüm boyunca destek verip sahip çıkan ve akademik hayatımı destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili Annem ve Babama, zor günlerde bana çok destek veren ve her zaman yanımda olan kardeşlerim başta olmak üzere tüm aileme, Türkiye'de her konuda bana destek olan ve tezimi yazmamda bana yardımcı olan Eyyüp Aslan'a ve benim günlere gelmeme katkısı olan tüm dostlarıma teşekkürü borç bilirim.

Haziran – 2018

Khalid YAHYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. GENEL BAKIŞ.....	8
1.1. Termoelektrik Atık Enerji Dönüşümü.....	10
1.2. Termoelektriklerin Generatör Fiziksel Yapısı.....	11
1.2.1. Seebeck etkisi	12
1.2.2. Peltier etkisi.....	13
1.2.3. Thomson etkisi	14
1.2.4. Joule ısı etkisi	14
1.3. TEG ile Enerji Üretme Sistemleri	14
1.3.1. TEG'lerin temel teorisi	16
1.3.1.1. TEG'in yapısı	16
1.3.1.2. Termal ve elektriksel direnç ağı.....	18
1.3.1.3. TEG'lerin performans analizi	19
1.3.1.4. TEG için ZT Parameteresi	22
1.3.2. TEG malzemeleri	23
2. TEG TESTLERİ VE KARAKTERİSTİKLERİ	26
2.1. Tek TEG için Deney Tasarımı	28
2.2. Çok Hücreli TEG Sistem Yapıları.....	35
2.2.1. Seri dizisi yapılandırması	35
2.2.2. Paralel dizi yapılandırması	37
2.3. Seri ve Paralel Yapılar İçin Deneysel Kurulum	38
3. TEG ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİ İÇİN DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ.....	43
3.1. DC-DC Dönüştürücülerin Prensibi	45
3.2. DC-DC Dönüştürücülerin Kontrolü	46
3.3. DC-DC Dönüştürücü Yapıları.....	49
3.4. Yükseltici Tip Dönüştürücülerin Tasarımı	51
3.5. STM32F429 Mikrodenetleyiciler.....	58
4. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME ALGORİTMALARI.....	60
4.1. Geleneksel MGNİ Algoritmalarını İçeren Çalışmalar	61
4.2. Yaygın MGNİ Algoritmaları.....	64
4.2.1. Değiştir ve gözle (P&O).....	64
4.2.2. Artımsal iletkenlik (INC)	65
4.2.3. Kesirli açık devre gerilimi.....	68
4.2.4. Kesirli kısa devre akımı.....	68
4.3. Geliştirilen MGNİ Tekniği.....	69
5. DENEYLER GERÇEKLEME VE SONUÇLAR.....	70

5.1. Termoelektrik Generatörün Verimliliği	72
5.2. Önerilen Algoritmalar ve Uygulamaları.....	74
5.2.1. Modifiye değiştir ve gözle (P & O) algoritması.....	74
5.2.1.1. Değiştir ve gözle algoritması için Kalman filtresi	75
5.2.1.2. Modifiye P&O için enerji üretim prototipi	76
5.2.2. Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme Algoritması (PD-MGNI)	79
5.2.2.1. PD-MGNI algoritması için MGNI dönüştürücüsü	81
5.2.2.2. PD-MGNI algoritması için Kalman filtresi	82
5.2.2.3. PD-MGNI algoritması için enerji üretim prototipi	83
5.2.3. Kısa devre akım darbesi MGNI algoritma (SCP)	88
5.2.3.1. SCP algoritması için MGNI dönüştürücüsü	90
5.2.3.2. SCP için enerji üretim prototipi	91
5.3. TEG'ler için Geçmişte Önerilen MGNI Yöntemleriyle Karşılaştırma	98
5.4. TEG Uygulama Analizi	99
5.5. Ekonomik Analiz.....	101
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	107
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	114
ÖZGEÇMİŞ	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dönüştürücü ve yüke bağlı TEG ünitesi.	9
Şekil 1.2.	Önerilen algoritmaların akış şeması.	10
Şekil 1.3.	Seebeck etkisinin şeması.	12
Şekil 1.4.	P-N yarıiletken termokuplun şeması.	13
Şekil 1.5.	TEG için önerilen MGN takibi ile enerji üretim sistemi.	16
Şekil 1.6.	Termoelektrik jeneratörün elektriksel eşdeğer devre modeli.	16
Şekil 1.7.	Çok elemanlı TEG'in şematik yapısı.	17
Şekil 1.8.	Ticari TEG'in iç yapısı.	18
Şekil 1.9.	TEG'in 1-D termal şeması	18
Şekil 1.10.	TEG' in elektriksel iç yapısı.	19
Şekil 1.11.	0-1000 aralığında bazı TEG materyalleri için performans katsayısı ZT değişimi	25
Şekil 2.1.	TEG simulink modeli	27
Şekil 2.2.	TEG için Matlab/Simulink modelinin genel görünümü.	28
Şekil 2.3.	Deneysel test platformu.	29
Şekil 2.4.	TEG modülünün $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ için P-V karakteristiği (TEP1-142T300)	30
Şekil 2.5.	TEG modülünün I-V karakteristiği (TEP1-142T300).	31
Şekil 2.6.	Genel P-I eğrisinde MGN karakterizasyonu	32
Şekil 2.7.	$R_L = 4\text{ ohm}$ için TEG modülünün (TEP1-142T300) TH-TC= ΔT karakteristiği.	33
Şekil 2.8.	$R_L = 4\text{ ohm}$ 'da TEG modülünün (TEP1-142T300) ΔT -P karakterizasyonu.	33
Şekil 2.9.	TEG'nin sıcaklık farkına karşılık açık devre gerilimi değişimi.	34
Şekil 2.10.	(a) n elemanlı seri TEG dizisinin elektriksel şeması (b) 3 adet seri bağlı TEG için MATLAB/Simulink ana modeli.	36
Şekil 2.11.	(a) n sayıda paralel TEG dizisinin elektriksel şeması (b) 3 adet paralel TEG için MATLAB/Simulink ana modeli.	38
Şekil 2.12.	Test düzeneğinin prensip şeması.	39
Şekil 2.13.	TEG dizisinin deneysel test platformu	40
Şekil 2.14.	$\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ için 3 adet seri TEG modülü (TEP1- 142T300) (P-V) karakteristiği.	41
Şekil 2.15.	$\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ için 3 adet paralel TEG modülü (TEP1-142T300) (P-V) karakteristiği	41
Şekil 3.1.	(a) İdeal anahtarlama (b) çıkış gerilim sinyali.	47
Şekil 3.2.	Kullanılan sürücüsü devresi	48
Şekil 3.3.	(a) Düşürücü dönüştürücü (b) Yükseltici dönüştürücü (c) Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü (d) Cuk dönüştürücü devreleri	50
Şekil 3.4.	Yükseltici tip DC-DC dönüştürücü devresi (b) MOSFET akımı (c) diyot akımı.	52
Şekil 3.5.	SİM'da sırası ile endüktans akımı, kondansatör gerilimi ve S1 kapı sinyali.	54
Şekil 3.6.	Normalleştirilmiş SİM yükseltici dönüştürücü endüktansı.	55

Şekil 3.7.	Yükseltici dönüştürücü için endüktansın D ye göre değişimi.....	56
Şekil 3.8.	Pratik Yükseltici devre şeması	57
Şekil 3.9.	STM32F429 mikrodenetleyici kartı	58
Şekil 4.1.	P & O algoritmasının akış şeması	65
Şekil 4.2.	INC algoritmasının akış şeması.....	67
Şekil 5.1.	TEG enerji üretim sistemi için deney prensip şeması.....	70
Şekil 5.2.	Farklı ΔT değerleri altında termal enerji ile TEG çıkış gücü.....	73
Şekil 5.3.	Farklı ΔT değerleri altında TEG dönüşüm verimliliği.....	73
Şekil 5.4.	Modifiye P & O algoritmasının akış şeması	74
Şekil 5.5.	P & O tekniği.....	75
Şekil 5.6.	Kalman filtre çalışması.....	76
Şekil 5.7.	TEG için enerji üretim prototipi (Modifiye P&O).....	77
Şekil 5.8.	Deneysel çalışma sonucu, kapı sürücüsü darbesi, çıkış gücü, TEP1-142T300 gerilimi ve akımı.....	78
Şekil 5.9.	P & O ve modifiye P & O için farklı sıcaklık farklarında verimler.....	78
Şekil 5.10.	PD-MGNİ algoritmasının mekanizması	79
Şekil 5.11.	PD-MGNİ algoritmasının akış şeması.....	80
Şekil 5.12.	PD-MGNİ algoritması için önerilen sistemin şematik diyagramı.....	81
Şekil 5.13.	PD-MGNİ algoritması için önerilen sistemin blok şeması.....	83
Şekil 5.14.	PD-MGNİ algoritması için enerji üretimi sisteminin kullanılan elemanları.....	83
Şekil 5.15.	Algoritmanın STM32f429i'de kullanımı.....	84
Şekil 5.16.	PD-MGNİ algoritması için TEP1-142T300'ün deneysel çıkış gücü, akımı ve gerilimi.....	86
Şekil 5.17.	Tek TEG için farklı ΔT altında PD-MGNİ algoritmasının verimliliği.....	87
Şekil 5.18.	3 adet seri bağlı TEG için farklı ΔT altında PD-MGNİ algoritmasının verimliliği.....	87
Şekil 5.19.	3 adet paralel bağlı TEG için farklı ΔT altında PD-MGNİ algoritmasının verimliliği.....	88
Şekil 5.20.	SCP algoritmasının akış şeması.....	89
Şekil 5.21.	Kısa devre akımlı darbe algoritmasının mekanizması.....	89
Şekil 5.22.	Önerilen tekniğin gerekli bileşenleri için şematik diyagram.....	90
Şekil 5.23.	SCP algoritması için deneysel sistem ve bileşenleri.....	92
Şekil 5.24.	STM32F429 mikrodenetleyici ile TEG TEP1-142T300'ün çıkış gücü, akımı ve gerilimi.....	93
Şekil 5.25.	MGNİ dönüştürücüsü çıkışı (a) Kapı sürücüsü darbe gerilimi (b) Dönüştürücüsün çıkışı gerilimi.....	94
Şekil 5.26.	ΔT 'nin Değişimi nedeniyle (80 °C'den 130°C'ye) SCP MGNİ algoritmasının geçici durum altında (1,15 den 2V) cevabı.....	96
Şekil 5.27.	Tek TEG için farklı ΔT altında SCP MGNİ algoritmasının verimliliği.....	97
Şekil 5.28.	3 adet Paralel bağlı TEG için farklı ΔT altında SCP MGNİ algoritmasının verimliliği.....	97
Şekil 5.29.	3 adet seri bağlı TEG için farklı ΔT altında SCP MGNİ algoritmasının verimliliği.....	98
Şekil 5.30.	Odun sobası için TEG uygulama şeması.....	100
Şekil 5.31.	Watt başına değişken enerji maliyeti.....	102

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. TEG modülünün veri sayfası.....	29
Tablo 2.2. TEG performans parametreleri.....	32
Tablo 3.1. DC-DC dönüştürücüler dönüşüm.....	51
Tablo 3.2. Yükseltici dönüştürücü devre elemanları ve parametreleri.....	58
Tablo 5.1. Tek TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları	85
Tablo 5.2. Üç adet Seri TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları.....	85
Tablo 5.3. Üç adet Paralel TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları.....	85
Tablo 5.4. SCP algoritmasının tek TEG için sonuçları	95
Tablo 5.5. SCP algoritmasının 3 adet seri bağlı TEG için sonuçları.....	95
Tablo 5.6. SCP algoritmasının 3 adet paralel bağlı TEG için sonuçları.....	95
Tablo 5.7. MGNİ yöntemleriyle karşılaştırması.....	99
Tablo 5.8. Farklı ΔT değerinde değişken enerji maliyeti	102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
α	: Seebeck Katsayısı
T_H	: Sıcak Yüzey Sıcaklığı
T_C	: Soğuk Yüzey Sıcaklığı
Q_C	: Emilir Sıcaklık Oranı
π_{ab}	: Peltier Katsayısı
τ	: Thomson katsayısı
ΔT	: Sıcaklık Farkıdır
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
K_H	: Sıcak tarafının ısı iletkenliğini
Q_H	: Emilen Isı Oranı
K_L	: Soğuk Tarafının Isıl İletkenliği
$A_{p,n}$: P ve N Tipi Yarıiletken Bacakların Kesit Alanı
$L_{p,n}$: P ve N Tipi Yarıiletken Bacakların Uzunluğu
$k_{p,n}$: P ve N Tipi Yarıiletken Bacakların Termal İletkenliği
$\rho_{p,n}$: P ve N Tipi Yarıiletken Bacakların Elektriksel Direnci
I_m	: Nominal Akımı
R_L	: Harici Direnç Yüğü
η_{TEG}	: TEG'in Verim
ZT	: Figure of Merit
R_{in}	: İç Direnci
V_m	: Nominal Gerilimi
P_m	: Nominal Güğü
D	: Doluluk Boşluk Oranı
f_s	: Anahtarlama Frekansı
t_{on}	: Açma zamanı
t_{off}	: Kesim zamanı
L_{SIM}	: Dönüştürücünün Kritik Endüktansı
C_{SIM}	: Dönüştürücünün SIM Kapasitansı
P_{TEG}	: TEGin Çıkış Gücü
k	: Sabit (0.5)
K_g	: Kalman Kazancı
EST_t	: Geçerli Tahmin
NE_{EST}	: Yeni Hata
$\eta_{MGNİ}$: MGNİinin Verimliliği
$C_{TEG} (\$/W)$: Watt Başına İşletme Maliyeti

Kısaltmalar

Bi_2Te_3	: Bismuth Telluride (Bizmut Tellurid)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşleme)
DMGNİ	: Dağıtılmış Maksimum Güç Noktası İzleme

ESC	: Extremum Seeking Control (Ekstremum Arama Kontrolü)
FOM	: Figure of Merit (Yararlılık katsayısı)
FOCV	: Fractional Open-Circuit Voltage (Fraksiyonel Açık Devre Gerilimi)
FSCC	: Fractional Short-Circuit Current (Kısmi Kısa Devre Akımı)
INC	: Incremental Conductance Algorithm (Artımsal İletkenlik algoritması)
KİM	: Kesintili İletim Modunda
MGN	: Maksimum Güç Noktasını
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleme
P&O	: Perturb and Observe (Değiştir ve Gözle algoritması)
PD-MGNİ	: Power Differentials-Maximum Power Point Tracking.(Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme Algoritması)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişliği Modülasyonu)
RTG	: Radioisotope Thermoelectric Generator (Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör)
SCP	: Short Circuit Puls (Kısadevre Akımlı Darbe)
SİM	: Sürekli İletim Modunda
TEG	: Thermoelectric Generator (Termoelektrik Generatör)

TERMoeLEKTRİK GENERATÖRLER İÇİN DEĞİŞKEN KOŞULLAR ALTINDA ETKİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Termoelektrik Generatörler (TEG), yenilenebilir enerji kaynaklarının kapsamını geliştirerek yeni birçok araştırmanın yolunu açmıştır. TEG'lerin, hiçbir kirliliğinin olmaması ve gürültüsüz olması sebebi ile çevreye karşı olumsuz bir etkisi yoktur. Ayrıca, bakım ihtiyacının az olması, yaygın bulunan atık ısı enerjisini kullanması gibi avantajlara da sahiptir. Sıcaklık, TEG enerji dönüşüm sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. TEG performansında, iki plaka arasındaki sıcaklık farkı ΔT 'nin etkisi gibi önemli etkiye sahip olan birkaç faktör daha vardır.

İstenen gerilim ve/veya akımı sağlamak için TEG hücreler elektriksel olarak seri ve/veya paralel bir dizi oluşturacak şekilde bağlanabilirler. TEG'ler farklı sıcaklık ortamlarında, farklı termal güçlerde ve farklı elektrik yüklerinde uygulanabilirler. TEG dizilerindeki her bir hücreye çalışma koşullarının bir sonucu olarak, farklı sıcaklığın etkimesi mümkündür. Bu sebeple termoelektrik sistemde enerji dönüşümünün hassas bir şekilde, hücre bazında takip edilmesi ve sistemden maksimum enerji çekilebilmesinin sağlanması gereklidir. Bu işlem için TEG ile yük arasında Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) algoritması ile kontrol edilen bir güç dönüştürücüsü kullanmak kaçınılmazdır.

Bu tezde, TEG enerji dönüşüm sistemlerinin termal ve elektriksel karakteristiklerini çıkarmak için testler yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. TEG'lerden her çalışma şartı altında maksimum enerjiyi alabilmek için güç dönüştürücüsü ve farklı tiplerde MGNİ algoritmaları önerilmiştir. Önerilen algoritmaların performansı yapılan pratik uygulamalar ile belirlenerek sonuçlar sunulmuştur. Klasik algoritmaların yanında modifiye değiştir ve gözle (D&G) (ing. Perturbation and Observation -P & O) algoritması geliştirilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. MGNİ algoritmasına ilave olarak, TEG'in çalışma koşullarına göre çıkış gücünün tahmin etmek için Kalman Filtresi kullanılmış ve böylece sistemin performansı iyileştirilmiştir.

Büyük ölçekli uygulamalarda, güç dönüştürücünün kontrol edilmesi için Güç Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme (GK-MGNİ)(ing. Power Differentials-Maximum Power Point Tracking PD-MPPT) algoritması önerilmiştir. Küçük ölçekli uygulamalar için, Kısa-Devre Darbe (KDD) (ing. Short Circuit Pulse-SCP) algoritması önerilerek kararlı ve geçici bir durum altında sonuçlar analiz edilmiştir. Ticari TEG cihazları kullanılarak önerilen prototip ve kontrol algoritmaları, analitik ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Önerilen MGNİ çözümlerinin bahsedilen avantajlarını doğrulayan başarılı bir performans sergilediği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme (PD-MGNİ), Kısa-Devre Darbe (KDD), Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNİ), Termoelektrik Generatör (TEG), Yükseltici Dönüştürücü.

DEVELOPMENT AN EFFICIENT MAXIMUM POWER POINT TRACKER FOR THERMOELECTRIC GENERATORS UNDER VARIOUS CONDITIONS

ABSTRACT

Thermoelectric Generators (TEG) has opened the way for many new researchers by improving the coverage of renewable energy sources. There is no negative impact on the environment because TEGs have no pollution and are noiseless. It also has the advantages of low maintenance and the use of common waste heat energy. Temperature plays an important role in the TEG energy conversion process. In TEG performance, there are several other factors that have a significant effect, such as the effect of temperature difference ΔT between the two plates.

To provide the desired voltage and/or current, the TEG device can be electrically connected in series and/or parallel form. TEGs can be applied at different temperature environments, different thermal forces and different electrical loads. As a consequence of the operating conditions for each device in the TEG array, the changes of the temperature difference can affect on the system operation. For this reason, it is necessary to ensure that the energy conversion in the thermoelectric system is precisely monitored on a device basis and that maximum energy can be drawn from the system. For this operation, it is inevitable to use a power converter controlled by the Maximum Power Point Tracker (MPPT) algorithm between TEG and load.

In this thesis, the results were analyzed by making tests to extract the thermal and electrical characteristics of the TEG energy conversion systems. To obtain maximum energy under each working condition from TEG, power converter and various MPPT algorithms are proposed. The performance of the proposed algorithms is determined by practical applications and the results are presented. In addition to the classical algorithms, the modified perturb and observe (P&O) algorithm was developed and the results analyzed. In addition to the MPPT algorithm, the Kalman Filter is used to estimate the output power according to the operating conditions of the TEG, thus improving the performance of the system. In large-scale applications, the Power Differentials-Maximum Power Point Tracking (PD-MPPT) algorithm is proposed to control the power converter. For small-scale applications, the Short Circuit Pulse (SCP) algorithm is proposed, the results were analyzed under a stable and transient condition.

The proposed prototype using commercial TEG devices has been validated analytically, experimentally, and demonstrated successful performance which highlighted the claimed advantages of the proposed MPPT solutions.

Key words: Power Differentials-Maximum Power Point Tracking (PD-MPPT), Short Circuit Pulse (SCP), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Thermoelectric Generator (TEG), Boost Converter.

GİRİŞ

Çevre sorunlarına olan duyarlılığın ve elektrik enerjisi talebinin artması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi her geçen gün artmaktadır. Türkiye, hidrolik, jeotermal, rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunda son derece elverişli bir konuma sahiptir. Türkiye'de 2016 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi oranı % 35'tir [1] ve 2023 yılında elektrik tüketiminin bugüne kıyasla yaklaşık iki kat artacağı öngörülmektedir. Bununla beraber elektrik üretiminde (hidroelektrik dahil) kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının payı en az % 30 olması hedeflenmektedir.

Düşük maliyetli bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı da ısıdır. Isıdan elektrik enerjisinin üretimi için gerekli ısı, tipik olarak bir kimyasal yakma işlemiyle veya güneş, jeotermal gibi doğal ısı kaynakları ile sağlanır. Dönüşüm sistemlerinin verimliliği ve maliyeti, yatırımın değerlendirilmesi ve planlanması açısından dikkate alınması gereken ana değişkendir.

Dönüştürme verimliliğinin artırılması, kombine gaz-buhar döngülerinin kullanılması yoluyla olabilir. Bu sistem yenilenebilir olmamasının yanında çevreye de zararları vardır. Dahası, kurulum ve işletme maliyetlerinin göreceli yüksekliği, girdi enerji kaynağının sonlu olması gibi olumsuzlukları vardır. Bu sebeplerle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmış, rüzgar, güneş, hidrojen enerjisi gibi kaynaklar komsunda araştırmalar artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de, herhangi bir ek kimyasal işlem olmaksızın atık ısının oluşturduğu termal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan Termoelektrik Generatör (TEG) diye isimlendirilen cihazlardır.

Atık ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için, TEG cihazlarının yakın gelecekte modern dünyanın önde gelen cihazlarından olacağı öngörülmektedir. Özellikle otomobil egzozu, fabrika egzozu ve termal paneller gibi yüksek güçlü uygulamaların yanında medikal uygulamalarda da yaygınlaşmaya başlamışlardır.

Normal olarak, sanayide ortaya çıkan egzoz gazlarından termal enerji üretimi, daha çok endüstriyel amaçlar için sıcak su üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistemde enerji dönüşümü için bir duman/su ısı eşanjörünün yerleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür çözümlerin uygulanması ile kazanılan enerji ancak sıcak su olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sıcak suyun kullanımı ise her zaman ve her işletmede gerekli olmamaktadır. Bölgesel ısınma için ısının pazarlanması, özellikle ekonomik değerler ve münferit tesis zararlarının karşılanması açısından çok yararlı ve caziptir. Ancak gelişmemiş alanlarda ve kentsel alanlarda uygulanması zordur, ayrıca klasik enerji kaynaklarının insanların önceliği haline geldiği ve ilgisini çektiği yerlerde cazip gelmemektedir.

Dikkate alınması gereken bir diğer özellik ise üretilen enerjinin kalite seviyesidir. Isı, kullanışsız bir enerji türü olarak kabul edilir ve bu durum termodinamik açıdan, pazar için daha az cazip gelmektedir.

Isı dönüşümü sektöründe, özellikle atık ısının elektrik enerjisine doğrudan dönüşümü gibi araştırmalar yoğun ilgi çekmektedir. Ancak yapılan uygulamalar çok azdır. Termoelektrik Generatörlerin (TEG) enerji üretiminin fazla olduğu alanlarda uygulanması, fosil kaynaklarından üretim sisteminin verimliliğine ilişkin farklı bir adımı ortaya çıkarmaktadır.

Doğrudan bir ısı dönüşümü sağlayarak güç tüketimi açığını kapatmak uygun bir tercihtir. Özellikle üretimi optimize etme ve yeni depolama sistemleriyle enerjini depolanması ve transferinin mümkün olması sebebi ile elektrik enerjisine dönüşüm ilgi çekmektedir.

Termoelektrik Generatörlerin cihazlar TEG, doğrudan ısıl enerjiyi elektrik enerjisine veya tersine çevirebilen fiziksel ve elektriksel olarak sağlam yarı iletken cihazlardır. Bunlar, elektriksel olarak seri ve/veya paralel bağlı (yüksek gerilim ve / veya yüksek akım elde etmek için) ve termal olarak paralel bağlanmış n-p katkılı yarı iletken hücrelerden oluşur.

TEG'ler iki farklı modda çalışabilmektedir. Cihaza elektrik enerjisi uygulandığında cihazın bir yüzeyi ısınırken diğer yüzey soğumaktadır. Bu etkiyi oluşturan cihazlar Termoelektrik Soğutucu (TES) (ing. Thermoelectric Cooler-TEC) olarak isimlendirilmektedir. Diğer modda ise cihazın iki yüzeyi arasında ısı farkı oluştuğu

zaman elektriksel güç üretmektedir. Elektrik üretim modunda, TEG, Seebeck etkisinden dolayı, iki yüzeyi arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda çıkış uçlarında bir potansiyel fark oluşur. TEG cihazlarının bu çalışma modu Bölüm 2'de detaylı bir şekilde incelenmiştir.

TEG'in terminallerine bir yük bağlandığında TEG içinde PN yarıiletken çiftleri içerisinde akım akmaya başlar. Bu, sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru olan ısı akışının Peltier etkisi sebebiyledir.

TEG modülleri, birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar geniş bir yelpazede ticari olarak üretilmektedir. Paletlerin kesit alanı cihazın iç direncini, akım ve gerilim değerini büyük ölçüde etkiler. Geniş peletli bir modül sınırlı sayıda hücre taşıyabilir. Palet, sayısının artması yüksek çıkış akımı sağlarken gerilim değerinin düşmesini ve iç direncin azalmasını sağlar.

Daha yüksek çıkış gerilimleri ve akımları elde etmek ve gerekli güç seviyesini sağlamak için birden fazla modül elektriksel olarak seri veya paralel şekilde bağlanabilir.

TEG'ler hemen hemen her tür ısı enerjisiyi kullanabilir ve diğer enerji dönüşüm yöntemlerine göre bir takım avantajlara sahiptirler. Bu avantajlar, sağlam, hafif, güvenilir olması, hareketli mekanik parçalarının olmaması gibi sıralanabilir. Bu nedenle titreşim oluşturmazlar, genellikle bakım ihtiyaçları yoktur ve çalışmaları sessizdir.

TEG, kararlı durumda bir iç dirençle, seri bir gerilim kaynağı ile modellenir. Belli bir sıcaklık farkı için, TEG tarafından verilen elektrik gücü, terminallerine bağlı elektrik yükü tarafından çekilen akıma bağlı olarak değişir. Herhangi bir sabit sıcaklık farkında TEG'den aktarılan güç en üst düzeye çıkarmak için, yükün empedansı 'maksimum güç aktarma teoremi' ne göre TEG'in iç direncine eşit olmalıdır. Bir TEG enerji üretim sistemini düzgün bir şekilde tasarlamak için üreticiden temin edilen TEG'lerin performansı hakkındaki verileri (datasheet) buldurmak önemlidir. Bununla birlikte bugüne kadar termoelektrik cihazların test edilmesi için standartlaşmış bir yöntem yoktur. Bu yüzden üreticinin katalog verilerinde belirttiği performans özellikleri pratik uygulamalarda farklı olabilir. Ticari TEG karakteristiklerini belirlemek amacı ile tez kapsamında laboratuvarında bir

test sistemi geliştirilmiştir. Sistem hem bir performans değerlendiricisi olarak hem de farklı boyut ve koşullar için bir test cihazı olarak kullanılabilir.

Test düzeneği, TEG'lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, farklı boyutlarda olmaları ve mekanik kenetleme basıncı gibi değişken koşullar altında seri ve paralel bağlantılarının etkilerini analiz etmek için gerekli özelliklere sahiptir. Bu sayede, bütün elemanlar eşit derecede ısıtılmadığında bile birbirine bağlı TEG dizilerinin performansını incelemeye imkan vermektedir. Ayrıca, farklı elektriksel çalışma noktalarında, her bir TEG'in termal dengesi üzerindeki etkisi analiz edilebilmektedir. Bu sayede, TEG cihazları dengeli ve dengesiz koşullar altında, elektriksel olarak seri ya da paralel bağlandığında sistemin elektriksel ve termal davranışları belirlenmeye çalışılmıştır.

TEG'in ürettiği enerjinin seviyesi, kullanılan üretim malzemesi ve uygulanan sıcaklık farkı ile orantılıdır. Üretilen enerjinin, akım ve gerilim seviyelerinin artırılması için talep edilen enerji miktarına göre seri, paralel ve ya seri-paralel TEG dizisi yapısı oluşturularak yada güç dönüştürücüleri ile birlikte Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNI) algoritmaları kullanarak, TEG enerjisinin seviyesini artırmak için literatürde farklı yöntemler önerilmiştir.

TEG cihazları, bir iç dirence seri bağlanmış bir DC kaynak ile Thevenin eşdeğer devresi gibi elektriksel olarak modellenabilir. TEG cihazının iç direnci yük direncine eşit olduğunda, maksimum güç çekilir. Öte yandan, TEG cihazı çeşitli çalışma koşulları altında, yani dinamik koşullarda çalışırken, iç direnç, kaynak ile yük arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanan sıcaklık farkının değişimine bağlı olarak değişmektedir. Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) algoritması, Maksimum Güç Noktasını (MGN) yakalamak için uygulanmazsa, bu uyumsuzluk maksimum güç akışına izin vermeyecektir.

İdeal olarak her TEG bağımsız bir şekilde elektronik olarak kontrol edilmelidir. Ancak bu yöntem, ihtiyaç duyulan güç elektroniği dönüştürücülerinin sayısını ve karmaşıklığını büyük ölçüde artıracak ve sistemin uygulanma maliyetini olumsuz olarak etkileyecektir. Sonuç olarak, TEG'ler, diziler oluşturmak üzere, genellikle her bir dizi ayrı bir MGNI dönüştürücüye bağlı olarak birbirine bağlanır. Bu, her TEG dizisinin elektriksel çalışma noktasının bağımsız olarak denetlendiği Dağıtılmış

Maksimum Güç Noktası İzleme (DMGNİ) alt sistemi olarak adlandırılan yöntemi ortaya çıkarır. Literatürde mevcut olan birkaç MGNİ algoritması arasında “kesirli açık devre yöntemi (ing.fractional open-circuit method)”, doğrusal elektriksel özelliğinden dolayı TEG'ler için uygundur.

Bölüm 5'te TEG'ler için kullanabilecek MGNİ algoritmaları önerilmiştir. Kullanılan dönüştürücü, maliyet, boyut ve ağırlığı en aza indirmek üzere tasarlanmıştır. Prototip dönüştürücü, hem sabit halde hem de ısı geçişli gerçek TEG'lerle test edilmiştir ve deneysel sonuçlar, elektriksel verimlilik ve enerji toplama verimliliği açısından performansı belirlenmiştir.

Bölüm 6' da toplam verimi arttırmak için dönüştürücünün normal anahtarlama durumunda minimum güç kaybı ile TEG'lerin kısa devre akımlarını ölçme tekniği ile yeni bir teknik sunulmuştur. Bu teknik küçük uygulamalar için uygun bulunmuştur ve Kısa-Devre Darbe (KDD) (ing. Short Circuit Pulse-SCP) olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca büyük uygulamalar (hibrit ve normal sistemler) için bir ve birden fazla maksimum güç noktası olması durumunda Güç Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme (GK-MGNİ)(ing.Power Differentials-Maximum Power Point Tracking PD-MPPT)algoritması önerilmiştir. Buna ek olarak değiştir-gözle algoritmasıyla birlikte Kalman Filter kullanılarak hem küçük hem de büyük uygulamalar için geçerli olan bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen ve geliştirilen MGNİ tekniği ile, geniş bir giriş gerilimi ve çalışma sıcaklığı aralığında TEG'lerden güç elde edebilmektedir.

Çalışmanın Amaçları

1. TEG cihazını (ticari TEG) karakterize etmek ve cihazın herhangi bir termal durumda performansını incelemek için test platformunun oluşturulması,
2. Farklı bir konfigürasyona (tek, paralel ve seri dizi) bağlı TEG'lerin sıcaklık dengesizliğine bağlı olarak güç kaybına ilişkin teorik ve deney sonuçlarının analizinin yapılması,
3. Kararlı ve geçici ısı koşullar altında TEG'den çekilen maksimum güçlerin belirlenmesi,

4. Küçük güçlü uygulamalar için önerilen sistem çalışması sırasında seçilen DC-DC dönüştürücüye bağlı bir termoelektrik generatörün kısa devre akımını ölçen bir tekniğin geliştirilmesi,
5. Büyük güçlü uygulamalarda maksimum güç elde etmek için PD-MGNİ metoduna dayanan maksimum güç noktası izleme algoritmasının geliştirilmesi,
6. Kısa devre akımı ölçülerek oluşturulan tekniğe dayanarak önerilen maksimum güç izleme algoritması (SCP) ile optimum güce ulaşmak için enerji üretme sisteminde kesinti etkisi olmadan sistemin oluşturulması,
7. Önerilen algoritmanın sisteme uygulanması ve konvansiyonel MGNİ algoritmaları ile karşılaştırılması,
8. Isıtma sisteminden enerji üretimine kadar olan sisteminin tümünün maliyet ve verimlilik analizi,
9. P&O algoritmasının veriminin artırılarak geliştirilmesi için Kalman Filtresinin uygulanması ve konvansiyonel P&O algoritmasıyla verimlilik açısından karşılaştırılması.

Çalışmanın Sınırlıları

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretimini en üst düzeye çıkarmak, geleneksel kaynaklardan kurtulmak ve en düşük kayıp, en düşük gürültü, en düşük kirlilik, uzun ömür gibi özelliklere sahip elektrik enerjisi üretmek son zamanların hedeflerinden biridir. Termoelektrik enerji üretimi bu operasyonel avantajlara sahip olan umut verici kaynaklardan biridir.

TEG cihazı, herhangi bir ek ekipmana ihtiyaç duymadan ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine (Seebeck etkisi) dönüştürebilir. Elektrik üretim olayı, termal elektrikli cihazın iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını kullanarak mümkün olur. Fakat çevresel koşullar nedeniyle TEG farklı koşullar altında çalışabilmek için üretilmektedir. Geliştiricilerin TEG sisteminin maksimum gücünü elde etmesini engelleyen bazı elde olmayan faktörler vardır. Sistemi kötü etkileyen bu faktörlerden birisi atık enerji olarak değerlendirilen sıcaklık uyumsuzluğudur.

Bu nedenle, dinamik koşullara göre, daha az kayıp ve yüksek performanslı sistem izleme süresini hesaba katarak uyumsuzluk faktörleri altında gerçek maksimum güç

noktasını (MGN) izleyebilen özel maksimum güç noktası izleme (MGNİ) algoritmaları geliştirilmesi gereklidir.

Çalışmada, farklı uygulamalar için TEG tabanlı DC-DC dönüştürme ağının konseptinin tanımlanmasından ve geliştirilmesinden başlandı, sonra bu ağ için bir dizi bağlantı tasarımı yaklaşımı geliştirildi. İkinci aşamada, önerilen ağda kullanılan maksimum güç noktası dönüştürücülerini izlemek için sistem için en uygun algoritma araştırılmıştır.



1. GENEL BAKIŞ

Bir termoelektrik cihaz iki farklı çalışma modunda kullanılabilir: Isı pompalama ve güç üretme. İlk çalışma şekli, terminallerine elektrik akımı uygulandığında meydana gelir ve cihaz, akımın akış yönüne bağlı olarak bir taraftan diğerine ısı pompalar. Isı pompalama işlemi hem ısıtma hem de soğutma uygulamalarında kullanılır. Elektrik üretim modu, yüzeyleri arasında sıcaklık farkı muhafaza edildiğinde cihazın içerdiği ısının Doğru Akım (DC) elektrik akımına dönüştürülmesi ile ilgilidir. Temel termodinamik ve termoelektrik olay, burada [2] ve [3] tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır ki bu termoelektriğin sistem düzeyindeki davranışını anlamak için önemlidir.

Termoelektrik cihazlar elektronik cihazlar için soğutma uygulamalarında uzun süredir kullanılmaktadır [4] ve daha yakın zamanda değerlendirilen uygulamalarda buzdolabı olarak [5], ya da şofbenlerin verimliliğini arttırmak için [6] tarafından denenmiştir. Çok yakın bir zamanda [7], Rankine döngüsüne dayanan enerji santrallerinin verimliliğini arttırmak için termoelektrik ısı pompalarının geniş ölçekte uygulanmasını önermiştir.

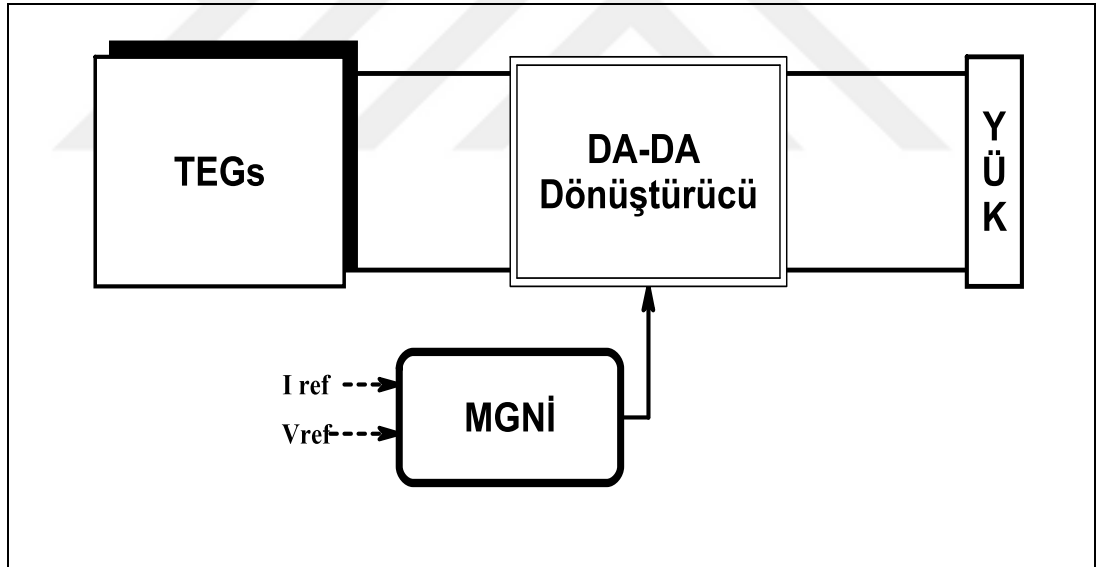
Elektrik enerjisi üretim modunda kullanıldığında, termoelektrik cihazlara genellikle TEG adı verilir. Bu mod, bu tezde incelenen çalışma modudur.

Geçmişte, TEG'lerin kullanımı nispeten yüksek maliyet gerektiriyordu ve verimlilikleri düşüktü (yaklaşık% 5). Ancak yüksek güvenilirlikleri nedeniyle, özel amaçlı tıbbi, askeri, uzak ve uzay uygulamalarında tercih edilmişlerdir.[8]. Daha önceki uygulamalara genel bir bakış sağlamakta ve alternatif elektrik kaynağı olarak termoelektrik enerji üretim potansiyelini değerlendirmektedir. 20 August 1977 yılında başlatılan ve üç adet Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör (RTG) tarafından desteklenen NASA'nın Voyager 1 uzay aracı 2013 yılında yıldızlar arası alana girdi ve tarihte herkesten daha fazla yol kat etti. Bir güç kaynağı olarak kullanılan radyoaktif Plutonyum izotopları, en az 2020'ye kadar uzay aracına elektrik enerjisi

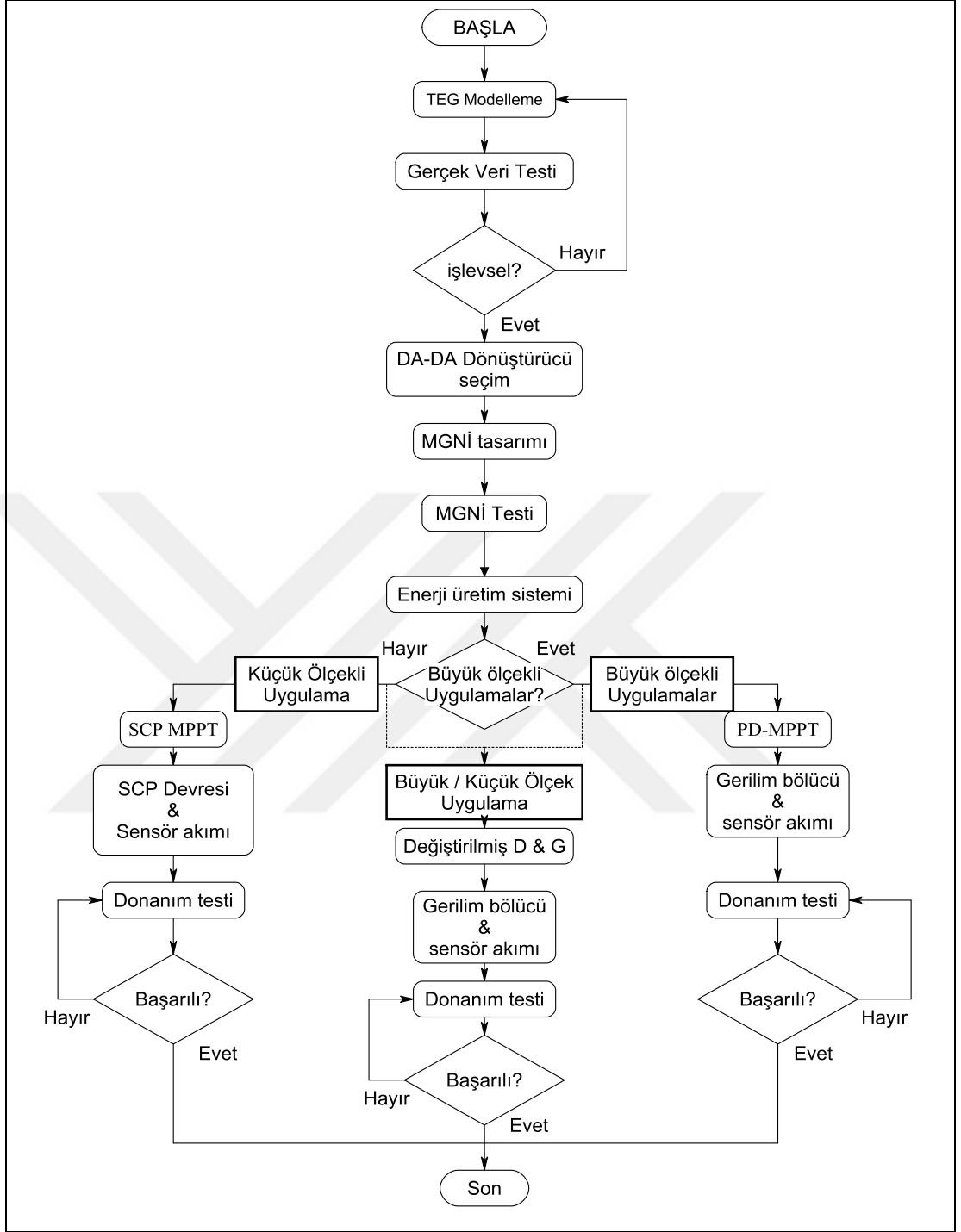
sağlamak için yeterlidir ve bu da 43 yıllık sürekli çalışmayı işaret eder. Mevcut güç seviyesi 249W'tır [9].

Son yıllarda artan çevresel sorunlar ve enerji maliyeti, araştırmaları alternatif elektrik enerjisi üretme yöntemlerine odaklanmıştır. Termoelektrik cihaz özellikle atık ısı geri kazanımı uygulamalarında geçerli bir elektrik enerjisi kaynağı olarak ortaya çıkanlardan biridir[10]. atık ısı geri kazanımı ekonomisini araştıran yüksek performanslı termoelektrik materyallerin, yeni cihazların ve uygulamaların gelişimindeki son gelişmelere dikkat çekmektedir. Bu durumda, termal giriş gücü esas itibariyle serbesttir, diğer bir deyişle gerekli diğer işlemin bir ürünü olan ısı çevre tarafından ortama geri verilmektedir.

