



## Termoelektrik Jeneratörler İçin İzolesiz Alçaltan Yükselten Çevirici ile Maksimum Güç Noktası İzlemedeki Yük Değişimlerinin Etkisi

Çiğdem AKYILDIZ<sup>1</sup>, Mehmet Ali ÜSTÜNER<sup>1</sup> ve Hayati MAMUR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

\* (hayati.mamur@cbu.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi

**Özet** – Termoelektrik jeneratörler (TEG) atık ısıların elektrik enerjisine çevriminde kullanılan yarı iletken cihazlardır. TEG’lerden elde edilen elektrik enerjisinin regülasyonuna ihtiyaç duyulur. Bunun için çeviriciler ile birlikte çalıştırılırlar. Bağlanan çevirici TEG’in yükünü oluşturur. Bu çeviricinin akımı maksimum güç noktası takibi (MPPT) algoritmaları ile ayarlamalı yapılarak TEG’in iç direnci ile bağlanan çeviricinin iç dirençleri birbirine eşitlenir. Böylece maksimum güç noktası (MPP) yakalanır. Bu MPP değeri bağlanan çeviricinin tipine göre çeviriciye bağlanan yük değerinden etkilenir. Bu çalışmada, TEG için izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici ile çeviriciye bağlanan yük değişimlerinin MPPT üzerindeki etkisi MATLAB/Simulink benzetimi ile araştırılmıştır. MPPT algoritması için karıştır & gözlemler (P&O) kullanılmıştır. Çalışmaların sonucunda MPPT algoritması izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviriciye bağlanan yük değerlerinin TEG iç direncinin alt ve üst değerlerinde MPP izlemesi yapabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler** – TEG, MPPT, İzolesiz DC-DC Alçaltan Yükselten Çevirici, P&O, Karıştır ve Gözlemler

### I. GİRİŞ

İnsanlık her alanda enerjiye ihtiyaç duyar. Elektrik enerjisi bu enerji kaynaklarından biridir. Şehirleşmenin artması, teknolojinin hızla gelişmesi ve değişmesi enerjiye duyulan ihtiyacı her geçen gün daha çok artırmaktadır. Fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin kullanılması sonucunda çevre dengesi bozulmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birçok alanda faydalanılmaktadır. Hangi enerji kaynağı kullanılırsa kullanılsın bunun sonucunda ortamda bir atık ısı ortaya çıkmaktadır. Atık ısıların bulunduğu yerler arasında insan vücudu, egzozlar, sıcak su atıkları ve fabrika bacaları verilebilir. Termoelektrik jeneratörler (TEG) bu oluşan atık ısıları yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak elektrik enerjisine dönüştürmektedirler [1].

Literatürde TEG uygulamalarına geniş ölçüde rastlanmaktadır. Bunların çoğunluğu atık ısıdan elektrik enerjisi kazanımı ile ilişkilidir. Khan ve ark. [2] esnek giyilebilir TEG’ler için mikron inceliğinde bir poli (vinylidene fluoride-co-exafluoropropylene) ışınımıyla soğutulan emici ile entegre edilmiş bir TEG önermişlerdir. Wang ve ark. [3] minyatür bir ivmeölçere güç sağlamak için vücut ısısını toplayan giyilebilir TEG sistemi geliştirmişlerdir. Elmoughni ve ark. [4] vücut ısı hasadı için tekstile entegre polimer TEG çalışması yapmışlardır. Schwurack ve ark. [5] baca etkisini kullanarak iyileştirilmiş doğal konveksiyon soğutmalı bir termoelektrik sistemin performans geliştirmesinin çalışmasını test etmişlerdir. Caballero-Calero ve ark. [6] egzoz boruları için boru halkalı TEG sistemi tasarlamışlar ve sistemlerinden nanotoz geçirerek performansını incelemişlerdir. Mona ve ark. [7] nesnelerin interneti (IoT) tabanlı izleme için termoelektrik

