



## Termoelektrik Jeneratörlerde Kullanılan İzolesiz Alçaltan Çeviricinin Yük Değişimlerinde Maksimum Güç Noktası İzleme Davranışının İncelenmesi

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) sıcaklık farkını elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. TEG’lerden maksimum verim elde etmek amacıyla DC-DC çeviriciler kullanılmaktadır. Alçaltan çeviricilerin çalışma prensibi çıkış geriliminin giriş geriliminden düşük olmasıdır. Bu çalışmada, TEG’lerde kullanılan izolesiz alçaltan DC-DC çeviricinin yük değişimlerinde maksimum güç noktası izleme (MPPT) davranışının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu MPPT algoritmaları çeviriciye bağlanan her yükte tam verimli çalışmamaktadır. Karıştır & Gözlemler (P&O) MPPT algoritması kullanılarak çeviriciye bağlanan değişen yükler altında TEG’in maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırılıp yük değer aralığı belirlenmiştir. MPP izlemesi için TEG’in yük direnç değeri ile TEG’e bağlanan ve TEG’in bir anlamda yükünü oluşturan alçaltan DC-DC çeviricinin akım değerini P&O algoritması ile değişimli yaparak eşitleme sağlanmıştır. Hesaplamaları gerçekleştirilen 50 W’lık bir alçaltan DC-DC çeviricinin 45,76 W değerindeki bir TEG ile MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. TEG’in iç direnç değeri 5,84  $\Omega$  iken alçaltan DC-DC çeviricinin yük direnç değeri 1-45  $\Omega$  arasında değiştirilmiştir. Çeviricinin yük direncinin TEG iç direncinden büyük olduğu durumlarda, alçaltan DC-DC çevirici anahtarının maksimum görev doluluk oranı ( $D$ ) değeri ile çalıştığı görülmüştür. Çeviricinin yük direncinin değeri TEG iç direncine kadar artırıldığında alçaltan DC-DC çevirici anahtarının  $D$  değerini artırdığı belirlenmiştir. Diğer durumlarda ise P&O MPPT algoritmasının alçaltan DC-DC çevirici anahtarının  $D$  değerini sabit tutarak sürekli maksimum güç değerini koruduğu görülmüştür. Çalışmanın sonucunda alçaltan DC-DC çeviricinin yükünün TEG iç direncinin üç katına kadar olan değerlerde MPP’yi izleyebildiği belirlenmiştir. Alçaltan DC-DC çeviricinin yük direnç değeri TEG iç direncinin üç katından fazla olduğunda,  $D$  değeri daha fazla arttırılamaması nedeniyle bu değer arttıkça MPP’den uzaklaştığı görülmüştür.

*Anahtar Kelimeler – TEG, MPPT, Karıştır & Gözlemler, P&O, Alçaltan Çevirici, Görev Doluluk Oranı*

### I. GİRİŞ

Enerji çeşitlerinden biri olan termal enerji, sistem veya ortam sıcaklığı sonucunda sistemdeki veya ortamdaki bir cismin veya maddenin potansiyel ve kinetik enerjileri toplamını ifade eden bir enerji biçimidir [1]. Isı, termal enerjinin akışıdır. Gerçek dünyadaki fiziksel sistemlerde gerçekleşen enerji transferi %100’den az