Sisteme Genel Bakış, Dönüştürücü ve yük ile birlikte TEG sisteminin oluşturulması Şekil 1.1'de gösterildiği gibi olacaktır. Ayrıca, proje akış şeması Şekil 1.2'te gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Dönüştürücü ve yüke bağlı TEG ünitesi



Şekil 1.2. Önerilen algoritmaların akış şeması

1.1. Termoelektrik Atık Enerji Dönüşümü

Günümüzde termoelektrik generatörler, kaybedilen termal enerjinin geri kazanılmasına, ulaşılması zor yerlerde, uzak bölgelerde elektrik enerjisinin üretilmesine ve mikrosensörlere güç sağlanmasına olanak verir. Doğrudan güneş enerjisinden elektrik üretmek için de kullanılabilir.

Elektrik üretimi ve atık ısı topluluklarımız için önemli bir konudur. Bu bağlamda, şu anda termoelektrik generatörler (TEG'ler) araştırma alanında geniş bir yer tutmaktadır. TEG'ler, biri soğuk biri sıcak olmak üzere iki yüzey arasına yerleştirilen bir dizi termoelektrik (TE) modülden oluşur. Her TE modülü, elektriksel olarak seri, termal olarak paralel halde birbirine bağlanan onlarca ya da yüzlerce çift Termoelektrik çiftinden oluşur ve termal enerjinin bir bölümünü doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür.

Aşağıda belirtildiği gibi TEG'lerin birçok avantajları vardır:

- 1- Önce termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren ve daha sonra bu mekanik enerjiyi bir alternatör kullanarak elektriğe dönüştüren birçok ısı motorunun aksine doğrudan enerji dönüşümü sağlar.
- 2- TEG'lerin içinde hareketli parçalar ve çalışma sıvıları olmadığı için bakım ve ekstra maliyet gerektirmezler.
- 3- Özellikle sabit ısı kaynakları ile çalışırken ömürleri uzun olur.
- 4- Ölçek etkisi yok: TEG, çok sınırlı mekanlarda mikro üretim için veya kWatt üretmek için kullanılabilir(örnek [11-15]).
- 5- Gürültüsüz çalışırlar.
- 6- TEG'ler için herhangi bir çalışma konumu mümkündür, fiziksel olarak gömülü sistemlerde farklı pozisyonlarda yerleştirilebilir.

Bu avantajlara rağmen, uzun yıllar boyunca TEG'ler, uzaya gönderilen problemlerin çoğunluğuna (Voyager, Apollo, Pioneer, Merak, vb.) elektrik sağlamak için, yüksek güvenilirlikleri nedeniyle tercih edilmişlerdir ancak uzay uygulamalarıyla sınırlı kalmışlardır. Düşük verimlilik ve yüksek maliyet, daha yaygın uygulamalar için geliştirilmesinin önünde bir engel oluşturmuştur [11].

1.2. Termoelektriklerin Fiziksel Yapısı

Üç temel fiziksel fenomen TEG'in işleyişi ile ilişkilendirilebilir [12]. Seebeck etkisi; iki taraf arasında bir sıcaklık farkı sağlandığında gerilim üretilmesi etkisidir. Thomson etkisi; sıcaklık akışı yönünde bir elektrik akımı geçirildiğinde homojen bir iletken içinde ısıtma veya soğutma etkisidir. Joule etkisi, bir iletken içinde bir elektrik akımı geçirildiğinde görülen ısıtma etkisidir.

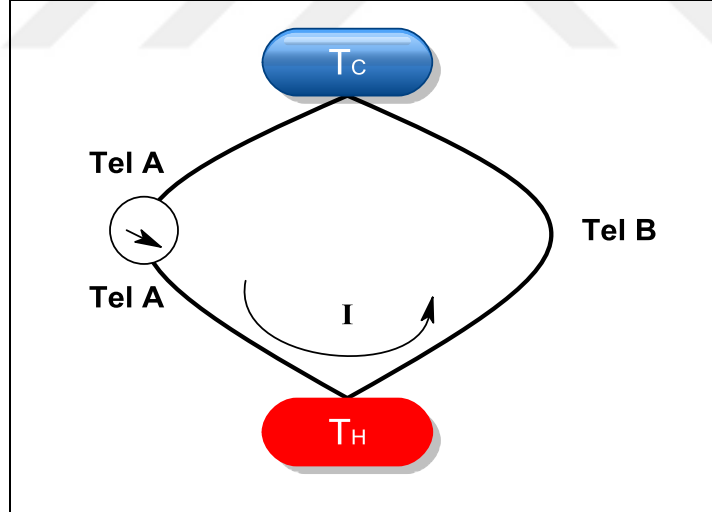
1.2.1. Seebeck etkisi

Seebeck etkisi, Şekil 1.3 görüldüğü gibi, farklı olmayan iki termoelektrik materyalin bir döngü içinde birleştirildiğinde, iki bağlantı noktasının farklı sıcaklıklara maruz kalmasıyla elektromotor kuvveti (emf) olarak da bilinen sıcaklığa bağlı elektrik potansiyelinin üretildiğini belirtmektedir.

Üretilen elektromotor kuvveti Seebeck gerilimini (V_{oc}) temsil eder ve Denklem (1.1)'de tanımlanır.

$$V_{oc} = \alpha_{ab}(T_H - T_C) \quad (1.1)$$

Burada, α farklı iki iletken olan a ve b'nin bağıl Seebeck katsayısını temsil etmektedir. $T_H - T_C$ Denklem (1.3) 'de belirtildiği gibi bağlantı noktaları arasındaki sıcaklık farkını temsil etmektedir. Açık devre geriliminde iletken boyunca sıcaklık dağılımının bir işlevi olmasa da açık devre gerilimi sıcaklık farkıyla orantılıdır ve iletim malzemesinin türüne bağlıdır.

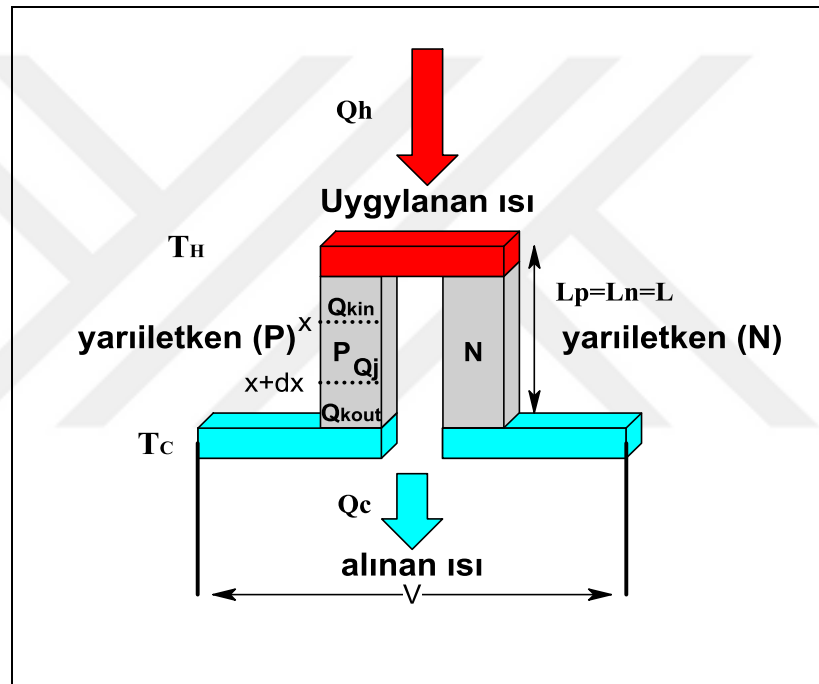


Şekil 1.3: Seebeck etkisinin şeması

Yarıiletkenler termoelektrik generatörler için sık sık kullanılmaktadır. Termoelektrik malzemeler termal enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisini termal enerjiye dönüştürmek için gerekli özellikleri sağlamaktadırlar.

Çoğu zaman, içerdiği yüklerin sayısını arttırmak amacıyla "doping" olarak bilinen bir fenomen yarı iletkenlere yabancı madde olarak eklenir. Negatif tip (N-tipi) ve

pozitif-tip (P-tipi) olmak üzere iki ana doping türü vardır. Birinci tipte değerlik elektronlar eklenir ve ikinci tipte değerlik elektronları çıkarılır. Bir yarı iletken, uçlarında sıcaklık farkı oluştuğunda ve peletler arasındaki ısı akışı ile birlikte yük taşıyıcıları, Şekil 1.4'de görüldüğü gibi sıcak taraftan daha soğuk olana doğru aynı yönde akar. N tipi yarı iletkenlerinde, elektronlar soğuk tarafa doğru göç etme eğiliminde olacak ve P-yarıiletken bacağındaki deliklerden soğuk tarafa doğru hareket edecektir. Bu durum, bacaklar arasında bir potansiyel fark oluşturur. Seebeck etkisinin sadece iki farklı termoelektrik malzemenin bağlantısıyla gerçekleşen bir temas fenomeni olduğunu belirtmek gerekir.



Şekil 1.4: P-N yarıiletken termokuplun şeması

1.2.2. Peltier etkisi

Eğer elektrik akımı birleştirilmiş iki farklı malzemedan akarsa, sıcaklığın sabit tutulması için bağlantı noktalarına (jonksiyonlara) sürekli olarak ısı eklenmeli ya da alınmalıdır. Bu olaya peltier etkisi denilmektedir. Peltier etkisinden dolayı bağlantı noktasında absorbe edilen veya uzaklaştırılan ısı oranı, elektrik akımı miktarıyla orantılıdır ve Denklem (1.2) ile verilmiştir.

$$Q_{\text{Peltier}} = \pi_{\text{ab}} I \quad (1.2)$$

Burada π_{ab} (V), iki farklı malzemenin görelî Peltier katsayısını temsil etmektedir ve bu iki farklı malzemenin birleşiminde oluşan ısıtma veya soğutma büyüklüğünü belirlemektedir. I (A) termokupl üzerinden akan elektrik akımını temsil etmektedir. Seebeck etkisine benzer şekilde, Peltier etkisi de iki farklı malzeme arasındaki birleşim noktasında oluşan bir olgudur. Yani bu cihazlarda minimum enerji kaybı ile peltier etkisi sayesinde elektrikten ısıtma/soğutma elde edilirken, Seebeck etkisi ile ısıtma/soğutmadan elektrik enerjisi elde edilebilmektedir.

1.2.3. Thomson etkisi

Thomson etkisi şu şekilde ifade edilmektedir; bir kablodan sıcaklık değişimi ile beraber akım aktığında, malzemeye ve akım yönüne bağılı olarak ısı kablo boyunca emilir veya serbest bırakılır. Thomson efektinden dolayı telin uzunluğu ile birlikte emilen veya açığa çıkan ısı oranı Denklem (1.3)'de verilmiştir.

$$Q_{\text{Tho}} = \tau \cdot I \Delta T \quad (1.3)$$

Burada τ Thomson katsayısını belirtir, I (A) elektrik akımını temsil eder ve ΔT terminalin iki ucu arasındaki sıcaklık farkıdır. Thomson ısısı geri dönüşlüdür ve Joule ısısı ile karıştırılmamalıdır, bir iletken üzerinden elektrik akımının geçişiyle iletkenin ısı yayması geri dönüşü olmayan bir etkidir.

1.2.4. Joule ısı etkisi

Joule ısıtma etkisi, iletkenen bir elektrik akımı akarken iletkenin sıfır olmayan elektriksel direnci sebebi ile malzeme tarafından ortama yayılan ısı olarak tanımlanır.

1.3. TEG ile Enerji Üretme Sistemleri

Son yıllarda, Güç tüketen cihazların güç kaynağı gereksinimlerini karşılamak için çevrelerinde bulunan mekanik, atık ısı, biyolojik v.s. enerjii yeniden kullanarak enerji üretme teknolojilerinin uygulanması önem kazanmıştır. TEG cihazları, farklı alanlarda farklı türdeki cihazlara (tıbbi cihazlar, giyilebilir ve kablosuz sensörler, uzak aktüatörler, gezegenler arası uzay uçuş sistemleri v.s. (ör. [13-17])) geniş bir güç yelpazesi (birkaç yüz Watt'a kadar) sağlama kabiliyetine sahiptir.

Ancak bir TEG dizisinin güç-gerilim karakteristiği farklı koşullar altında bir kaç MGN gösterir. Burada, TEG kaynağının ürettiği güç, sıcaklık farkına ve tipine bağlı olarak artmakta veya azalmaktadır. Diğer bir deyişle dinamik durumda, kaynağın iç direnci sıcaklık farkının değişimine göre değişir ve bu nedenle TEG ve yük arasında uyumsuzluk oluşabilir. Üretilen enerji uygun bir forma dönüştürülerek minimum kayıp ile seçilen yüke aktarılması için bir mikroelektronik enerji yönetim sistemi kullanılır. Bu uyumsuzluk maksimum gücün elde edilmesine izin vermeyecektir ve Maksimum Güç Noktasını (MGN) yakalamak için Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNİ) algoritması uygulanması gerekmektedir.

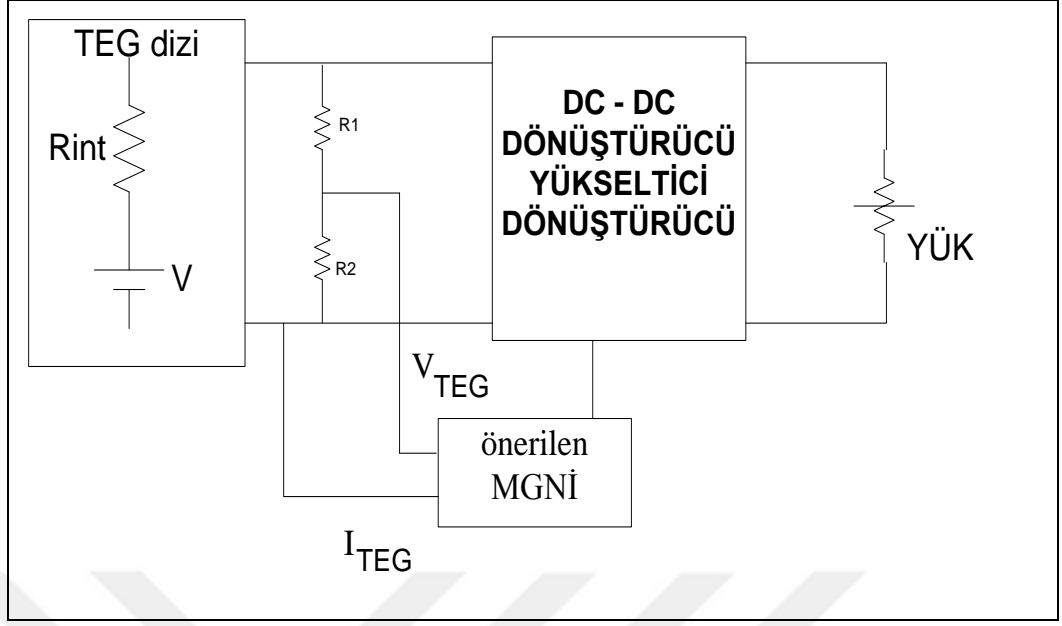
Bu araştırmanın amacı, TEG ile enerji üretme sisteminin performansını arttırmaya ve maksimum güç elde etmek için sistemi optimum çalışma noktasında çalıştırmaya odaklanmıştır. MGNİ, gerilim, akım ve sıcaklık farkı gibi referans değişkenleri olan bir algoritmadır. Bu değişkenlerin varyasyonlarına göre, bu algoritma herhangi bir koşul altında bir sinyal üreterek dönüştürücüyü kontrol eder ve enerji üretme sisteminde bir izleyici olarak (maksimum güç noktasını izleyerek) çalışır.

Temel olarak, TEG için enerji üretme sistemlerinde uygulanan MGNİ algoritmaları PV sistemler için kullanılan algoritmalar gibi kullanılmaktadır. En yaygın uygulanan algoritmalar Değişir ve Gözle (P & O) algoritması [18-20] ve artımlı iletkenlik (INC) algoritmasıdır. Ancak, P & O ve INC algoritmalarında kararlı durum salınımı ve algoritmalarındaki hatalar nedeniyle doğruluk eksikliği vardır.

TEG cihazlarının doğrusal karakteristiği nedeniyle, araştırmacıların çoğu, açık devre gerilimlerine ve kısa devre akımına dayanan MGNİ algoritmasını uygulamaktadır [21-24]. Burada algoritmalarda oluşturulan gücün maksimum değeri TEG in kısa devre akımı (I_{sc}) / açık devre geriliminin (V_{oc}) yarısındadır.

Bahsedilen algoritmalarda, bu tekniklerin çoğunun, I_{sc} akımı ve V_{oc} gerilimini ölçmek için TEG'in yükten ayrılmasının veya doğru sonucu sağlamayan bu değerleri tahmin etmenin dezavantajları vardır [25-27]. Ekonomik açıdan da, sistem maliyetini artıran ve sistemi daha karmaşık hale getiren bu algoritmalar uygulanadığında ekstra ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, Şekil 1.5'da gösterilen güç üretim sisteminde optimum işletim noktasını elde etmek için alternatif MGNİ algoritmaları önerilmiştir.

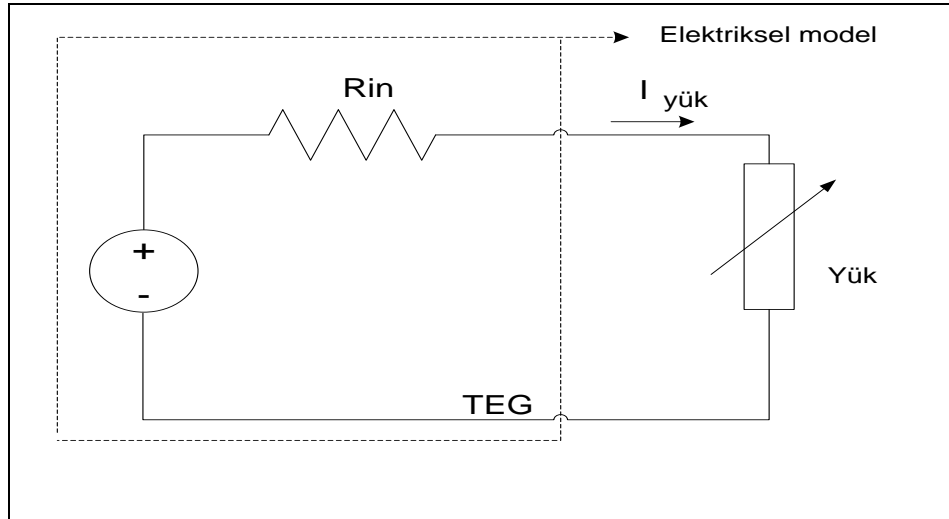


Şekil 1.5. TEG için önerilen MGN takibi ile enerji üretim sistemi

1.3.1. TEG'lerin temel teorisi

1.3.1.1. TEG'in yapısı

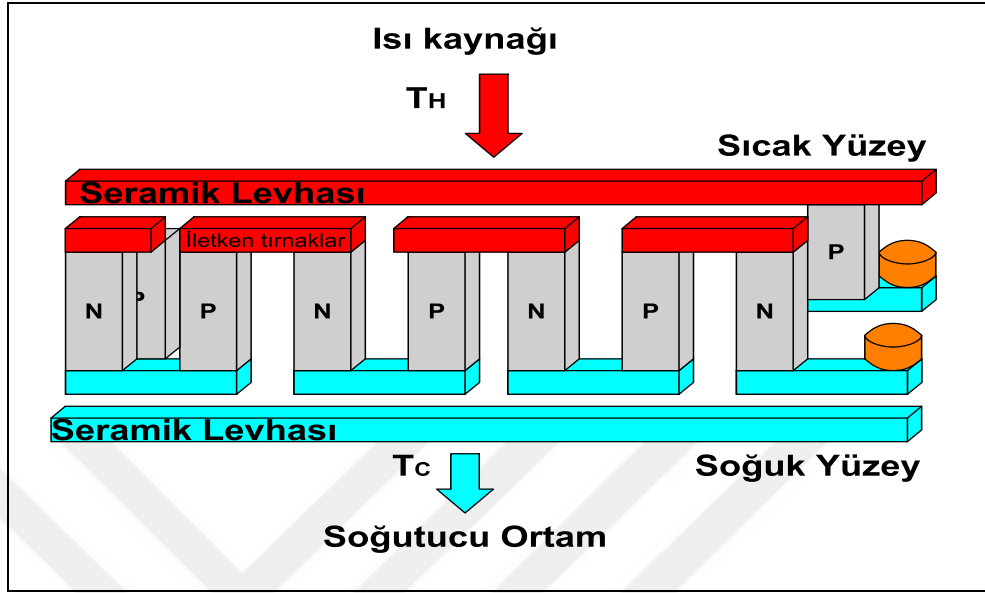
TEG Elektrik görünümünden, kararlı durumda bir iç dirençle, seri bir gerilim kaynağı ile şekil 1.6 gibi modellenebilir. Belirtildiği gibi, TEG'ler termokupulları oluşturan P ve N tipi yarı iletkenlerden yapılmış çok sayıda bacadan oluşur.



Şekil 1.6. Termoelektrik Generatörün elektriksel eşdeğer devre modeli

Yarıiletken bacaklar birbirine iletken bakır tırnaklarla bağlanmakta olup ısıyı ileten iki seramik levha arasına sıkıştırılırlar ancak bu levhalar elektrik akımına karşı

yalıtkandır. Üç boyutlu (3-D) çok elemanlı termoelektrik generatörün şematik diyagramı Şekil 1.7'de gösterilmiştir.

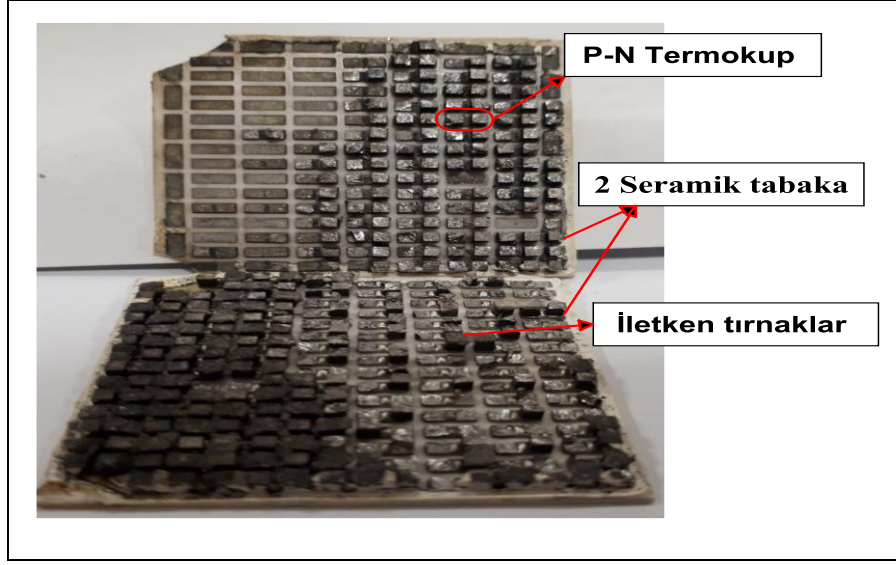


Şekil 1.7. Çok elemanlı TEG'in şematik yapısı

TEG'lerin üst seramik plakasına (sıcak taraf yüzeyine) otomobil motor egzoz gazları, endüstriyel, altyapı ısıtma faaliyetleri, jeotermal vb. çeşitli kaynaklardan gelen atık ısı uygulanabilir.

Şekil 1.7'de gösterildiği gibi, ısı P ve N tipi yarı iletkenlerin bacaklarının üst yüzeyine ulaşmadan önce seramik levhadan ve bakır iletken tırnaklardan akmaktadır. Bu yüzey TEG'in sıcak tarafı olarak tanımlanmaktadır. Bu ısı, hem yarı iletkenin bacaklarından hem de bakır iletken tırnaklar ve alt seramik plakasından akar. Ancak Soğutucu sayesinde, alt seramik plaka, üst seramikten daha düşük bir sıcaklıkta tutulur ve bunden dolayı yüksek sıcaklık farkı oluşturmayı mümkün kılar. Bu durum, TEG'in yüksek güç çıkışı üretmesini sağlamaktadır.

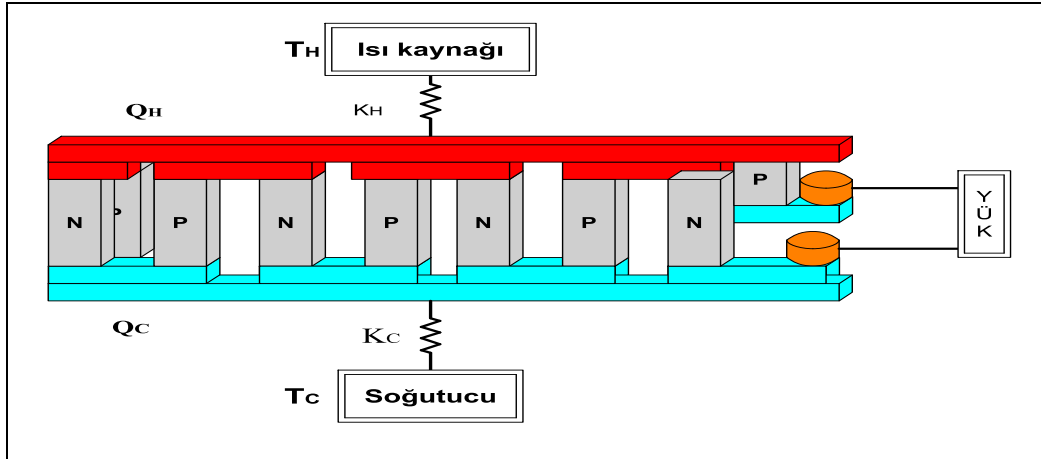
Üst ve alt seramik plakalara uygulanmasına izin verilen sıcaklık, P ve N tipi bacakların malzeme türüne bağlıdır. Ayrıca, Yarı iletkenler vasıtasıyla mümkün olduğunca ısı akışını kısıtlamak ve TEG'nin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkını korumak için P ve N tipi malzemeler düşük ısı iletkenliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ticari bir TEG' in iç yapısı Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Ticari TEG'in iç yapısı

1.3.1.2. Termal ve elektriksel direnç ağı

TEG'in bir boyutlu (1-D) modelinin belirlenmesi, absorbe edilen ısı ile uzaklaştırılan ısı arasındaki analitik ifadelerin belirlenmesinde faydalıdır. Çünkü TEG'in çıkış gücü, absorbe edilen ısı ile uzaklaştırılan ısı arasındaki fark ile orantılı olarak tanımlanır. Şekil 1.9'da TEG' in üst ve alt taraflarına uygulanan, sırasıyla ısı kaynağını ve ısı emicisinin 1-D şemasını gösterilmektedir.

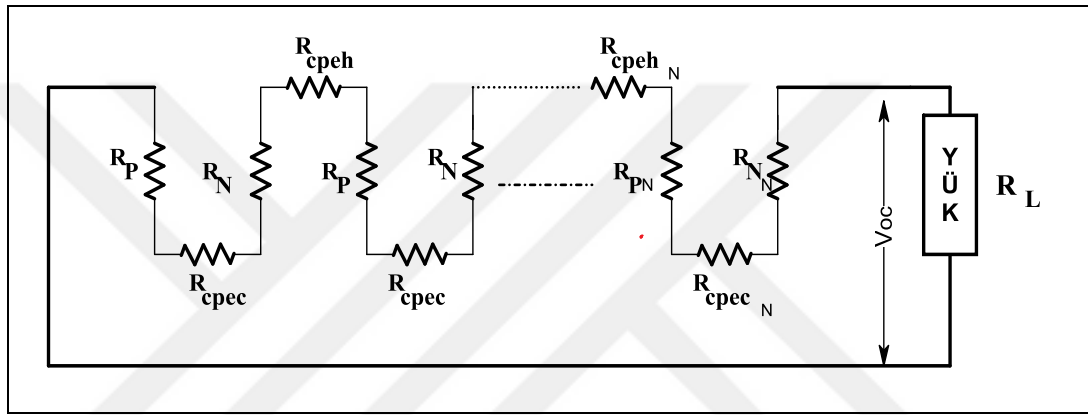


Şekil 1.9. TEG'in 1-D termal şeması

T_H , Q_H ve K_H sırasıyla, ısı kaynağı sıcaklığı, ısı kaynağından TEG'e verilen ısı miktarı ve TEG'in sıcak tarafının termal iletkenliğini temsil etmektedir. T_C , Q_C ve K_C sırasıyla, soğutucu sıcaklığı, TEG'den ısı emicisine verilen ısı ve TEG soğuk tarafının ısıl iletkenliğini ifade etmektedir. T_H ve Q_H , termokupların sıcak bağlantı

noktasını (jonksiyonu) ve sıcak TEG bağlantı noktaları boyunca ısı akışını tanımlar. T_c ve Q_c , termokuplların soğuk bağlantı noktasını (jonksiyonu) ve soğuk TEG bağlantı noktalarındaki ısı akışını tanımlar. Termoelektrik özellikler sıcaklıktan bağımsız olarak kabul edilirse, α , k , ρ sırasıyla, sabit Seebeck katsayısı, sabit ısıl iletkenlik ve sabit elektriksel direnç olarak tanımlanabilir.

TEG'in elektriksel iç yapısı ise Şekil 1.10'de gösterildiği gibi tanımlanabilir. P-tipi ve N-tipi yarı iletken ayaklar, birbirine elektriksel olarak, iletken tırnaklarla bağlanmıştır.



Şekil 1.10. TEG' in elektriksel iç yapısı

R_P ve R_N , sırasıyla P ve N tipi yarıiletken ayaklarla ilişkili elektriksel dirençleri temsil etmektedir. R_{cpeh} , R_{cpec} ve R_L sırasıyla, sıcak taraftaki bakır iletken şeritlerin elektrik direnci, soğuk taraftaki bakır iletken şeritlerin elektrik direnci ve harici yük direncini ifade etmektedir.

1.3.1.3. TEG'lerin performans analizi

TEG performansını tanımlayan ifadeleri elde etmek için, P ve N tipi yarıiletkenlerin bacakları tarafından oluşturulan termokupl yapısı kullanılacaktır. Şekil 1.4'te tekli termokupl içerisindeki ısı transferini göstermektedir. Hem P hem de N tipi yarıiletkenlerin ayaklarının uzunluk ve kesit alanı sırasıyla L ve A olarak tanımlanmıştır.

Hem P- hem de N-tipi yarı iletken bacakların sıcak bağlantı noktasında (jonksiyonda) absorbe edilen toplam ısı (1.4) ile verilmiştir:

$$Q_h = (\alpha_p - \alpha_n) IT_h + \left(\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_h - T_c) - 0.5 \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) I^2 \quad (1.4)$$

Burada, A_p , A_n , L_p , L_n , k_p , k_n , ρ_p ve ρ_n sırasıyla, P ve N tipi yarıiletken bacakların kesit alanını, uzunluğunu, termal iletkenliğini, elektriksel öz direncini temsil etmektedir. p-tipi ve n-tipi yarı iletken bacakların soğuk bağlantı noktasından uzaklaştırılan toplam ısı Denkelem (1.5) ile verilmiştir.

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n) IT_h + \left(\frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_h - T_c) + 0.5 \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) I^2 \quad (1.5)$$

TEG, sıcak tarafta absorbe edilen ısı, soğuk tarafta uzaklaştırılan ısı, güç çıkışı, üretilen gerilim, yük direnciyle ve elektrik devresinde akan akım dahil olmak üzere çok sayıda performans ifadesi ile karakterize edilir. Denklem (1.4) ve (1.5)'ten aşağıdaki ifadeler tanımlanmıştır.

$$K = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \quad (1.6)$$

$$r = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (1.7)$$

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (1.8)$$

N adet yarı iletken termokupl için sıcak ve soğuk yüzeylerden ısı akışının ifadeleri Denklem (1.9) ve (1.10) ile tanımlanabilir:

$$Q_H = N(\alpha T_H I_{TEG} - \frac{1}{2} r I_{TEG}^2 + K(T_H - T_C)) \quad (1.9)$$

$$Q_C = N(\alpha T_C I_{TEG} + \frac{1}{2} r I_{TEG}^2 + K(T_H - T_C)) \quad (1.10)$$

Bilindiği gibi, TEG tarafından üretilen güç, sıcak tarafta emilen ısı ve soğuk tarafta uzaklaştırılan ısı arasındaki fark ile doğru orantılı olarak tanımlanır:

$$P = Q_H - Q_c = N(\alpha(T_H - T_c)I_{TEG} - rI_{TEG}^2) \quad (1.11)$$

TEG tarafından üretilen optimum akım, Denklem (1.11)'den türetilen Denklem (1.12) ile elde edilir.

$$\frac{dP}{dI_{TEG}} = N(\alpha(T_H - T_c) - 2I_{TEG}r) \quad (1.12)$$

Maksimum akımı belirlemek için, Denklem(1.12)'nin sifira eşitlenmesiyle elde edilen (1.13) dDnklemi kullanılır.

$$I_{TEG\ m} = \frac{\alpha(T_H - T_c)}{2r} \quad (1.13)$$

Genel olarak, Şekil 1.6'da gösterilene benzer şekilde bir dizi termokuplda indüklenen gerilim, çekilen akım ve çıkış gücü sırasıyla, şöyle tanımlanır:

$$I_{TEG\ m} = \frac{\alpha(T_H - T_c)}{r + R_L} \quad (1.14)$$

$$P_0 = I_{TEG\ m}^2 R_L = \left(\frac{\alpha(T_H - T_c)}{r + R_L} \right)^2 R_L \quad (1.15)$$

$$V_0 = I_{TEG\ m} R_L = \left(\frac{\alpha(T_H - T_c)}{r + R_L} \right) R_L \quad (1.16)$$

R_L , harici direnç yüküdür. Bir dizi termokupldan oluşan TEG ile elektrik devresinde üretilen maksimum elektrik akımını ve çıkış gücünü elde etmek için harici direnç, P ve N tipi yarı iletken bacakların toplam dahili elektrik direncine eşit olmalıdır. TEG'in verimliliği şu şekilde tanımlanır:

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{out}}{Q_H} \quad (1.17)$$

Gerçek bir TEG'de, P ve N tipi yarı iletkenler olmak üzere iki tip termoelektrik malzeme kullanılır. TEG tarafından sağlanan maksimum verimlilik şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{T_H}{T_c}\right) \frac{\sqrt{1+Z\bar{T}-1}}{\sqrt{1+Z\bar{T}+\frac{T_H}{T_c}}} \quad (1.18)$$

Burada Z, yarı iletken malzemelerin yararlılık (performans) katsayısı, \bar{T} sıcak ve soğuk taraftaki sıcaklık değerlerinin ortalama sıcaklığıdır.

1.3.1.4. TEG için ZT parametresi

Termoelektrik malzemeler için, malzemelerin performansının belirlenmesinde yüksek enerji dönüşüm verimliliği yeteneği en önemli standarttır. Yararlılık (performans) katsayısı (ing. Figure of Merit -FOM), farklı materyallerle yapılan cihazların potansiyel verimliliğini karşılaştırmak için kullanılan ölçüdür. Termoelektrik cihazlar için yararlılık (performans) katsayısı (FOM), Denklem (1.19)'da tanımlanmıştır.

$$Z = \frac{\alpha^2}{k\rho} \quad (1.19)$$

Burada ρ elektriksel öz direnci, k termal iletkenliği ve α Seebeck katsayısını temsil etmektedir. FOM hesaplamasında kullanılan Seebeck katsayısı için geleneksel birim $\mu\text{V} / \text{K}$ ' dir. Daha yaygın olarak kullanılan ölçü, boyutsuz FOM, $Z\bar{T}$ ' dir. Ve \bar{T} , cihazdaki ortalama sıcaklık $(T_2 + T_1) / 2$ dir. Termokupl'daki her iki bacağı hesaba katmak gerekirse, boyutsuz FOM aşağıdaki Denklemlerle ifade edilebilir:

$$Z\bar{T} = \frac{(s_p - s_n)^2 \bar{T}}{\left[(\rho_n k_n)^{1/2} (\rho_p k_p)^{1/2} \right]^2} \quad (1.20)$$

Burada \bar{T} , cihazın sıcak ve soğuk tarafı arasındaki ortalama sıcaklık, n ve p alt simgeleri N ve P tipi yarı iletkenleri göstermektedir. Yakın zamanda üretilen TE malzemeleri için, $ZT = 1$ değeri iyi olarak kabul edilirken, en az 3-4 aralığındaki ZT değerleri, mekanik üretim ve soğutmada verimlilik ile rekabet edebilmesi adına

termoelektrikler için gerekli olarak kabul edilmektedir. Denklem (1.19)'dan, FOM değerini arttırmak için Seebeck etkinliği artırabilir veya termal iletkenliği azaltabilir. Bunlar aynı zamanda mevcut TE malzeme araştırmalarının odak noktasıdır. Nanoteknolojinin ilerlemesi ile bu hedefler malzemelerin nano yapısı manipüle edilerek elde edilebilecektir.

TEG cihazlarının yüksek performans sağlaması için, malzemelerin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir:

1. Büyük Seebeck Katsayıları.
2. Yüksek Elektriksel İletkenlik.
3. Düşük Isı İletkenliği.

Ayrıca, modern TE çiftlerinde, TE çiftinin verimliliğini arttırmak için genellikle iki veya daha fazla malzeme türü tek bacakta bulunmaktadır. TE çift verimliliğini arttırmaya yönelik bu yaklaşım, segmentasyon olarak adlandırılır. Aynı bacak yapısındaki materyallerin uyumluluk faktörleri 2 veya daha fazla faktörle farklılık gösteremez [28] kuralı gözardı edilmemelidir. Bu kural ihlal edilirse, maksimum verimlilik aslında segmentasyonla azaltılabilir.

1.3.2. TEG malzemeleri

20. Yüzyılın ortalarında Loffe, yüksek Seebeck katsayısı ve fonon-transport-dominant ısı iletimi nedeniyle yarı iletken malzemeleri fark edene kadar metaller, TEG'lerin üretiminde kullanılan ana malzemelerdi. Metallerin yüksek elektriksel iletkenlik derecesine, ısıl iletkenliğe sahip olmasına rağmen, modern TE malzemeler çoğunlukla yarı iletkenlerden oluşmaktadır. TEG'lerin performansları, kullanılan malzemelerin özelliklerinden büyük ölçüde etkilenirler. Bu nedenle, yüksek performanslı bir TEG tasarımı için TEG malzemelerinin seçimi ve kombinasyonu çok önemlidir. Bu sebeple TEG materyal ailelerini incelemek ve karşılaştırmak gerekmektedir.

Chalcogenides materyal ailesi, ana malzeme bizmut tellurid (Bi_2Te_3) ve alaşımlarıdır ve oda sıcaklığının altında çok iyi TE malzemeleridir [29]. Termal iletkenliği önemli ölçüde azaltmak için Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 ile alaşımlı veya Bi_2Se_3 ile alaşımlı olabilir. Ancak, Tellüryum az bulunan, toksik ve yüksek sıcaklıklarda uçucu olduğu için

kullanımı sınırlıdır. Kurşun telluride'in (PbTe) 300-700 Kelvin aralığındaki sıcaklıklarda iyi termoelektrik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Benzer şekilde PbS ve PbSe gibi termoelektrik malzemeler de chalcogenides sistemine aittir.

Germanyum telluride GeTe ile gümüş antimon telluride $AgSbTe_2$ alaşımı $((AgSbTe_2)_{1-x}(GeTe)_x)$, yaygın olarak TAGS olarak adlandırılır) başlangıçta, uzay güç kaynakları için radyoizotop TEG'ler gibi daha yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda p-tipi PbTe' nin yerini almak üzere düşünülmüştür. TAG uzun ömürlü termoelektrik generatörlerde başarıyla kullanılmıştır [30].

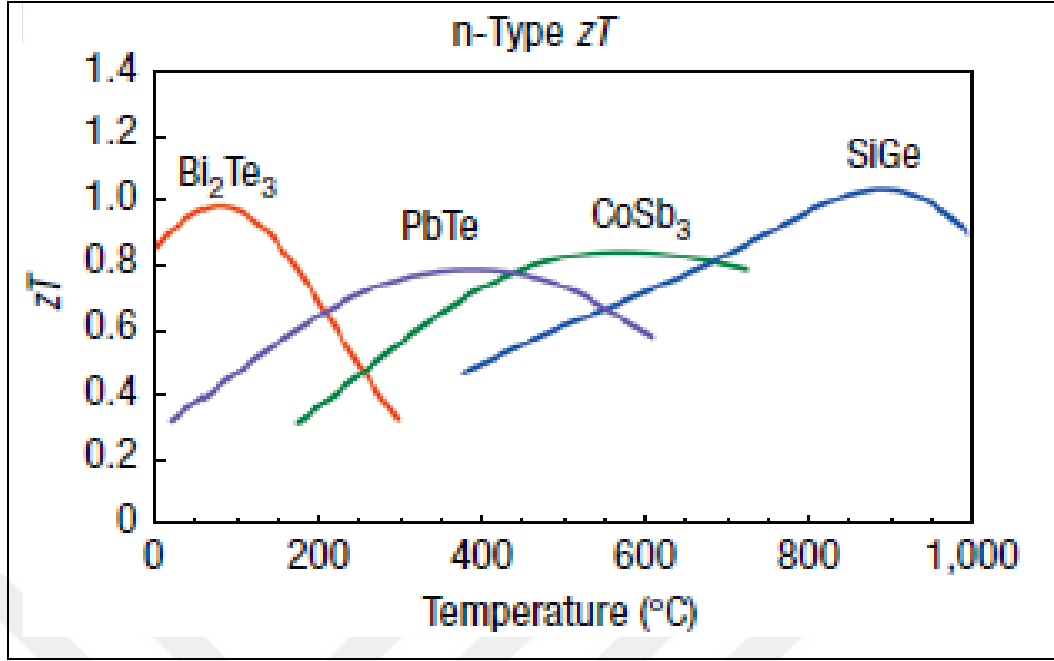
SiGe alaşımları, termoelektrik üretimi için üstün malzemelerdir ve tipik olarak yüksek sıcaklıklarda (> 900 Kelvin) TEG'lerde hem N tipi hem de P tipi bacaklar için kullanılır. Ancak, Bu malzemelerin ZT' si, özellikle P tipi materyaller için oldukça düşüktür [30].

Skutterudites ($ReTm_4M_{12}$) karmaşık malzemelerdir ve nadir toprak elementleri (Re), geçiş metalleri (T_m) ve metaloidler (M) içerir. Skutteruditin ZT' sinin 700 KELVİNDE 1'den daha büyük olduğu bulunmuştur.

Metal oksit, 2007 yılında Snyder G. Ve Toberer E. tarafından yeni bir TE malzeme sınıfı olarak tanıtıldı [31]. Tanıtılan metal oksit, $SrTiO_3$ 'te iki boyutlu bir elektron gazı (2DEG) idi. 2DEG, toplu ve optimize edilmiş bir ZT'ye kıyasla yaklaşık 5 kat artırılmış bir Seebeck katsayısını göstermektedir ve bu malzemeler ZT'si geleneksel termoelektrik malzemelerin iki katı olan 2,4'e ulaşmıştır.

Oksit TE malzemeleri, yüksek sıcaklıklarda kimyasal olarak kararlı olduklarından ve toksik olmadıklarından ümit vericidirler. Ancak, Oksit ve elektrotların arayüzlerinde zayıf mekanik mukavemet, yüksek temas direnci gibi genel problemleri vardır.

Çeşitli malzemeler için, 0-1000 ° C sıcaklık aralığı üzerindeki ZT değerleri Şekil 1.11' de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. 0-1000 aralığında bazı TEG materyalleri için performans katsayısı ZT değişimi [28]

2. TEG TESTLERİ VE KARAKTERİSTİKLERİ

Ticari bir TEG'in üretim verileri kullanılarak TEG için MATLAB/Simulink' te bir model geliştirilmiştir. Modelge giriş olarak gerçek zamanlı değişen sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Modelin çıkış büyüklükleri ise, Seebeck katsayısı, açık devre gerilimi (V_{oc}) ve TEG'in iç direnci (R_{in})'dir. Bunlar, dönüşüm sisteminin işleyişi ile ilgili en önemli parametrelerdir. TEG modülünün değişken sıcaklık farkı (ΔT) değerlerinde performansı geliştirilen bu TEG modeli ile analiz edilmiştir.. TEG için oluşturulan MATLAB/Simulink modli Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Yapılan benzetimlerde TEG modülünün parametreleri olarak TEP1-142T300 tipi TEG verileri kullanılmıştır.