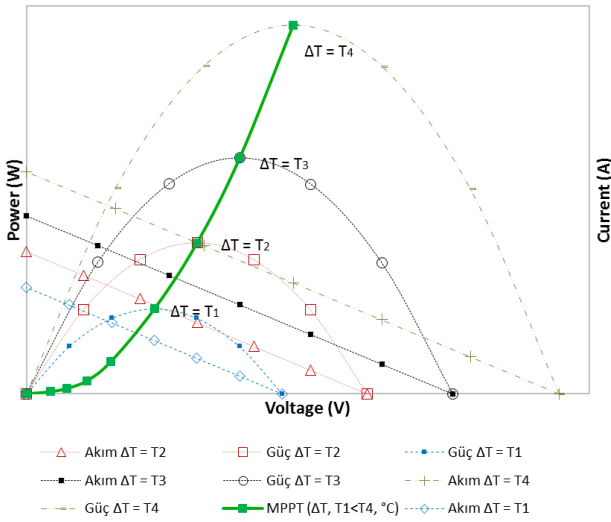
modül kullanan jeotermal elektrik jeneratörü tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, TEG'lerin MPPT için kullanılan izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviricinin yükünün MPPT üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### A. Termoelektrik Jeneratörden Enerji Elde Edinimi

TEG'ler düşük performans ve verime sahiptirler. Bu nedenle TEG'lerden MPP'yi elde etmek için tam kapasiteye yakın durumda çalıştırmak gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek amacıyla empedans eşlemesi yaparak TEG sistemine bağlı değişken harici yük direnci ( $R_L$ ) ile TEG sisteminin toplam iç direnç değeri ( $R_{TEG}$ ) arasında denge kurulmalıdır. Şekil 1'de hem yük direncinin hem de sıcaklık farkının fonksiyonu olarak TEG akım-gerilim, MPP ve güç eğrisi verilmiştir.

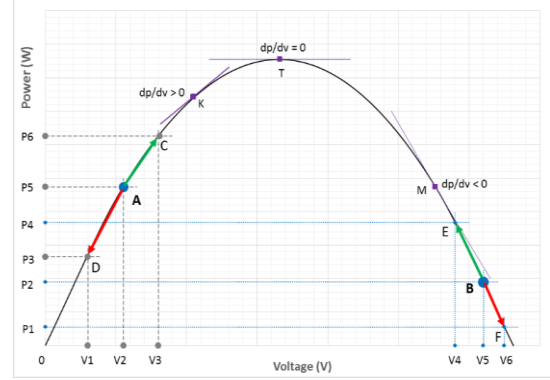


Şekil 1. Yük direnci ve sıcaklık farkının fonksiyonu olarak TEG akım-gerilim, MPP ve güç eğrisi

### B. P&O MPPT Algoritması

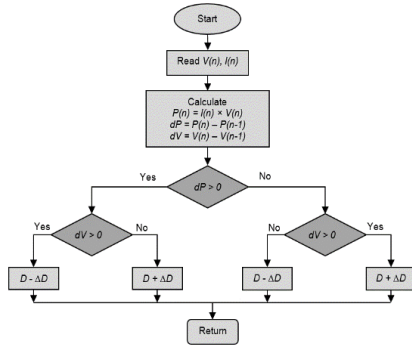
Karıştır ve gözlemle (P&O) algoritması en iyi bilinen bir MPPT algoritmasıdır. P&O algoritmasının pratikte uygulanmasının diğer algoritmalara göre daha kolay olmasından dolayı MPPT teknikleri içerisinde sıklıkla tercih edilmektedir. P&O algoritmasında fotovoltaik sistemler için panellerin güç-gerilim karakteristiğinden faydalanırken aynı şekilde TEG sistemleri içinde güç-gerilim grafiğinden faydalanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada TEG sistemi için tasarlanmış izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici anahtarının görev çevrimi (D)

değerinin değiştirilmesiyle P&O MPPT algoritması uygulanmıştır. Şekil 2'de TEG güç-gerilim grafiği verilmiştir. Bu grafiğin sol tarafında gerilime göre gücün türevi pozitiftir ve sağ tarafında negatiftir. Tam ortada sıfır değerini alır ve MPP yakalanır.