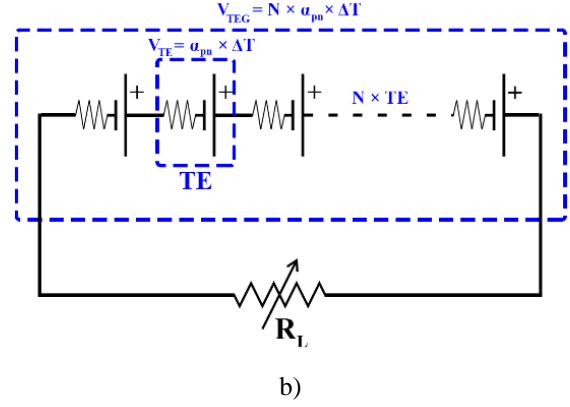
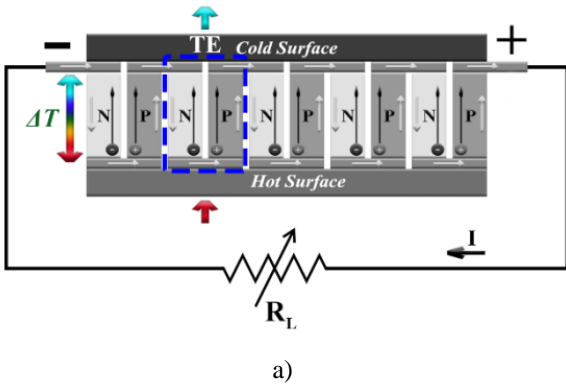
verimliliğe sahiptir. Sonucunda bir atık termal ısı oluşur. Bu atık ısılardan çevre sıcaklığı ile arasındaki sıcaklık farkını kullanarak elektrik enerjisine çeviren cihazlardan biri termoelektrik jeneratörlerdir (TEG). TEG’ler “Seebeck Etki”yi kullanırlar. TEG’lerin enerji verimlerinin düşük olması nedeniyle maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırılmaları önemlidir. TEG’leri MPP’de

çalıştırmak için DC-DC çeviriciler kullanılır [2]. Bu DC-DC çeviriciler hem güç regülasyonu hem de MPP izlemesi (MPPT) yapabilmektedirler. MPPT için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [3]. Bunlardan en yaygın kullanılanı karıştır & gözlemler (P&O) metodudur [4]. Ayrıca, bu DC-DC çeviriciler TEG'ler ve bataryalar arasında kullanıldığında batarya yönetim sistemini de gerçekleştirirler [5].

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### A. Termoelektrik Jeneratör

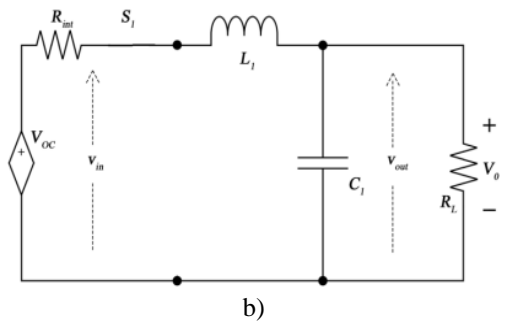
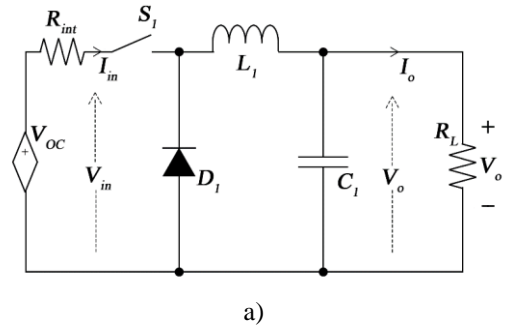
TEG'lerin çalışma mantığı üretilen gerilimin sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğu termoelektrik malzemelerin Seebeck etkisi kavramına dayanmaktadır. TEG'lerde, çıkış gücünü arttırmak amacıyla birçok yariletken termoeleman (TE) birbirine bağlanmaktadır. Gerilimin artırılması için TE'ler birbirleri ile seri bağlanırken, ısıl iletkenliğin artırılması için seramik plakalar yoluyla paralel bağlanmaktadır [6]. Bu birleşimden termoelektrik modül (TEM) oluşur. TEM'in uçları arasına bir yük bağlanır ve yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı oluşturulur ise yük üzerinden bir güç alınır [7]. Bu sayede TEM TEG modunda çalışmış olur. Tipik bir TEG'in iç yapısı ve elektriksel bağlantısı Şekil 1'de sunulmuştur.