TEG'nin elektriksel direnci r , aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$r = \frac{V_m^2}{P_m} \quad (2.1)$$

Burada, V_m TEG gerilimi , P_m TEG gücüdür. m indisi ise, TEG'in maksimum güç noktasında (MGN) çalıştığını belirtir.

TEG'in Seebeck katsayısı (2.2) Denklemiyle gösterilir.

$$\alpha = \frac{2V_m}{\Delta T} \quad (2.2)$$

Ohm yasasına göre, TEG'nin yük akımı şu şekilde belirlenebilir:

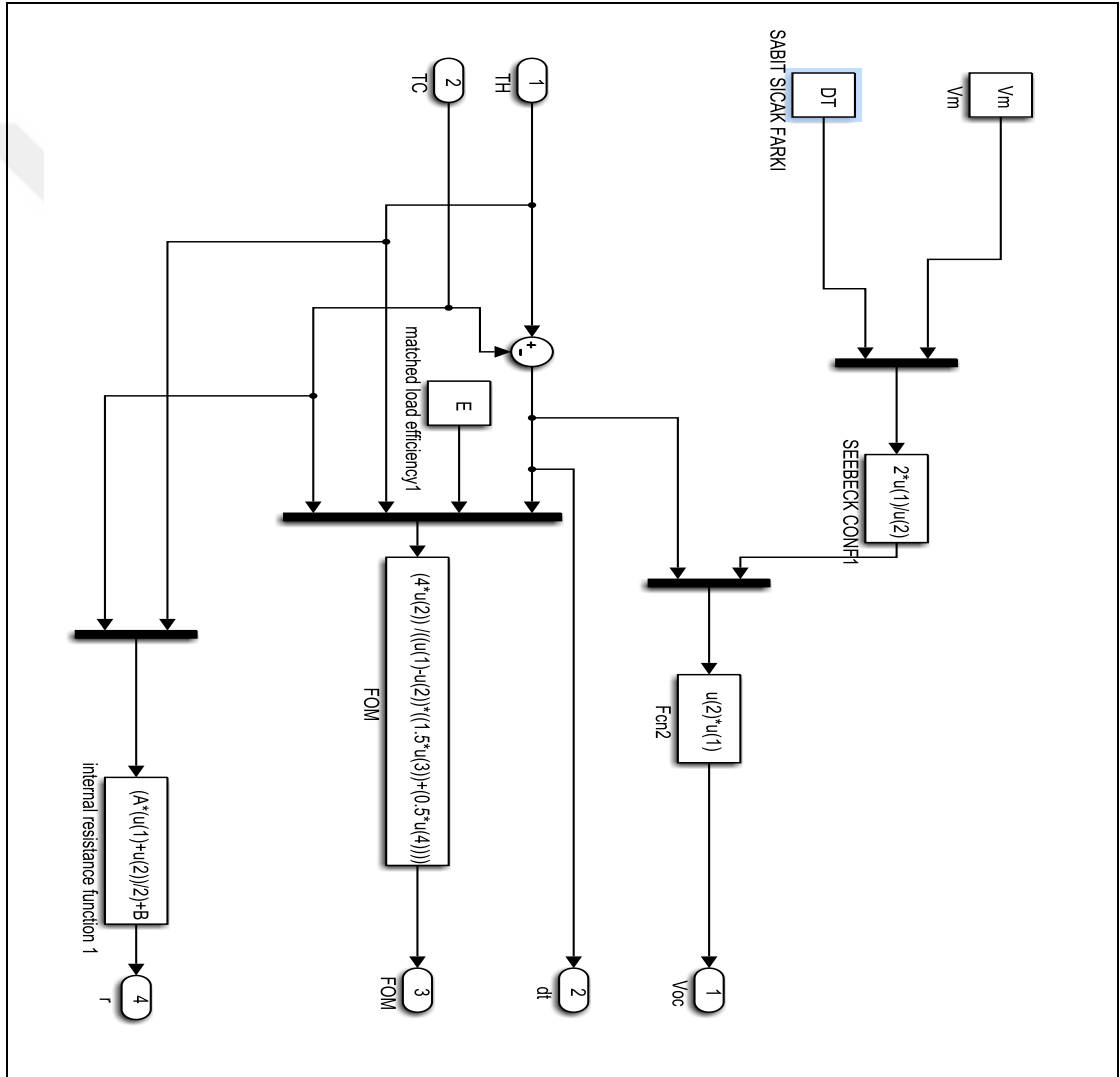
$$I_L = \frac{\alpha \Delta T}{(r + R_L)} \quad (2.3)$$

Bir varsayım olarak, yük direnci $R_L = mR$ olarak gösterilebilir. Burada m , yük ve iç direnç arasındaki direnç oranıdır. Yük üzerinden akan akım Denklem (2.4)'de olduğu gibi gösterilebilir.

$$I_L = \frac{\alpha \Delta T}{(1+m)R} \quad (2.4)$$

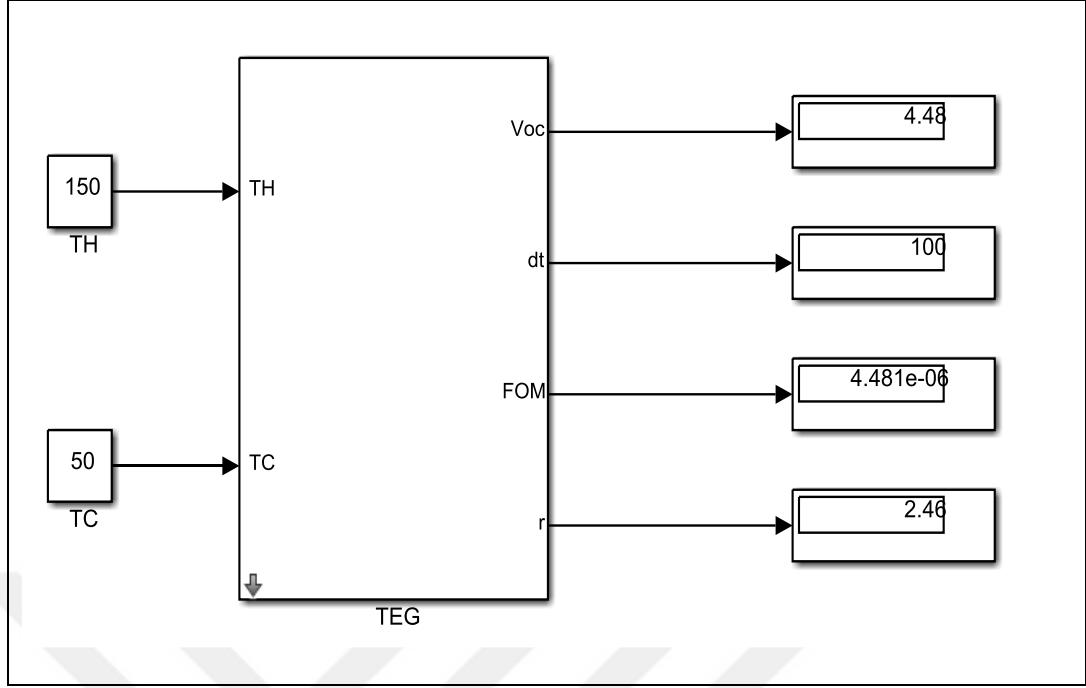
Ayrıca, Yüknün gücü şu şekilde belirlenebilir:

$$P_L = \left(\frac{\alpha^2 \Delta T^2}{(R+R_L)^2} \right) R_L \quad (2.5)$$



Şekil 2.1. TEG simulink modeli

TEG'in Voc gerçek zamanlı verileri kontrollü gerilim kaynağı ile ve iç direnç (Rint) gerçek zamanlı verileri değişken direnç ile eşlenebilmektedir. Şekil 2.2 TEG alt sistemini göstermektedir.



Şekil 2.2. TEG için Matlab/Simulink modelinin genel görünümü

2.1. Tek Tek TEG için Deneysel Tasarımı

TEG' i karakterize etmek için, [32-35]'de doğru karakteristik sonuçlar veren birkaç test önerilmiştir. Bu çalışmada, TEG' in performansını test etmek, doğru tekrarlanabilir ölçümler sağlamak ve TEG'in elektriksel özelliklerini elde etmek için basit bir test düzeneği tasarlanmıştır. Şekil 2.3 test platformunu göstermektedir. Platform ile çeşitli direnç yüklerinde TEG terminallerindeki farklı sıcaklık farkları altında gerçek ölçümler yapılabilmektedir. Sistemin maksimum güçte çalışmasını sağlamak için önerilen algoritmaları değerlendirmek üzere ticari bir TEG modülü seçilmiştir. Sıcaklık değişimlerini ve sıcaklık değişiminin üretim sistemindeki elektriksel parametreler üzerindeki etkilerini incelemek için seçilen TEG yüzeyine kararlı ve kararsız bir sıcaklık farkı uygulanmaktadır. Tablo 2.1 deneysel test platformunda kullanılan ticari TEG (TEP1-142T300) veri sayfasını göstermektedir.



Şekil 2.3. Deneysel test platformu

Tablo 2.1. TEG modülünün veri sayfası

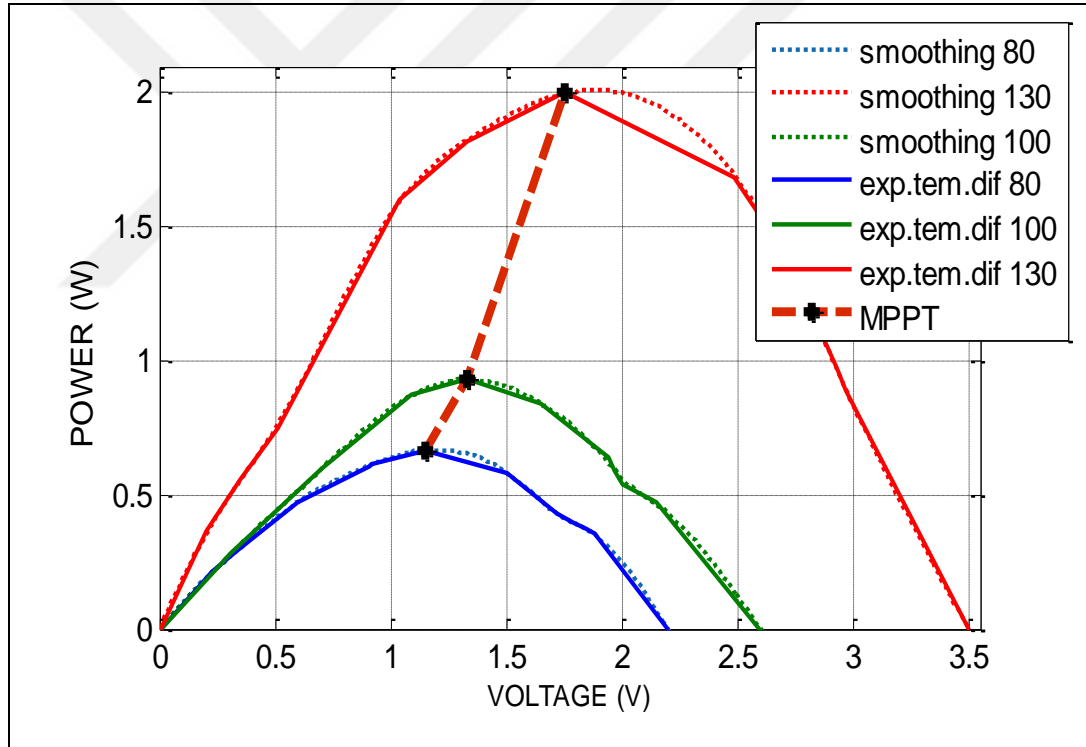
TYPE	No. of couples	Geometrical dimensions, mm			Tcold=50 Thot=150			efficiency %
		L	W	H	Rin ohm	V v	I amp	
		TEP1-142T300	128	40	40	3,4	2.25	

TEG cihazı, sıcak bir blok ve soğuk bir blok arasında sıkıştırılmıştır. Platformda TEG'nin sıcak tarafını ısıtmak için elektrikli ısıtıcı bulunmaktadır. Ayrıca, TEG'in soğuk tarafını soğutmak için soğutucu üzerinde bir fan kullanılmıştır. TEG'in çıkış terminalleri değişken bir direnç yüküne bağlanmıştır. Ticari TEG (TEP1-142T300) üç farklı sıcaklık farkında ΔT : 80 °C, 100 °C ve 130 °C için termal kamera kullanarak karakterize edilmiştir.

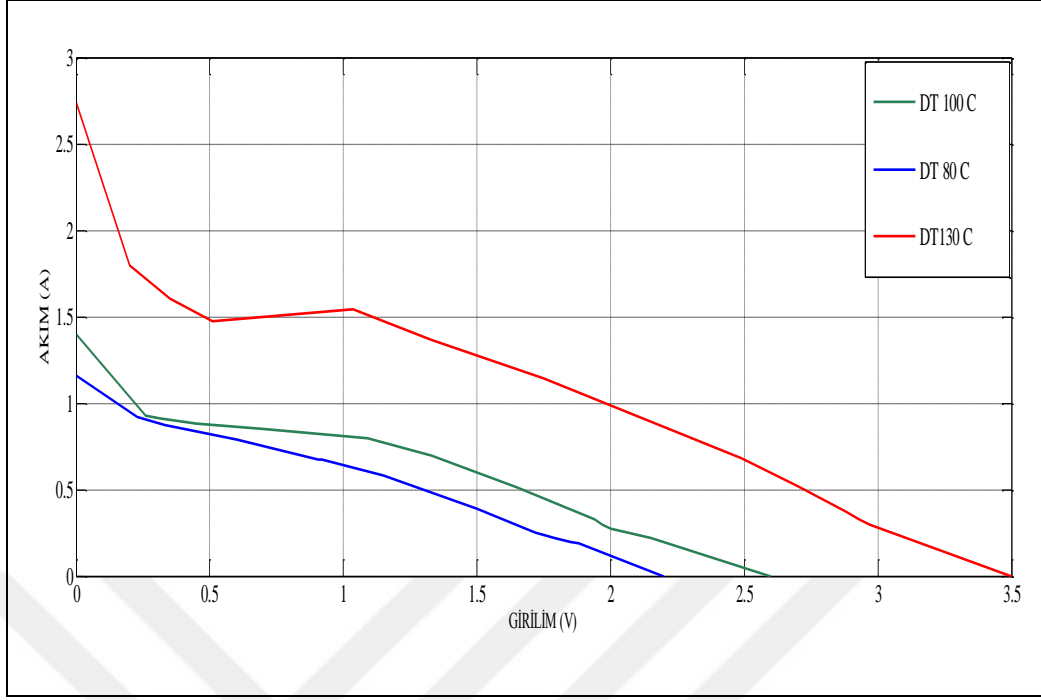
Çalışma sırasında, TEG, bir dizi termal ve mekanik baskılara maruz kalacaktır ve bu baskılardan dolayı, TEG modülünün fiziksel boyutu, tipik olarak $100 \times 100\text{mm}^2$ den daha az olacak şekilde sınırlandırılmaktadır.

Modüle etkiyen baskılar, termoelektrik malzemenin peletlerini çevreleyen üst ve alt tabakaların fiziksel boyutundaki değişimin sonuçlarıdır. Bu değişim, TEG üretiminde kullanılan malzemelerin ısıl genleşmesi veya büzülmesindeki uyumsuzluktan dolayı meydana gelir. Yarı iletken materyal, malzemenin ısıl iletkenliğini direkt değiştirir, bu da termal sıcaklık eğrisinin eğimini etkiler ve işlem sırasında mekanik baskıların oluşmasına neden olur. TEP1-142T300 kodlu ürün için Şekil 2.4' te Güç-Gerilim, Şekil 2.5'te ise Akım-Gerilim eğrileri verimiştir. 128 çiftten oluşan, fiziksel boyutu $44 \times 44\text{mm}^2$ olan bu modül ΔT 80 °C, 100 °C ve 130 °C'de test edilmiştir.

Şekil 2.4'da eğri çizgi, TEG cihazı için çeşitli sıcaklık farkı altında güç eğrisini temsil eder (P-V) ve Şekil 2.5' teki düz çizgi, çeşitli sıcaklık farkları altında gerilim - akım (V-I) karakteristiğini temsil etmektedir.



Şekil 2.4. TEG modülünün $\Delta T = 80$ °C, 100 °C ve 130 °C için P-V karakteristiği (TEP1-142T300)



Şekil 2.5. TEG modülünün I-V karakteristiği (TEP1-142T300)

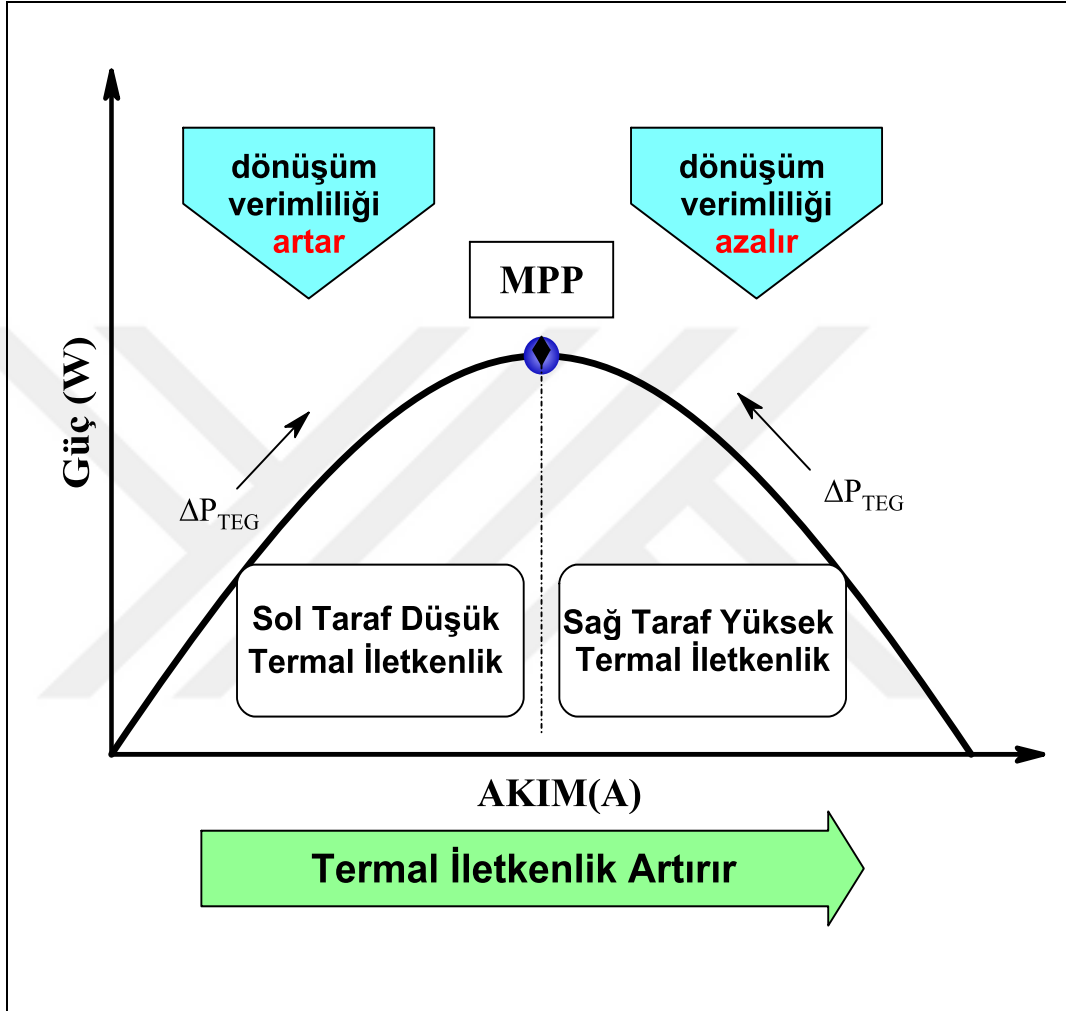
Elde edilen karakteristikten, Maksimum güç noktasında çalışabilmek için yükün çalışma noktasının, açık devre geriliminin yarısında ($V_m = V_{OC}/2$) ya da kısa devre akımının yarısında ($I_m = I_{SC}/2$) olması gerektiği görülür. Örneğin, seçilen modül verileri, Şekil 3.4'de 130 ° C'de gösterilmektedir, maksimum güç, açık devre gerilimi 3.5 V'un yarısına karşılık gelen gerilimde yaklaşık 2 W'a denk gelmektedir.

Yani, TEG'e bağlı harici devredeki elektriksel eşdeğer yük direnci, TEG'in elektriksel iç direncine eşit olduğu zaman MGN elde edilecektir.

R_{int} , (I-V) eğrisinin ters eğimli haline karşılık gelmektedir ve TEG çalıştığında R_{int} mutlak değeri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla R_{int} 'in sabit bir değere sahip olmadığı anlaşılmaktadır.

TEG, Şekil 2.6'de gösterildiği gibi maksimum güç noktasının sol tarafında çalıştırıldığında, TEG'den çekilen akım miktarı azalır ve TEG'nin etkin termal iletkenliği (Bu da Parazit Peltier etkisi nedeniyle mevcut akışa bağlıdır) azalır. Bu şart altında, TEG üzerinden gerçekleştirilen termal enerji, maksimum güç noktasında olduğundan daha düşüktür ve dolayısıyla genel sisteme daha düşük bir termal yük uygulanır. Bu çoğu durumda avantajlıdır çünkü sistemin termal verimliliğini arttırmaktadır.

TEG, maksimum güç noktasının sağında çalıştırıldığında, termal iletkenlik artar ve TEG yardımıyla gerçekleştirilen termal enerji, maksimum güç noktasında akandan daha büyüktür. MGN'nin sağındaki bölgede çalışma, sistemin termal verimliliğini azaltır.



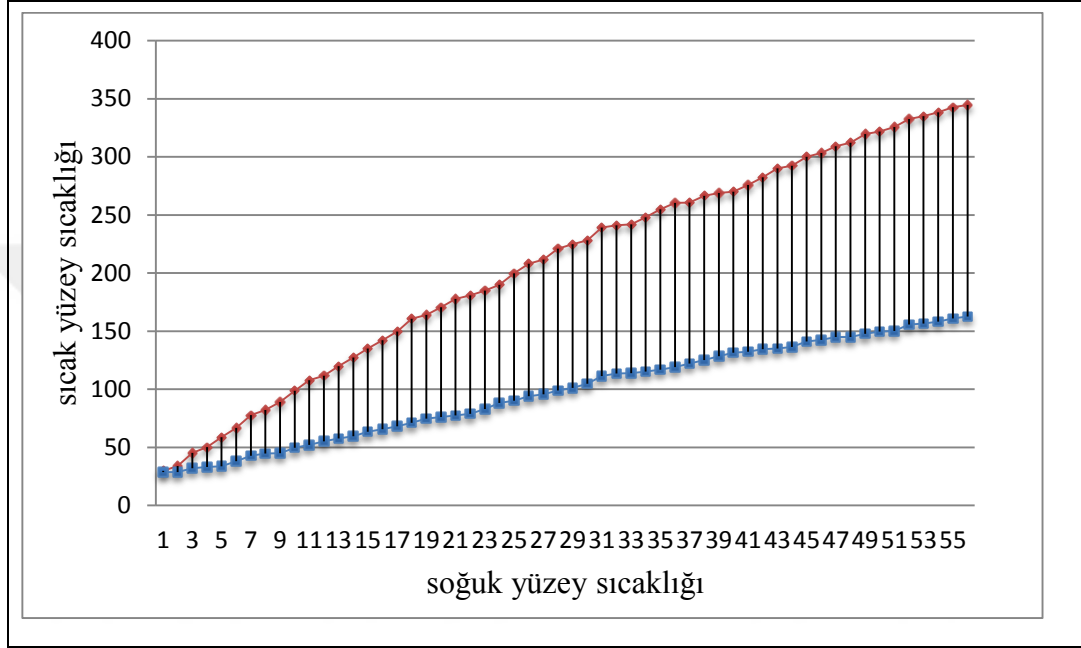
Şekil 2.6. Genel P-I eğrisinde MGN karakterizasyonu

Kullanılan modül için üç ayrı sıcaklık farkı değerinde maksimum güç noktası ve TEG'in iç direnç değişimi Tablo 2.2' de verilmiştir.

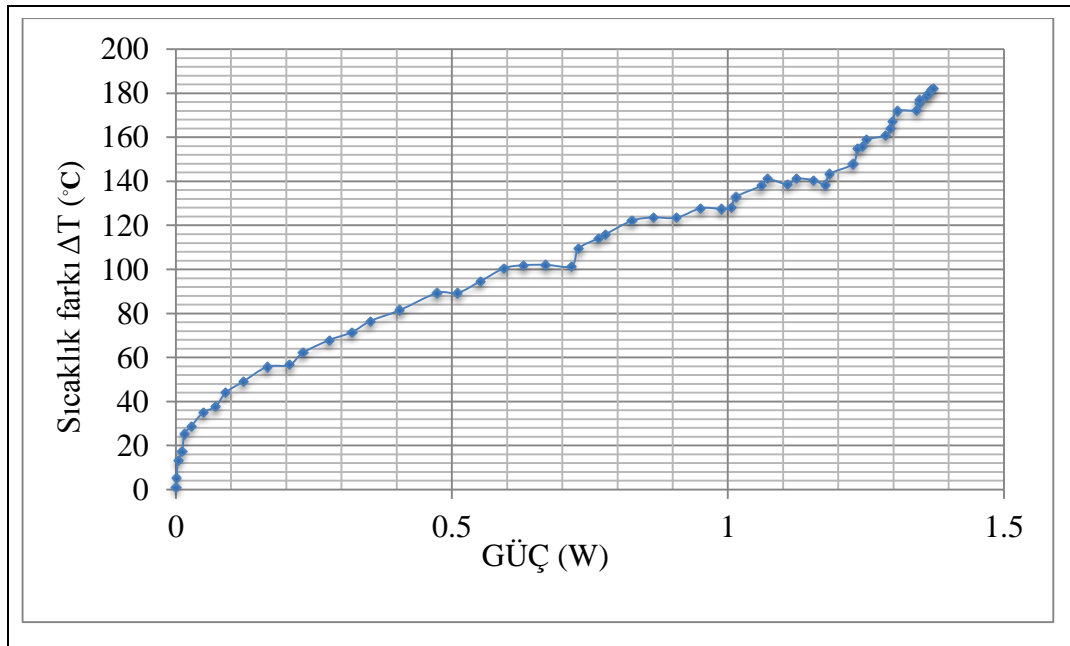
Tablo 2.2. TEG performans parametreleri

ΔT	V	I	P	R_{in}
80	1,15	0,58	0,667	2,206897
100	1,41	0,7	0,987	2,314286
130	1,96	1,03	2,0188	2,951456

Şekil 2.7'de kırmızı eğri, TEG'nin sıcak tarafındaki sıcaklık artışını gösterirken, mavi eğri, soğuk tarafın sıcaklığını ve 4 ohm'da dinamik durumlar altında ΔT 'nin artışını göstermektedir. Şekil 2.8 TEG materyaline göre TEG çıkış gücü ve sıcaklık farkı (ΔT) arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır.



Şekil 2.7. $R_L = 4$ ohm için TEG modülünün (TEP1-142T300) T_H - T_C karakteristiği

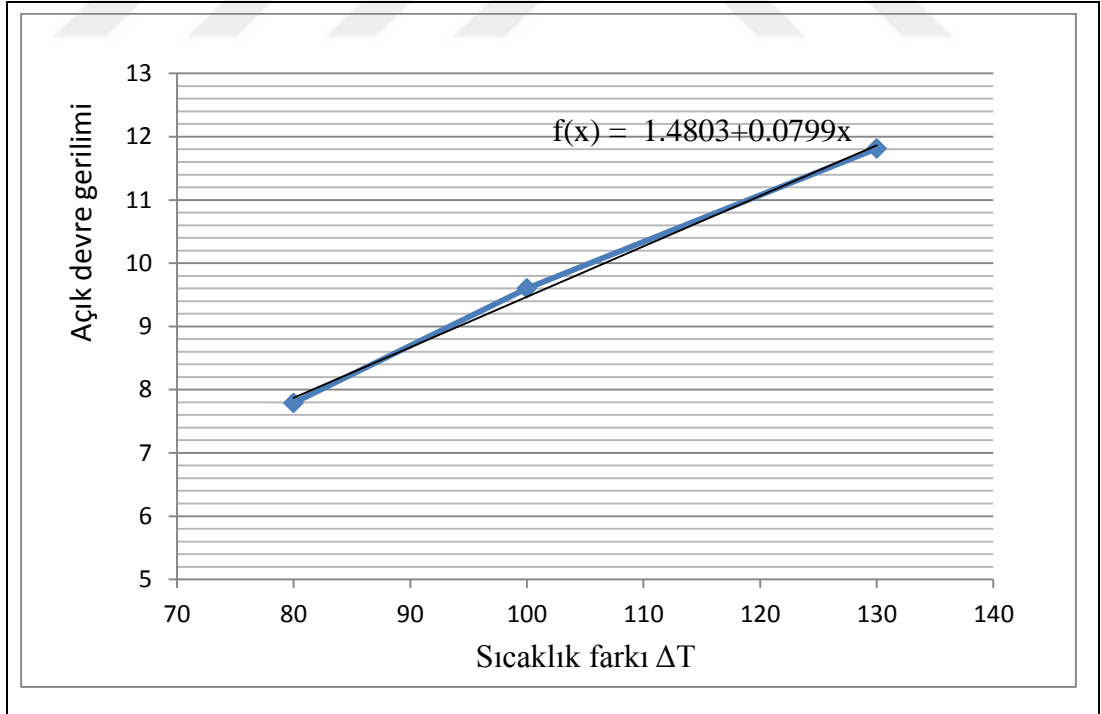


Şekil 2.8. $R_L = 4$ ohm'da TEG modülünün (TEP1-142T300) ΔT -P karakterizasyonu

Deneysel sonuçlarda elde edilen enerji düşüktür. Yüksek enerji gerektiren uygulamalar için farklı bir yapılandırma gereklidir. Ek olarak sıcak taraf ve soğuk taraf sıcaklıklarındaki bir değişiklik ile elektriksel parametrelerin değiştiği gözükmemektedir. Sıcaklık farkı (ΔT) yükseldiğinde, maksimum çıkış gücü ve açık devre gerilimi artar.

Tipik olarak, TEG modelinin sıcak taraf yüzey sıcaklığı yüksek ve yüzeyler arasında sabit bir sıcaklık farkı (ΔT) olduğunda, TEG modelinin verimliliği artar. Dinamik koşullar için, uyumsuz şartlar altında gerçek maksimum güç noktasını (MGN) izleyebilecek özel maksimum güç noktası izleme (MGNİ) algoritmaları geliştirmek gerekir.

TEG, kararlı durumda çalışıyorsa çıkış gerilimi ile ΔT arasındaki fonksiyonun lineer olarak gösterilebilir ($f(x)=b+ax$). Burada $f(x)$ gerilim fonksiyonu, x TEG yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ve a , b ise sabit sayıları temsil etmektedir. Sıcaklık farkı (ΔT) ile açık devre geriliminin değişimi Gauss eliminasyon yöntemi kullanılarak Şekil 2.9' da gösterildiği gibi olarak hesaplanabilir.



Şekil 2.9. TEG'nin sıcaklık farkına karşılık açık devre gerilimi değişimi

2.2. Çok Hücreli TEG Sistem Yapıları

Bir adet TEG modülünden elde edilen enerji çok düşük olmaktadır . Daha yüksek çıkış gücü elde etmek için, TEG modelini n eleman sayılı bir TEG-dizisi (Seri bağlantı ve/veya paralel bağlantı) şeklinde kullanılması gereklidir

Bağlantı türleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Referans [36] deneysel yöntemler ve sayısal hesaplama yöntemleri ile TEG modülleri için seri-paralel bağlantı şeklinin performansına odaklanmıştır. Araştırma bulguları sonucunda, Tüm TEG modülleri aynı parametrelere sahip olduğunda ve aynı koşullarda çalıştıklarında, TEG'nin seri-paralel özellikleri, ortak DC gücün seri-paralel özellikleriyle aynı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

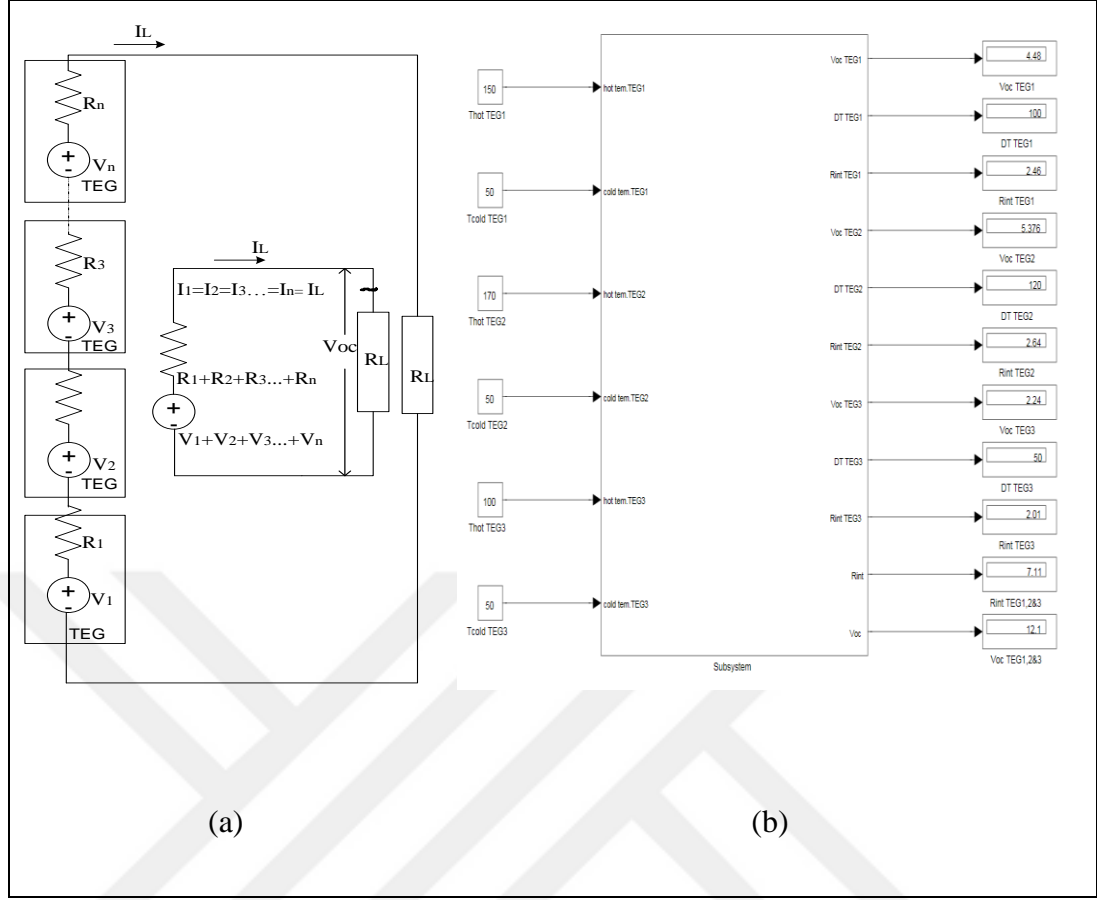
Birçok araştırmacı TEG modüllerinin performans analizi üzerinde aynı çalışma koşulları altında yoğunlaşarak çoklu modüllü TEG yapıları (modülleri) üzerinde çalışmıştır [37-39].

Diğer taraftan, farklı çalışma koşullarında TEG modüllerinin araştırılmasına, farklı bağlantı yöntemleri (seri, paralel) ile analitik bir TEG dizisi modeli oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Seri TEG dizisinin çıkış performansı ve paralel TEG dizisinin çıkış performansı bu çalışmada ayrı ayrı incelenmiştir.

Pratik termoelektrik sistemlerde, daha büyük akım ve gerilim değerlerine ulaşmak için seri ve veya paralel ara bağlantılara sahip birçok termoelektrik modül yerleştirilmektedir ve TEG'lerin birbirine bağlanma yöntemi genellikle ihtiyaç duyulan gerilim ve akım değerine göre belirlenmektedir.

2.2.1. Seri dizisi yapılandırması

Şekil 2.10 (a), n eleman sayılı TEG'den oluşan sistemin seri bağlantısını göstermektedir. Bunların her biri bir iç direnç değeri olan R_1, R_2, R_3, R_n ile seri olarak bir V_1, V_2, V_3, V_n gerilimli gerilim kaynağı ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.10. (a) n elemanlı seri TEG dizisinin elektriksel şeması (b) 3 adet seri bağlı TEG için MATLAB/Simulink ana modeli

İdeal çalışma koşulları altında, dizideki her modül eşit bir ΔT 'ye sahip olmalı, tüm modüller eşit çıkış gerilimi V_{OC} üretmeli ve dizi dengeli bir termal durumda olmalıdır. Bu durumda MGN ($n \cdot V_{OC} / 2$) değerine denk gelmektedir ve genel dizi iç direnci $n \cdot R_{int}$ olmaktadır.

Ancak, Pratik bir sistemdeki gerçek termal çalışma koşulları altında, her bir TEG'in farklı bir ΔT değerine sahip olabileceği için bu TEG dizilerinin gerilimleri ve iç dirençleri eşit olmayacaktır. Bu durumda $V_{OC} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$ ve yüke akan akım:

$$I_L = \left(\frac{V_{OC} - V_S}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} \right) R_L \quad (2.6)$$

I_L dizinin Akımıdır.

Bu çalışmada TEG dizileri bağlantı modellerini değerlendirmek için, MATLAB/ Simulink'te bezetim çalışması yapılmıştır. Deneysel olarak da üç farklı yaklaşım uygulandı, İlk yaklaşımda, tek TEG yukarıda bahsedildiği gibi. İkinci yaklaşımda, MATLAB/ Simulink'te Şekil 2.10(b)' de gösterildiği gibi seri bağlı üç adet TEG modelinden oluşur.

2.2.2. Paralel dizi yapılandırması

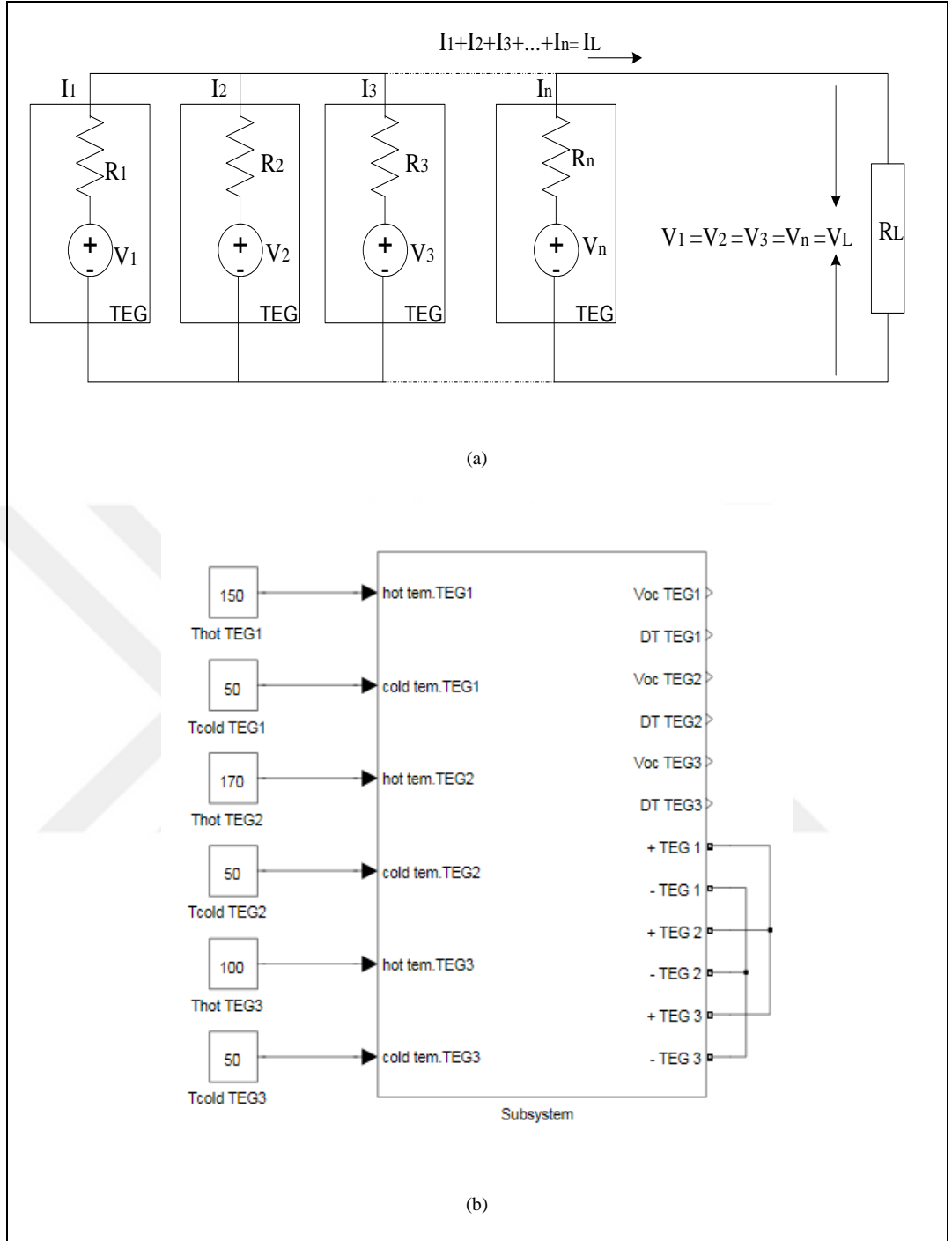
Şekil 2.11(a), paralel bir konfigürasyonda n sayıda TEG modülünü göstermektedir. İdeal çalışma koşulları için, dizideki TEG modülleri aynı ΔT ' de çalışmalıdır. Dolayısıyla her bir TEG aynı gerilimi ve aynı akımı ($I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$) üreteceği için sistem maksimum güçte çalışacaktır.

İdeal olmayan ısı koşullar altında, her bir TEG ünitesindeki farklı sıcaklık farkı, akım değerinde bir uyumsuzluğa neden olacaktır:

$$I_1 = \left(\frac{V_1 - V_L}{R_1} \right), I_2 = \left(\frac{V_2 - V_L}{R_2} \right), I_3 = \left(\frac{V_3 - V_L}{R_3} \right) \quad (3.7)$$

burada V_L , dizilerdeki gerilimdir.

Üçüncü yaklaşım, Matlab Simulinkte Şekil 2.11(b)'de gösterildiği gibi paralel bağlı üç TEG modelinden oluşmaktadır.