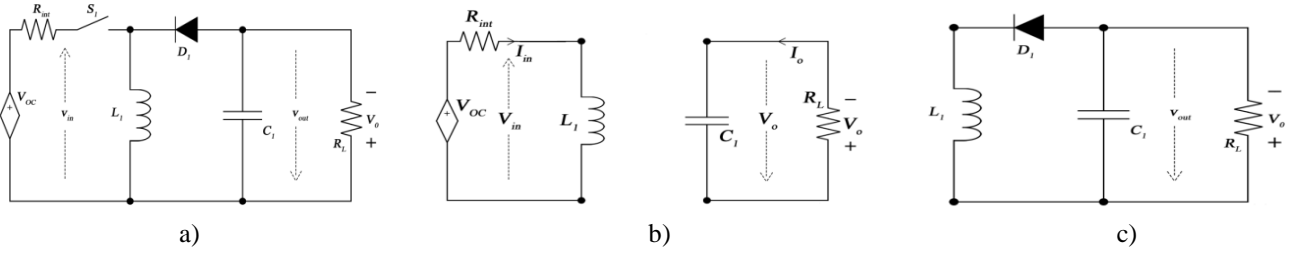


Şekil 2. TEG güç grafiği

TEG'den maksimum verim elde etmek için MPP'nin yakalandığı T noktasına ulaşmak gerekmektedir. Referans noktası A noktası olarak belirlenmiş olsun. A noktasından D noktasına gidildiğinde gerilim düşmekte dolayısıyla elde edilen güç azalmaktadır. A noktasından C noktasına gidildiğinde ise gerilim arttığından dolayı elde edilen güç miktarı da artış göstermektedir. Bu iki ifade ortak olarak değerlendirildiğinde MPP'nin yakalandığı T noktasına ulaşmak için gerilime göre gücün türevinin pozitif olduğu bölgede gerilim değeri sürekli artırılmalıdır. Diğer bir durumda, referans noktası gücün türevinin negatif olduğu B noktası olsun. B noktasından F noktasına gidildiğinde gerilim artmakta fakat elde edilen güç azalmaktadır. B noktasından E noktasına gidildiğinde gerilim azalmakta fakat elde edilen güç artmaktadır. Bu iki ifade gücün türevinin negatif olduğu bölge için değerlendirildiğinde MPP'nin yakalandığı T noktasına ulaşmak için gerilim değeri sürekli olarak azaltılmalıdır. Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için kullanılacak olan bu P&O MPPT algoritması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. P&O MPPT algoritması



Şekil 4. İzolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici; a) şeması, b) durum 1 ve (c) durum 2

Tablo 1. İzolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici tasarım değerleri

Parameter	Değer	Birim	Tanımlama
$P_{TEG\_MAX}$	45,76	W	MPPT'deki güç
$P_{conv}$	50	W	Çeviricinin gücü
$V_{in}$	16,4	V	Giriş gerilimi
$R_L$	1-45	$\Omega$	Yük direnci
$I_o(max)$	$\sqrt{P_{TEG\_MAX}/R_L}$	A	Maximum çıkış akımı
$V_o(max)$	$\sqrt{P_{TEG\_MAX} \times R_L}$	V	Maximum çıkış gerilimi
$\Delta I_L$	30% $I_o$	A	Maximum dalgalanma akımı
$\Delta V_o$	5% $V_o$	A	MPP değerinde maksimum gerilim dalgalanması
$\eta$	0,8		Konvertör verimi
$f_s$	20	kHz	MOSFET anahtarlama frekansı
$L_1$	2~	mH	Bobin indüktansı
$C_1$	3300~	$\mu F$	Kondansatör kapasitesi

### C. İzolesiz DC-DC Alçaltan Yükselten Çevirici

İzolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviriciler DC gerilim seviyesini düşürebilen veya yükseltebilen çevirilerdir. Giriş geriliminin polaritesini tersine çevirmektedirler. Bu özellikleriyle hem yükselten çevirici gibi hem de alçaltan çevirici gibi çalıştırılmasına olanak sağlamaktadırlar. Şekil 4a'da devre şeması verilmiştir.

İzolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviricinin çalışma prensibi iki durumda incelenebilir. Şekil 4b durum 1'de anahtarlama elemanı metal oksit alan etkili transistör (MOSFET) iletimdeyken diyot ters gerilime maruz kaldığı için kesimdedir. Bu durumda giriş kaynak akımı MOSFET ve bobin üzerinden akar. Şekil 4c durum 2'de MOSFET

kesimdeyken diyot iletimdedir. Bobinden akan akım kondansatör, diyot ve yük üzerinden geçer ve bobinin enerjisi yüke aktarılır.

İzolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici referans değerleri olarak Tablo 1'deki veriler dikkate alınmıştır. Burada TEG'in çıkış gücü 45,76 W'tır. Çeviricinin güç hesaplamaları 50 W içindir. MOSFET anahtarlama frekansı 20 kHz'dir. Yapılan çalışma için izolesiz DC-DC alçaltan-yükselten çeviricinin tasarım hesaplamalarında takip eden eşitlikler kullanılmıştır.

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

$$D = \frac{-V_o + V_F}{-V_o + V_F + V_{in(min)}} \quad (2)$$

$$I_{in} = \frac{I_o D}{1 - D} \quad (3)$$

$$R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_L \left( \frac{1 - D}{D} \right)^2 \quad (4)$$

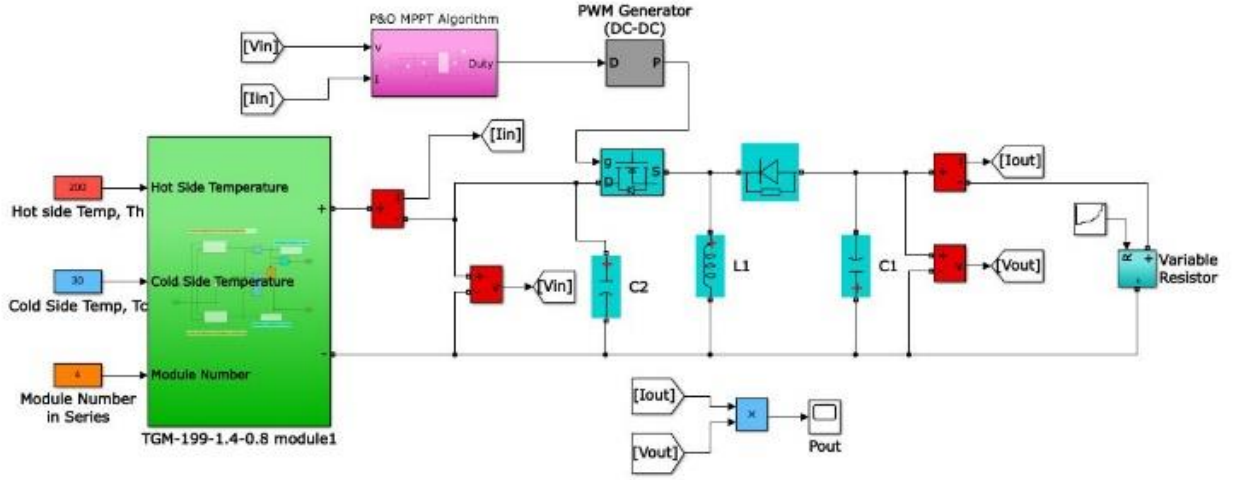
Burada  $V_o$ ,  $V_{in}$ ,  $D$ ,  $I_{in}$ ,  $I_o$ ,  $R_L$  ve  $R_{PROG}$  sırasıyla, konvertörün çıkış gerilimi (V), giriş gerilimi (V), görev çevrimi, giriş akımı (A), çıkış akımı (A), yük direnci ( $\Omega$ ) ve çevirici tarafındaki eşdeğer dirençtir

( $\Omega$ ). Akım dalgalanması ve kondansatörün değeri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$\Delta I_L = (0.2 - 0.4) \times I_{maxout} \quad (5)$$

$$C_{out(min)} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_{out}} \quad (6)$$

Burada,  $\Delta I_L$  akım dalgalanması,  $I_{maxout}$  maksimum çıkış akımı,  $C_{out(min)}$  çıkış kondansatör değeri,  $f_s$  anahtarlama frekansı ve  $\Delta V_{out}$  çıkış gerilim dalgalanmasıdır.