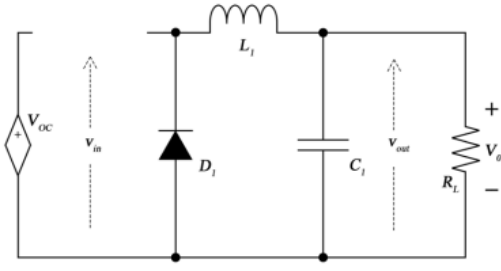


Şekil 1. TEG; a) iç yapısı ve b) elektrik eşdeğer devresi

### B. İzolesiz Alçaltan DC-DC Çevirici

İzolesiz alçaltan DC-DC çeviriciler çıkış geriliminin giriş geriliminden daha düşük olduğu çeviricilerdir. Şekil 2a'da görüldüğü gibi bobin, kondansatör, anahtarlama elemanı ve diyottan oluşmaktadır. Alçaltan çeviriciler olmak üzere, Şekil 2b ve 2c'de görüldüğü gibi, anahtarın konumuna göre iki durumda incelenebilirler.





c)

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

Durum 1’de anahtarlama elemanı iletimdeyken diyot kesimdedir. Bu devrede indüktör (bobin) doğrudan giriş ile çıkış arasında bağlanmıştır. Durum 2’de ise anahtarlama elemanı kesimdeyken diyot iletimdedir. Anahtarın iletimde kaldığı durumdaki endüktans üzerindeki gerilim ile kesimde kaldığı durumdaki endüktans üzerindeki gerilim birbirine eşittir. Yarı iletken anahtarın kaynak ve bobin arasında seri olarak bağlanmasından dolayı giriş akımı süreksizdir. Bunun dışında, bobinin ve kapasitenin her

Tablo 1. İzolesiz alçaltan DC-DC çevirici tasarım değerleri

Parametre	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
$L_1$	680~	$\mu$ H	Bobin indüktansı
$C_1$	100~	$\mu$ F	Kondansatör kapasitesi

durumda yükü beslemesinden dolayı çıkış akımı da süreklidir. Yapılan çalışma için alçaltan çeviricinin tasarım hesaplamalarında aşağıdaki dönüşüm eşitlikleri kullanılmıştır.

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} \quad (3)$$

$$(V_{in} - V_o) \times D \times T - V_o \times (1 - D) \times T = 0 \quad (1) \quad R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_o/D}{I_o/D} = \frac{R_L}{D^2} \quad (4)$$

$$D = \frac{V_o}{V_{in(max)} \times \eta} \quad (2)$$

Burada,  $V_o$ ,  $V_{in}$ ,  $D$ ,  $I_{in}$ ,  $I_o$ ,  $R_L$ ,  $R_{PROG}$  ve  $\eta$  sırasıyla, konvertörün çıkış gerilimi (V), giriş gerilimi (V), duty cycle, giriş akımı (A), çıkış akımı (A), yük direnci ( $\Omega$ ), çeviricinin iç direnci ( $\Omega$ ) ve konvertörün verimidir. Akım dalgalanması

ve kondansatörün değeri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

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

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

$\Delta I_L$  değeri çıkış akımının %20-%40'ı arasında dalgalanır ve bu değerler arasında alınır. Diğer taraftan alçaltan çevirici için kullanılacak olan gerekli minimum kondansatörün değeri yukarıdaki eşitlikle bulunur. Burada,  $C_{out(min)}$  çıkış kondansatörüdür (F).