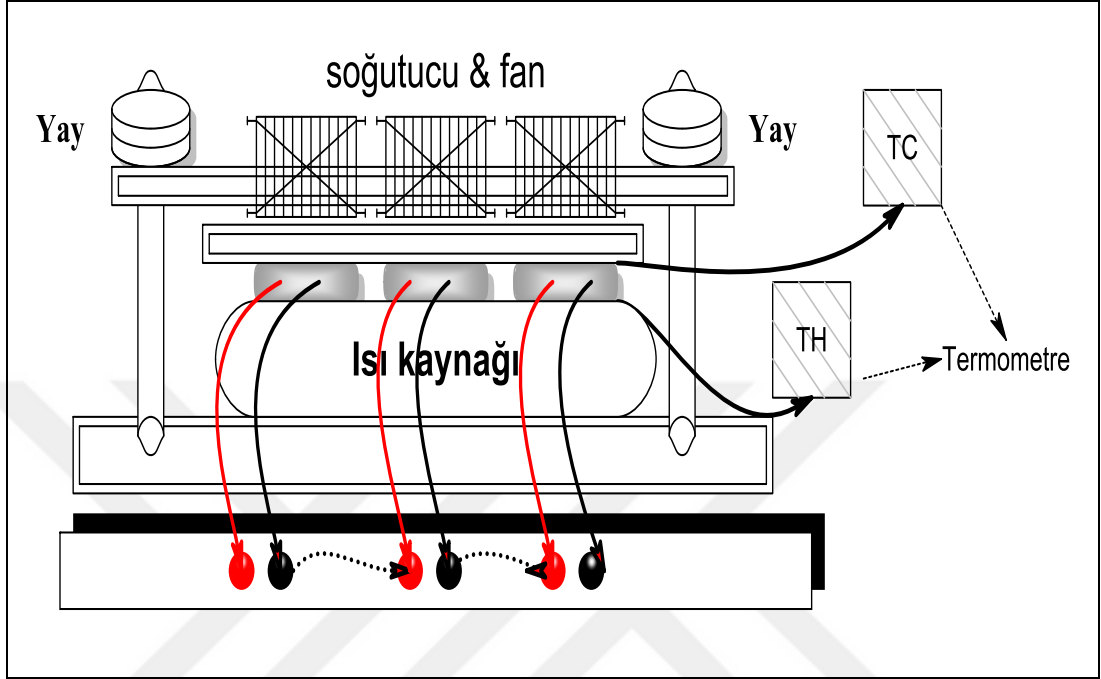


Şekil 2.11. (a) n sayıda paralel TEG dizisinin elektriksel şeması (b) 3 adet paralel TEG için MATLAB/Simulink ana modeli

2.3. Seri ve Paralel Yapılar İçin Deneysel Kurulum

Termoelektrik cihazların performansını, çoklu bağlantı konfigürasyonlarında farklı sıcaklık farklarında belirlemek için Şekil 2.12' te gösterildiği gibi laboratuvarında bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur.

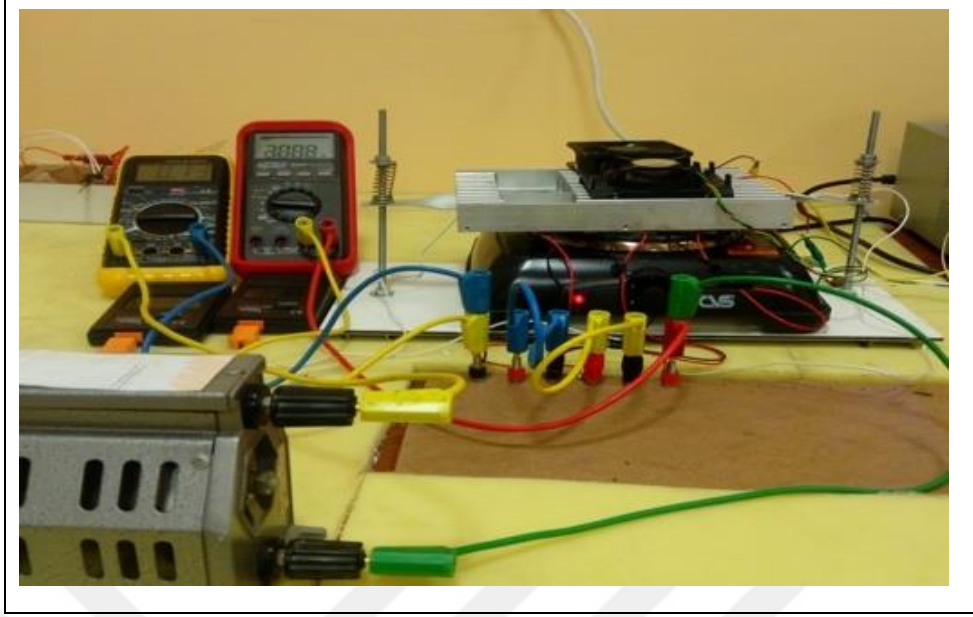
Bu test düzeneği doğru ve tekrarlanabilir ölçümler sağlamakla birlikte sıcaklığın kontrol edilemediği gerçek uygulamalarda gerçek çevre koşullarını sağlamak için kurulmuştur.



Şekil 2.12. Test düzeneğinin prensip şeması

TEG dizisi, Şekil 2.12deki deney düzeneğinde sıcak blok ve soğuk blok arasında dizilmiştir. Sıcak blokta, AC güç kaynağı ile çalışan yüksek sıcaklıklı, yüksek güçlü bir elektrikli ısıtıcı bulunmaktadır. Soğuk blok ise alüminyum soğutucu ve fan üniteleri yardımıyla hava ile soğutulmaktadır. TEG'in çıkışı elektronik veya istenen herhangi başka bir yüke bağlanabilir. Bu yükler DC gerilimle besleniyorsa TEG çıkışı doğrudan bu yüklere bağlanabilir. Ancak AC yükler için bir evirici devresi kullanılması gerekir.

Hassas sıcaklık ölçümleri elde etmek için, fan üniteleri ile soğuk taraftaki TEG'ler arasına bir ısı sensörü, elektrikli ocak ve TEG'lerin sıcak tarafları arasına da başka bir ısı sensörü yerleştirilerek TEG dizileri mekanik olarak sıkıştırılmıştır.

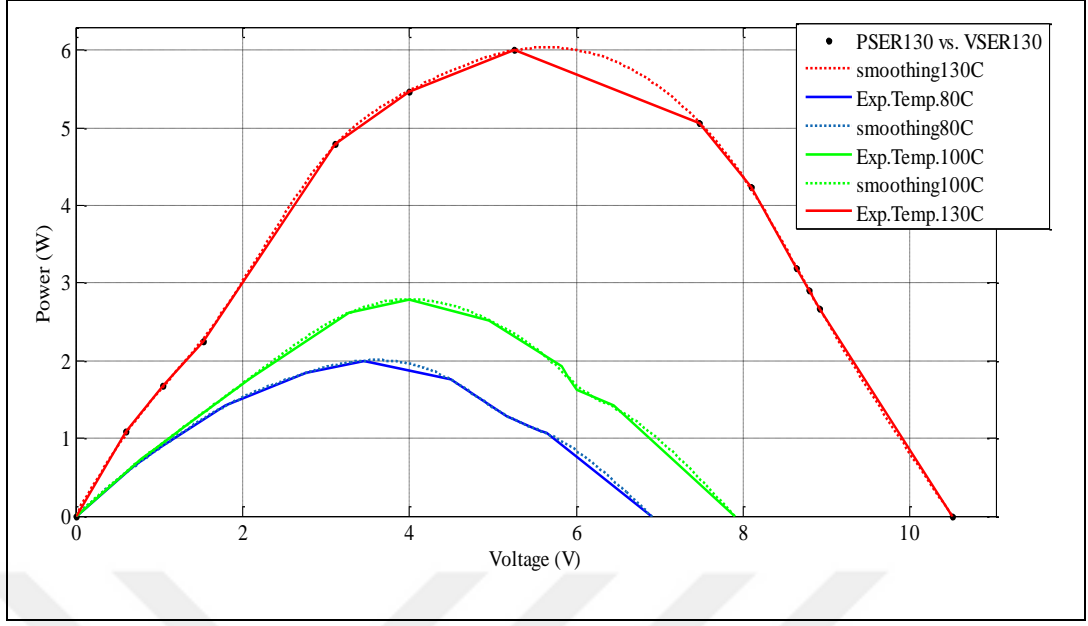


Şekil 2.13: TEG dizisinin deneysel test platformu

Çeşitli direnç yük değerleri için gerekli gücü karşılamak ve test altındaki TEG'nin elektriksel karakteristiğini doğru bir şekilde elde etmek için TEG cihazları bir dizi olarak birbirine bağlanarak aynı sıcaklık farkı değerinde, yük direnci değeri değiştirilerek deney yapılmıştır.

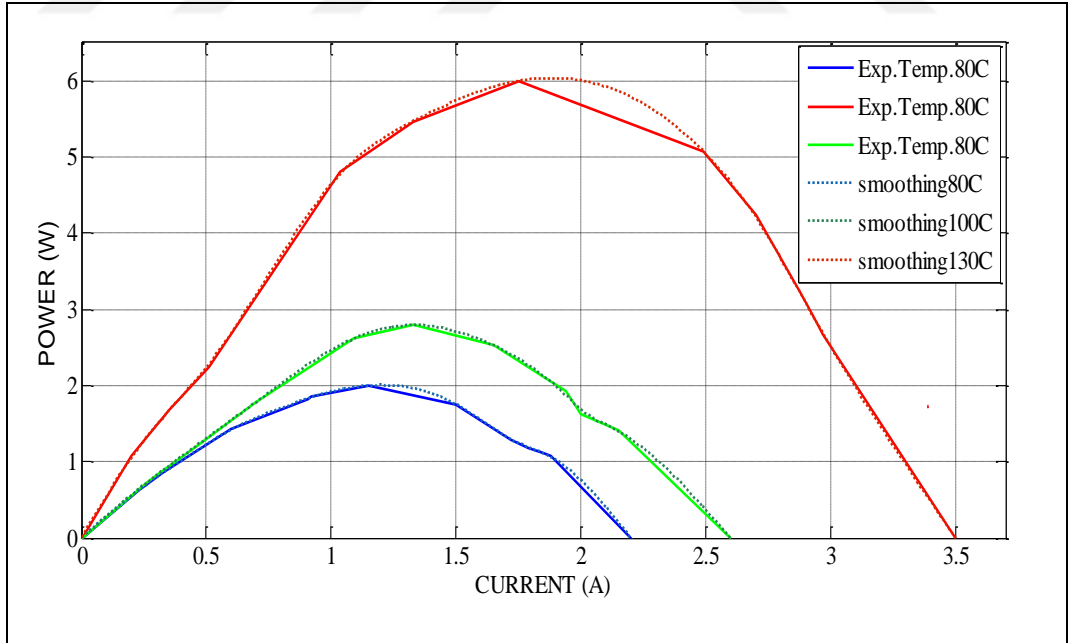
Beklendiği gibi, T_c sabit tutulurken sıcak taraf sıcaklığının artmasıyla çıkış gerilimi artmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık farkı ΔT de artmaktadır. Aynı sonuç, yüksüz durum içinde geçerlidir. Şekil 2.14'de deneysel P-V değerleri verilmiştir. Ayrıca, tüm I-V grafikleri hemen hemen aynı eğimde olduğu ve bu grafiklerde yüksek bir doğrusallık olduğu gözlemlenebilir. Bu durum, termoelektrik dönüştürücünün iç direncinin belli bir test sıcaklığı (ΔT_n) altında yükleme işlemleri ile sabit olduğu anlamına gelir. Bu V/I çıkış karakteristiğinden, cihazın iç direncini elde etmek mümkündür.

İlk yaklaşımda, üç farklı sıcaklık farkı (ΔT) değeri için 3 adet seri TEG modülü kullanılmıştır. Bu modüllerin Güç-gerilim karakteristikleri, Şekil 2.14' de gösterilmektedir.



Şekil 2.14. $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$, 100°C ve 130°C için 3 adet seri TEG modülü (TEP1-142T300) (P-V) karakteristiği.

İkinci yaklaşımda, üç farklı sıcaklık farkı değeri için 3 adet paralel TEG modülü elde edilmiştir. Bu modüllerin Güç-akım karakteristikleri, 2.15'de gösterilmektedir.



Şekil 2.15. $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$, 100°C ve 130°C için 3 adet paralel TEG modülü (TEP1-142T300) (P-V) karakteristiği

Bölüm 3 'teki deney sonuçları, elektriksel parametrelerin sıcak ve soğuk taraf sıcaklıklarındaki bir değişiklikte değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, bunların sonuçları, termoelektrik jeneratörlerin seri olarak bağlanmasıyla elektriksel olarak daha iyi bir sistem verimliliği sağladığını göstermektedir (daha yüksek gerilim ve daha düşük akım). Paralel bağlı dizi daha düşük gerilim ve daha yüksek akıma sahiptir. Bu bağlantı şekli, kablolarda ve MGNI dönüştürücüde daha yüksek I^2R kayıplarına neden olabilir.

TEG'ler, zamanla değişen sıcaklık farklılıklarına sahip, örneğin hibrit otomobillerin egzoz gazı sistemleri gibi dinamik ortamlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle, her zaman üretim gücünü en üst düzeye çıkarmak için en iyi elektriksel çalışma noktasını hızlı ve hassas bir şekilde ayarlamak çok önemlidir. Bu işlem, uygun bir MGNI algoritması tarafından ayarlanan DC-DC güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından gerçekleştirilebilir. Bu algoritma, dönüştürücünün doluluk boşluk oranı'nı kontrol ederek TEG'den maksimum gücün çekilmesini sağlayabilmektedir.

3. TEG ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİ İÇİN DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Termoelektrik Generatör (TEG)' ün gerilimi, termoelektrik materyal boyunca sıcaklık gradyanı ile orantılıdır. Çoğu uygulamalarının atık ısı sıcaklığı, bir çevirimde dinamik bir şekilde değişen özelliklere sahiptir. Dolayısıyla, TEG gerilimi de bu özelliklere göre değişiklik gösterir.[40]. 1914'teki [41] patentine göre, TEG'lerin gerilimi ile uygun genlikte bir bataryayı şarj edebileceği belirtilmiştir. Arıza maksimum voltajı azaltmak ve lineer voltaj kontrolörleri olarak çalışması için Zener diyotları kullanan prototipi [42]'de sunulmaktadır. Fazla güç toprağa akıtılmak üzere, BMW, 200 W TEG ve on-board bir güç kaynağı arasında bir diyot kullanmaktadır [43]. Eğer TEG gerilimi, on-board gerilim ile diyotun eşik geriliminin toplamından daha büyük ise TEG aracın elektrik şebekesini beslemektedir. Hem eşik geriliminden kaynaklanan güç kaybı hem de on-board geriliminin eşik gerilimi ile toplamı kadar gerilimin geri alınmaması dezavantajlar olarak görülmektedir.

DC-DC dönüştürücüler Doğru gerilimi değiştirmek için kullanılırlar DC-DC dönüştürücüde, yarıiletken anahtarlar kullanılarak dönüşüm oranının ayarlanmasıyla çıkış gerilimini (aracı besleyen gerilimi) ayarlamayı sağlamaktadır [44]. Kontrollü dönüşüm oranlı veya sabit oranlı dönüştürücüler arasındaki karşılaştırılma [45] 'te sunulmuştur. Yüksek frekanslı anahtar sinyalleri, gerekli nominal yarı iletken değerlerini, akım dalgalılığını, gerilim dalgalılığını azaltırken, aynı zamanda dönüştürücünün toplam ağırlığını, hacmini ve maliyetlerini de azaltılmaktadır. TEG için, transformatör kaybını önlemek amacıyla izolesiz DC-DC dönüştürücüler tercih edilmektedir. [46] 'da, TEG'ler için kullanılan klasik DC-DC dönüştürücüler ile ilgili bir araştırma sunulmuştur. Dönüştürücü topolojilerinin seçimi, yük ve kaynak için gerilim ve akım genliğine bağlıdır. TEG için en çok kullanılan yükseltici (boost), düşürücü-yükseltici(buck-boost), ve Cuk dönüştürücülerdir [46]. Genel bir açıklama olarak izoleli olmayan DC-DC dönüştürücüler arasında karşılaştırma [47, 48, 49, 50, 51] 'de sunulmuştur.

Bir TEG' nin giriş gücünün geniş aralığı nedeniyle, kullanılan dönüştürücüler ve nominal güçleri önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. 35 V' luk maksimum giriş gücüne sahip olan ters çevrilmemiş bir Düşürücü-Yükseltici dönüştürücünün 12 V'luk bir batarya şarjı için uygulaması [52] 'da gösterilmiştir. [53]'de ise , % 93 verimli ve 22 W giriş gücüne sahip olan 12 V'luk bir batarya için Düşürücü dönüştürücüsünü verilmiştir. [54] düz bir endüktör ile 1,2 W giriş gücü için bir dönüştürücü sunmaktadır. Kaçak endüktansı azaltmak için baskılı devre kartına (PCB) entegre edilmiştir. Bu devre tüm sürücü ve yarı iletken kayıplarını içeren %83'lük bir verime ulaşmış olup, ek olarak, dönüştürücü için bir model önerilmiştir. Bu model istenen bir çalışma noktası için dönüştürücüyü optimize etmek amacıyla bir düzenleyici görevi görebilmektedir. Tek uçlu primer endüktanslı dönüştürücüsünün (SEPIC) bir termoelektrik uygulaması [55]'te sunulmuştur. Bu prototipin 2.3W giriş gücü için sadece %69'luk bir verimliliği vardır, ancak senkronize metal oksit-yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler) ile daha yüksek verim elde edilebilir. Diğer tarafta, [56] açısından SEPIC, 8.4 W giriş gücü için %95.11'e kadar verim sağlamaktadır. Termoelektrik-fotovoltaik hibrit enerji şebekesi için geliştirilmiş olan 100 W multi-stage Cuk dönüştürücüsü [57]'ta gösterilmiştir. Bu konsept dönüştürücüdeki gerekli yarı iletken ve sensör sayısını azaltmaktadır.

[58]'de sunulan dönüştürücü, %99'luk bir verimlilikle maksimum 500 W'lık bir elektrik gücü için tasarlanmıştır. Kayıp oranını azaltmak için, Düşürücü-Yükseltici tek çekirdekli bir çift indüktör kullanmaktadır. Dönüştürücü Yükseltici yada Düşürücü mod ile çalışmaktadır. Yükseltici modunda, Düşürücü dönüştürücü yüke bağlanmış olup, Düşürücü modunda, Yükseltici dönüştürücü kaynağa bağlanmaktadır. Dolayısıyla, Yükseltici-Düşürücü dönüştürücü sadece bir kontrolör ve ek olarak bir batarya gerilim kontrolörü ile çalıştırılmaktadır.

[59]'de 1,5 kW nominal giriş gücüne sahip bir Yükseltici-Düşürücü dönüştürücü sunulmaktadır. Ayrıca, Yükseltici ve Düşürücü dönüştürücüler ayrı ayrı kullanılmaktadır. Böylelikle, bozulmaları telafi etmek ve dönüştürücünün tüm durumlarını düzenlemek için daha iyi bir performans avantajına sahip olan kademeli bir kontrol konsepti uygulanmaktadır. [65], anahtarlama kaybını azaltmak için üç fazlı serpiştirilmiş senkron anahtarlar kullanmaktadır. Dönüştürücünün yukarıda

belirtilen tüm özellikleri, TEM'in belirli bir çalışma noktası ve elektriksel karakteristiği için tasarlanmıştır. Ayrıca, dönüştürücülerin elektriksel dinamikleri, TEM'nin elektriksel karakteristiğinin değişmesinden etkilenmektedir ve kapalı devre kontrolörün stabilitesini ve dinamiğini etkilemektedir.

[60] %3,4'lük verimin aksine %3,8'lik bir genel verimlilik ile bir DC-DC dönüştürücü ağı önermektedir. Tek bir dönüştürücüye sahip TEG için, TEG farklı çalışma alanlarında TEG diziden ayrılmalıdır. Tekli dönüştürücü, verimliliğin azalmasına neden olan TEG'nin tüm operasyon noktalarını kapsamalıdır.

Özetle, TEG'nin elektriksel arayüzü ve yükü önemlidir, çünkü elektrik devresinin verimliliği, geri kazanılan elektrik enerjisinin tüm verimliliğini azaltır. MGNİ donanımının kalbi, anahtarlamalı bir DC-DC dönüştürücüsüdür. DC-DC dönüştürücüler, değişken bir DC girişinin istenilen gerilim seviyesinde, kontrollü bir DC çıkışa dönüştürülmesi amacıyla ,DC güç kaynakları ve DC motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MGNİ aynı dönüştürücüyü farklı bir amaç için kullanır:

Bir TEG'den maksimum güç çekilmesi için birkaç dönüştürücü topolojisi kullanılabilir. Bu tez çalışmasında dört farklı dönüştürücü topolojisi üzerinde çalışılmıştır. Bunlar, Düşürücü (buck), Yükseltici (boost), Düşürücü-Yükseltici (buck-boost) ve SEPIC dönüştürücülerdir. Ancak sadece yükseltici (boost) dönüştürücü ile uygulama yapılmıştır. Basitliği, uygunluğu ve sıcaklık farkının değişimi altında yüksek bir aralıkta çalışma kabiliyeti olduğu için bu dönüştürücü seçilmiştir. Ayrıca, bu bölümde DC-DC dönüştürücüler ve incelenen farklı dönüştürücülerin arkasındaki temel prensipler açıklanmıştır

3.1. DC-DC Dönüştürücülerin Prensibi

DC-DC dönüştürücüler tasarlanırken iki önemli sorunla karşılaşmaktadır. Bunlar, verimlilik ve dalgalılıktır. Verimlilik, hemen hemen tüm devrelerin, dönüştürücünün çalışması sırasında güç tüketen dirençli bileşenlere veya paraziter dirençlere sahip olması nedeniyle kayıp enerjinin varlığı ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, tasarımcılar verimin %100'e ulaşamamasına rağmen, dönüştürücünün verimliliğini optimize etmelidir. Dalgalılık gerekliliği ise, tüm güç kaynaklarının kesinlikle sabit

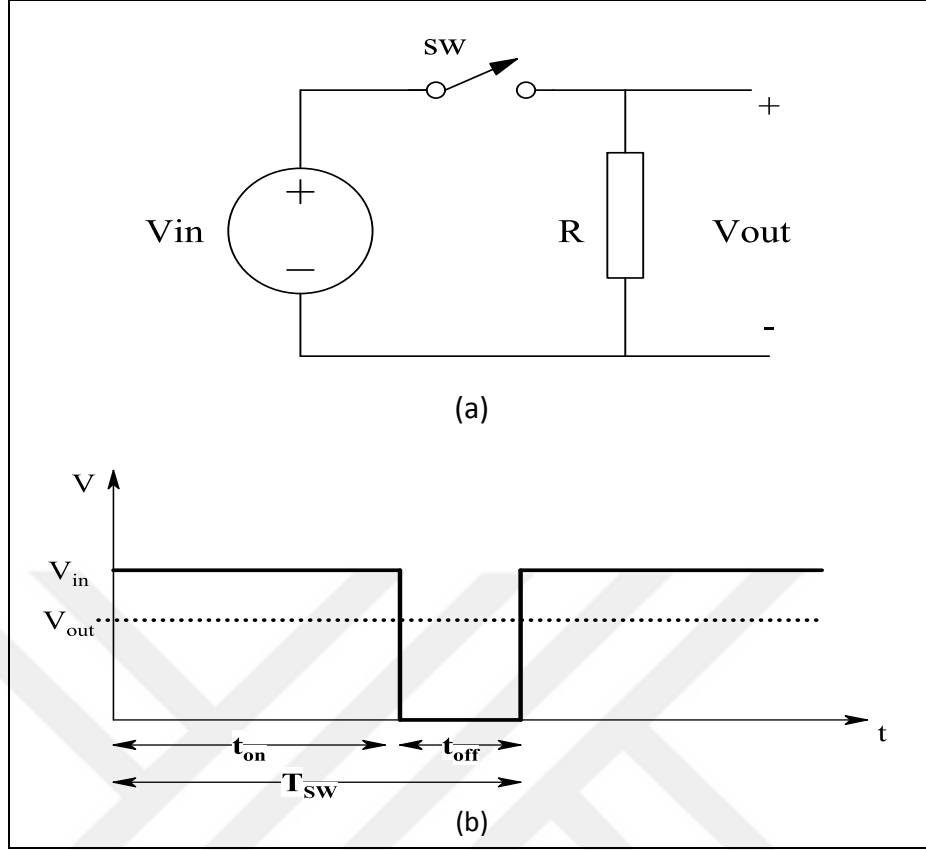
bir değere sahip olmaması gerçeğinden kaynaklanmaktadır; buna rağmen, birçok elektronik cihaz belirli bir seviyede güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Şimdiye kadar, zaten çeşitli tasarım teknikleri ve bu sorunlara çözüm bulabilmek için optimize edilmiş bileşenler olduğu gösterilmektedir. DC-DC dönüştürücülerinin genel prensibi, kapasitörler ve indüktörler gibi bileşenlere elektrik enerjisinin depolanmasını ve enerjinin yüke aktarılmasını içermektedir. Enerji depolama ve yüke aktarma süresinin kontrol edilmesiyle, dönüştürücü yükünde ortaya çıkan ortalama gerilim seviyesi kontrol edilebilir. Bu nedenle ortalama yük gerilimi seviyesi, güç kaynağının gerilim seviyesinden daha yüksek veya daha düşük olabilir.

Enerji depolama durumu ve enerji aktarma durumunun dönüşümü, anahtarlama cihazları ile yerine getirilir. Günümüzde, transistor DC-DC dönüştürücüde kullanılan en yaygın anahtarlama cihazıdır. Bir anahtarlama periyodu içinde her bir durum için iletim süresinin uzunluğu, anahtarlama transistörlerinin kapısını beslenen sinyalin uygulanma süresine bağlıdır. Hemen hemen tüm modern DC-DC dönüştürücüler, çıkış gücü üzerindeki doğrusal kontrol avantajı için anahtar kontrol sinyali olarak Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) sinyalini kullanırlar. Anahtarlama periyodunu T_{sw} olarak ve anahtarlama zamanının t_{on} olduğunu belirtirsek, DGM sinyalinin doluluk oranı Denklem (4.1) deki gibi olur.:

$$D = \frac{t_{on}}{T_{sw}} \quad (3.1)$$

3.2. DC-DC Dönüştürücülerin Kontrolü

DC-DC dönüştürücülerde, çıkış gerilimi seviyesinin daha yüksek veya daha düşük bir değere ayarlanarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bir yükü beslemek için farklı genişlikteki darbeleri bir gerilim ile bir anahtar kontrol edilerek, çıkış gerilimi seviyesi ayarlanabilmektedir. Bu kontrol yöntemi Darbe Genişliği Modülasyonu (DGM) olarak bilinmektedir. DGM kontrolü tüm uygulamalar için en çok kullanılan kontrol yöntemidir ve bu projede bu kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yöntemi daha fazla açıklamak için, şekil 3.1(a)'da gösterilen devre, ideal bir anahtar ve yük varsayılarak incelenmiştir.



Şekil 3.1. (a) İdeal anahtarlama (b) Çıkış gerilim sinyali

Şekil 3.1 'de anahtar, t_{on} sırasında iletimde ve t_{off} sırasında kesimdedir, bu işlem periyodik olarak tekrarlanır. Böylece tüm geçiş periyodu şöyle Denklem (3.2) ile ifade edilebilir:

$$T_{sw} = t_{on} + t_{off} \quad (3.2)$$

Ve Şekil 3.1'den, anahtarın iletimde olduğu süreç,

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.3)$$

ve doluluk boşluk oranı (D) olarak bilinir.

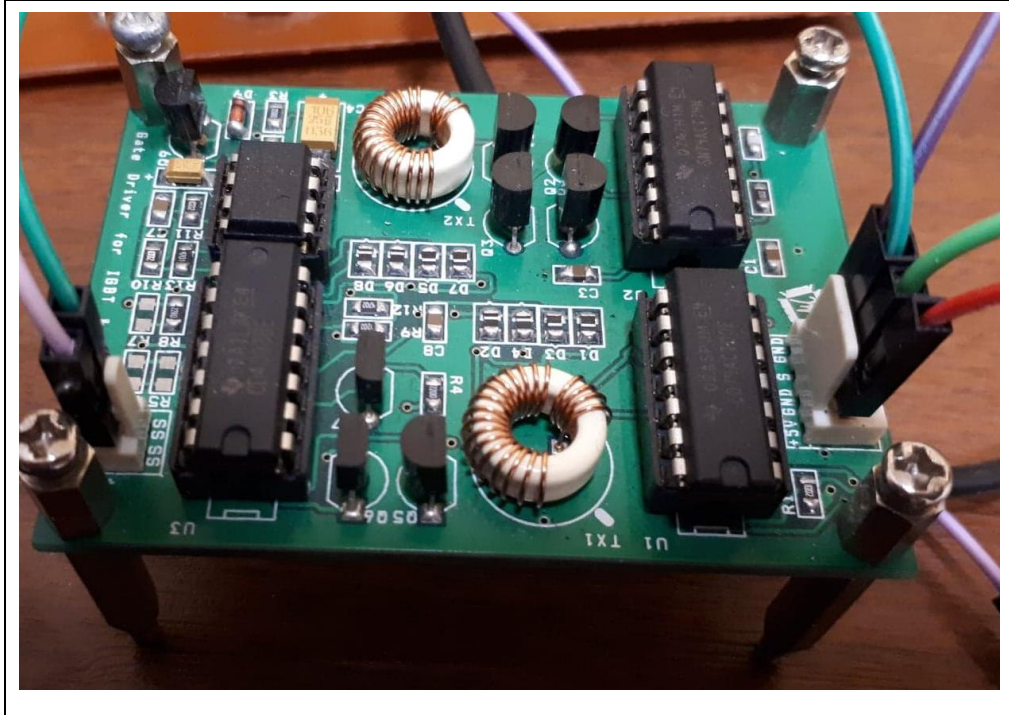
Şekil 3.1 (b) 'de görüldüğü gibi, t_{on} sırasında çıkış gerilimi, giriş gerilimine eşittir ve t_{off} süresince anahtar iletimde olmadığından çıkış gerilimi sıfırdır. Ayrıca, t_{on} ve t_{off} kontrol edilerek, ortalama çıkış voltajı V_o kontrol edilmektedir. Böylece, ortalama gerilim (V_o), giriş gerilimi (V_{in}), t_{on} ve t_{off} un büyüklüğüne bağlıdır. Bu, daha yüksek

bir t_{on} süresinin daha yüksek bir ortalama çıkış gerilimi verdiği anlamına gelir, dolayısıyla ortalama gerilim aşağıdaki gibi verilir:

$$V_o = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{t_{on}} V_{in} dt = \frac{t_{on}}{T_{sw}} V_{in} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} V_{in} \quad (3.4)$$

Daha yüksek bir D daha yüksek bir çıkış gerilimini daha düşük D daha düşük bir gerilim oluşmasını sağlar. Pratik uygulamada olarak, bir MOSFET-transistör anahtar olarak kullanır. Anahtarlama frekansını kontrol etmek ve anahtarı tetiklemek için bir DGM sinyali gereklidir.

Bir DGM sinyali, karşılaştırıcı bir referans voltajı U_{ref} ve bir üçgen dalga sinyalinin U_{tri} karşılaştırılması ile üretilir. DGM sinyalinin frekansı üçgen dalga voltajı frekansı ile aynıdır, dolayısıyla üçgen voltajın frekansı kontrol edilerek DGM frekansı kontrol edilir. DGM kontrol yöntemi, bir DC-DC dönüştürücüyü kontrol etmenin en yaygın yoludur. Bununla birlikte, şunu belirtmek gerekir ki, modern güç elektroniğinde DGM kontrol gerilimi genellikle bir mikroişlemci tarafından üretilir. Bu tezin uygulama kısmında, bir DGM sinyali oluşturmak için Şekil 3.2'de verilen hazır bir sürücüsü kullanıldı.



Şekil 3.2. Kullanılan sürücüsü devresi

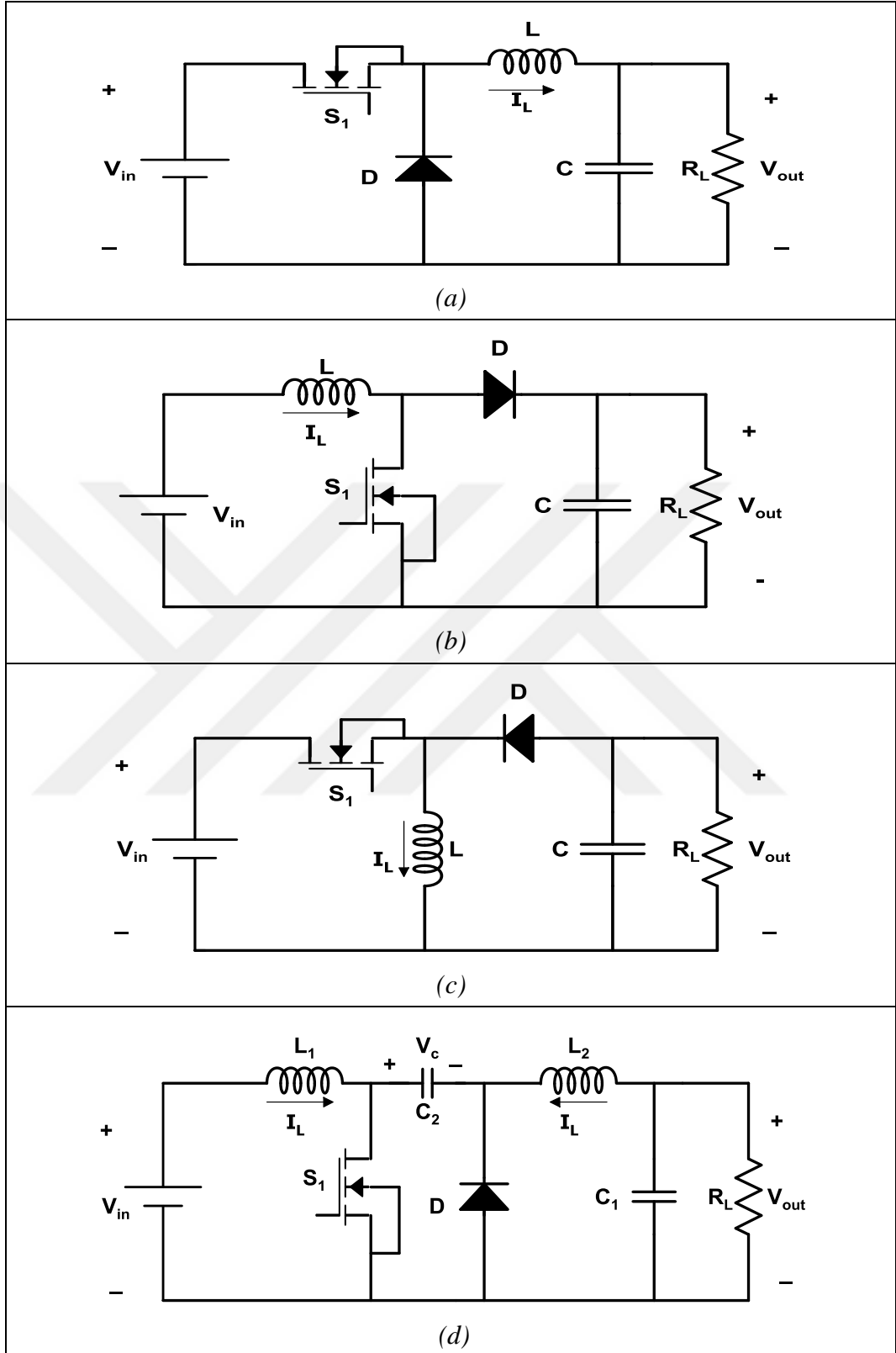
3.3. DC-DC Dönüştürücüler Yapıları

Literatürde önerilmiş, uygulamaya geçmiş çok sayıda DC-DC dönüştürücü tipi vardır. Her bir tip, hedef uygulamaların ihtiyaçlarına cevap vermek için dönüştürücü performansının belirli yönlerini optimize eder.

DC-DC dönüştürücüler birçok şekilde sınıflandırılabilir. En popüler sınıflandırma metodu gruplarından biri, transformatörlerin varlığıyla. Transformatörler bazen dönüştürücünün girişi ve çıkışı arasında DC izolasyonu sağlamak için DC-DC dönüştürücüye dahil edilir. Transformatörlü olanlar izoleli dönüştürücüler olarak adlandırılır, transformatörlü olmayanlar, izolesiz (non-isolated) dönüştürücüler olarak adlandırılır. Şekil 4.3' de, izolesiz temel dönüştürücü topolojileri gösterilmektedir.

Literatürde çok sayıda dönüştürücü tipi önerilmiştir, ancak bu dönüştürücüler bir dizi kural üzerine inşa edilmiş bir grup temel dc-dc dönüştürücüsünün küçük varyasyonları olarak görülebilir. birçoğu temel grup olarak üç tipten oluşmaktadır: Düşürücü, Yükseltici ve Düşürücü-Yükseltici dönüştürücüler. Cuk gibi başka dönüştürücüler de var ancak esasen o da bir Yükseltici-Düşürücü dönüştürücü sayılır. SEPIC ve ZETA dönüştürücüler de diğer dönüştürücü türlerindedir.

Şekil 3.3'te, (a) Düşürücü dönüştürücü, gerilimden akıma bir dönüştürücü, (b)Yükseltici dönüştürücü akımdan gerilime bir dönüştürücü, (c)Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü gerilim-akım-gerilim dönüştürücü, (d) CUK dönüştürücü, Akım-Gerilim-Akım dönüştürücü olarak görülmektedir. Düşürücü Düşürücü dönüştürücüde, çıkış gerilimi, giriş voltajından daha düşük ve Yükseltici dönüştürücüde, çıkış geriliminin, giriş geriliminden daha yüksek olması sağlanmaktadır.



Şekil 3.3. (a) Düşürücü dönüştürücü (b) Yükseltici dönüştürücü (c) Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü (d) Cuk dönüştürücü devreleri

Tablo 3.1'de gösterilen yükseltici dönüşüm oranı olasılık olarak sınırsız bir çıkış gerilimini göstermesine rağmen, fiziksel bileşenlerin özellikleri sebebi ile çıkışta bir üst limit vardır.

Tablo 3.1. DC-DC dönüştürücüler dönüşüm

Dönüştürücü Topolojisi	İdeal Transfer Fonksiyonu M(D))
Düşürücü	D
Yükseltici	$\frac{1}{1-D}$
Düşürücü-Yükseltici	$-\frac{D}{1-D}$
Cuk	$\frac{D}{1-D}$

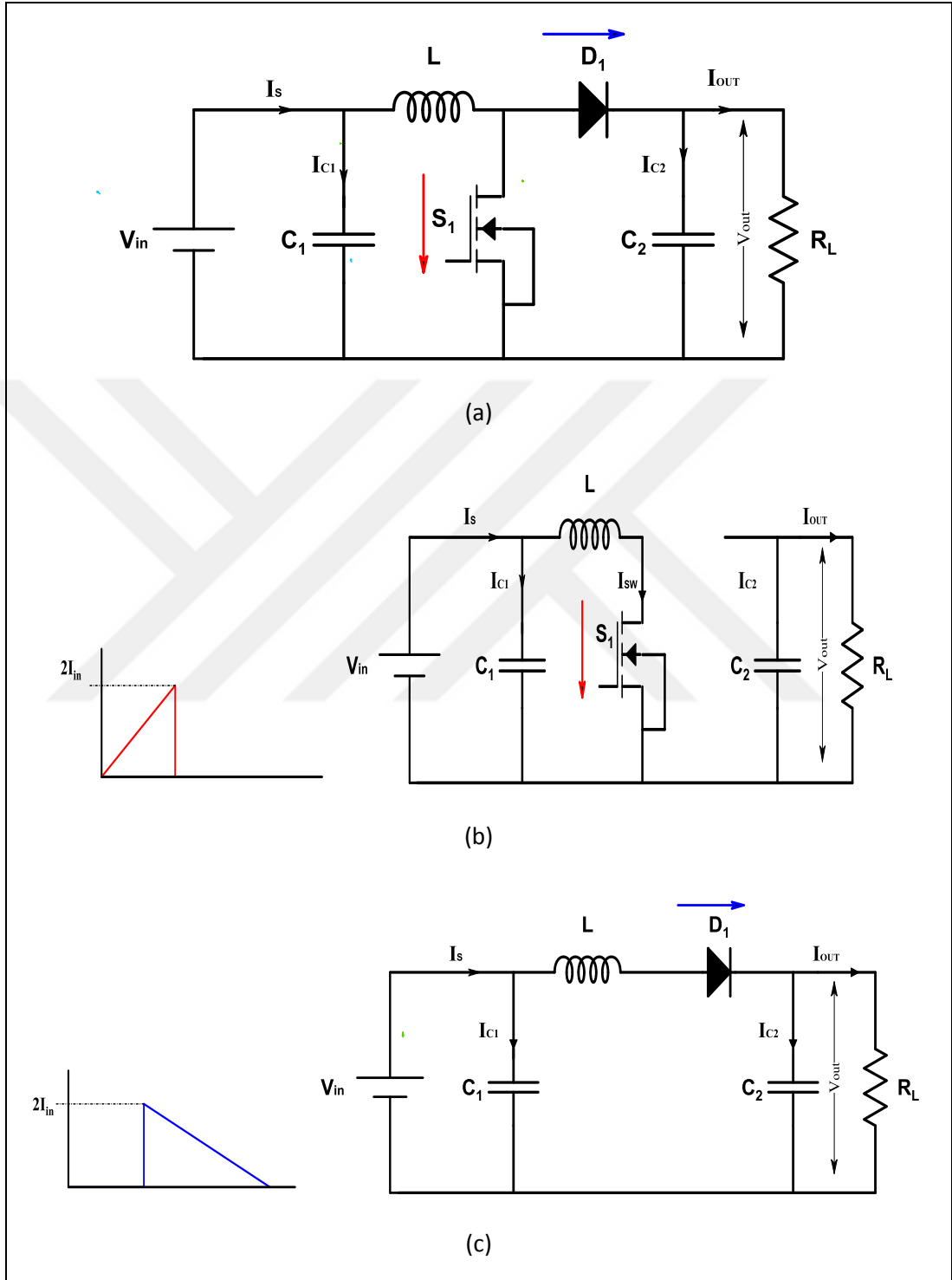
TEG'de açık devre voltajı sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğu, güneş pillerinde olduğu gibi, uygun gerilim ve akım seviyesine ulaşmak için TEG'lerinde uygun bir şekilde seri ve/veya paralel olarak bağlanabildiği önceki bölümde incelenmişti. Güç elektroniği dönüştürücüleri, TEG'leri yüke bağlamak için kullanılır. Dönüştürücü topolojisinin seçimi, çıkış ve giriş gerilimlerine bağlıdır; Örnek olarak, DC mikrogruplara bağlantı için bir yükseltici dönüştürücü gereklidir, 12 V'luk bir araba aküsüne bağlantı için bir Düşürücü veya Düşürücü-Yükseltici tipi dönüştürücü kullanılabilir.

Bu çalışmada geniş giriş gerilimi aralığı sunmak ve dolayısıyla geniş bir çalışma sıcaklığı aralığında TEG'lerden güç elde etmek için yükseltici tip dönüştürücü kullanılmıştır.

3.4. Yükseltici Tip Dönüştürücülerin Tasarımı

Tasarlanan DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücü, modülün her zaman maksimum güçte çalışmasını sağlamak için TEG modülü ile yük arasında bağlanır. Yükseltici

dönüştürücü, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi dört elemandan oluşur, bunlar: endüktans, diyot, kapasitör ve MOSFET elemanlarıdır.