Şekil 5. MATLAB/Simulink benzetimi.

Tablo 2. Yük değişimlerine göre MOSFET anahtarlama  $D$  değerleri

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

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada 4 adet TEG kullanılmıştır. Her bir TEG gücü 11,44 W'tır. Bu sayede TEG sistemi için toplam çıkış gücü 45,76 W ve iç direnci 5,84  $\Omega$ 'dur. Bu sistem için 50 W gücünde izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çevirici tasarlanmıştır. Şekil 5'te verilen MATLAB/Simulink benzetimleri için uygun yük değer aralığını belirlemek amacıyla yük direnç değerleri 1-45  $\Omega$  arasında değiştirilmiştir. MPPT algoritmasının MPP değerini takip etmek için ayarladığı  $D$  değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviricinin TEG'in iç direncinin altında ve üstündeki değerler için  $D$  değerini değiştirdiği görülmektedir.  $R_L$  değeri değişimlerinin her birine farklı bir  $D$  değeri karşılık gelmiştir. TEG'in iç direncinden çok düşük

ve çok yüksek  $R_L$  değerleri için hata değerlerinin fazla olduğu tespit edilmiştir.

### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, TEG'leri MPP değerinde çalıştırmak için kullanılan izolesiz DC-DC alçaltan yükselten çeviricinin çıkışına bağlanan yükün MPPT üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 1-45  $\Omega$  arası  $R_L$  değerlerinde MPPT algoritması MPP değerini takip etmek için  $D$  değerini yük değişimine bağlı olarak sürekli değiştirmiştir. Çevirinin iç direncinin MPPT algoritması ile programlanabilir yapılması MPPT takibini bu çevirici için her yük değerinde yapmasını sağlamıştır. Hata değerleri %0,34 ile %0,74 arasında gerçekleşmiştir. En az hata değeri 11-30  $\Omega$  arasında çıkmıştır. Bu veriye göre TEG iç direnç değerinin yaklaşık 2-6 katı

aralığında yük kullanmak bu çevirici tipi için en iyi MPPT performansını sağlamıştır.

## TEŞEKKÜR

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

## KAYNAKLAR

- [1] H. Mamur, M. A. Üstüner, and M. R. A. Bhuiyan, "Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101824, 2022.
- [2] S. Khan, J. Kim, K. Roh, G. Park, and W. Kim, "High power density of radiative-cooled compact thermoelectric generator based on body heat harvesting," *Nano Energy*, 87, 106180, 2021.
- [3] Y. Wang, Y. Shi, D. Mei, and Z. Chen, "Wearable thermoelectric generator to harvest body heat for powering a miniaturized accelerometer," *Applied Energy*, 215, 690-698, 2018.
- [4] H. M. Elmoughni, A. K. Menon, R. M. Wolfe, and S. K. Yee, "A textile-integrated polymer thermoelectric generator for body heat harvesting," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 7, 1800708, 2019.
- [5] R. Schwurack, J. Bärschneider, S. Unz, and M. Beckmann, "Performance enhancement of a thermoelectric system with improved natural convection cooling by utilizing the chimney effect," *Energy Conversion and Management*, 237, 114118, 2021.
- [6] O. Caballero-Calero, M. Rull-Bravo, D. Platzek, M. D. Cárdenas, R. Fernández, A. Moure, J. F. Fernández, and M. Martín-González, "Tubular ring thermoelectric module for exhaust pipes: From Skutterudite nanopowders to the final device," *Energy*, 234, 121223, 2021.
- [7] Y. Mona, T. A. Do, C. Sekine, P. Suttakul, and C. Chaichana, "Geothermal electricity generator using thermoelectric module for IoT monitoring," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 347-352, 2022.