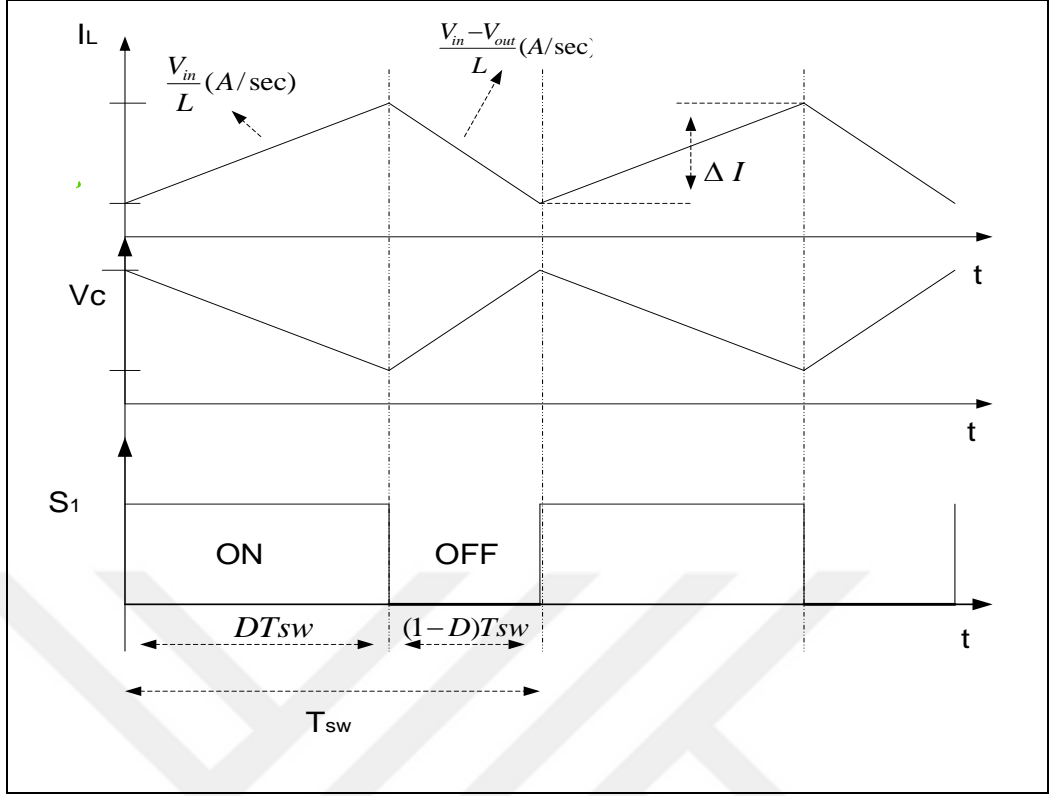


Şekil 3.4. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücü devresi (b) MOSFET akımı (c) diyot akımı

Dönüştürücünün adından da anlaşılacağı gibi, giriş gerilimini artırır yani, çıkış gerilimini giriş geriliminden daha büyük olmasını sağlar. Dönüştürücü, anahtar olarak kullanılan MOSFET ile kontrol edilir. Anahtarın (MOSFET) tetiklenmesi ile yani açılıp kapanmasıyla endüktans gerilimini değiştirerek, TEG modülünün yükü maksimum gerilimde çalıştırmasını sağlamak için çıkış gerilimini kontrol eder.

İletim zamanında, anahtar (S_1) kapanır ve ilettime geçer, diyot kesimdedir , endüktans, TEG çıkışından güç çekerken ve depolarken, yük tarafından görünen dönüştürücü çıkışı, önceki döngüden kapasitörde depolanan enerji tarafından sağlanır. Kesim zamanında, anahtar (S_1W) açılır, diyot ilettime girer, endüktans artık yüke bağlı bir kaynak gibi RC bağlantısına çıkış gücü verir. Kesim zamanında, indüktör gücü, TEG tarafından sağlanan mevcut güç ve önceden depolanmış gücün bir kombinasyonudur. Endüktans enerjisinin bir kısmı yükü besler ve geri kalan kısmı kapasitörün şarj edilmesini sağlar. Bu şekilde, çıkış portundan görülen ortalama gerilim, giriş portundan görüldüğünden daha yüksek olabilir. Anahtarlama frekansının (f_s) belirlenmesi DC-DC dönüştürücünün tasarımındaki ilk görev olmalıdır. Anahtarlama frekansı belirlenirken güç seviyesi, soğutma yöntemi ve uygulama özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Anahtar dalgalanması ve anahtar kaybı arasında bir uyum vardır. Eğer anahtarlama frekansı (f_s) artarsa, daha küçük filtre bileşenleri seçilebilir ve sistemin daha hızlı yanıt vermesi sağlanabilir.

Bununla birlikte, (f_s) artışı da anahtarlama kaybını artıracaktır. Anahtar kaybı yüksek frekanslı çalışmada kayıpların en fazla olduğu kısım haline gelecektir. Ayrıca (f_s) 'nin artırılması manyetik çekirdek kaybını da arttıracaktır. Şekil 3.5'te, endüktans akımını, kapasitör gerilimini ve kapı sinyalini Sürekli İletim Modunda (SİM) (ing. Continious Current Mode-CCM) gösterilmiştir.



Şekil 3.5. SİM'da sırası ile endüktans akımı, kondansatör gerilimi ve S_1 kapı sinyali

Yükseltici dönüştürücünün Sürekli İletim Modu doluluk oranı (D_{CCM}), yükseltici dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi değerleri kullanılarak belirlenebilir:

$$D_{CCM} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (3.5)$$

Denklem 4.5'nin çözümü çıkış geriliminin giriş gerilimlerine oranı transfer fonksiyonunun sonucu, yani, devrenin dönüşüm oranı:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 - \frac{1}{1 - D_{CCM}} \quad (3.6)$$

Dönüştürücünün kritik endüktansı (L_{CCM}), doluluk oranı, yük direnci ve anahtarlama frekansı değerleri kullanılarak ifade edilebilir:

$$L_{CCM} = \frac{D_{CCM} (1 - D_{CCM})^2 R_L}{2f_s} \quad (3.7)$$

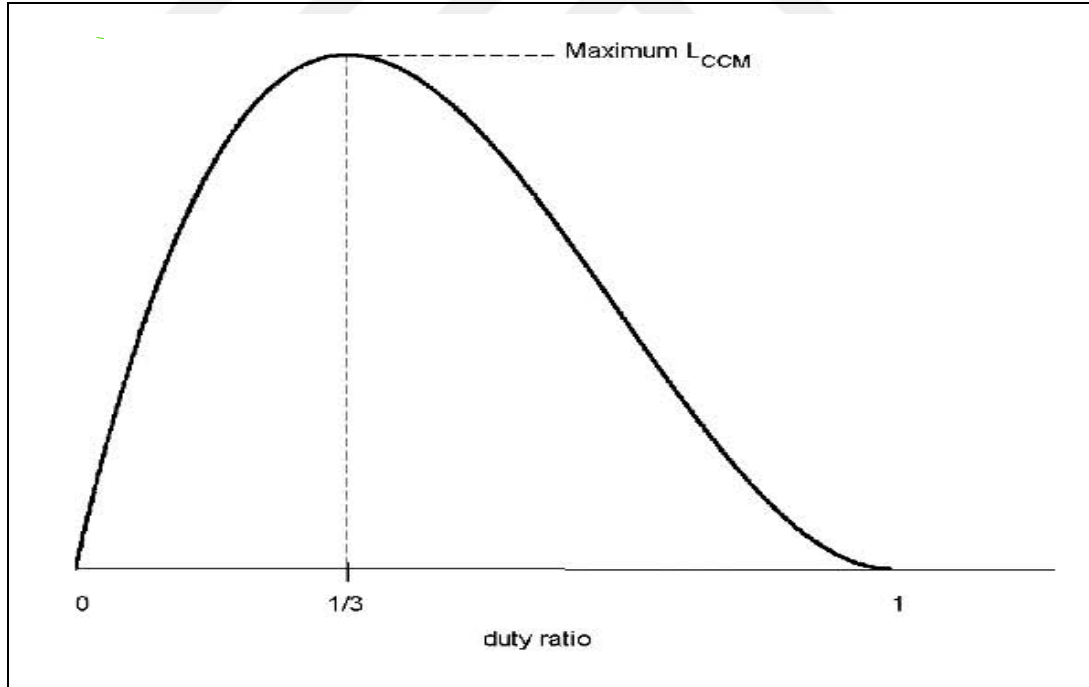
endüktans L_{CCM} 'den daha büyükse, devre CCM'de çalışacaktır, aksi takdirde kesintili iletim modunda (KİM) (ing. Discontinious Current Mode- DCM) çalışacaktır. Dönüştürücünün SİM'de çalışmasını sağlamak için, dönüştürücü için belirtilen endüktans, değişken çalışma koşulları altında hesaplanan en büyük L_{CCM} değerinden daha büyük olmalıdır.

Yükseltici dönüştürücünün SİM kapasitansı şu şekilde belirlenir:

$$C_{CCM} = \frac{D_{CCM}}{R_L f_s r} \quad (3.8)$$

Burada r , dönüştürücünün istenen çıkış gerilimi dalgalanma oranıdır.

Doluluk oranı dinamik değildir, her zaman maksimum endüktans vermez. Bu nedenle, maksimum endüktans, şekil 3.6'da gösterildiği gibi çizilen normalize SİM endüktansının doluluk oranına göre, üçte bir doluluk oranında çalışır.



Şekil 3.6. Normalleştirilmiş SİM yükseltici dönüştürücü endüktansı [77].

Dönüştürücünün eşdeğer giriş direncinin sadece DGM sinyal doluluk oranı ve yük direnci ile yaklaşık olarak Denklem (3.9) hesaplanabilir.

$$R_{in} \approx (1-D)^2 R_L \quad (3.9)$$

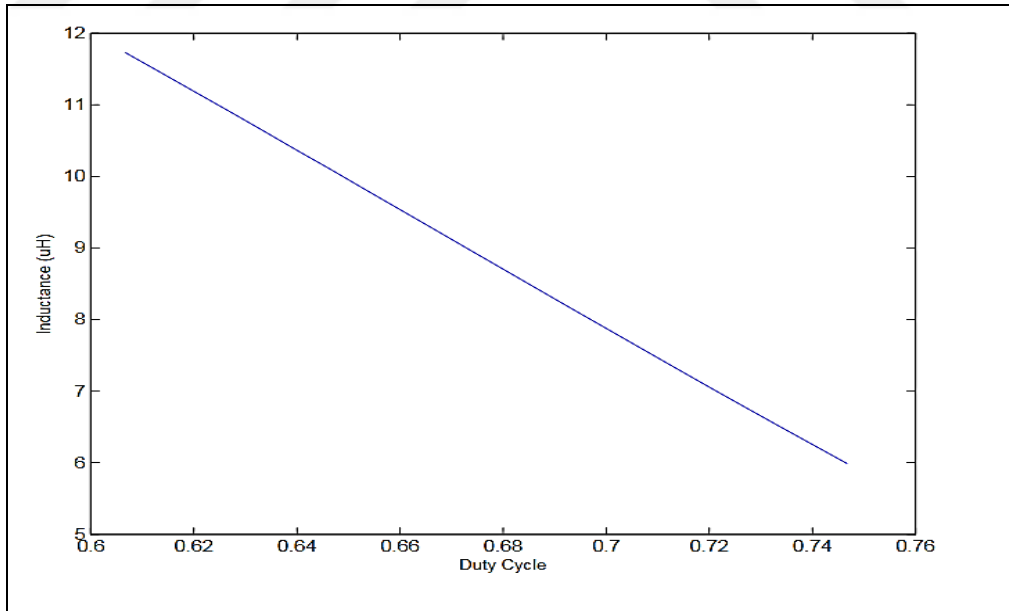
Empedans eşleştirme koşulu karşılanırsa, o zaman teorik doluluk oranı simülasyon için [0.60633, 0.74033] aralığında ve dönüştürücü için giriş gerilimi 3,895 V-5,905 V aralığında olur. Şekil 3.7'de Kritik endüktans L_{CCM} eğrisi, D doluluk oranı döngüsünün bir varyasyonu ile birlikte gösterilmiştir.

TEG'in çıkış gerilimi, V_{oc} 'in yarısına eşit olduğundan (3.10) Denklemi ile hesaplanan doluluk oranı daha sonra endüktörü seçmek için kullanılır ayrıca yükseltici dönüştürücünün SİM'de çalışmasını garantiler.

$$D_{CCM_AT} = \left(1 - \frac{V_{oc}/2}{V_{out}}\right) \quad (3.10)$$

$$D_{CCM_80} = \left(1 - \frac{3,895}{15}\right) = 0,74033$$

$$D_{CCM_130} = \left(1 - \frac{5,905}{15}\right) = 0,60633$$



Şekil 3.7. Yükseltici dönüştürücü için endüktansın D ye göre değişimi

SİM operasyonunu sağlamak için, kullanılan endüktans 231 μ H olarak Şekil 3.6'da gösterilen çok sayıda marj sağlamak için en büyük değer iki katı olarak seçilmiştir ve gerçek çıkış kapasitesi şu şekilde belirlenebilir:

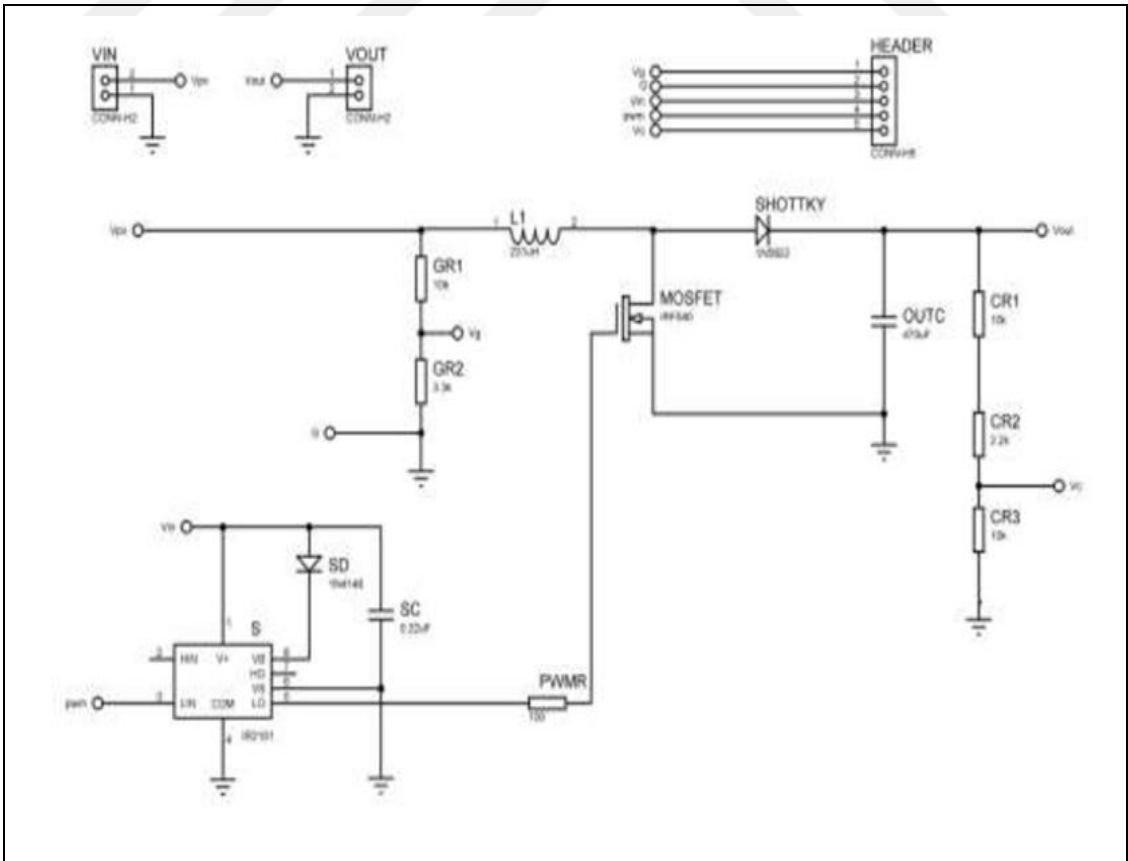
$$C_2 > C_{CCM} \quad (3.11)$$

C_{CCM} , Denklem 3.8'e göre hesaplandığında, D_{CCM} ile istenen aralıktaki en büyük değer bulunur. Eğer çıkış gerilimi dalgalanma oranı 0,01 ise, SİM kapasitansı 220 μ F olarak bulunur. Yeterli marjı sağlamak için gerçek bir 470 μ F değeri seçilir.

Giriş gerilimi dalgalanmasını azaltmak için, yükseltici dönüştürücü girişinde bir kondansatör kullanılmaktadır. Bu giriş kapasitansının değeri şu şekilde belirlenebilir:

$$C_1 > C_{min(1)} = \frac{I_{out}D(1-D)}{f_s V_{in}} \quad (3.12)$$

Burada I_{out} sabit durum çıkış akımıdır ve V_{in} (maks) izin verilen maksimum pik-tepe giriş dalgalanma gerilimidir. Bu tasarımda giriş kondansatörü için 470 μ F'lik bir değer seçilmiştir. Yükseltici dönüştürücü devre şeması, Şekil 4.8'de gösterilmiştir ve TEG sisteminde hedeflenen sıcaklık aralığı için devre parametreleri ise Tablo 3.2'de listelenmiştir.



Şekil 3.8. Pratik yükseltici devre şeması

Tablo 3.2. Yükseltici dönüştürücü devre elemanları ve parametreleri

Elemanlar	Tanımlama
Sıcaklık aralığı	80-130C
Giriş kondansatörü	470 μ F
Bobbin	231 μ H
Mosfet	IRF540N
Diyot	Schottky
Çıkış kondansatörü	470 μ F

3.5. STM32F429 Mikrodenetleyiciler

DC-DC dönüştürücü, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile çalıştırılır ve doluluk boşluk oranı değiştirilerek kontrol edilir. DGM mikrodenetleyici sistemi üzerinde kolayca geliştirilebilir, ancak doluluk boşluk oranı değerini belirlemek için kontrol algoritması uygulandığında problem karmaşıklaşır. Algılayıcı, kontrol algoritması ve kullanıcı arabirimi sistemi için çoklu görev gereklidir.

Bu projede, mikroişlemci üzerinde çoklu görev işlemek için STM32F429 ARM Cortex M4'te (180 MHz'de çalışırken, düşük statik güç tüketimine ulaşan) gerçek zamanlı işletim sistemi (RTOS) uygulamasını kullanılmıştır. Şekil 3.9.'da mikrodenetleyici kartı göstermektedir.



Şekil 3.9. STM32F429 mikrodenetleyici kartı

STM32F429'un ilk görevi yükseltici dönüştürücüyü kontrol etmek ve önerilen MGNI'yi TEG'den maksimum güç elde etmek için çalıştırmak üzere uygulamaktır. Ayrıca, akım ve gerilimin ölçülen değerlerini ekranda görüntülemek ve izleme işlemini doğrulamaktır.



4. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME ALGORİTMALARI

Belirtildiği gibi, sabit bir termal durum için, bir TEG tarafından üretilen elektrik enerjisi bağlı olan elektrik yüküne göre değişir. Açık devre ve kısa devre durumlarında TEG herhangi bir elektrik enerjisi üretmez, buna karşılık, V-I karakteristiğindeki diğer herhangi bir elektriksel çalışma noktası için, TEG, kullanılabilir bir çıkış gücü üretebilmektedir.

Daha önce açıklandığı üzere, V-I eğrisinde, çalışma noktasındaki gerilim açık devre geriliminin (V_{oc}) yarısı olduğunda veya çalışma noktasında çekilen akım kısa devre akımının (I_{sc}) yarısı olduğunda maksimum güç elde edilmektedir. TEG'de uygulanan sıcaklık farkının sabit tutulması durumunda, yükün değeri Denklem 4.1'de ifade edildiği gibi ayarlanırsa, herhangi bir ek işlem gerekmeden TEG'den maksimum gücün çekilmesini sağlayabilmektedir.

$$R_{LOAD} = \frac{V_{oc}/2}{I_{sc}/2} \quad (4.1)$$

Ancak, bu durumun iki ana nedenden dolayı garanti edilmesi neredeyse imkansızdır. Çünkü hemen hemen hiçbir uygulamada sıcaklık farkı sabit tutulamamaktadır ve özellikle yükün sadece dirençli bir yüke sahip olması yaygın olan bir durum değildir. İkinci olarak, yük saf direnç değilse yükün gerçek güç tüketimine bağlı olarak elektrik yükü değeri zaman içinde değişiklik gösterebilir.

Atık ısı uygulamalarında TEG girişinde kullanılacak olan ısı gücü toplamak aslında bedelsizdir. Bu nedenle, TEG'lerin elektriksel dönüşüm verimliliğinin düşük olması ciddi bir dezavantaj değildir. Ancak Watt başına maliyeti en aza indirmek için TEG'lerden üretilen gücü en üst düzeye çıkarmak önemlidir. Üretilen gerçek güç mevcut yük talebi ile karşılanmasa bile, artan elektrik enerjisi piller veya süper kapasitörlerde depolanabilir. Pratik TEG sistemlerinde, TEG'e uygulanan sıcaklık farkı, çalışma sırasında değişir. Bu nedenle, herhangi bir ısı işlem durumunda

çekilen gücü en üst düzeye çıkarmak için yükün elektriksel çalışma noktasının sık sık güncellenmesi gerekir. Öte yandan, TEG yüzeylerinde uygulanan ΔT 'nin dengesizliğinden dolayı, iç direnç değeri değişmektedir ve her bir sıcaklık farkı değeri için farklı bir maksimum güç noktası (MGN) P-V ve P-I karakteristiklerinde oluşmaktadır. Thevenin eşdeğer devresine göre, en yüksek güç, yük direnci kaynağın iç direncine eşit olduğunda üretilir ($R_L = R_{int}$). Bu yük eşleşmesini elde etmek için, yük ile TEG dizisi arasında MGNİ algoritması ile kontrol edilen bir güç dönüştürücüsü konulması gerekir . Bu MGNİ algoritması, çeşitli ΔT değerleri altında, sistemin MGN 'da çalıştırılmasını sağlamaktadır. Bu amaç için MGNİ algoritmaları [61] 'de tanımlanmıştır, ancak bu algoritmalar TEG uygulamalarında fotovoltaik uygulamalara göre daha az yaygındır.

Özellikle, maksimum güç noktasını izlemek ve maksimum gücün çekilmesi için DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu tür dönüştürücüler MGNİ algoritmaları tarafından kontrol edilir. Bu algoritmalar en iyi çalışma noktasını dönüştürücünün doluluk/boşluk oranı değerini değiştirerek ayarlar. Bir TEG için optimum çalışma koşulu, yük empedansının iç dirence eşit veya ondan daha yüksek olmasını sağlamaktır ve genel sisteminin yüksek bir elektrik dönüşüm verimliliğini nispeten temin etmektedir.

4.1. Geleneksel MGNİ Algoritmalarını İçeren Çalışmalar

Geçmişte, TEG bazlı enerji üretim ve toplama sistemlerinde MGNİ işleminin gerçekleştirilmesi için, aşağıda analiz edildiği gibi çok çeşitli teknikler önerilmiştir. Değişir ve Gözle (ing. Perturbation and Observation-P & O) veya tepe tırmanan (hill-climbing) adı verilen MGNİ tekniği, TEG çıkış gücünün ardışık ölçümlerinin karşılaştırılması ile çalışır. [62,63, 18-20]. Bu teknikte sırasıyla, önceki ve sonraki çıkış gücü değerlerine göre güç dönüştürücüsünün doluluk boşluk oranı kontrol edilmektedir.

Güç - gerilim eğrisinin iki tarafındaki değerleri ölçülerek ve karşılaştırılarak, TEG çalışma noktası sürekli olarak MGN'ye taşınmaya çalışılır.

[12] 'de bir gerilim-trend(eğilim) saptama devresi tasarlanmıştır. Burada bir yükseltici dönüştürücü çıkış gücünün gradyanı, karşılık gelen çıkış geriliminin

ölçülmesiyle tespit edilir, böylece tepe-tırmanma (hill-climbing) MGNİ yaklaşımının düşük güçte uygulanması sağlanır.

P&O ve InC algoritmalarının MGNİ verimliliği, devredeki gürültülerden ve ayrıca TEG çıkış gücü gradyanının doğru sonuçlarının hesaplanmasından etkilenir.

Bu tezde daha doğru bir ölçüm elde etmek için Kalman filtresi kullanılarak bir çözüm önerilmiştir. [62] 'de ele alındığı gibi, değiştirme adımının arttırılması, MGN çevresinde yüksek kararlı durum salınımı ile sonuçlanır ve bu da TEG güç üretimini azaltır. Öte yandan, ölçümlerin doğruluğunu arttırmak ise MGNİ kontrol ünitesinin karmaşıklığını ve güç tüketimini arttırır. Bu operasyonel özellik, TEG kaynağının güç üretiminin ve kontrol ünitesinin güç tüketiminin aynı büyüklükte olduğu düşük güçlü TEG uygulamalarında özellikle önemlidir.

[64,65] 'te MGNİ işlemi gerçekleştirilirken, açık devre gerilimini ölçmek için TEG güç kaynağı güç dönüştürücüsünden periyodik olarak ayrılmaktadır. Daha sonra, SEPIC ve Yükseltici tipi DC / DC güç dönüştürücüleri, TEG kaynağının, MGN'na karşılık gelen $V_{oc}/2$ 'de çalışacağı şekilde kontrol edilir. Bu teknik genellikle fraksiyonel açık devre gerilimi (ing. fractional open circuit voltage -FOCV)" MGNİ yöntemi olarak adlandırılır. Benzer şekilde, fraksiyonel kısa devre akımı (ing fractional short circuit current FSCC)" MGNİ yönteminde, TEG kaynağı periyodik olarak kısa devre modunda ve ilgili kısa devre çıkış akımı altında çalışacak şekilde ayarlanır [62,66]. Güç kademesi öyle kontrol edilir ki, TEG çıkış akımı, daha önce ölçülen kısa devre TEG akımının yarısına eşitlenir, böylece MGNPP'da işlem gerçekleştirilir.

Operasyonel basitliklerine rağmen, FOCV ve FSCC MGNİ yöntemleri, açık devre gerilimi veya kısa devre akımının ardışık ölçümleri arasında gerçekleşen MGN'nin kısa adımlardaki değişikliklerini takip edememektedir. Ayrıca açık devre gerilimi veya kısa devre akımının örnekleme frekansı büyük ölçüde artırılmalıdır. Ancak bu da güç kaybına neden olacaktır, çünkü açık devre gerilimi veya kısa devre akımı ölçümleri sırasında TEG cihazından güç üretimi yapılamamaktadır.

[67]'de açık devre gerilimini ölçme sırasında TEG kaynağı çalışmasını kesintiye uğratmamak için, FOCV tekniği, TEG kaynağının sırasıyla sıcak ve soğuk taraflarında geliştirilen sıcaklık derecesinin ölçülmesi bir çift sıcaklık sensörü

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşım, özellikle TEG kaynağının çalışma sıcaklığı aralığının yüksek olması durumunda (örn. Yanmalı motor uygulamalarında) MGNİ sisteminin maliyetinin artmasına neden olan sıcaklık sensörlerinin dezavantajına sahiptir.

[68] 'da TEG'ler için tek sensörlü bir MGNİ yaklaşımı önerilmiştir. Bir yükseltici-tipi DC/DC güç dönüştürücünün bobin akımı ölçülür ve bu ölçüm durum-uzay ortalaması tekniğine dayanan bir güç dönüştürücünün modeli kullanılarak TEG güç kaynağının MGNİ'sini tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntemi uygulamak için, MGNİ işlemi sırasında güç dönüştürücü modeli tarafından dikte edilen hesaplamaların gerçekleştirilmesi için bir Dijital Sinyal İşleme (DSP) birimi kullanılmalıdır.

TEG için MGNİ tekniklerinin başka bir sınıfında, TEG'lerin iç direnci, çalışma sıcaklığı gradyanlarının tüm yayılımı boyunca yaklaşık olarak sabit kabul edilir [69]. Bu çalışma prensibine dayanarak, kesintili iletim modunda çalışan bir DC / DC yükseltici-tipi dönüştürücünün giriş empedansı, TEG seri iç direnci ile eşleşmesi için ayarlanmıştır [69] ve bundan dolayı TEG kaynağı her zaman MGN'da çalışmaktadır.

Giriş empedansı ayarı, dönüştürücü güç anahtarının anahtarlama frekansı (f_s), iletim zamanı (t_{on}) seçilerek ve ayrıca aşağıdaki gibi güç dönüştürücü endüktansının (L) değeri verilerek uygulanır:

$$R_{in} = \frac{2 \times L}{t_1^2 \cdot f_s} \quad (4.2)$$

Benzer bir yaklaşım da [70]'de kullanılmıştır. Empedans Eşleştirme yönteminin bazı dezavantajları vardır: Birincisi, MGNİ işleminin verimliliği, güç dönüştürücüye dahil edilen endüktansın istenen değere ayarlanmasından (indüktans değeri toleransı ve ayrıca çalışma sıcaklığı ile olan değişmesinden dolayı) etkilenir.

İkincisi, endüktans ve anahtarlama frekansı, güç dönüştürücü performansı, güç dönüşümü verimliliği ve maliyet gibi ölçümler açısından optimize edilmeyecek ve uygun değerlere de ayarlanmasını sağlayamayacaktır. Üçüncüsü, güç dönüştürücü kesintili iletim modunda çalıştırılır, bu durumda yüksek akım değerinde güç yarı iletkenleri gerekli olacağından, daha yüksek güç seviyelerinde arzu edilmez.

[71] 'da önerilen Extremum Seeking Control (ESC) MGNİ tekniği, Bir geri besleme kontrol döngüsünün uygulanmasına dayanmaktadır. DC/DC dönüştürücü kontrol sinyalinin doluluk boşluk oranına bir sinüzoidal değişim uygulandığında, TEG tarafından üretilen gücün değişimini ortaya çıkarır.

Sonrasında, TEG kaynağının çıkış gücü demodülasyonda ölçülür ve elde edilen sinyal, ilgili çalışma noktasında TEG güç-gerilim eğrisinin eğimini gösterir. Bu bilgi yeni doluluk/boşluk oranı değişimini türetmek için kullanılır ve TEG çalışma noktasını TEG kaynağının MGN'sine doğru hareket etmesi için zorlar. ESC MGNİ yönteminin başarılı bir şekilde çalışması için kontrol döngüsünün çoklu parametrelerinin değerlerinin uygun şekilde ayarlanması gerekliliği, bu yöntemin dezavantajıdır.

MGNİ ile kontrol edilen dönüştürücüler genellikle TEG'leri batarya veya süperkapasitör gibi depolama elemanlarına bağlar. Yük, doğru çalışma için sabit bir gerilim gerektiriyorsa, sabit bir regüle çıkış gerilimi ile yükü bataryadan beslemek için başka bir DC-DC dönüştürücü kullanılabilir.

Özetlenecek olursa, MGNİ algoritmaları ilk olarak PV sistemler için geliştirilmiştir ve ilk iki algoritma (P&O, INC), logaritmik olan PV güç eğrisinin şekli nedeniyle tepe-tırmanma teknikleri olarak adlandırılmaktadır.

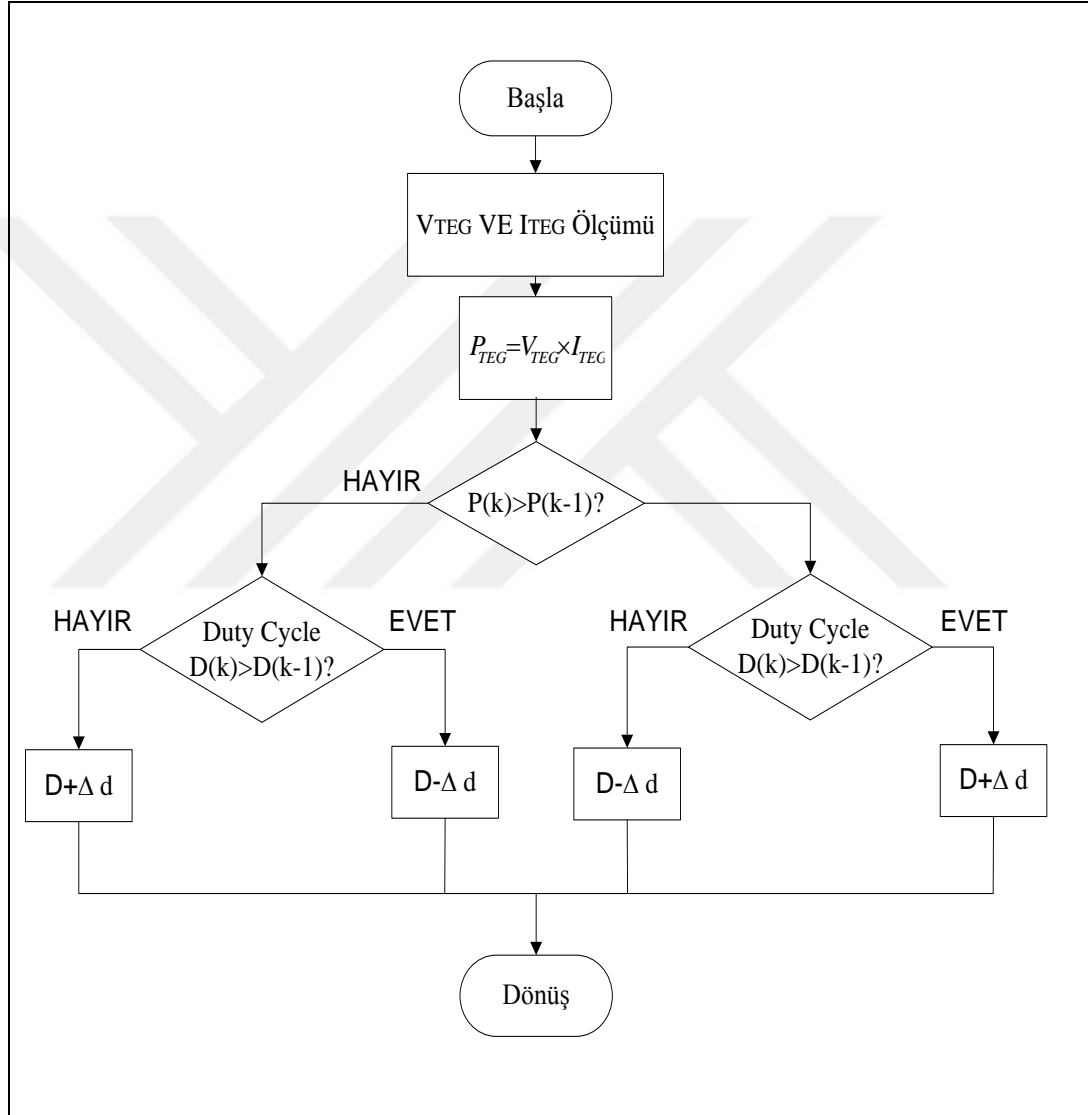
Yukarıda bahsedilen tüm MGNİ algoritmaları hem akım hem de gerilim ölçümünü gerektirir ve genellikle DGM periyodu başına önemli bir hesaplama yükü sunarken, fraksiyonel açık devre ve fraksiyonel kısa devre metodu sadece bir gerilim veya akım okumasını gerektirir ve nispeten düşük bir hesaplama sahiptir.

4.2. Yaygın MGNİ Algoritmaları

4.2.1. Değiştir ve gözle (ing. Perturb & Observe -P&O)

TEG yüzeylerinde uygulanan ΔT 'in kararsızlığı, her bir sıcaklık farkı değerı için P-V ve P-I özelliklerinde iç dirençteki bir değişmeden dolayı maksimum güç noktası (MGN) değişir. Bu yük eşleşmesinin ($R_L = R_{int}$) elde edilmesi için, farklı ΔT altında TEG dizisinin MGN'de çalışmasını sağlayan TEG dizisi ile yük arasında MGNİ ile kontrol edilen bir güç dönüştürücüsü uygulanmalıdır. Değiştir ve Gözle (P&O)

algoritması basitliği, düşük maliyeti ve yakınsama hızı özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. P & O'da, TEG (P_{TEG}) dizisinin çıkış gücü, üretilen gerilim (V_{TEG}) ve akımdan (I_{TEG}) hesaplanır. her belli bir adama bir önceki zamanda ölçülen bir referans güç noktasına sahip olması gerektiğine dair bir işaret verir ($P_{ref}(k-1)$). Daha sonra P_{TEG} ile $P_{ref}(k-1)$ karşılaştırması yapılarak Şekil 4.1. verilen P & O Algoritmasının Akış Şeması'na göre işlem yapılır



Şekil 4.1. P & O algoritmasının akış şeması

4.2.2. Artımsal iletkenlik (INC)

TEG karakteristiğinde, V_{MGN} 'den daha küçük/büyük bir işletim gerilimi (V_{OP}) varsa, bu noktada güç eğrisinin eğimi pozitif / negatif olacaktır.

V_{MGN} eğrinin zirvesi olduğundan dolayı eğim sıfır olmaktadır. Bu nedenle, takibi yönetmek için aşağıdaki Denklem kümesi kullanılmaktadır.

$$\frac{dP}{dV}=0 \text{ için } V_L=V_{MGN} \quad (4.3)$$

$$\frac{dP}{dV}>0 \text{ için } V_L<V_{MGN} \quad (4.4)$$

$$\frac{dP}{dV}<0 \text{ için } V_L>V_{MGN} \quad (4.5)$$

Ancak, $P = VI$ ve I, V 'nin bir fonksiyonudur, böylece

$$\frac{dP}{dV}=I+V \frac{dI}{dV} \cong I+V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (4.6)$$

Dolayısıyla, yönetim Denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V}=-\frac{I}{V} \text{ için } V_L=V_{MGN} \quad (4.7)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V}>-\frac{I}{V} \text{ için } V_L<V_{MGN} \quad (4.8)$$

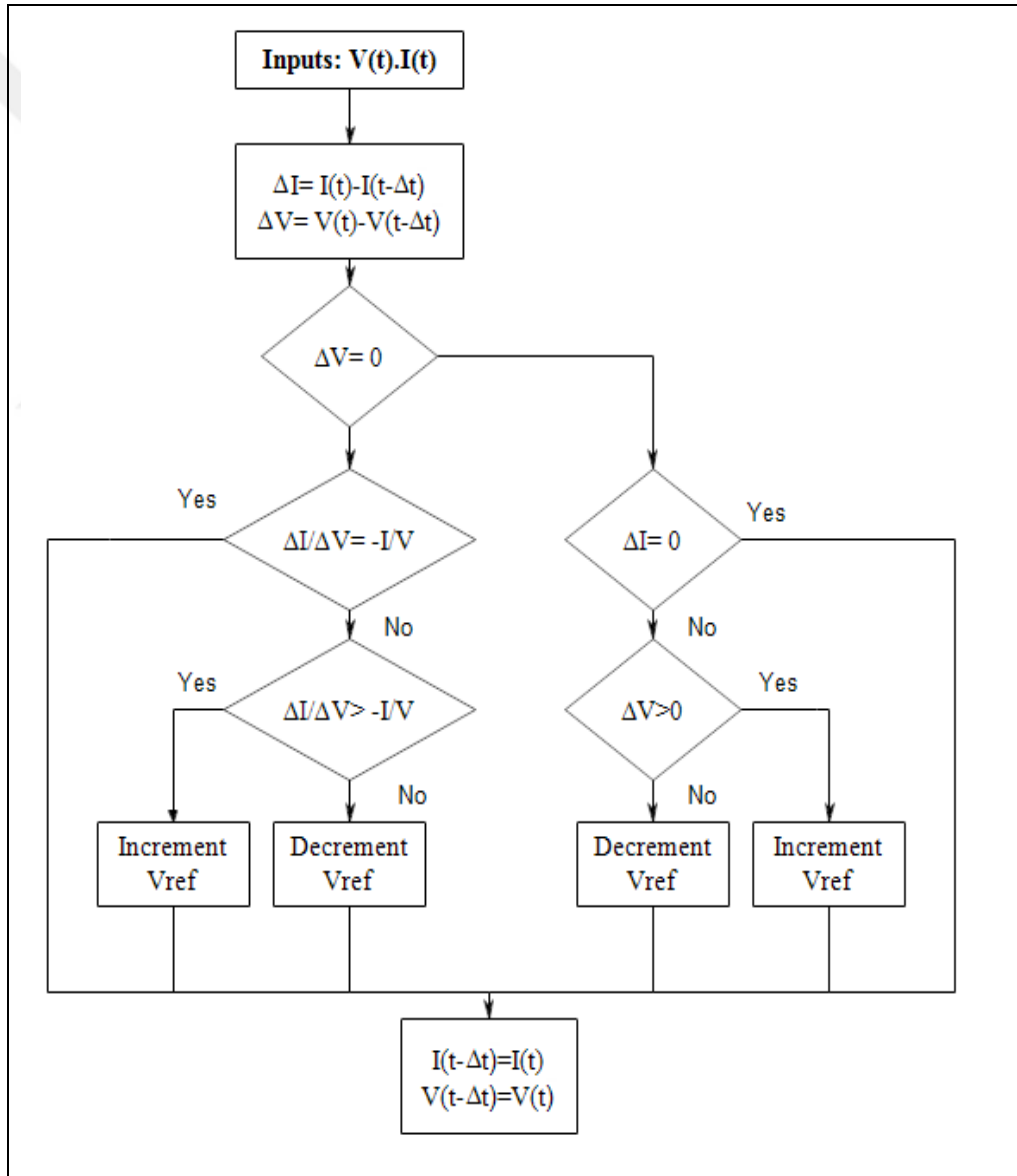
$$\frac{\Delta I}{\Delta V}<-\frac{I}{V} \text{ için } V_L>V_{MGN} \quad (4.9)$$

Bu Denklemler, kaynağın artan iletkenliğinin anlık iletkenliğin negatif değerine eşit olması durumunda, MGN'ye ulaşıldığını belirtmektedir. Artımlı iletkenlik (INC) algoritması, P & O gibi gerilimi adımlayarak izler. Yukarıdaki Denklemler kullanılarak, MGN'ye ne zaman ulaşıldığı tam olarak belirlenebilir. INC için akış şeması Şekil 4.2'te gösterilmektedir.

Gerçekte, algoritmanın tam olarak MGN'de durması çok olası değildir. Bu nedenle, pratik INC algoritmaları, çalışma noktası belirli bir hata payı içinde olduğunda MGN'ye ulaşıldığı düşünülür:

$$\left| I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \right| < e \quad (4.10)$$

Hatadan kaçınmak için adım büyüklüğü sınırlardan daha küçük olmalıdır. Bu nedenle INC algoritmaları, kararlı durum performansı ve dinamik yanıt arasındaki dengeyi önlemek için de bir değişken adımı kullanırlar [72] [73].



Şekil 4.2. INC algoritmasının akış şeması

4.2.3. Kesirli açık devre gerilimi

Kesirli açık devre gerilimi (FOCV), daha yaygın olarak sabit voltaj olarak bilinen, açık devre voltajı (V_{OC}) ve V_{MGN} arasındaki ilişkinin aşağıdaki Denklemden gösterildiği gibi lineer olduğunu kullanır:

$$V_{MGN}=kV_{OC} \text{ (k=sabit)} \quad (4.11)$$

Genellikle bir TEG'in I-V karakteristikleri neredeyse doğrusal olduğundan $k = 0.5$ tir. FOCV Algoritması, TEG'i güç dönüştürücüsünden periyodik olarak ayırıp V_{OC} 'yi ölçerek çalışır. Denklem (4.11), V_{MGN} 'yi hesaplamak için kullanılır ve güç dönüştürücü, çalışma gerilimini eşleştirmek için değiştirir. Açıkta ki, V_{OC} kontrol edilirken yüke güç aktarılmaz, bu yüzden güç aktarım kaybını minimumda tutacak bir ölçüm sıklığı seçilmelidir.

4.2.4. Kesirli kısa devre akımı

Benzer şekilde, kısmi kısa devre akımı (ing. fractional short circuit current -FSCC), kısa devre akımı (I_{SC}) ve Maksimum akım (I_{MGN}) arasındaki ilişkiyi kullanmaktadır:

$$I_{MGN}=kI_{SC} \text{ (k=sabit)} \quad (4.12)$$

Bu ilişkiyi kullanan MGNİ algoritmaları ya açık devre gerilimini [22], [55], [74] ya da kısa devre akımını [66] ölçmektedir ve yukarıda belirtilen yöntemlere (P&O ve INC) göre aşağıdaki avantajları sağlarlar:

- 1) Sadece bir parametrenin (gerilim veya akım) ölçümü gereklidir.
- 2) Gereken sayısal hesaplamalar daha azdır.
- 3) Değişir -gözle (P & O) algoritmasındaki sabit durum az salınımı ve Artımsal İletkenlik Algoritmasındaki (INC) sabit durum hatası yoktur.

Bu yöntemlerin olumsuz yanları ise, sistemde dönüştürücü bulundurulma gerekliliğinden dolayı örnekleme zamanı boyunca TEG'den dönüştürücüye hiçbir enerjinin akmaması olarak ortaya çıkmaktadır.

4.3. Geliştirilen MGNİ Tekniği

TEG'nin kısa devre akımını ölçmek için bu çalışmada geliştirilen teknik, bir anahtarla birlikte, bir kondansatör paralel olarak bağlanmaktadır ve TEG'in çıkışına bir diyot seri olarak bağlanmaktadır. Bu seri diyot aynı zamanda yükseltici dönüştürücünün girişı olmaktadır. Küçük ölçekli uygulamalar için SCP algoritması kullanabilmektedir.

Ayrıca, büyük ölçekli uygulamalar için Karşılaştırmalı-Maksimum Güç Noktası İzleme algoritması PD-MGNİ uygulanmıştır. Bu yöntemde gerilim ve akım sensörleri gerektiren yükseltici dönüştürücüde kullanılmaktadır. Buna ek olarak, Kalman filtre tahmincisi kullanılarak geleneksel P&O algoritması için bir performans gelişimi sağlanmıştır . Bu algoritmalar sonuçları ile birlikte 6. bölümde ayrıntılı olarak açıklamaktadır.

üretmemesine neden olur. MGNI dönüştürücüler, tam tersine, güç üretimini en üst düzeye çıkaracak şekilde TEG'ler tarafından "görülen" empedansı ayarlayabilir.

a. Kararlı durum koşulları

Bu durumun amacı, MGNI dönüştürücü tarafından çekilen gücün, her biri aynı sıcaklık farkında muhafaza edilen, önerilen konfigürasyonlardan (tek, seri ve paralel) elde edilebilecek maksimum güce ulaşmasını sağlamaktır. Üç ayrı MGNI algoritması gerçekleştirilmiş olup, her algoritma farklı bir termal işlem noktası altında çalıştırılmıştır.

b. TEG geçici performansı

Deneyde, sıcaklık farkı, sıcak taraflardaki ısı arttığında, en hızlı termal geçiş TEG'lerin sıcaklığındaki artışa bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Algoritma, 80 C'den 130°C'ye kadar termal geçici koşullar altında test edilmiştir ve çalışma noktası saniyede üç kez değiştirilmiştir. Üç cihazdaki sıcaklık farklılıkları her zaman tam olarak aynı değildir, bu nedenle MGNI dönüştürücü tarafından çekilen gerçek güç, kararlılık deneyi için hesaplanan mevcut teorik maksimum güç ile karşılaştırılmaktadır.

MGNI algoritmalarının kararlı hal ve geçici hal performansını test etmek için üç adet deney yapılmıştır. Bununla birlikte, elde edilen performansın literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılması mümkündür.

Bu bölümde, ticari TEG cihazları için uygulanan elektrik yüküne bağlı olarak üç farklı sıcaklık gradyanında üretilen gücü tanımlayan önerilen algoritmaların ve grafiklerin sonuçlarını sunmaktadır. Bir önceki bölümde ilk deneysel verileri topladıktan sonra, uygulanan algoritmanın verimliliğini hesaplamak, her bir termik işletim noktasında doğru elektrik değerlerinin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bahsedildiği gibi, ticari TEG (TEP1-142T300), üç farklı konfigürasyon için üç farklı sıcaklık farkında ΔT : 80 °C, 100 °C ve 130 °C ile karakterize edilmiştir ve algoritmaların verimliliğini test etmek için aynı değerler kullanılmıştır.

5.1. Termoelektrik Generatörün Verimliliği

Çeşitli çalışma koşullarında; çıkış gücü, emilen ısı ve bir termoelektrik jeneratörün (TEG) verimliliği, özellikle TEG'nin sıcak ve soğuk taraf yüzeylerinde periyodik olarak değiştirilen sıcaklıkların etkilerine dikkat edilerek deneysel olarak analiz edilmiştir. Tahminler gösteriyor ki sıcak taraf yüzey sıcaklığındaki bir artış, çıkış gücü ve emilen ısıyı da artırır. Sıcak tarafta ve soğuk taraftaki sıcaklık genlikleri sabitlendiğinde, ortalama çıkış gücü ve verimliliği, artan faz açısı ile belirli bir dereceye kadar arttırılabilir. Emilen ısı faz açısına duyarlıdır. Ortalama çıkış gücü, emilen ısı veya değişken sıcaklık nedeniyle soğuk taraf yüzeyi, ısı kaynağına ve kullanılan ısı emici malzemelere bağlıdır.

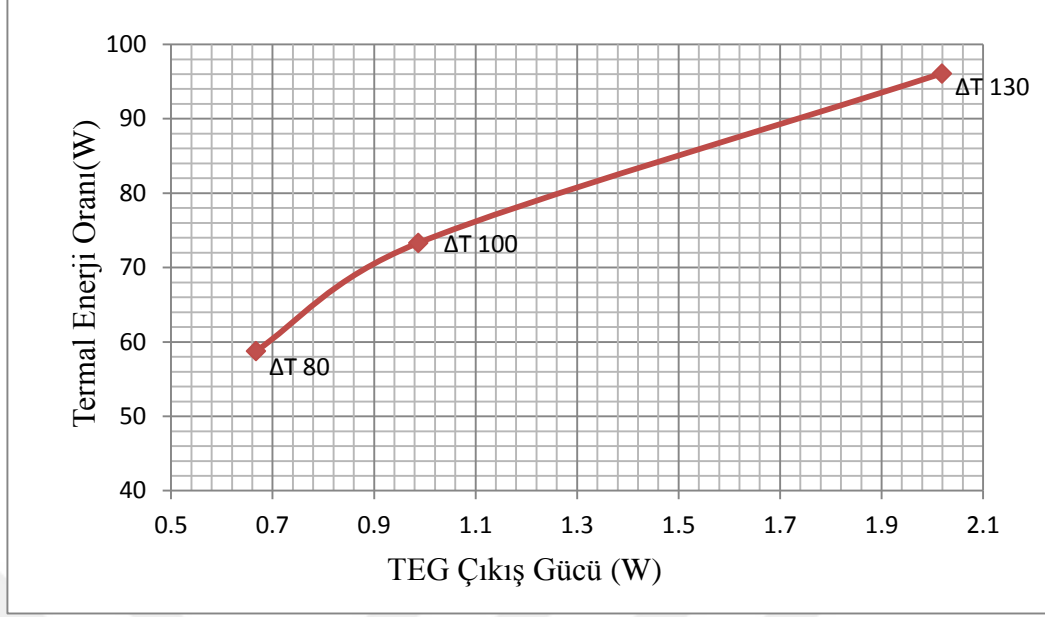
Otomobil, medikal, güneş termoelektrik generatörü vb. gibi tüm gerçek uygulamalarda atık ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için önemli bir konu olan bu enerji dönüşümü, TEG'in dönüşüm verimliliği ile yakından ilgilidir. TEG cihazının verimliliği (η_{TEG}), üretilen elektrik gücünün (P_{TEG}) ve termal enerjinin oranıdır. Şekil 5.2. farklı termal enerji değerleri altında TEG güç üretimi performansını gösterir.

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{TEG}}{Q_H} \quad (5.1)$$

Q_H , sıcak yüzey üzerinde uygulanan termal enerji oranı aşağıdaki gibi verilir:

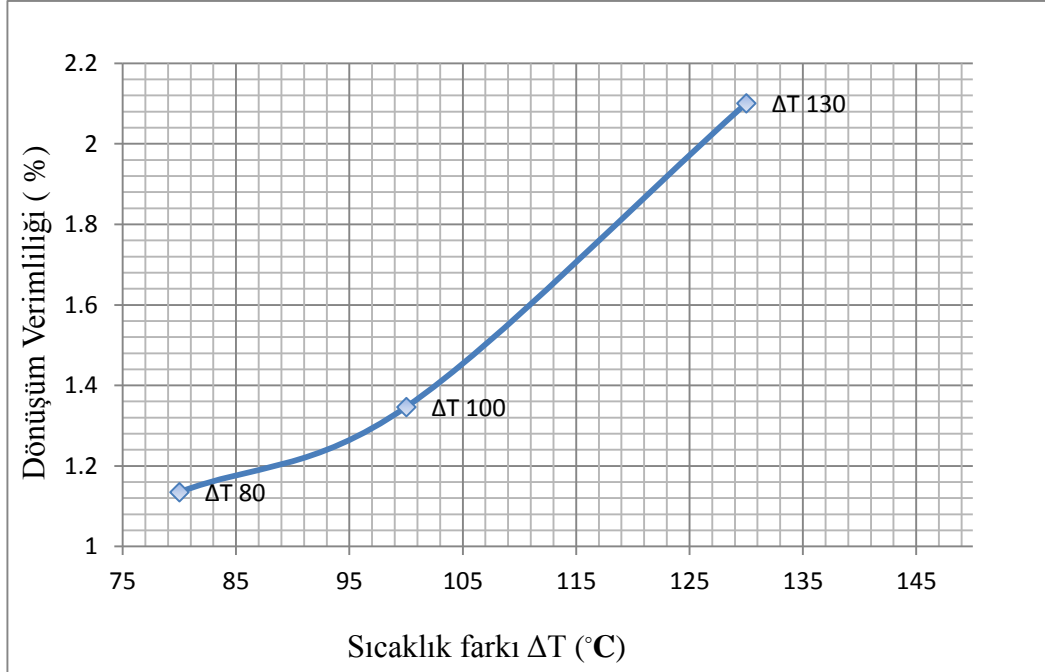
$$Q_H = \frac{\Delta T}{Q_m} + \alpha T_H I_{TEG} - \frac{1}{2} R_{int} I_{TEG}^2 \quad (5.2)$$

Q_m , TEG'in termal direnci iken, T_H sıcak yüzey sıcaklığı, I_{TEG} üretilen akım ve R_{int} TEG modülünün iç direncidir.



Şekil 5.2. Farklı ΔT değerleri altında termal enerji ile TEG çıkış gücü

Denklem (5.1) den farklı ΔT değerlerinde seçilen modülün verimi ise Şekil 5.3' te gösterilmiştir.

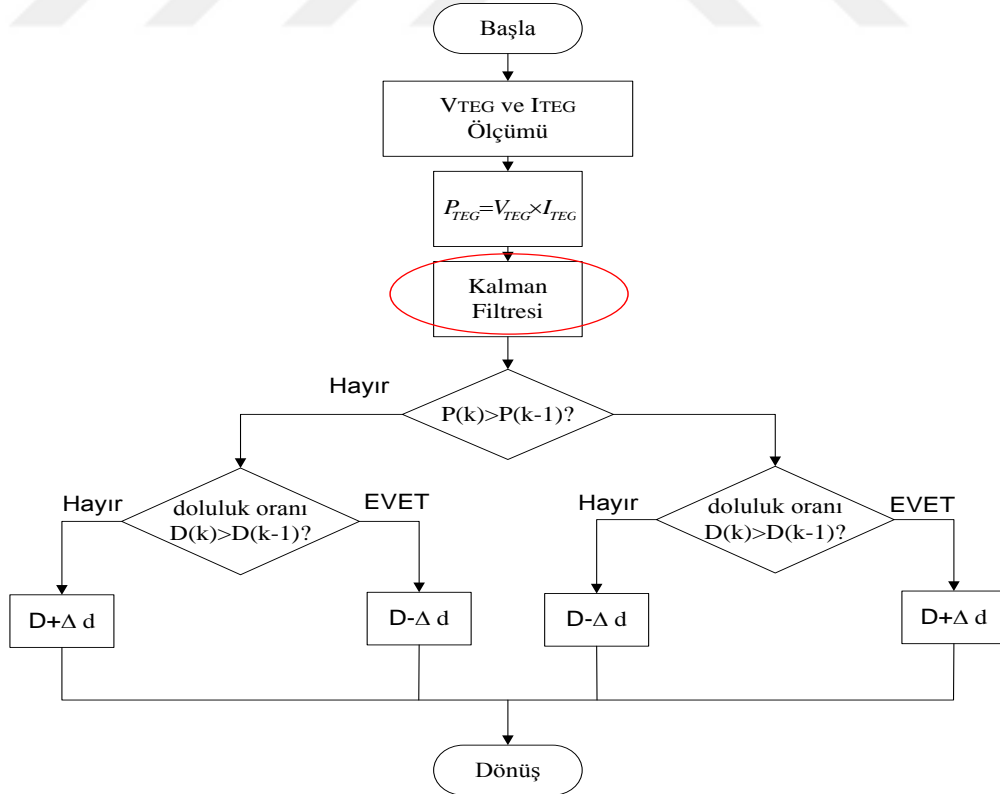


Şekil 5.3. Farklı ΔT değerleri altında TEG dönüşüm verimliliği

5.2. Önerilen Algoritmalar ve Uygulanları

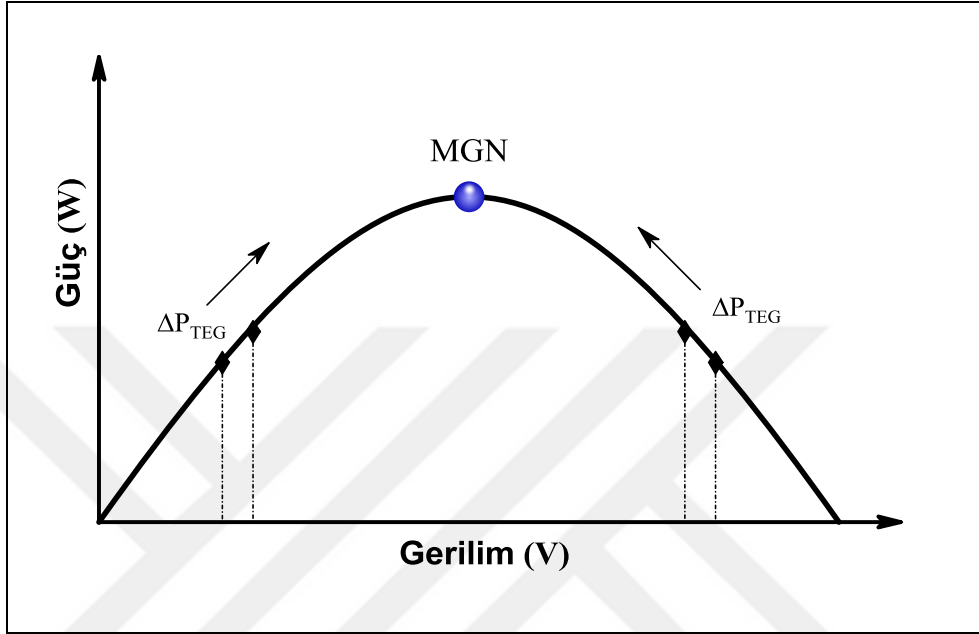
5.2.1. Modifiye değiştir ve gözle (P & O) algoritması

TEG yüzeylerinde uygulanan ΔT 'in kararsızlığı, her bir sıcaklık farkı değeri için P-V ve P-I özelliklerinde, iç dirençteki bir değişmeden dolayı maksimum güç noktasında (MGN) değişir. Bu yük eşleşmesinin ($R_L = R_{int}$) elde edilmesi için, farklı ΔT altında TEG dizisinin MGN'de çalışmasını sağlayan TEG dizisi ile yük arasında MGNİ uygulanmalıdır. Değiştir ve Gözle algoritması basitliği, düşük maliyeti ve yakınsama hızı özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. P & O'da, TEG (P_{TEG}) dizisinin çıkış gücü, üretilen gerilim (V_{TEG}) ve akımdan (I_{TEG}) hesaplanır. Ölçülen güç, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi Kalman filtresi kullanılarak yeniden ayarlanır. Sıcak yüzeydeki veya soğuk yüzeydeki sıcaklık değişimi, TEG dizisinin çıkışını etkiler ve bu, sistemin bir denge durumunda olmayacağını ve her sistemin bir önceki zamanda ölçülen bir referans güç noktasına sahip olması gerektiğine dair bir işaret verir ($P_{ref}(k-1)$). Daha sonra PTEG'nin $P_{ref}(k-1)$ ile karşılaştırması yapılmalı ve dizi etrafındaki parazit ısıdan etkilenen çıkış gücüne ilişkin bozukluk yönünde bir karar alınmalıdır.



Şekil 5.4. Modifiye P & O algoritmasının akış şeması

Tırmanma adımlarının yönünü incelemek için iki sınır vardır: $\Delta P > 0$ olduğunda, tırmanma yönü, P_{ref} 'in durumunda olduğu gibi, aynı yönde değişecektir. $\Delta P < 0$ yönü, gösterildiği gibi P_{ref} 'in tersi yönde değişir. Şekil 5.5. Bu adımların amacı, sistemin MGNI'ye ulaşması durumunda $\Delta P = 0$ seviyesini arttırmaktır.



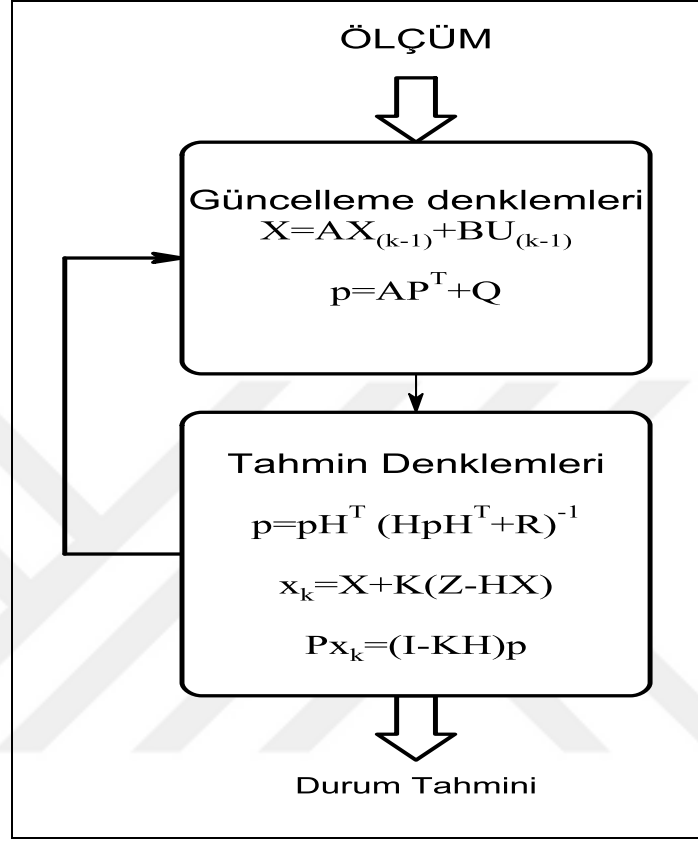
Şekil 5.5. P & O tekniği

5.2.1.1. Değiştir ve gözle algoritması için Kalman filtresi

Kalman Filtresi, sistemdeki verinin gürültüyle doğrusal olarak netleştirilmesini sağlayan en uygun tahmin edicidir. Ayrıca, Kalman filtresi prensibi state-space yöntemi üzerine kurulmuştur. Bu süreçte, sinyalin gürültü ve bozulma oluşumunu araştırmaktadır [78].

MGNI yöntemleri üzerindeki gürültü etkilerini ortadan kaldırmak için çıkış gücünde yeniden ayarlama yapılmalıdır ve yeniden ayarlama işlemi için, bir geri bildirim kontrolü uygulanmalıdır. Gürültüler ve çalışma koşullarındaki değişikliklerin üstesinden gelmek için, filtre güç durumunu eş zamanlı olarak tahmin eder ve buna göre geri bildirim verir. Yeniden ayarlama işlemi iki aşamada sınıflandırılır. İlk aşama, tahmin edici denklemlerde temsil edilen ölçüm güncellemesi ile ilgilidir, ikinci aşama ise düzeltici denklemlerde temsil edilen zaman güncelleme süreçlerine işaret etmektedir.

Söz konusu süreçlere dayanarak, sistemde herhangi bir ekstra ekipman olmaksızın doğru güç özellikleri tahmin edilebilir. Şekil 5.6. Kalman filtre işlem sürecini göstermektedir.

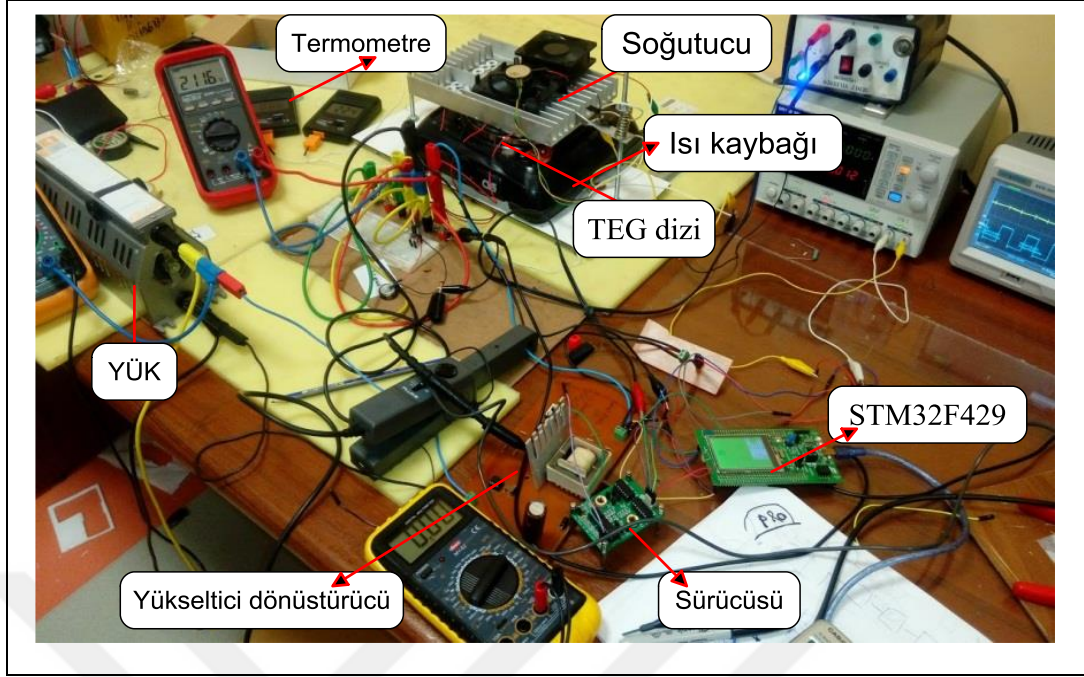


Şekil 5.6. Kalman filtre çalışması

5.2.1.2. Modifiye P&O algoritması için enerji üretim prototipi

Deney prototipi, ticari TEG (TEP1-142T300) karakteristik testinden oluşmaktadır. Algoritmanın uygulanması için diğer ana bileşenler bir yükseltici dönüştürücü, direnç yükü, bir gerilim bölücü ve çıkış akımını algılayan yüksek hassasiyetli akım sensörüdür (NA250).

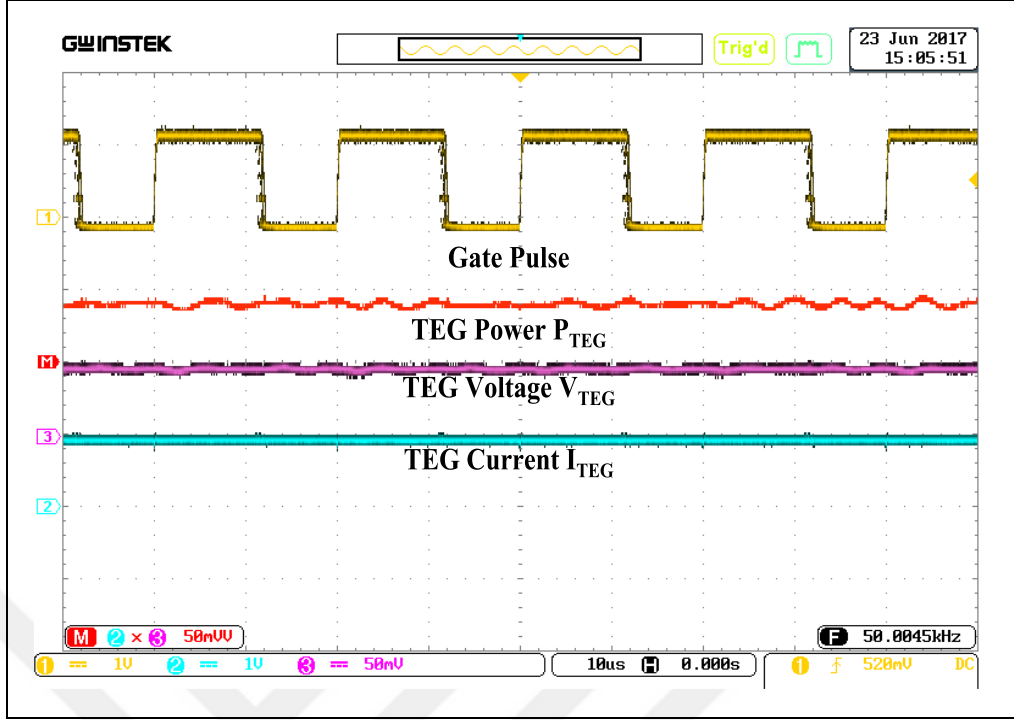
MGNİ algoritmasını uygularken daha iyi performans almak için STM32F429 kitinin kullanılmıştır. Şekil 5.7'de tüm deney resmi görülmektedir.



Şekil 5.7. TEG için enerji üretim prototipi (Modifiye P&O)

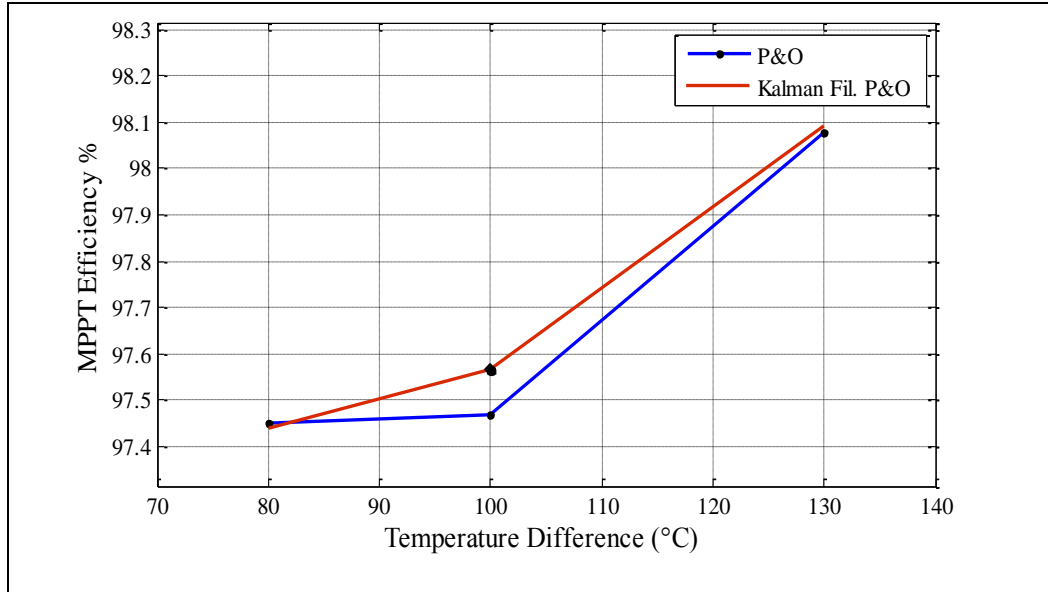
Modifiye edilen MGNİ algoritmasının kararlı durum koşulu altında etkinliğini incelemek için önerilen sisteme bağlanan TEG dizisine üç farklı sıcaklık farkı ΔT , 80 °C, 100 °C, 130 °C uygulanmıştır.

Buna uygun olarak, verimlilik, her bir ΔT için optimum noktada TEG'in çıkış gücü özelliklerine ve MGNİ dönüştürücünün çıkış gücüne göre hesaplanır. Kalman filtresi, gerilim ve akım sensörü üzerinden ölçülen çıkış gücü için bir mikro denetleyicide uygulanmıştır. Bu uygulama, çıkış gücünü tahmin etmek ve yeniden ayarlamak amacıyla kullanılır. Ayrıca bu tahmin, algoritmanın herhangi bir karışıklık olmadan sorunsuzca işlemini sağlamaktadır. Şekil 5.8. MGNİ'li dönüştürücünün deneysel malışma sonucunda çıkış büyüklükleri verilmiştir. Kalman filtresinde, tekrarlamalı ölçüm güncellemesi ve süreçlerin zaman güncellemeleri, durumların tahminini sabitleyerek gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.8. Deneysel çalışma sonucu, kapı sürücüsü darbesi, çıkış gücü, TEP1-142T300 gerilimi ve akımı

Kalman filtreli P&O algoritması, geleneksel P&O algoritmasına kıyasla daha yüksek bir verim sağlamaktadır. Sonuçlar, önerilen tekniğin performansının yüksek düzeyde verimli olduğunu ve MGNI veriminin Şekil 5.9'da gösterildiği gibi farklı ΔT değerleri altında artırıldığını göstermiştir.

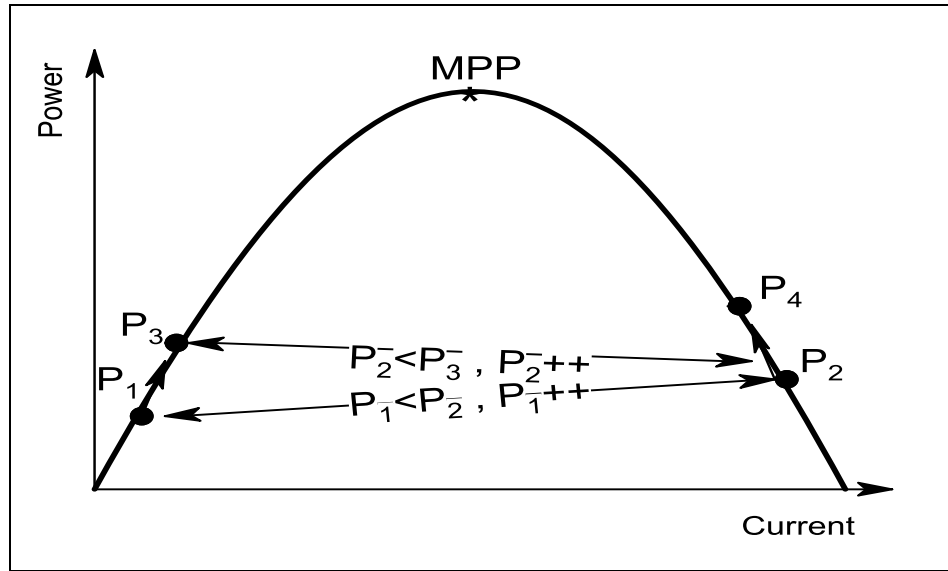


Şekil 5.9. P & O ve modifiye P & O için farklı sıcaklık farklarında verimler

5.2.2. Karşılaştırmalı-maksimum güç noktası izleme algoritması (PD- MGNİ)

Önerilen algoritma, sıcaklık değişimini izlemek için TEG sisteminin çıkış akımını ve gerilimini algılamaktadır. Ana PD-MGNİ algoritması doğrudan iki farklı güç noktası için hesaplanan işletme gücüne bağlıdır. İşletme gücünün ilk güç noktası, dönüştürücünün doluluk boşluk oranının sıfıra yakın olduğu anda başlamaktadır, ikinci güç noktası dönüştürücünün doluluk boşluk oranının 1'e yakın olduğu anda başlamaktadır.

Pratik açıdan bakınca, Kabarcık Sıralama algoritması sadece optimum güç noktasını elde etmek için kullanılır. Başka bir deyişle, bu algoritma (PD-MGNİ algoritması), karakteristik eğrinin ölçülen güç değerlerini karşılaştırır ve en büyük değeri seçer. En yüksek güç noktası referans güç (P_{ref}) olarak güncellenirken düşük nokta tarafı yeni bir güç noktasına yönlendirilmektedir. Her yinelemede belirli bir adım, sistemin MGN'yi temsil eden en büyük güç noktasına ulaşmasını sağlamaktadır. Ek olarak, kontrol stratejisi, dönüştürücünün doluluk boşluk oranı'nının iki güç çalışma noktası konumuna sahip olması için ayarlanır. Yöntemin prensibi Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir.

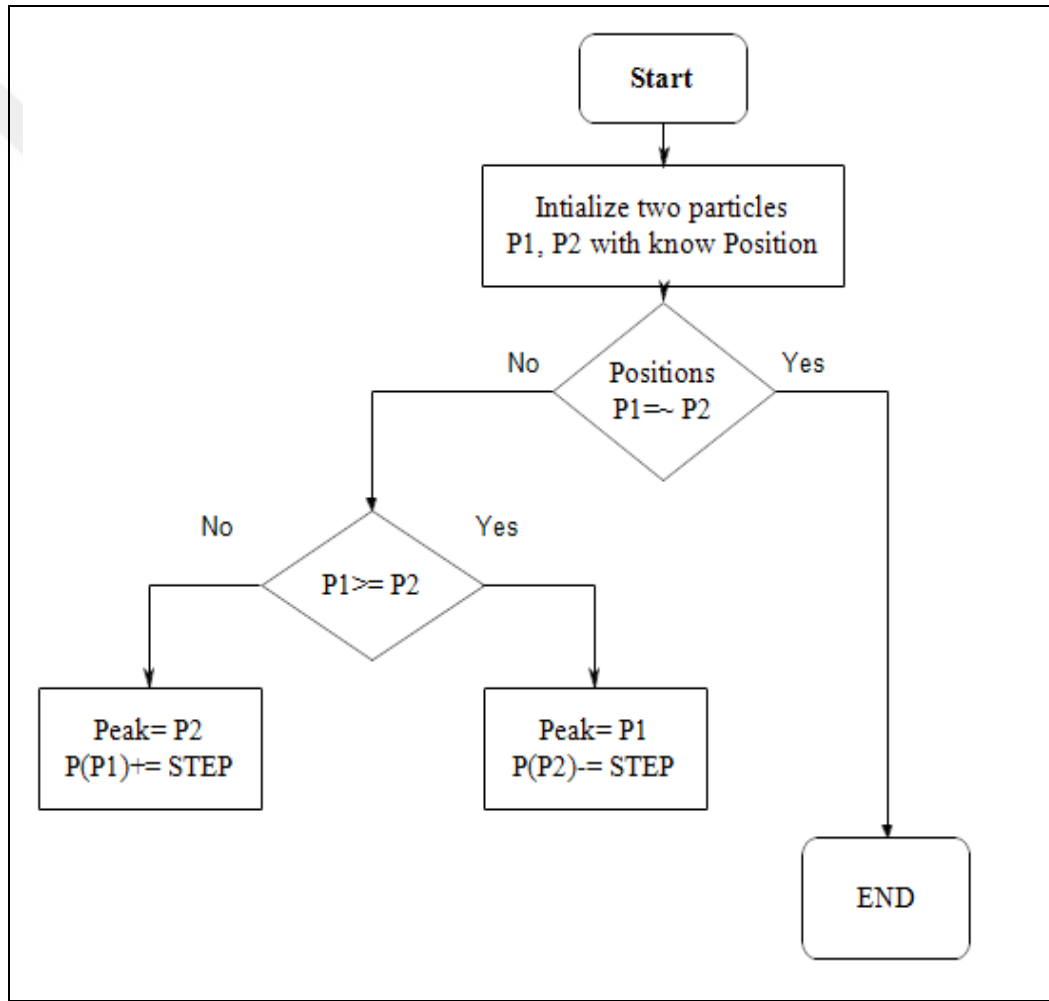


Şekil 5.10. PD-MGNİ algoritmasının mekanizması

Şekil 5.10'da gösterildiği gibi, P_1 , güç eğrisinin başlangıç noktası olarak kabul edilir ve P_2 , güç eğrisinin sonundaki güç değeri olarak kabul edilir.

Güç noktalarını farklılaştırmak için, ilk güç noktası (P_1) ile ikinci güç noktası (P_2) arasında bir karşılaştırma çizilmektedir. Optimum olmayan nokta (P_1) belirli bir adım ($++$) ile yeni bir pozisyon P_3 'e taşınır, P_2 ve P_3 arasında bir karşılaştırma yapıp P_2 P_4 'e taşınır, bu işlem bir MGN elde edilene kadar devam etmektedir.

Algoritmanın temel ilkeleri iletişim ve öğrenmedir. Böylece maksimum güç aktarım teoremi ile, en yüksek noktaya yükselen noktalardan biri maksimum gücü gösterdiğinde TEG'den maksimum güç çekilir. Önerilen algoritmanın akış şeması Şekil 5.11'de sunulmuştur.



Şekil 5.11. PD-MGNİ algoritmasının akış şeması

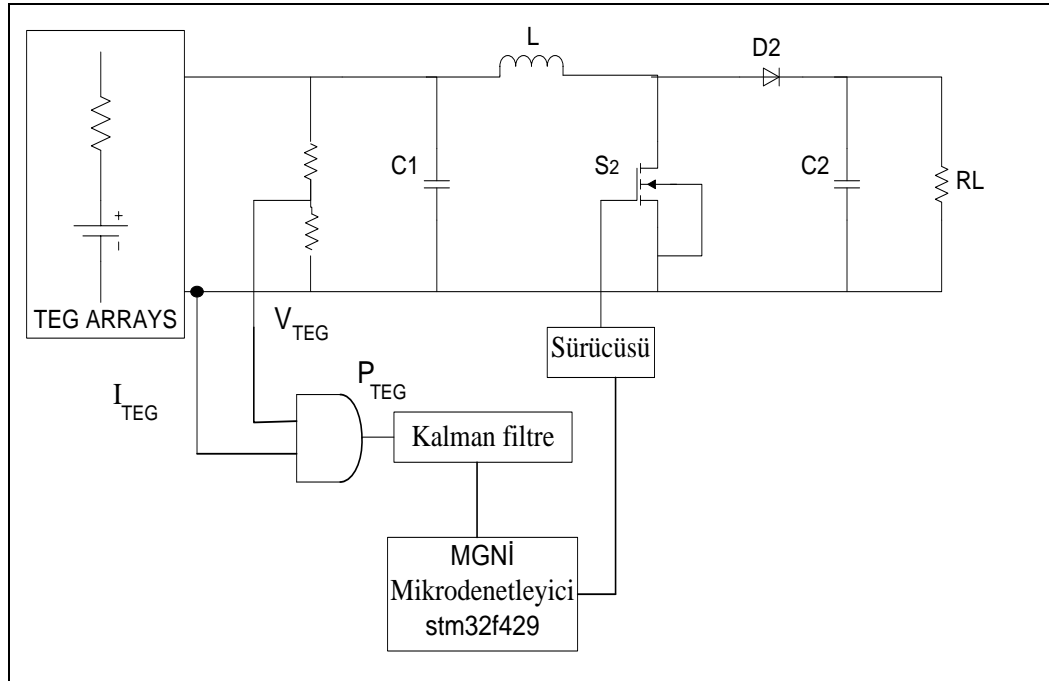
5.2.2.1. PD-MGNİ algoritması için MGNİ dönüştürücüsü

Çeşitli ısı koşullar altında, Yükseltici dönüştürücü (yükseltici), farklı güç aralıklarında (düşük / orta seviye) çalışma yeteneği nedeniyle Maksimum Güç Noktasını izlemek için yaygın olarak kullanılır. Yükseltici dönüştürücü dönüştürme faktörü sorunsuz ve doğru bir şekilde baskın olmaktadır. Bu yönleri ile çok seviyeli güç uygulamalarında yüksek performanslı bir sistem sunar. Sürekli iletim modu (SİM) ve kesintili iletim modu (KİM) olarak iki moda yapılandırılmıştır.

SİM modu, yükseltici dönüştürücünün bobin eğrisinde açıkça gösterilmiştir, burada boşaltma periyodundaki endüktans akımı asla sıfıra gitmez.

Bu mod (SİM), anahtarların yüksek verimli kullanımı için seçilmiştir. Süreksiz (KİM) modda, endüktans akımı sıfıra gider ve dinamik durumdaki azalma nedeniyle iyi değildir.

PD-MGNİ algoritmasını uygulamak için bir akım sensörü ve bir gerilim bölücü, farklı çalışma koşulları altında akım ve gerilimi ölçmek için periyodik olarak kullanılmıştır. Şekil 5.12.'de önerilen enerji üretim sisteminin yapılandırılmış diyagramını sunmaktadır.



Şekil 5.12. PD-MGNİ algoritması için önerilen sistemin şematik diyagramı

5.2.2.2. PD-MGNİ algoritması için Kalman filtresi

Kalman filtresi, gürültülü bir ortamda en uygun stokastik tahmini sağlayan bir tahmin edicidir. Kalman filtresinin mekanizması temel olarak iki temel aşamaya dayanır; zaman güncelleme ve ölçüm güncelleme.

Pratik açıdan, Enerji üretim sisteminde, TEG dizisinin çıkış gücü üzerinde bir bozukluk görülmektedir. Ek olarak, termal gürültünün, anahtarlama gürültüsünün, elektromanyetik parazit (EMI) vs.'nin neden olduğu sistem bozuklukları, MGNİ'nin işletme doğası ve kalite performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Bu bozuklukların üstesinden gelmek için, Kalman filtresi, ardışık gürültü etkisinden dolayı ideal seçenek olarak kabul edilir. Güç eğrisini tahmin eder ve karışıklık olmadan MGN'ye sorunsuz bir izleme yeteneği verir. Kalman filtresi, Şekil 5.13'teki Blok diyagramında gösterildiği gibi mikrokontrolörde uygulanır.

Gerçek doğru değerleri elde etmek için üç ana yineleme hesaplaması tamamlanmalıdır. Her yinelemede, Kalman filtre kazancı, mevcut tahmin ve tahmini değerdeki yeni hata için bir hesaplama yapılmaktadır. Kalman kazancı (K_g) sıfır ile 1 arasında bir değere sahiptir ve Denklem (5.3) ile hesaplanır.

$$K_g = \left(\frac{E_{est}}{E_{est} - E_{mea}} \right) \quad (5.3)$$

Her zaman için geçerli tahmin EST_t , Denklem (5.4) 'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

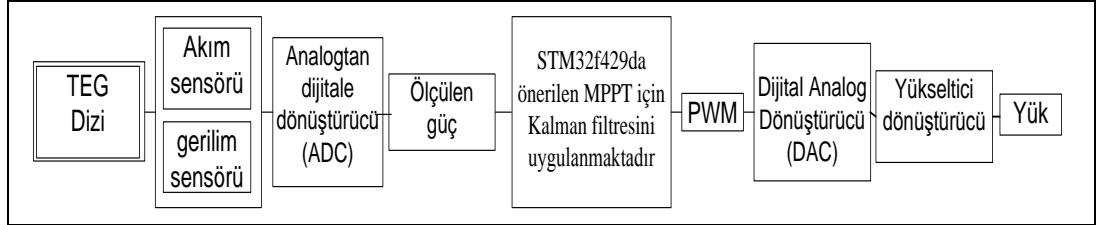
$$EST_t = EST_{t-1} + K_g(MEA - EST_{t-1}) \quad (5.4)$$

Tahmin edilen değerdeki yeni hata NE_{EST_t} Denklemde gösterildiği gibi hesaplanır:

$$NE_{EST_t} = \left(\frac{(E_{mea})(E_{est-1})}{(E_{mea}) + (E_{est-1})} \right) \quad (5.5)$$

E_{est} tahmini hatayı, E_{mea} ölçümdeki hatayı, MEA ölçüm değerlerini ve EST_{t-1} önceki tahmini temsil etmektedir.

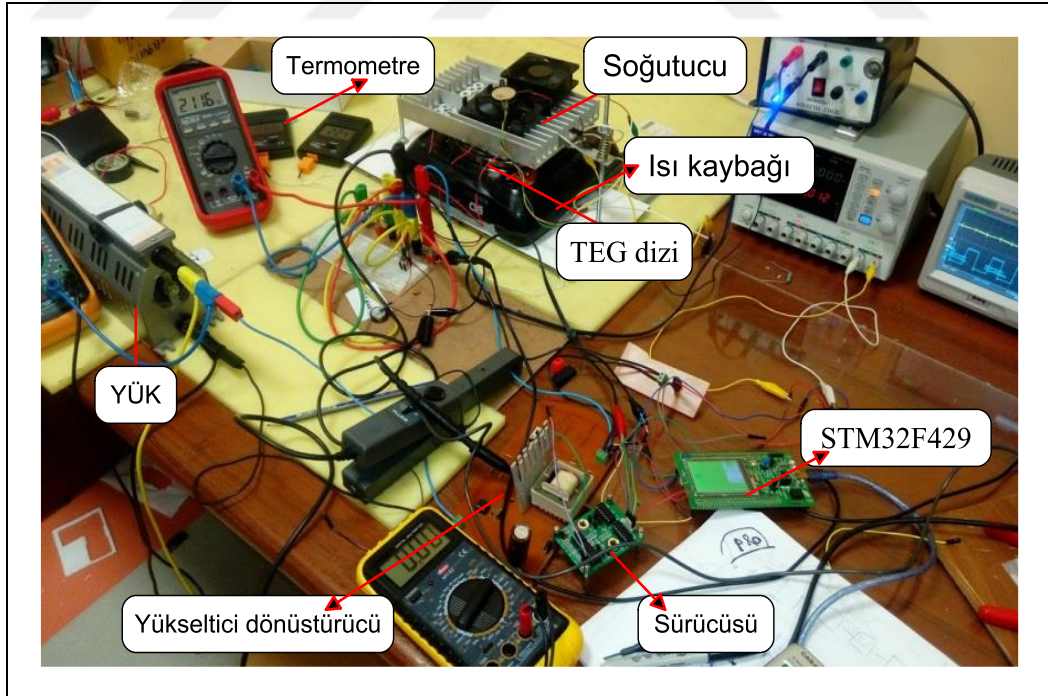
Bahsedilen denklemler için yinelemeyi uygulayarak, tahmin işlemleri, tahmini değer için bir düzeltici olarak işlev gören ölçüm güncellemesinde ayarlanır ve optimum güç izleme işlemi için kolaylaştırıcı olur.



Şekil 5.13. PD-MGNİ algoritması için önerilen sistemin blok şeması

5.2.2.3. PD-MGNİ algoritması için enerji üretim prototipi

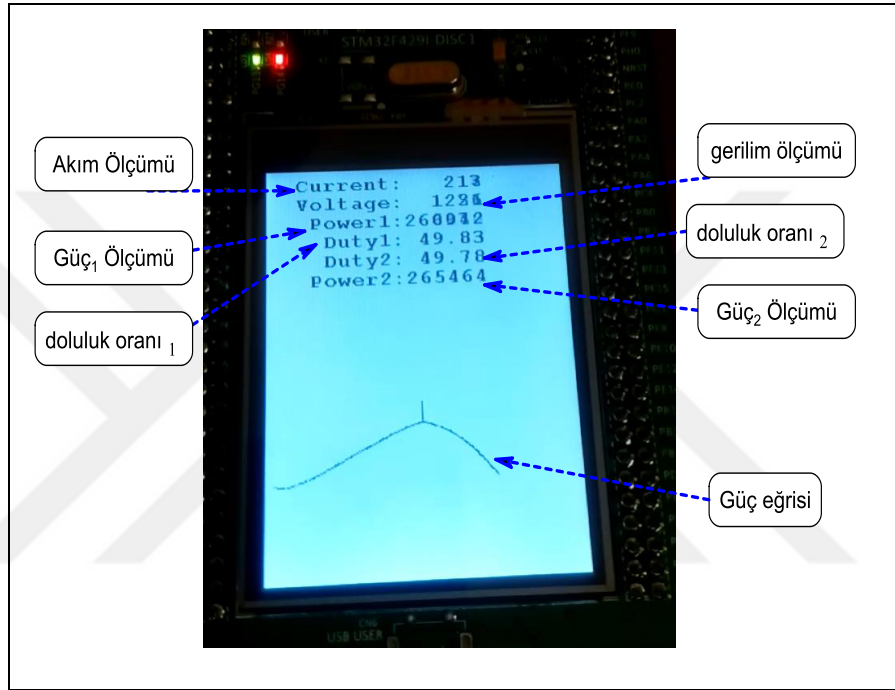
Mevcut çalışma, pratik olarak güç üretim sisteminde uygulanmıştır. Algoritma, bir dizi olarak ticari TEG (TEP1-142T300) modülünün maksimum gücünü başarıyla izlemektedir. Şekil 5.14. Önerilen üretim sistemi devresinin deneysel elemanlarını göstermektedir. PD-MGNİ algoritmasını uygulamak için geniş güç aralığı çalışması altında yüksek performansı nedeniyle bir yükseltici dönüştürücü kullanılmaktadır.



Şekil 5.14. PD-MGNİ algoritması için enerji üretimi sisteminin kullanılan elemanları

Ayrıca, sistem yüksek özelliklere sahip olan STM32f429 adı verilen bir mikro denetleyici kiti kullanmaktadır ve önerilen algoritmanın farklı çalışma koşulları altında operasyon süresinde iki doluluk oranı'nın değerini gözlemektedir.

Şekil 5.15'da gösterildiği gibi, Akımı algılamak için INA250 yüksek hassasiyetli algılayıcı kullanılmakta ve gerilimi algılamak için bir gerilim bölücü kullanılmaktadır.



Şekil 5.15. Algoritmanın STM32f429i'de kullanımı

PD-MGNİ algoritması üç farklı sıcaklık farkı değeri (ΔT) altında değerlendirilmiştir. Bunlar: 80 °C, 100 °C ve 130 °C'dir. PD-MGNİ algoritması, optimum güç noktasını yakalar ve TEG'nin çıkış gücünde görünen sabit durum hatasını(steady-state error) azaltır. Ayrıca, algoritma kararlı durum koşulları altında ve üç sıcaklık farkı değerinde sunulan dinamik koşullarda değerlendirilmiştir.

İki farklı güç noktasının ölçülmesi nedeniyle, algoritma yavaş bir oturma zamanına sahiptir. Bu durum TEG enerji üretim sistemi üzerindeki çevresel değişikliklere dayanan sıcaklık değişimlerinin değişmesi için uygun olan bir durumdur.

Ölçülen çalışma noktaları verilerinden, TEG karakteristik eğrileri, Bölüm 3'te belirtildiği gibi önerilen sıcaklık koşullarında doğru MGN'yi elde etmek için

oluşturulmuştur. Önceki adımlarda, karakteristik verilerden elde edilen MGN ile önerilen enerji üretim sisteminden elde edilen sonuç arasında bir tür karşılaştırma yapılmaktadır. Uygulanan enerji üretim sistemi donanımları düşük maliyetlidirler ve yüksek performanslı yönleri vardır. Öte yandan, Kalman filtresinin kullanılması sistemin çıkış gücünde görülen bozukluğun giderilmesidir. Bu da, PD-MGNİ algoritmasının başarılı bir izlemeyi garantilemesini sağlamıştır. Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 Enerji toplama sisteminden önerilen algoritmanın kullanımı ile elde edilen MGN'yi gösterir.

Tablo 5.1. Tek TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları

ΔT (°C)	Testteki MGN			Önerilen PD-MGNİ'deki MGN		
	V(v)	I(amp)	MGN(w)	$V_{MGN}(v)$	$I_{MGN}(amp)$	MGNİ(w)
80	1,15	0,58	0,667	1,14	0,56	0,6384
100	1,41	0,7	0,987	1,4	0,69	0,966
130	1,96	1,03	2,018	1,96	0,99	1,9404

Tablo 5.2. Üç adet Seri TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları

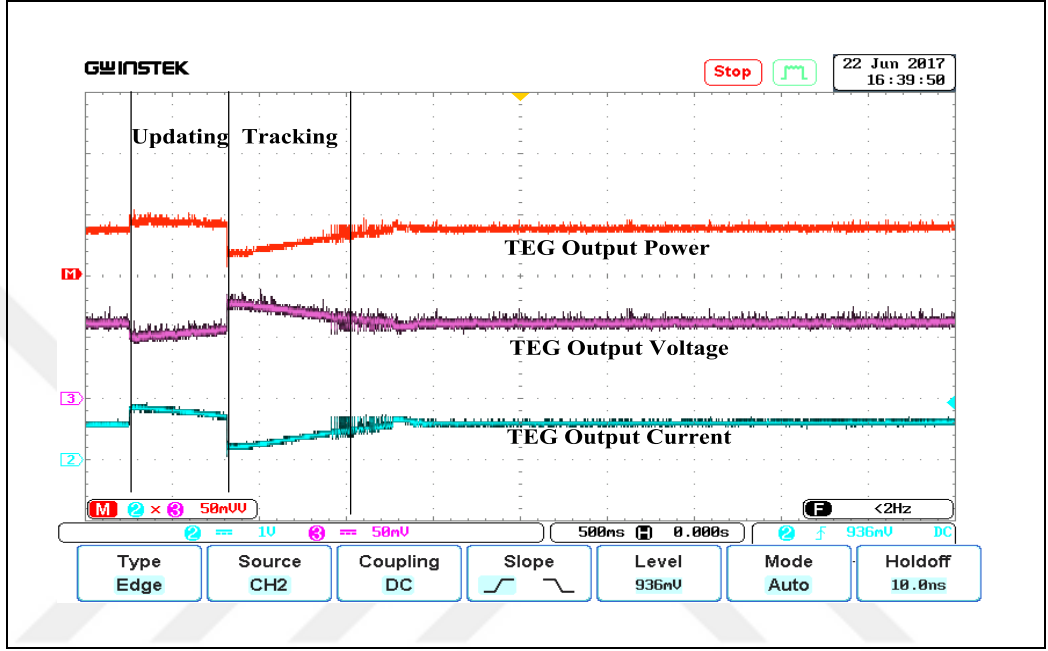
ΔT (°C)	Testteki MGN			Önerilen PD-MGNİ'deki MGN		
	V(v)	I(amp)	MGN(w)	$V_{MGN}(v)$	$I_{MGN}(amp)$	MGNİ(w)
80	3,45	0,58	2,001	3,4	0,57	1,938
100	3,99	0,7	2,793	3,87	0,703	2,72061
130	5,25	1,142	6	5,12	1,132	5,79584

Tablo 5.3. Üç adet Paralel TEG için PD-MGNİ Algoritmasının Sonuçları

ΔT (°C)	Testteki MGN			Önerilen PD-MGNİ'deki MGN		
	V(v)	I(amp)	MGN(w)	$V_{MGN}(v)$	$I_{MGN}(amp)$	MGNİ(w)
80	1,15	1,74	2,001	1,12	1,72	1,9264
100	1,33	2,1	2,793	1,3	2,1	2,73
130	1,75	3,428	5,999	1,9	3,06	5,814

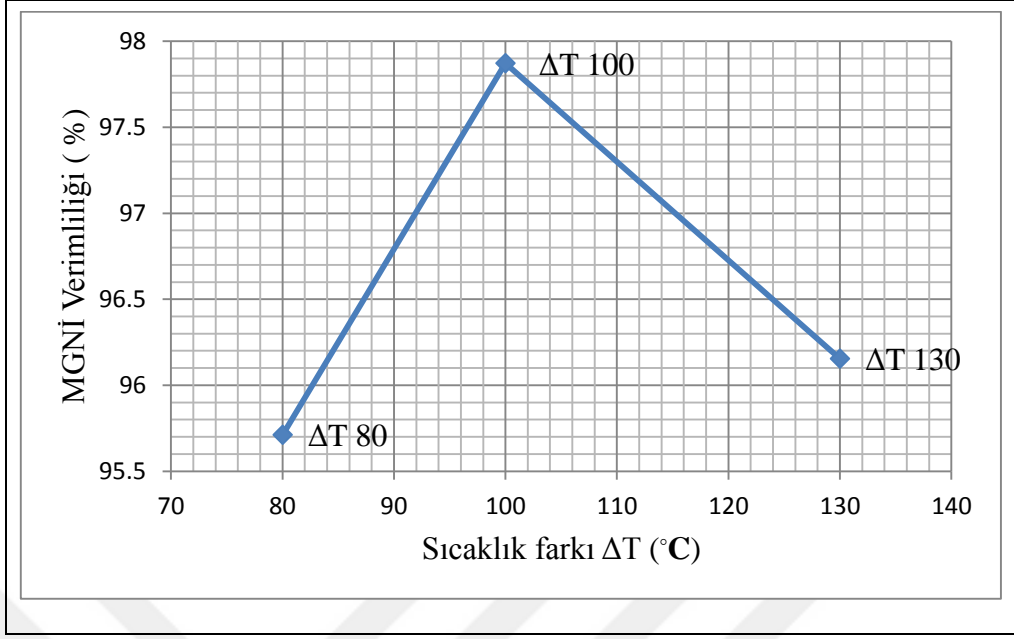
Şekil 5.16'da Algoritmanın, sistemin hareket etmesine bağlı olarak MGN'yi periyodik olarak güncellediği ve izlediği algoritmanın işlevsel çalışması sırasında TEG akımını, gerilimini ve çıkış gücünü gösterilmiştir.

PD-MGNİ algoritması hem ucuz hemde karmaşık değildir. Üstelik, kesme (snubber) devresi gibi herhangi bir ekstra devreye ihtiyaç duymamaktadır. Seçilen dönüştürücü, TEG dizisinde çok çeşitli sıcaklık farkları altında çalıştırılabilen bir yükseltici dönüştürücüdür. Ayrıca, sistem bozukluklarını azaltmak ve güç eğrisini tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılmıştır.

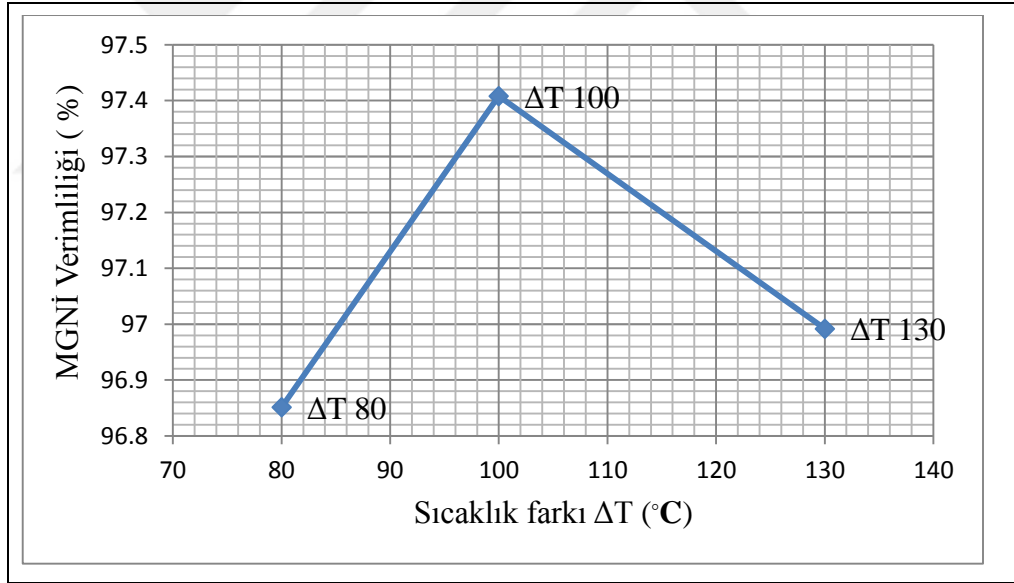


Şekil 5.16. PD-MGNİ algoritması için TEP1-142T300'ün deneysel çıkış gücü, akımı ve gerilimi

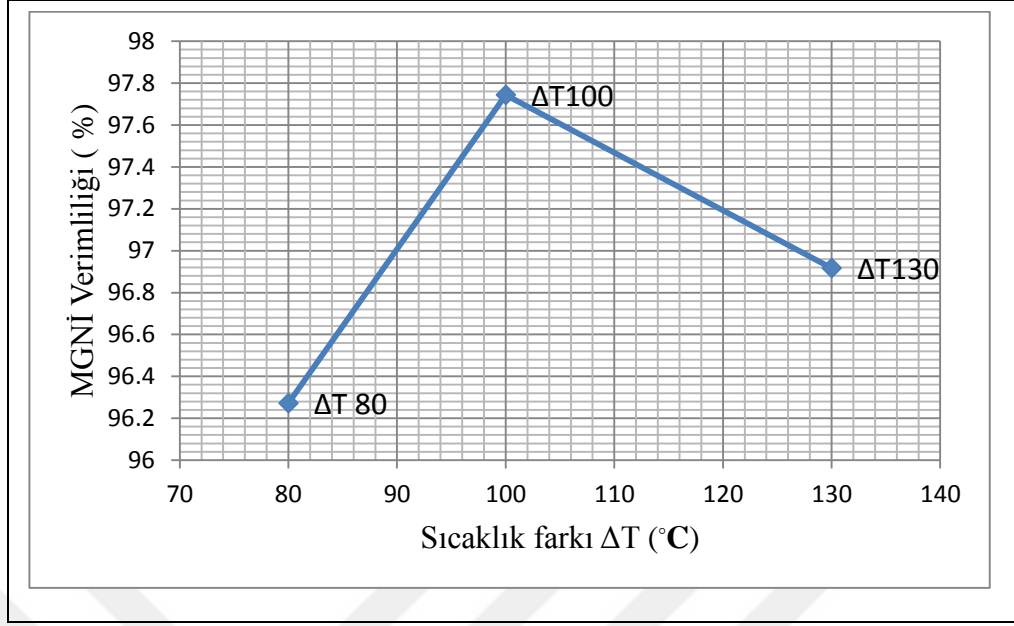
Sunulan MGNİ sistemi, kararlı ve geçici koşullar altında laboratuvarında test edilmiştir. PD-MGNİ algoritması verimlilik açısından; % 97,7' yi aşmaktadır. Şekil (5.17), (5.18) ve (5.19) algoritmanın verimliliğini 3 farklı konfigürasyon için göstermektedir. PD-MGNİ algoritması, çıkış gücünde birden fazla MGN bulunduğunda, FV / TEG-FV hibrid sistemindeki MGN'yi başarılı bir şekilde izleme yeteneğine sahiptir.



Şekil 5.17. Tek TEG için farklı ΔT altında PD-MGNI algoritmasının verimliliği



Şekil 5.18. 3 adet seri bağlı TEG için farklı ΔT altında PD-MGNI algoritmasının verimliliği



Şekil 5.19. 3 adet paralel bağlı TEG için farklı ΔT altında PD-MGNI algoritmasının verimliliği

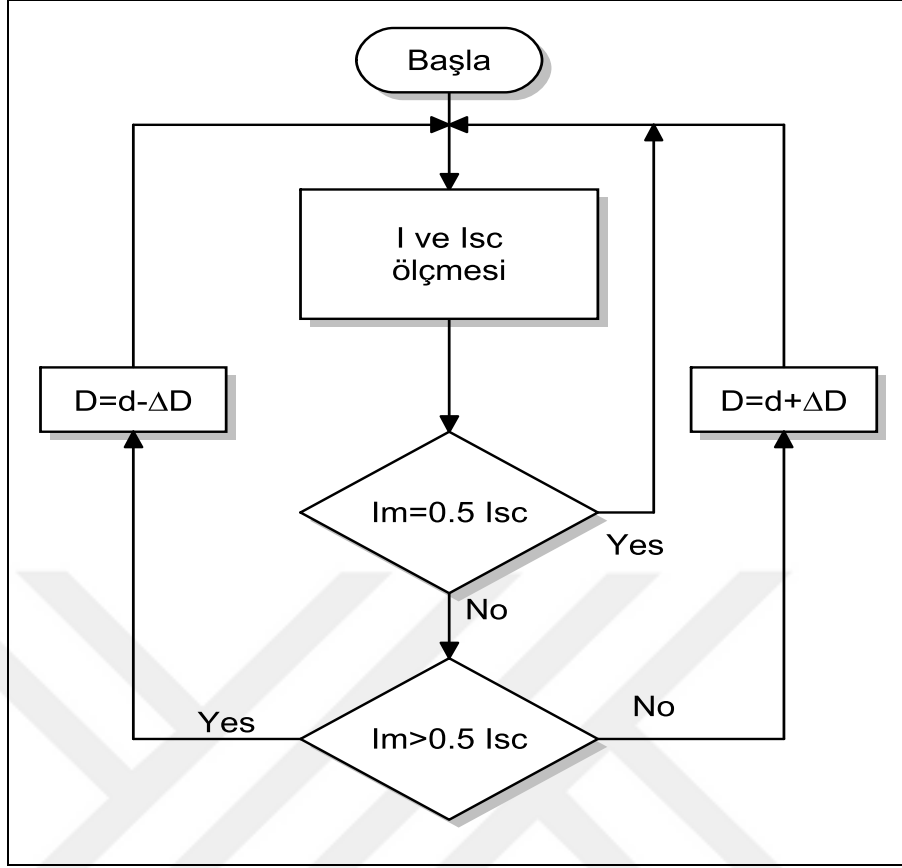
5.2.3. Kısa devre akım darbesi MGNI algoritması (SCP)

Kısadevre Akımlı Darbe (SCP) algoritmasının prensibi, maksimum akım (I_m) (maksimum güç noktasında ki akım) ve kısa devre akımı (I_{sc}) arasındaki doğal ilişkiye bağlıdır.

Bölüm 3'te belirtildiği gibi, bu algoritmanın temelini Denklem (5.5) oluşturmaktadır.

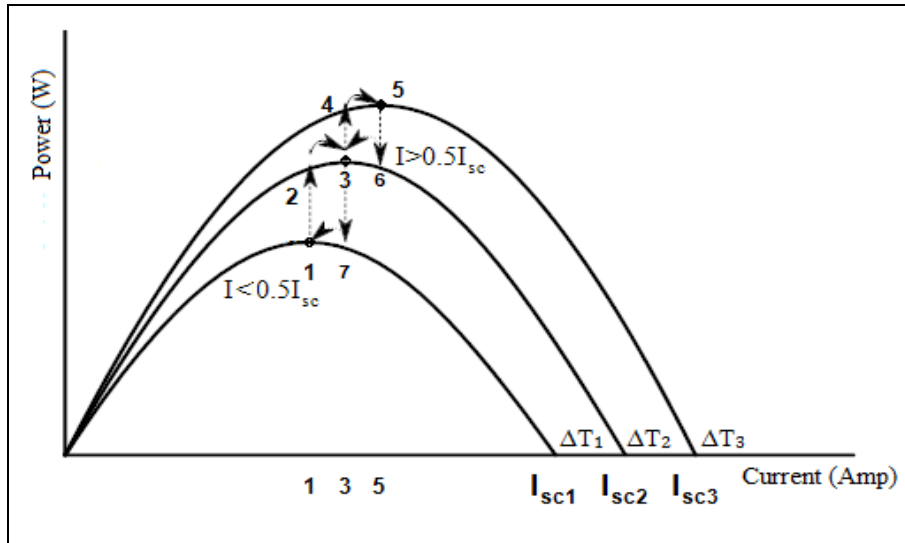
$$I_m = 0.5 I_{sc} \quad (5.5)$$

Şekil 5.20'de gösterildiği gibi Kısa devre Akımlı Darbeli algoritmada, hem akımı hem de kısa devre akımını ölçmekte ve karşılaştırmaktadır. Ölçülen akım kısa devre akımının yarısından daha büyük ise bu, TEG'nin optimum çalışma noktasının maksimum güç noktasının sol tarafında olacağı anlamına gelir. Öte yandan, akım kısa devre akımının yarısından daha küçükse, TEG'nin optimum çalışma noktası maksimum güç noktasının sağ tarafında olacaktır. Buna dayanarak, MGN konumu, optimum çalışma noktasına ulaşmak için verilen küçük bir adım hareketi ile teyit edilmiş ve takip edilmiştir. Bu işlem düzenli ve dinamik hallerde TEG'de MGN'yi yakalamak için periyodik olarak yapılmaktadır.



Şekil 5.20. SCP algoritmasının akış şeması

Yukarıdaki adımlar takip edilerek, Şekil 5.21'da konun prensibi gösterilmektedir. Buna göre; güç akımı eğrisindeki konum 1, ilk sıcaklık farkının (ΔT_1) başlangıç optimum güç noktasını gösterdiği varsayılır. Denklem (2.15) 'ya göre, çıkış gücü sıcaklık farkından (ΔT) etkilenir.



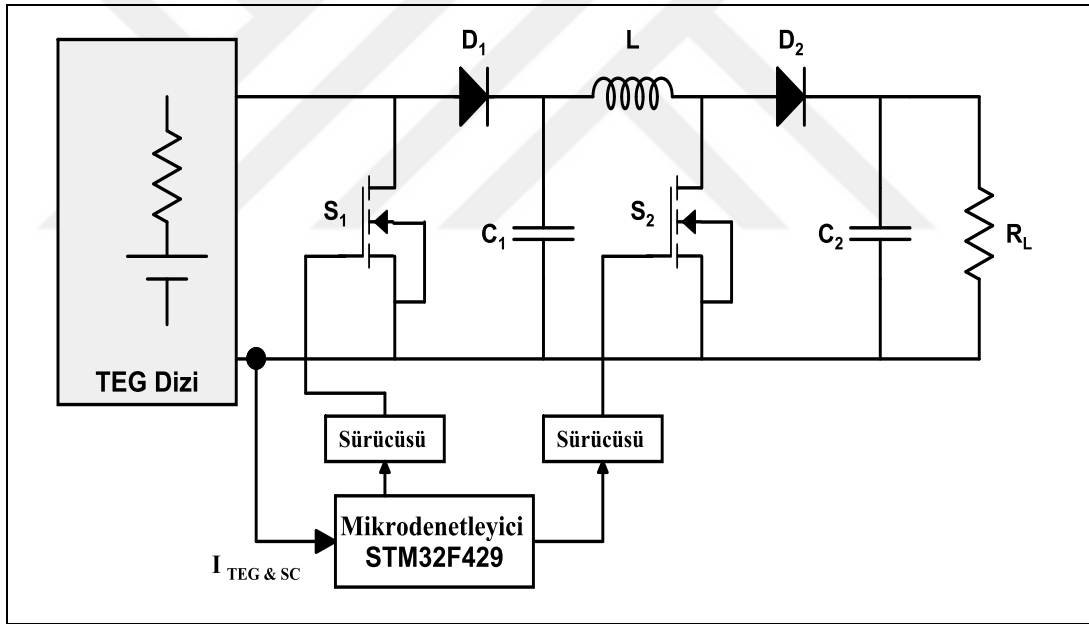
Şekil 5.21. Kısa devre akımlı darbe algoritmasının mekanizması

5.2.3.1. SCP Algoritması için MGNİ dönüştürücüsü

TEG modülünden üretilen enerji düşüktür. Çıkış gücünü en üst seviyeye çıkarmak için bazı adımlar takip edilebilir. Örneğin, n sayıda TEG modülü ile bir TEG-dizisi oluşturmak ve devre tasarımına göre giriş gerilimini artıran bir destek dönüştürücüsü kullanmak bunlardan biridir.

Bu çalışmada, MGNİ sisteminin konfigürasyonu, TEG dizisinden (Tek, seri, Paralel olarak bağlanan üç TEG modülü), Kısadevre Akım Darbesi devresinden ve dirençli bir yüke bağlı olarak önerilen MGNİ tarafından kontrol edilen yükseltici dönüştürücüden oluşan sistem, laboratuarda inşa edilmiştir.

Önerilen sistemin kısa devre akımını ölçmek için Şekil 5.22'da gösterildiği gibi Kısadevre Akım Darbeli (SCP) tekniği önerilmiş ve uygulanmıştır.



Şekil 5.22. Önerilen tekniğin gerekli bileşenleri için şematik diyagram

SCP devresi, MOSFET, Shockley Diode (SK0726) ve Kondansatör'den oluşmaktadır. MOSFET, TEG ve kondansatör ile paralel, Shockley Diode ile seri bağlanır. MOSFET, TEG (TLP350) ile türetilen terminalleri arasında periyodik olarak kısa devre yapmak için kullanılmaktadır. Diyot, geçiş süresinin açık olduğu süre boyunca S1 MOSFET üzerinden giriş kondansatörünün deşarj edilmesini önlemek için kullanılır. Kondansatör, sistemi zamanında devreye almak ve yük

üzerinde herhangi bir güç kaybı olmadığını garanti etmek için kullanılmaktadır. Kondansatörün gerilim değeri, açık devre gerilimi aralığında olmalıdır.

Yükseltici dönüştürücü de iletim zamanında, S_2 anahtarı iletimdedir ve D_2 diodundan akım geçmemektedir. Devre açık devre durumundayken TEG çıkışındaki güç ile D_2 diodu üzerinden giriş kondansatörü ve bobin şarj olur, C_2 çıkış kondansatörü daha önce depoladığı enerji ile yükü destekler. S_2 anahtarı kesimdeyken, D_2 diodundan akım geçerken anahtardan geçemez. Bir önceki periyotta TEG tarafından üretilen enerji ile şarj olan bobin, enerjisini yüke aktarır.

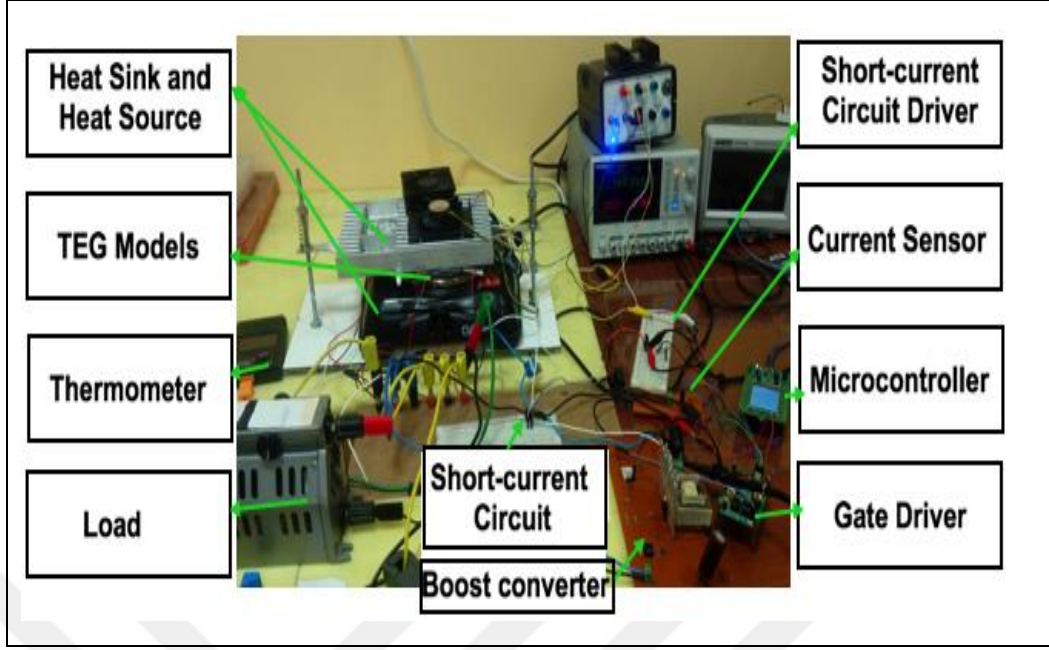
Şekil 3.6, sürekli iletim modunda (SİM) kapı sinyali ile endüktans akımını ve kapasitör gerilimini göstermektedir. Bahsedilen adımlar dikkate alındığında, çıkış geriliminin giriş geriliminden daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

5.2.3.2. SCP için enerji üretim prototipi

Farklı konfigürasyonlarda 44x44mm ticari TEG modülünün optimum maksimum gücünü izlemek için MGNİ algoritmasına kısıdevre akımı tekniğini uygulamak için Şekil 5.23' te gösterilen sistemi kurulmuştur.

Önerilen üretim sisteminin donanımı, düşük maliyetli ancak yüksek performanslı elemanlardan oluşmaktadır. Yüksek hassasiyetli INA250 algılayıcısı akımı algılamak için kullanılmaktadır. ARM® Cortex®-M4 çekirdekli STM32f429 kiti, sistemin uygun bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol ederken, uygulanan algoritmanın doğrulanması için avantaj sağlayan bir ekran ile donatılmıştır.

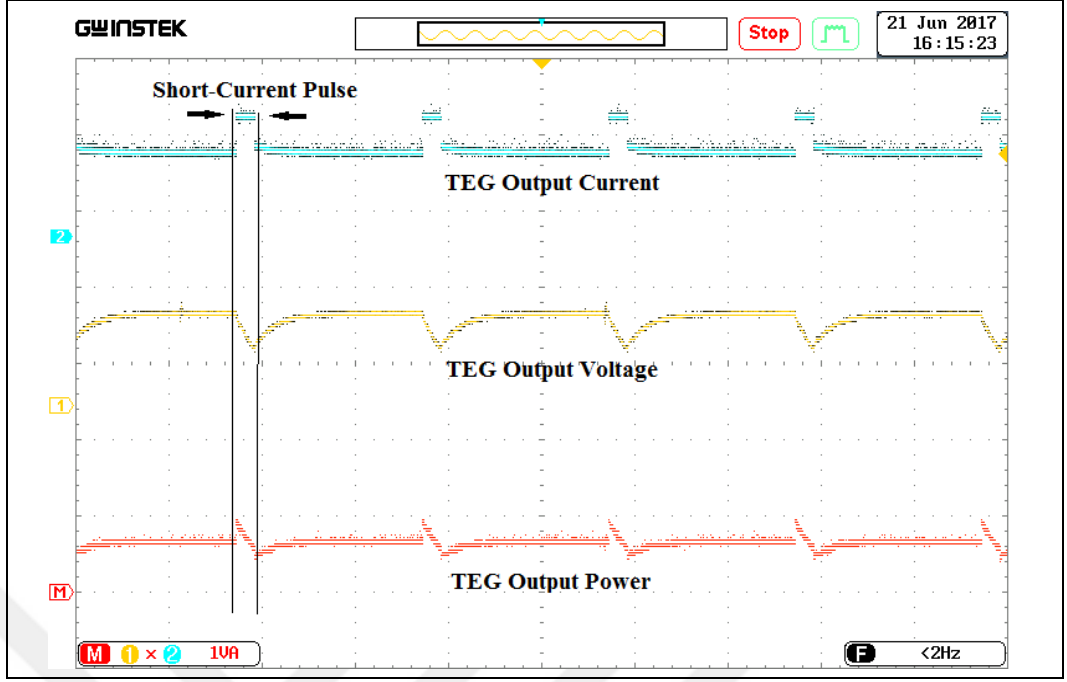
Ayrıca ölçülen kısa devre akımı, TEG çıkış akımı, tarama adımları ve MGN'deki destek dönüştürücünün çalışma görev döngüsü gibi parametreleri ekranda gösterme imkanına da sahiptir. Bu deneyde, seçilen MOSFET'in tetikleme gerilimini (mikro denetleyicinin çıkış gerilimi kapasitesini) eşleştirmek için, SCP'nin ve dönüştürücü devresinin MOSFET'lerini tahrik etmek için iki kapı sürücü devresi kurulmuştur. Önerilen prototip uygulaması Şekil 5.23'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. SCP algoritması için deneysel sistem ve bileşenleri

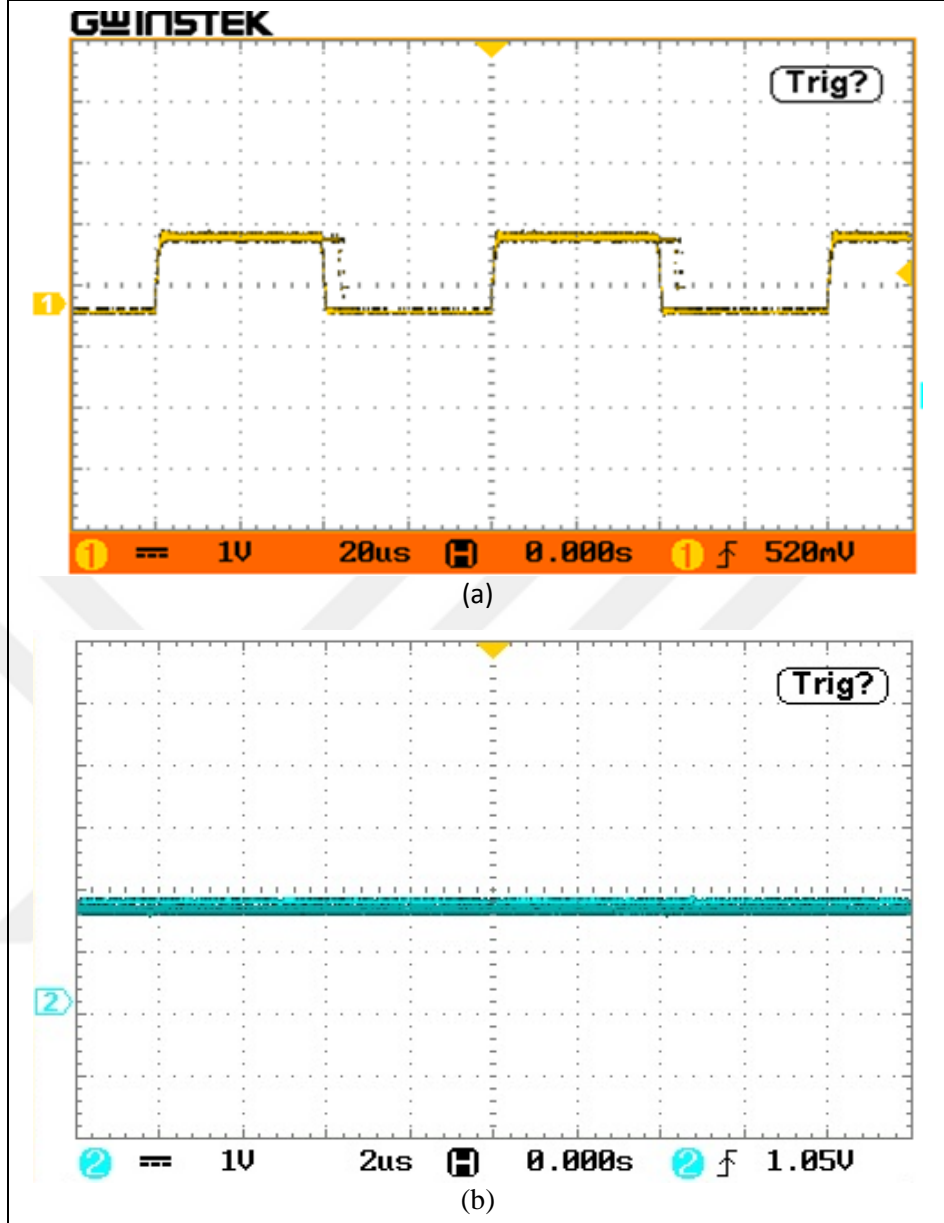
Önerilen algoritmanın kapasitesi, maksimum enerjiyi üretmek ve iki çalışma koşulu altında test gerçekleştirilmiştir. Birincisi, üç farklı sıcaklık farkı için kararlı durum çalışma koşulu $\Delta T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_3 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ dir. İkincisi ise ΔT eğer $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $130 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında ise geçici çalışma koşuludur. Ayrıca, yükseltici dönüştürücü, geçici durum aralığına göre maksimum güç noktasını karşılamak için sürekli iletim modunda tasarlanmıştır. Geçici durum için, görev döngüsünün büyüklüğü, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de $V_{oc} = 7,79 \text{ V}$ ve $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de $V_{oc} = 11,81 \text{ V}$ arasındaki açık devre gerilimine bağlı olarak hesaplanmıştır. Çünkü TEG'in çıkış gerilimi Denklem (5.5) ve çıkarılan karakteristiğe göre V_{oc} geriliminin yarısına eşittir.

SCP algoritması yüksek izleme performansına sahiptir ve ortalama izleme verimliliği % 100'e yakındır. Burada, maksimum çalışma noktasını ayarlamak için kısa devre akımı saniyede üç kez ölçülmektedir ve bir maksimum güç takibi algoritması tarafından üretilen darbe yoluyla dönüştürücü kontrol edilmektedir. Dahası, STM32f429'da uygulanan koddaki örnekleme değerini değiştirerek, saniyede örneklenen kısa devre akım sinyallerinin sayısını artırma ve azaltma yeteneği vardır. Bu çalışma durumu için deneysel sonuçlar Şekil 5.24' te verilmiştir.



Şekil 5.24. STM32F429 mikrodnetleyici ile TEG TEP1-142T300'ün çıkış gücü, akımı ve gerilimi

Yüksek verimli toplama ve üretim sistemleri oluşturmak için farklı sıcaklık farkları altında TEG dizilerinden maksimum gücü elde etmek gerekir. Şekil 5.25 kararlı durumda MGNİ dönüştürücünün çıkış gerilimini yükü ayırmaya gerek kalmadan göstermektedir.



Şekil 5.25. MGNI dönüştürücüsü çıkışı (a) Kapı sürücüsü darbe gerilimi
(b) Dönüştürücüsün çıkışı gırilimi

Bölüm 3'te belirtildiği gibi, TEG modülüne üç farklı ΔT değeri uygulanmış ve üç farklı çalışma noktasında gösterilmiştir. Tablo 5.4, 5.5 ve 5.6'da kararlı durum koşullarının sonuçlarını verilmiştir. PMGNI sütunu, üç farklı ΔT değeri altında TEG'den çekilen maksimum gücü ve önerilen algoritmanın izleme doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 5.4. SCP Algoritmasının Tek TEG için Sonuçları

$\Delta T(^{\circ}C)$	V(v)	MGN(w)	$V_{MGNI}(v)$	$P_{MGNI}(w)$
80	1,15	0,667	1,13	0,664
100	1,41	0,987	1,41	0,986
130	1,96	2,0188	1,96	2,011

Tablo 5.5. SCP Algoritmasının 3 adet seri bağlı TEG için Sonuçları

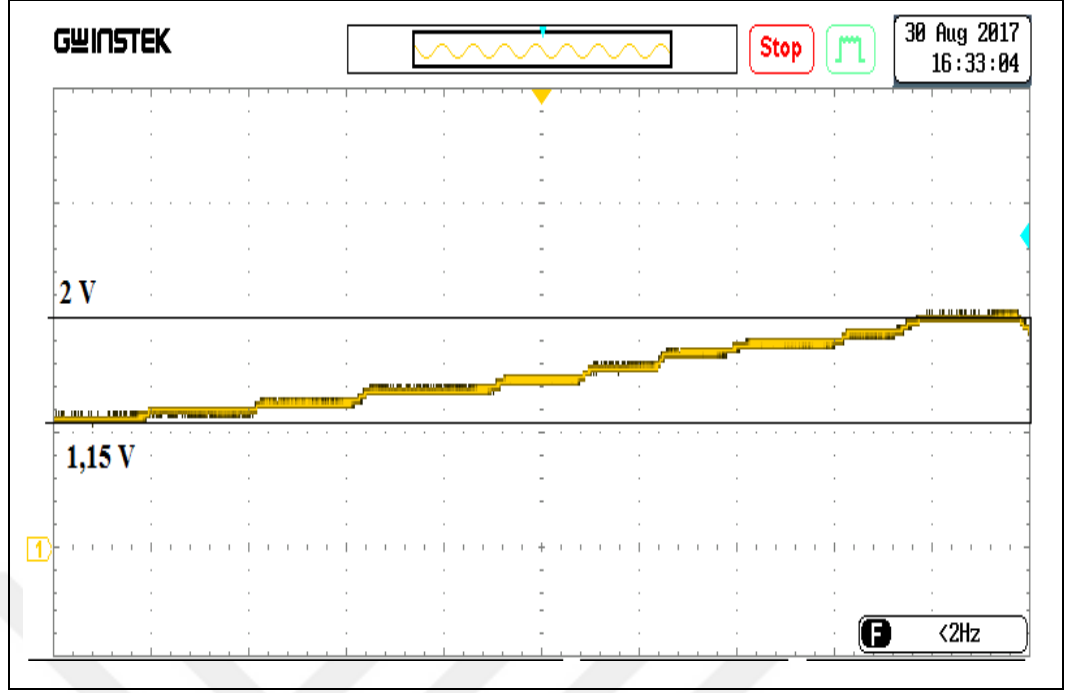
$\Delta T(^{\circ}C)$	Vser	Pser	$V_{MGNI}(v)$	$P_{MGNI}(w)$
80	3,45	2,001	3,43	1,992
100	3,99	2,793	3,97	2,79
130	5,25	6	5,25	5,98

Tablo 5.6. SCP Algoritmasının 3 adet paralel bağlı TEG için Sonuçları

$\Delta T(^{\circ}C)$	I_{PAR}	P_{PAR}	$I_{MGNI}(A)$	$P_{MGNI}(w)$
80	1,74	2,001	1,68	1,993
100	2,1	2,793	2	2,79
130	3,428	6	3,42	5,98

Geçici durumda çalışma sırasında, TEG'deki sıcaklık farklılıkları sürekli olarak değişmektedir ve bu da cihazın özelliklerini etkilemektedir.

Bu çalışmada, algoritma 80 °C'den 130 °C'ye kadar termal geçici koşullar altında test edilmiştir ve yükseltici dönüştürücünün doluluk boşluk oranı saniyede üç kez uygun değere getirilerek sistemin çalışma noktası ayarlanmaktadır. Şekil 5.26'da. geçici durumda gerilimin 1,15V'den 2V'ye kadar değiştiği görülmektedir. Deneyin sonuçlarına göre, maksimum güç noktasının başarıyla takip edildiği görülmüştür.

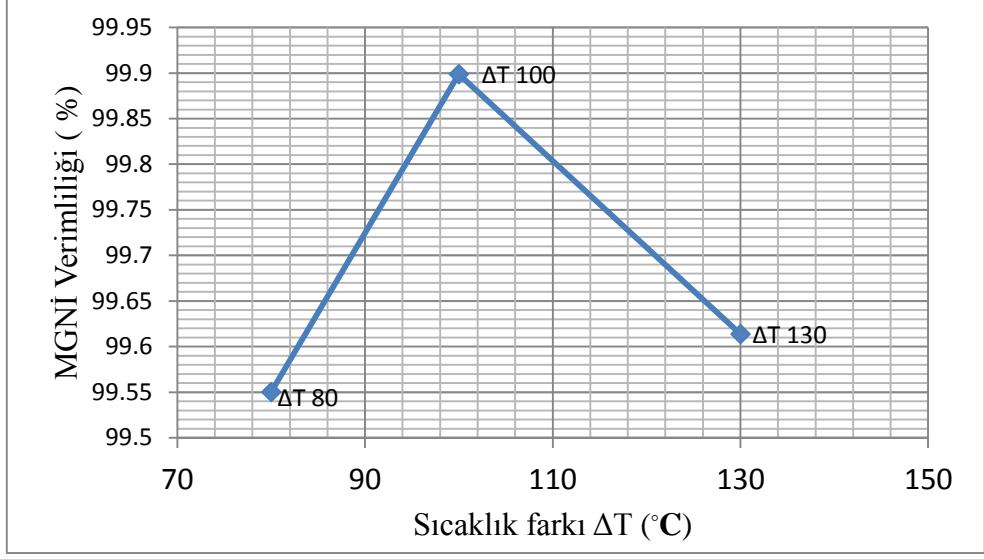


Şekil 5.26. ΔT 'nin Değişimi nedeniyle (80 °C'den 130°C'ye) SCP MGNI algoritmasının geçici durum altında (1,15 den 2V) cevabı

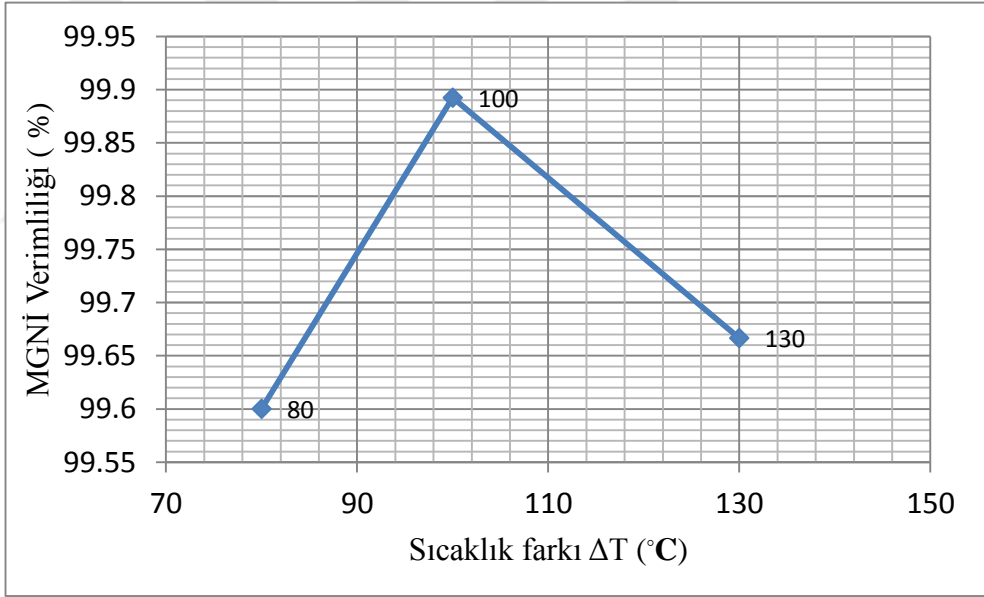
TEG'in optimum noktada ölçülen çıkış gücüne (P_{TEG_MGN}) ve çeşitli sıcaklık farkları altında SCP MGNI algoritmasının (P_{TEG_MGNI}) kullanımıyla ölçülen güce bağlı olarak verimlilik % 99.89'a ulaşmıştır.

Şekil 5.27, 5.28 ve 5.29. de Denklem (5.7) ye göre algoritmanın üç ayrı konfigürasyon için verimlilik eğrileri gösterilmiştir:

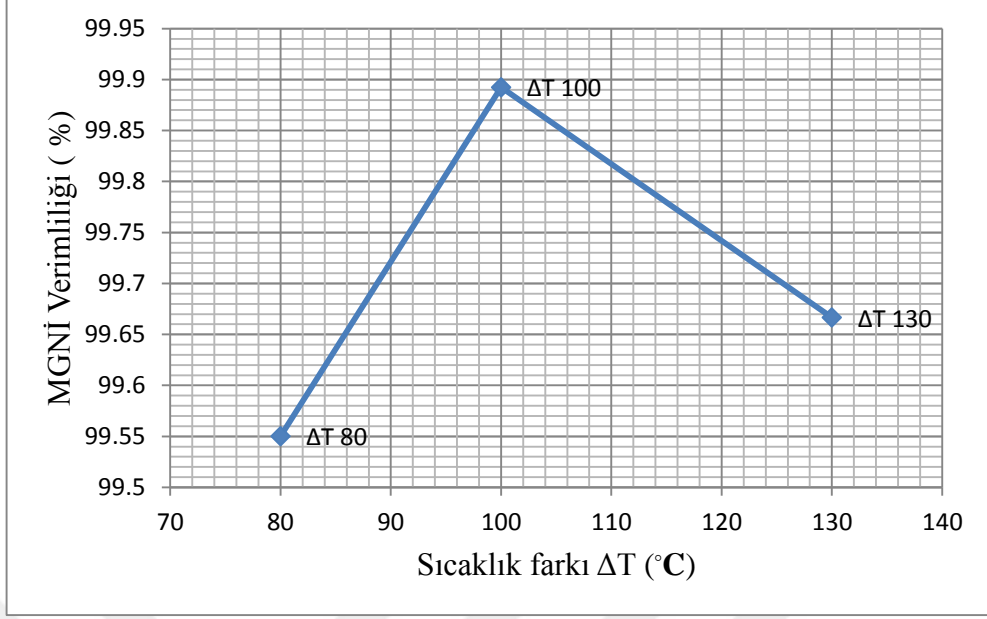
$$\eta_{MGNI} = \frac{P_{TEG_MGNI}}{P_{TEG_MGN}} \times 100 \quad (5.7)$$



Şekil 5.27. Tek TEG için farklı ΔT altında SCP MGNI algoritmasının verimliliği



Şekil 5.28. 3 adet Paralel bağlı TEG için farklı ΔT altında SCP MGNI algoritmasının verimliliği



Şekil 5.29. 3 adet seri bağlı TEG için farklı ΔT altında SCP MGNI algoritmasının verimliliği

5.3. TEG'ler için Geçmişte Önerilen MGNI Yöntemleriyle Karşılaştırma

Bu tezde, hem düşük hem de yüksek enerjili enerji hasadı uygulamalarında uygulanmaya uygun olan TEG'ler için MPPT algoritmaları sunulmuştur.

Önerilen teknikler, TEG güç kaynağının güç-gerilim eğrisinin MPP'lerine yakın konumlandırılmış olarak önceden programlanmış olan çalışma noktalarında çalışan bir yükseltici konvertörün kontrol edilmesine dayanmaktadır.

TEG'ler için geçmişte önerilen MPPT yöntemlerinin aksine, önerilen MPPTs kontrol sisteminin tasarımı STM32F429'un kullanımı ile sadece birkaç unsura dayanmaktadır. Bu tezde sunulan kontrol teknikleri, uygulama açısından daha basittir, çünkü yüksek geliştirme maliyetleri ile karakterize edilen güç tüketen ek devre elemanlarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Önerilen teknik, FSCC, FOCV, ECS, P&O ve InC yöntemleriyle karşılaştırılabilir derecede bir izleme doğruluğu sağlar.

TEG kaynakları için önceki çalışmalarda önerilen MGNI teknikleri ve bu tezde önerilen teknikleri uygulamak için gereken kontrol devresi elemanları Tablo 5.7 ile verilmiştir.

Tablo 5.7. MGNİ yöntemleriyle karşılaştırması

MGNİ teknikleri	Tekniklerin gereklilikleri	Verimlilik	Referanslar
Based Voc	Aşırı gerilim sınırlaması, iki adet gerilim algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici	99.85%	[52]
INC	Akım ve gerilim algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici.	95%	[75]
P&O	Akım ve gerilim algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici.	95%-99%	[71],[76]
FSCC	İki adet sıcaklık algılayıcı, Akım algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici, yüksüz durumda kısa devre oluşturmak için ek anahtar	-	[55]
FOCV	İki adet sıcaklık algılayıcı, Gerilim algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici, yüksüz durumda kısa devre oluşturmak için ek anahtar	-	[22]
ECS	Akım ve gerilim algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici.	98.15%-99.56%	[71]
Proposed PD-MGNİ	Akım ve gerilim algılayıcı, mikroişlemci (kalman filter), PWM üretici	97,74%	
Proposed SCP	Akım algılayıcı, mikroişlemci, PWM üretici, kısa devre oluşturmak için ek anahtar.	99.89%	
Proposed Modified P&O	Akım ve gerilim algılayıcı, mikroişlemci (kalman filter), PWM üretici.	97,4%-98%	

5.4. TEG Uygulama Analizi

TEG'ler, multidisipliner uygulamalar için birkaç watt güç sağlayan iyi enerji dönüştürücü cihazlardır. Ayrıca, TEG'ler atık ısıdan faydalandığı sürece TEG'in düşük verimi bir engel değildir. Ek olarak, iyi tasarlanmış enerji üretim ve toplama

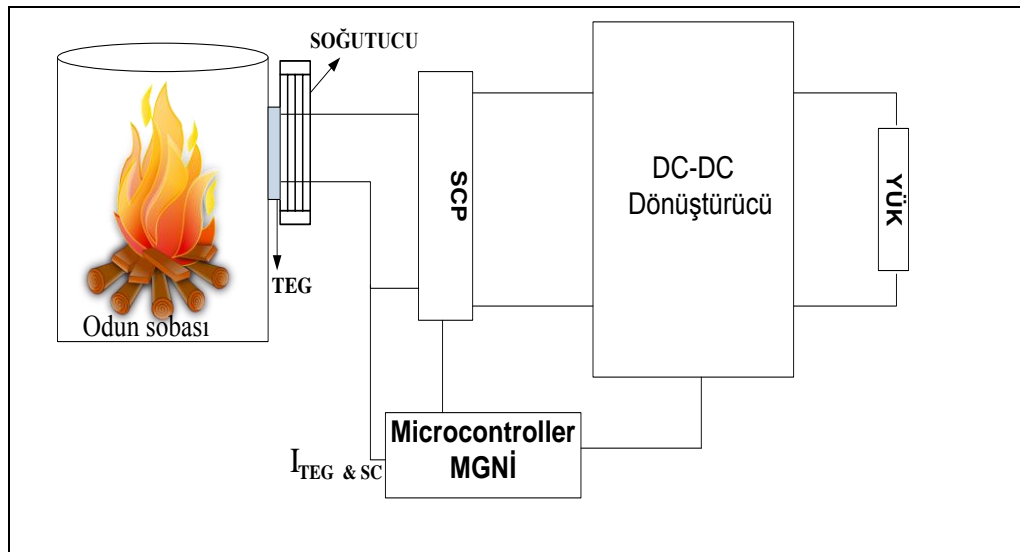
uygulamaları, TEG'in düşük verimliliğine rağmen hayatta önemli bir rol oynayabilir ve ekonomik avantajı olan, doğal kaynakları koruyan yüksek performanslı uygulamalar sağlayabilmektedir.

Atık ısı enerjisinin geri kazanılmasında kullanılan en popüler uygulamalardan biri "odun sobası" olarak adlandırılmaktadır. Elektriksel olarak, TEG uygulamalarının verimliliği, çıkış enerjisinin maliyetini azaltan maksimum gücü elde etmek için MGNI algoritmasının doğrudan uygulanmasıyla etkin bir şekilde artırılabilir. Şekil 5.30, basit ve düşük maliyetli özelliklere sahip TEG uygulamaları için güvenilir bir tasarımı gösterilmiştir.

Ayrıca, amaçlanan tasarımı elde etmek için uygulanması gereken belirli hesaplamalar vardır. Bir referans olarak bu hesaplamalar, Denklem (5.8) 'de gösterildiği gibi giriş termal enerji oranını (Q_H) analiz etmek ve soğuk taraf ısı uzaklaştırma oranını (Q_C) analiz etmek için (5.9) Denklemden faydalanılabilir:

$$Q_H = \frac{\Delta T}{Q_m} + \alpha T_H I_{TEG} - \frac{1}{2} R_{int} I_{TEG}^2 \quad (5.8)$$

$$Q_C = \frac{\Delta T}{Q_m} + \alpha T_C I_{TEG} + \frac{1}{2} R_{int} I_{TEG}^2 \quad (5.9)$$



Şekil 5.30. için TEG uygulama şeması

Ölçülen sıcaklık farkına göre, TEG akımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$I_{TEG} = \frac{\alpha (T_H - T_C)}{R_{int} + R_L} \quad (5.10)$$

Maksimum güçteki gerilim şu şekilde hesaplanır:

$$V_{TEG} = \frac{n\alpha (T_H - T_C)}{R_{int} + R_L} \quad (5.11)$$

n, TEG modülündeki termokuplların sayısıdır.

Uzak ve elektrik erişimi olmayan bölgelere ilişkin olarak, odun sobası yaklaşık 10 kg odun tüketerek yaklaşık 35 kWh civarında bir enerji açığa çıkarılabilir . Eğer TEG'in dönüşüm verimliliği % 2 olarak varsayılırsa, TEG tarafından geri kazanılan enerji 10W civarında olabilir. Bu kazanç, telefon, led ışıklar ve radyo gibi düşük güç tüketen cihazları beslemek için yeterlidir. TEG'in maksimum çıkış gücünü (P_{max}) elde etmek için, iç direnç, yük direncine, yani $R_{int} = R_L$ 'ye eşit olmalıdır.

$$P_{max} = I_{TEG} \times V_{TEG} \quad (5.12)$$

Yük için gerekli güce bağlı olarak, dönüştürücü tipi seçilip, yük ve TEG arasında MGNİ uygunlamalıdır. Bu uygulama, günlük hayatta bu teknoloji, daha ekonomik bir yaklaşımla tüketicinin hayatını kolaylaştırmasına yardımcı olur.

5.5. Ekonomik Analizi

Modern teknoloji, atık ısıyı elektrik enerjisine çevirme yeteneği olan ve düşük maliyetli yüksek verimli cihazlara ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç, düşük maliyetli malzemeler ve TEG cihazı için iyi otomatik mekanizmalar üretilerek karşılanabilir. Ek olarak, termoelektrik generatör cihazlarının watt başına maliyeti, kurulu herhangi bir sistem için 1 \$ / W olması hedeflenmiştir. Bu amaca ulaşılabilmesi için, 1 / (\$ / K) 'lık bir ısı eşanjörü maliyeti elde etmek büyük ölçüde gereklidir. Tablo 5.8 önerilen üretim sistemi için watt başına değişken işletme maliyetini (C_{TEG}) göstermektedir ve Denklem (5.13) 'de verilen şekilde hesaplanmaktadır.

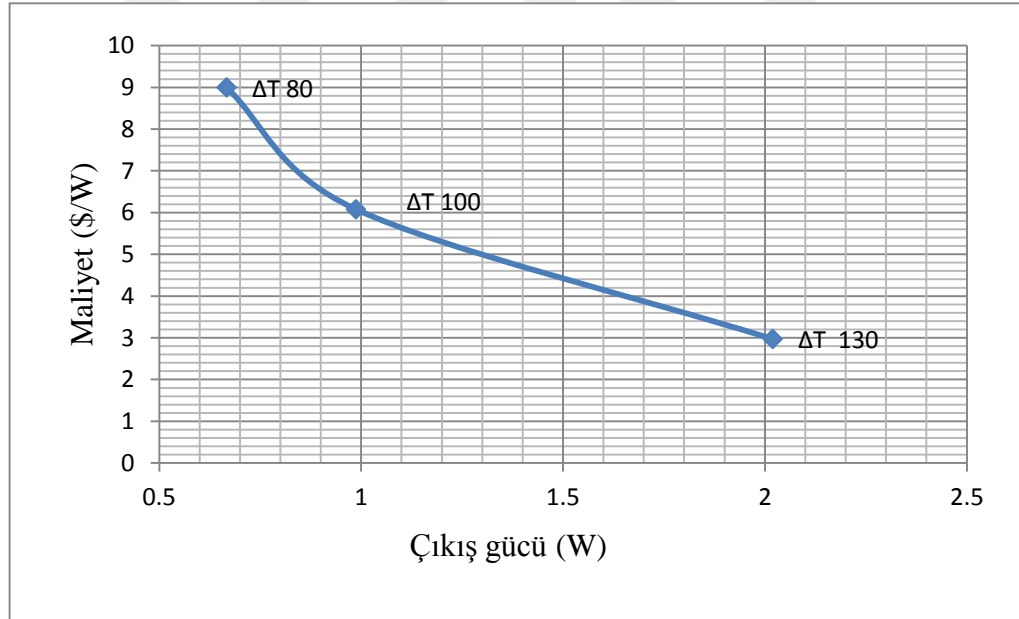
(5.13)

$$C_{TEG}(\$/W) = \frac{\text{The Cost of Used TEG Units}}{P_{TEG_MPPT}}$$

Tablo 5.8 Farklı ΔT değerinde değişken enerji maliyeti

ΔT (C)	Q_H (W)	P_{MGNI} (W)	η_{TEG} (%)	C_{TEG} (\$/W)
80	58,76752	0,664	1,129876	9,036145
100	73,30646	0,986	1,345038	6,085193
130	96,09727	2,011	2,092671	2,98359

Şekil 5.31'de enerji maliyetini ve üretilen çıkış gücünü göstermektedir. Çalışma sıcaklığının doğru seçilmesinin düşük bir maliyeti sağlamanın yanında bu sıcaklıkta maksimum enerjinin de üretilmesi gereklidir.



Şekil 5.31. Watt başına değişken enerji maliyeti

Birkaç yıl önce, TEG'ler sadece uzay ve sabit erişim bölgeleri gibi alanlarda kullanılmakta iken artık kullanımı ticari olarak ta yaygınlaşmaya başlamıştır.

Günümüzde TEG'ler tıbbi cihazlar gibi uygulamalarda da uygulanmaya başlamıştır. Diğer yandan, bu alanda yapılan bilimsel araştırmaların çoğu, termoelektrik malzemenin endüstride uygulanmasının mümkün olabileceğini ifade etmiştir.

Fotovoltaik hücrelere kıyasla TEG'den üretilen güç maliyet açısından, fotovoltaik hücrede üretilen gücün yaklaşık % 73'üne denk gelmektedir. Buna karşılık, TEG'in boyut ve ağırlık avantajları açıkça belirtilmiştir [79].

Ayrıca, TEG farklı koşullar altında çok esnek bir şekilde uygulanabilir. Bunun tersine, fotovoltaik hücrelerin kullanımı çevre koşullarına çok duyarlıdır.

Malzemelerin (figure-of-merit)'inin ortalama olarak 2'ye ulaşması beklenmektedir ve bu artış enerji üretim verimliliğine olumlu yansıyacaktır. Ayrıca, TEG ürününün geliştirilmesi ve endüstriyel canlılık için düşünülmesi gereken bir diğer önemli husus, ürün ve potansiyel ticari pazarlar arasındaki uygun uyumu belirlemektir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez, termoelektrik generatörler kullanılarak ısı gücünden elektrik üretimi ile ilgili mevcut bilgilere, termal generatör performansının (TEG) test ve analizinden elde edilen yeni fikirler ve sonuç aralığı ile ilgili mevcut bilgilere katkıda bulunmaktadır.

Bölüm 2, Literatür çalışmalarını içermektedir. Ayrıca TEG cihazları aracılığıyla atık ısı geri kazanımının, bu uygulamaların verimliliğini arttırmak için depolanabilen veya kullanılabilen farklı endüstriyel uygulamalarda atık ısının elektriğe dönüştürülmesinin olası bir yolu olarak kabul edildiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, TEG konvansiyonel enerji toplama sistemi, onu verimsiz kılan önemli dezavantajlara sahiptir. Bu tezde, enerji toplama sisteminin dönüşüm verimliliğini artıracak büyük ölçekli ve küçük ölçekli uygulamalar için DC-DC dönüştürücü ve geliştirilmiş MGNİ çözümleri ile birlikte yenilikçi bir TEG sistemi topolojisi önerilmiştir.

Geniş bir sıcaklık aralığı için TEG cihazlarının doğru ve tekrarlanabilir karakterizasyonlarını çıkaran bir karakteristik test düzeneği tasarlanmıştır. Ayrıca, TEG cihazlarından üretilen enerjiyi maksimize etmek için üç farklı konfigürasyon yaklaşımı yapılmıştır. Empedans eşleştirme konusunu kararlı durumda ele almanın en iyi yolunun seri bağlı TEG ve paralelleştirilmiş TEG modüllerini birleştiren bir sistem topolojisi geliştirmek olduğu kararlaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımlar, dinamik empedans eşleştirme konusunu ele almak için de karakterize edilmiştir.

Karakteristik testin sıcaklık farkı ve sıkma kuvveti kontrolü ile üç TEG cihazını eşzamanlı olarak test etme yeteneği sayesinde, test, sıcaklık farkının TEG dizileri tarafından üretilen güce olan etkilerini araştırmak için de kullanılmıştır. Seri ve paralel şekilde elektriksel olarak bağlanan TEG dizileri için elde edilen elektriksel karakteristikler, seri olarak bağlanan termoelektrik generatörlerin daha yüksek bir gerilim ve daha düşük akım ürettiğini, paralel bağlı dizinin daha düşük gerilim ve daha yüksek bir akıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu da, seri bağlı sistemin daha

verimli olduğunu göstermektedir. Paralel bağlı dizi, kablolama ve MGNİ dönüştürücüde daha yüksek I²R kayıplarına yol açmaktadır.

İstenen sıcaklık farklarını korumak için termal giriş gücü değiştirilerek deney sonuçları sabit sıcaklık farkları altında elde edilmiştir.

Literatürde yayınlanan, TEG'ler için en yaygın kullanılan MGNİ algoritmalarının analitik bir analizi sunulmuş ve bu algoritmaların belirtilen dezavantajlarına dayanarak, güce dayanan kısa devre akımını ölçmek için yeni MGNİ algoritması (SCP) (küçük ölçekli uygulamalar için) önerilmiştir. Büyük ölçekli uygulamalar için ise diferansiyel algoritması PD-MGNİ önerilmiştir. Ayrıca, TEG'in sabit olmayan çıkış değerlerinin etkisini azaltmak için modifiye edilmiş bir P & O algoritması önerilmiştir. Tüm bu algoritmalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

P & O algoritması Kalman filtresi kullanılarak yeniden ayarlanan güç özelliklerine göre uygulanmıştır. Kalman filtresi, MGNİ algoritmasının uygulanmasının önünü açan değişken karakteristiğinin tesirini azaltabilmiştir. Bu da, özellikle gürültülü koşullarda bile P & O'nun MGNİ'yi yakalayabildiği gösterilmiştir. Sonuçlar, Kalman filtresi üzerinde P & O algoritmasının temel performansında görülebilir bir iyileşme olduğunu kanıtlamıştır. Enerji toplama sistemi, farklı sıcaklık farkları altında test edilmiş ve geleneksel P & O algoritması ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen tekniğin özellikle ısı dağılım probleminin ortaya çıktığı büyük ölçekli uygulamalar için verimli olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, büyük ölçekli sistemlerde maksimum çalışma gücü elde etmek için yeni bir PD-MGNİ algoritması önerilmiştir. Uygulama açısından bakılırsa, önerilen algoritmanın ucuz ve basit bir yapıdadır. Dahası önerilen yöntem, aşırı gerilim sınırlama devresi gibi herhangi bir ekstra devreye ihtiyaç duymamaktadır. Önerilen MGNİ sistemi, kararlı durum koşullarında laboratuarda test edilmiştir; PD-MGNİ algoritmasıyla verim açısından %97,7 aşılmıştır. PD-MGNİ algoritması, çıkış gücünün özelliklerinde birden fazla MGNİ bulunduğunda, FV / TEG-FV hibrid sistemindeki MGNİ'yi başarılı bir şekilde izleme yeteneğine sahiptir.

Ayrıca, bu tezde küçük ölçekli TEG enerji toplama sistemi için yüksek performanslı bir SCP MGNİ algoritması da uygulanmıştır. Önerilen algoritma kısa devre akımını

ölçmek için yeni bir darbe tekniği kullanmaktadır. SCP MGNİ algoritması. yük ve TEG dizisi arasında ne bağlantı kesilmesini gerektirmektedir ne de ölçümler için tahmin yapılması gerektirmektedir. SCP algoritması periyodik bir şekilde kısa devre akımının ölçümüne bağlı olarak çalıştığı ve üretilen doluluk boşluk oranına göre MGN'yi doğru bir şekilde sağladığından, bu algorithmada farklı sıcaklık farkları altında işlem noktasını doğrulamak için basit ve düşük maliyetli bir prototip kullanılmaktadır. Ayrıca, algoritma kararlı durum ve dinamik koşullar altında, tekli akım sensörü ve kullanıcının ekran sayesinde ölçümleri gözlemlemesini sağlayan STM32F429 mikro denetleyicinin kullanımı gibi bazı avantajlarla uygulanmaktadır. Önerilen prototip deneysel olarak gerçekleştirilmiş olup hedeflenen performansı sunmuştur.

Geçmişte önerilen MGNİ yöntemleriyle karşılaştırıldığında, bu tezde sunulan teknikler daha operasyonel, verimli ve tasarım kolaylığı sunma avantajına sahiptir. Bu özellikler, MGNİ'yi uygulamak için özel sinyal işleme ve kontrol ünitelerinin kullanılmasına ihtiyaç bırakmamaktadır.

Gelecek ve geliştirilmiş çalışmalar açısından, dizide farklı tiplerde TEG kullanımı ve sıcaklık uyumsuzluğunun etkisini analiz etmek, verimli bir sistem tasarlama konusunu kolaylaştırabilir, bu kullanım bu tezde belirtilmemiştir, PD-MGNİ algoritması farklı tipte TEG'ler için de kullanılabilir. Bunun gibi çıkarımlar gelecekteki araştırmalarda ele alınmalıdır.

Hibrit üretim sistemi için PD-MGNİ algoritmasının gelecekte bir MGN'den daha fazla MGN olması durumunda, maksimum gücün anlık noktasını önceden tahmin edebilmek için Yapay sinir ağları kullanılarak algoritmanın daha hızlı olması için çalışmalar yapılabilecektir.

Son olarak, yazar bu tezin TEG uygulamaları için güç elektroniği ile ilgilenen diğer araştırmacıların ve endüstrinin çıkarlarına hizmet etmesini ve daha gelişmiş bir üst düzey proje için teşvik sağlamasını temenni etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.invest.gov.tr/en-US/sectors/Pages/Energy.aspx> (Ziyaret tarihi: 22 April 2018).
- [2] Zhang X., Zhao L., Thermoelectric Materials: Energy Conversion Between Heat and Electricity, *Journal of Materiomics*, 2015, **1**(2), 92-105.
- [3] Sharma S., Dwivedi V., Pandit S., A Review of Thermoelectric Devices for Cooling Applications, *International Journal of Green Energy*, 2014, **11**(9), 899-909.
- [4] Stubstad W., The Application of Thermoelectric Spot Cooling to Electronic Equipment, *IRE Transactions on Product Engineering and Production*, 1961, **5**(4), 22-29.
- [5] Min G., Rowe D., Experimental Evaluation of Prototype Thermoelectric Domestic-Refrigerators, *Applied Energy*, 2006, **83**(2), 133-152.
- [6] Luo Q., Tang G., Liu Z., Wang J., A Novel Water Heater Integrating Thermoelectric Heat Pump With Separating Thermosiphon, *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**(14-15), 2193-2203.
- [7] Siviter J., Knox A., Buckle J., Montecucco A., McCulloch E., Megawatt Scale Energy Recovery in The Rankine Cycle, *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, 15-20 September 2012.
- [8] Rowe D., Thermoelectrics, An Environmentally-Friendly Source of Electrical power, *Renewable Energy*, 1999, **16**(1-4), 1251-1256.
- [9] <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/>, (Ziyaret tarihi: 19 May 2016).
- [10] Rowe D., Thermoelectric Waste Heat Recovery As A Renewable Energy Source, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 2006, **1**(1), 13-23.
- [11] Champier D., Thermoelectric generators: A Review of Applications. *Energy Conversion and Management*, 2017, **140**, 167-181.

- [12] Goldsmid H., Introduction to Thermoelectricity. *Springer Series in Materials Science*, 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [13] Barma M., Riaz M., Saidur R., Long B., Estimation Of Thermoelectric Power Generation By Recovering Waste Heat From Biomass Fired Thermal Oil Heater. *Energy Conversion and Management*, 2015, **98**, 303-313.
- [14] Bonin R., Boero D., Chiaberge M., Tonoli A., Design And Characterization Of Small Thermoelectric Generators For Environmental Monitoring Devices. *Energy Conversion and Management*, 2013, **73**, 340-349.
- [15] Haug B., Wireless Sensor Nodes Can Be Powered by Temperature Gradients; No Batteries Needed: Harvesting Energy from Thermoelectric Generators. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2017, **4**(4), 24-32.
- [16] Lossec M., Multon B., Ben Ahmed H., Sizing Optimization of A Thermoelectric Generator Set With Heatsink For Harvesting Human Body Heat. *Energy Conversion and Management*, 2013, **68**, 260-265.
- [17] Yadav S., Yamasani P., Kumar S., Experimental Studies On A Micro Power Generator Using Thermo-Electric Modules Mounted On A Micro-Combustor, *Energy Conversion and Management*, 2015, **99**, 1-7.
- [18] Man, E., Sera, D., Mathe, L., Schaltz, E. and Rosendahl, L. Dynamic Performance of Maximum Power Point Trackers in TEG Systems Under Rapidly Changing Temperature Conditions, *Journal of Electronic Materials*, 2015, **45**(3), pp.1309-1315.
- [19] Ni L., Sun K., Zhang L., Xing Y., Chen M., Rosendahl L., A Power Conditioning System For Thermoelectric Generator Based on Interleaved Boost Converter With MPPT Control. *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China , 20-23 August 2011.
- [20] Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B., Huang, K., Performance Analysis Of Thermoelectric Generator Using DC-DC Converter With Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking, *Energy for Sustainable Development*, 2017, **37**, 86-98.
- [21] Kim S., Cho S., Kim N., Park, J., A Maximum Power Point Tracking Circuit of Thermoelectric Generators Without Digital Controllers, *IEICE Electronics Express*, 2010, **7**(20), 1539-1545.
- [22] Kim J., and Kim C., A DC-DC Boost Converter With Variation-Tolerant MPPT Technique and Efficient ZCS Circuit for Thermoelectric Energy Harvesting Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(8), 3827-3833.
- [23] Kim S., Cho S., Kim N., Baatar N., Kwon J., A Digital Coreless Maximum Power Point Tracking Circuit for Thermoelectric Generators, *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(5), 867-872.

- [24] Manikandan S., Kaushik S., Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator–thermoelectric cooler combined system, *Cryogenics (Guildf)*. 2015, **67**, 52-62.
- [25] Yamada H., Kimura K., Hanamoto T., Ishiyama T., Sakaguchi, T., Takahashi T., A Novel MPPT Control Method of Thermoelectric Power Generation with Single Sensor, *Applied Sciences*, 2013, **3**(2), 545-558.
- [26] Zakariya M., Zaka U., New MPPT Algorithm Based On Indirect Open Circuit Voltage And Short Circuit Current Detection For Thermoelectric Generators, *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 2015, 20-24 September 2015.
- [27] Park, J., Lee H., Bond M., Uninterrupted Thermoelectric Energy Harvesting Using Temperature-Sensor-Based Maximum Power Point Tracking System, *Energy Conversion and Management*, 2014, **86**, .233-240.
- [28] Snyder G., Ursell T., Thermoelectric Efficiency and Compatibility, *Physical Review Letters*, 2003, **91**(14), 1-4.
- [29] Mamur H., Bhuiyan M., Korkmaz F., Nil M., A Review on Bismuth Telluride (Bi₂Te₃) Nanostructure For Thermoelectric Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **82**, 4159-4169.
- [30] Snyder G., Toberer E., Complex Thermoelectric Materials, *Nature Materials*, 2008, **7**(2), 105-114.
- [31] Ohta H., Thermoelectrics Based on Strontium Titanate, *Materials Today*, 2007, **10**(10), 44-49.
- [32] Izidoro C., Ando Junior O., Carmo J., Schaeffer L., Characterization of Thermoelectric Generator For Energy Harvesting, *Measurement*, 2017, **106**, 283-290.
- [33] Sandoz-Rosado E., Stevens R., Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power Generation, *Journal of Electronic Materials*, 2009, **38**(7), 1239-1244.
- [34] Vizquez J., Palacios R., Sanz-Bobi M., Arenas A., Test Bench For Measuring The Electrical Properties Of Commercial Thermoelectric Modules, *Proceedings ICT'03 22nd International Conference on Thermoelectrics*, La Grande Motte, France, France, 7-21 August 2003.
- [35] Bonin R., Boero D., Chiaberge M., Tonoli A., Design and Characterization of Small Thermoelectric Generators For Environmental Monitoring Devices, *Energy Conversion and Management*, 2013, **73**, 340-349.
- [36] Zhang H., Chen H., Wang J., Research On The Generating Performance Of Series-Parallel Connection and Reappearance of A Semiconductor Thermoelectric Module, *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2001, **22** (4), 394-397.

- [37] Gaowei L., Jiemin Z., Xuezhong H., Analytical Model of Series Semiconductor Thermoelectric Generators, *Jiangsu University of Science and Technology*, 2011, **32** (3), 314-319.
- [38] Weerasinghe R., Hughes T., Numerical and Experimental Investigation of Thermoelectric Cooling in Down-Hole Measuring Tools; A Case Study, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2017, **10**, 44-53.
- [39] Montecucco A., Siviter J., Knox A., The Effect of Temperature Mismatch On Thermoelectric Generators Electrically Connected in Series and Parallel, *Appl Energy*, 2014, **123**, 47-54.
- [40] 4. Zheng X., Liu C., Yan Y., Wang Q., A Review Of Thermoelectrics Research – Recent Developments and Potentials for Sustainable and Renewable Energy Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **32**, 486-503.
- [41] Rowe D. *Modules, Systems, And Applications In Thermoelectrics*, CRC Press, 2012.
- [42] Srivastava D., Agarwal A., Datta A., Maurya R., *Advances In Internal Combustion Engine Research*, 1st ed., Springer Singapore, 2018.
- [43] Eder A., Fröschl J., Integration of a Thermoelectric Generator into the On-board Vehicle Electrical Systems, *In IAV - Symposium - Symposium Steuerungssysteme für automobile Antriebe*, Berlin, Germany, June 2009.
- [44] Robert. W. E., Dragan M., *Fundamentals of Power Electronics*, Springer, 2nd edition, January 2001.
- [45] Nagayoshi H., Nakabayashi T., Maiwa H., Kajikawa T., Development of 100-W High-Efficiency MPPT Power Conditioner and Evaluation of TEG System with Battery Load, *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(5), 657-661.
- [46] Man E., Schaltz E., Rosendahl L., Thermoelectric Generator Power Converter System Configurations: A Review. *Proceedings of the 11th European Conference on Thermoelectrics*, 23 August 2014.
- [47] Jingquan C., Maksimovic D., Erickson R. A New Low-Stress Buck-Boost Converter For Universal-Input PFC Applications, *APEC 2001 Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 4-8 March 2001.
- [48] Jingquan C., Maksimovic D., Erickson R., Buck-Boost Pwm Converters Having Two Independently Controlled Switches, *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vancouver, BC, Canada, 17-21 June 2001.
- [49] Jingquan C., Maksimovic D., Erickson R., Analysis and Design of A Low-Stress Buck-Boost Converter In Universal-Input PFC Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, **21**(2), 320-329.

- [50] Duran E., Sidrach-de-Cardona M., Galan J., Andujar J., Omparative Analysis Of Buck-Boost Converters Used to Obtain I–V Characteristic Curves of Photovoltaic Modules, *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.
- [51] Qiao H, Zhang Y., Yao Y., Wei L., Analysis of Buck-Boost Converters for Fuel Cell Electric Vehicles, *2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Shanghai, China, 13-15 Decmber 2006.
- [52] Montecucco A., Knox A., Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **30**(2), 828-839.
- [53] Montecucco A., Siviter J., Knox A., Simple, Fast and Accurate Maximum Power Point Tracking Converter For Thermoelectric Generators, *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, 15-20 September 2012.
- [54] Huleihel Y., Cervera A., Ben-Yaakov S., A High Gain DC-DC Converter For Energy Harvesting of Thermal Waste By Thermoelectric Generators, *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in occupied Palestine*, 14-17 November 2012.
- [55] Schwartz D., A Maximum-Power-Point-Tracking Control System For Thermoelectric Generators, *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Aalborg, Denmark, 25-28 June 2012.
- [56] Eakburanawat J., Boonyaroonate I., Development of A Thermoelectric Battery-Charger With Microcontroller-Based Maximum Power Point Tracking Technique, *Apply Energy*, 2006, **83**(7), 687-704.
- [57] Zhang X., Chan C., Li W., An Automotive Thermoelectric Energy System With Parallel Configuration for Engine Waste Heat Recovery, *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 20-23 August 2011.
- [58] Wu H., Sun K., Zhang J., Xing Y., A TEG Efficiency Booster with Buck–Boost Conversion, *Journal of Electronic Materials*. 2013, **42**(7), 1737-1744.
- [59] Kim R., Improved Renewable Energy Power System using a Generalized Control Structure for Two-Stage Power Converters, PhD thesis, Virginia State University, Blacksburg, Virginia, 2009.
- [60] Li M., Xu S., Chen Q., Zheng L., Thermoelectric-Generator-Based DC–DC Conversion Networks for Automotive Applications, *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(5), 1136-1143.
- [61] Efram T., Chapman P., Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**(2), 439-449.

- [62] Mamur H, Ahiska R. Application of a DC–DC Boost Converter With Maximum Power Point Tracking for Low Power Thermoelectric Generators. *Energy Conversion and Management*, 2015, **97**, 265-272.
- [63] Laird I., Lu D., Steady State Reliability of Maximum Power Point Tracking Algorithms Used With A Thermoelectric Generator, *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013)*, Beijing, China, 19-23 May 2013.
- [64] Im J., Wang S., Ryu S., Cho G., A 40 mV Transformer-Reuse Self-Startup Boost Converter With MPPT Control for Thermoelectric Energy Harvesting, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, **47**(12), 3055-3067.
- [65] Kim J., Kim C., A DC–DC Boost Converter With Variation-Tolerant MPPT Technique and Efficient ZCS Circuit for Thermoelectric Energy Harvesting Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(8), 3827-3833.
- [66] Laird I, Lu D. High Step-Up DC/DC Topology and MPPT Algorithm for Use With a Thermoelectric Generator. *IEEE Transactions on Power Electronics.*, 2013, **28**(7), 3147-3157.
- [67] Park J., Lee H., Bond M., Uninterrupted Thermoelectric Energy Harvesting Using Temperature-Sensor-Based Maximum Power Point Tracking System, *Energy Conversion and Management*, 2014, **86**, 233-240.
- [68] Yamada H., Kimura K., Hanamoto T., Ishiyama T., Sakaguchi T., Takahashi T., A MPPT Control Method of Thermoelectric Power Generation With Single Sensor, *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Kitakyushu, Japan, 22-25 April 2013.
- [69] Bandyopadhyay S., Chandrakasan A.. Platform Architecture for Solar, Thermal, and Vibration Energy Combining With MPPT and Single Inductor, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, **47**(9), 2199-2215.
- [70] Ramadass Y., Chandrakasan A., A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2011, **46**(1), 333-341.
- [71] Phillip N., Maganga O., Burnham K., et al., Investigation of Maximum Power Point Tracking for Thermoelectric Generators, *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(7), 1900-1906.
- [72] Jae Ho L., HyunSu B., Bo Hyung C., Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size, *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, Slovenia, 30 August-1 September 2006.
- [73] Liu B., Duan S., Liu F., Xu P., Analysis and Improvement of Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Incremental Conductance Method

for Photovoltaic Array, *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, 27-30 November 2007.

- [74] Nagayoshi H., Kajikawa T., Mismatch Power Loss Reduction on Thermoelectric Generator Systems Using Maximum Power Point Trackers, *2006 25th International Conference on Thermoelectrics*, Vienna, Austria, 6-10 August 2006.
- [75] Rae-Young K., Jih-Sheng L., York B., Koran A., Analysis and Design of Maximum Power Point Tracking Scheme for Thermoelectric Battery Energy Storage System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(9), 3709-3716.
- [76] Champier D., Favarel C., Bédécarrats J., Kousksou T., Rozis J., Prototype Combined Heater/Thermoelectric Power Generator for Remote Applications, *Journal of Electronic Materials*. 2013, **42**(7), 1888-1899.
- [77] Shaffer R., *Fundamentals Of Power Electronics With MATLAB*, Boston, Mass, Charles River Media, 2007.
- [78] Saeed V., *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*, John Wiley, England, 2006.
- [79] Al-Habahbeh O., Mohammad A., Al-khalidi A., Khanfer M., Obeid M., Design Optimization of A Large-Scale Thermoelectric Generator, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2018, **30**(2), 177-182.

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

- [1] **Khalid Y.**, Mehmet Zeki B., Tarık E., The Effect of Temperature Variations Over Thermoelectric Generator Efficiency, *International Engineering Research Symposium UMAS2017*, Duzce, Turkey, 11-13 September 2017.
- [2] **Khalid Y.**, Mehmet Zeki B., Tarık E., Practical Implementation of Maximum Power Tracking Based Short-Current Pulse Method for Thermoelectric Generators System, *Journal of power electronics (JPE)*, 2018, **18**, 1201-1210.
- [3] **Khalid Y.**, Mehmet Zeki B., Tarık E., Bekir Ç., Improving the Performance of the MPPT for Thermoelectric Generator System by Using Kalman Filter, *IEEE 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul, Turkey, 3-5 May 2018.
- [4] **Khalid Y.**, Mehmet Zeki B., Tarık E., “Studying Effects of Changing the Irradiation on the Performance of PV System and Using MPPT,” *1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Sciences Afyon Kocatepe University, Turkey* 21-22 April 2016.
- [5] **Khalid Y.**, Mehmet Zeki B., A Novel Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Power Differentials Method for Thermoelectric Generators, under review, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Libya – Zawya şehrinde doğdu. Lise öğrenimini Jeel Lisesi'nde 2003'de tamamladı. Lisans öğrenimini Sabrata üniversitesinde Elektrik Mühendisliği Bölümünde 2008 yılında tamamladı. 2009 yılında başladığı Malezya Tun Hussein Onn University of Malaysia (UTHM) Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan 2010 yılında Yüksek Lisansı tamamladı. 2013 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine devam etmektedir.