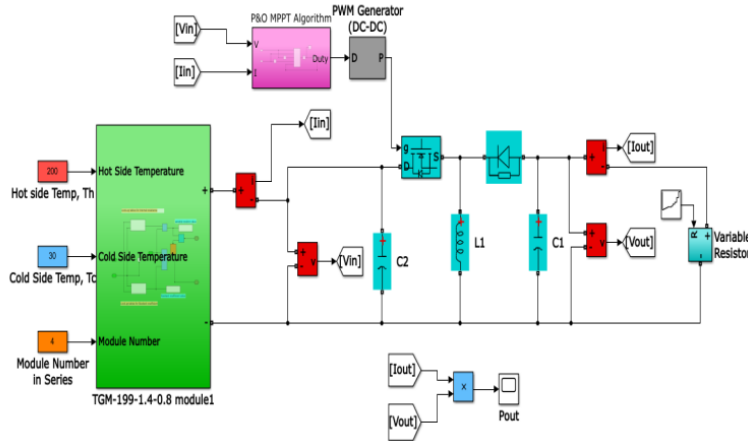
### C. Tasarım Hesapları

İzolesiz alçaltan DC-DC çevirici için Tablo 1'deki veriler alınmıştır. İlk olarak TEG'in gücü MATLAB/Simulink ile elde edilen çıkış gücü hesaplamaları ile 45,76 W belirlenmiştir. Daha sonra buna uygun izolesiz alçaltan DC-DC çeviricinin gücü 50 W olarak alınıp hesaplamalar yapılmıştır. Yük direncinin değerinin değişik

değerlerde olabileceği düşünülerek MATLAB/Simulink benzetimleri için bu 1-45  $\Omega$  arasında kullanılmıştır. Metal oksit silikon alan etkili transistörün (MOSTEF) anahtarlama frekansı 20 kHz olarak düşünülmüştür.

### D. P&O Algoritmali İzolesiz DC-DC Alçaltan Çevirici MATLAB/Simulink Modellemesi

MATLAB/Simulink ortamında bir TEG sistemi geliştirilmiştir [2]. TEG gücü uygulamalar açısından değerlendirildiğinde 50 W olacak bir şekilde giriş verileri benzetim çalışmasında ayarlanmıştır. Bu TEG sistemine tasarım hesapları yapılmış olan çevirici eklenmiştir. Alçaltan çeviricinin çıkışına değişken yük bağlanmıştır. Şekil 3'te bu TEG sistemi-DC-DC çevirici ve yük bağlantısı gösterilmiştir. Alçaltan çeviricinin anahtarlama P&O MPPT metodu ile gerçekleştirilmiştir. TEG'in sıcak yüzey sıcaklığı  $T_H = 200^\circ$  ve soğuk yüzey sıcaklığı  $T_C = 30^\circ$  de sabit tutulmuştur. P&O MPPT algoritması yükün değişkenliğine bağlı olarak üretilen görev çevrimi  $D$  değerleri değiştirmiştir.



Şekil 3. Alçaltan çevirici; a) şeması, b) durum 1 ve c) durum 2

Tablo 2. Yük değişimlerine göre üretilen ortalama  $D$  değerleri

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

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmasında TEG'in kademeli yük

değerlerine karşılık gelen  $D$  değerleri ve elde edilen bulgular Tablo 2'de verilmiştir. Değiştirilen direnç değerlerinin karşılaştırılması TEG'in iç direncinin altındaki ve üstündeki değerler olarak

yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada,  $5,84 \Omega$ 'un altındaki değerler TEG sisteminin iç direncinin altındaki değerler,  $5,84 \Omega$  ve üzerindeki değerler ise TEG sisteminin iç direncinin üzerindeki değerlerdir. Ayrıca eşit olduğu  $R_{int} = R_L$  durumu için de analiz yapılmıştır. Modellenen TEG sisteminin MPP değeri yükselten çevirici ile aynı ve  $45,76 \text{ W}$ 'tır.

#### IV. SONUÇLAR

İzolesiz alçaltan DC-DC çevirici yük değişimlerine bağlı olarak P&O MPPT algoritması MPP değerini yakalamak için  $D$  değerini birden TEG iç direncine kadar olan değerlerde yapmıştır. Bu değerlerin üzerindeki yük değerlerinde maksimum  $D$  değeri ile çalışmış ve buna bağlı olarak MPP takibi yapamamıştır.

#### TEŞEKKÜR

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

#### KAYNAKLAR

- [1] I. Sarbu, and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, 191, 2018.
- [2] H. Mamur, and Y. Coban, Y, "Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 28, no. 1, pp. 124-139, 2020.
- [3] M. R. A. Bhuiyan, H. Mamur, M. A. Üstüner, and Ö. F. Dilmaç, "Current and future trend opportunities of thermoelectric generator applications in waste heat recovery," *Gazi University Journal of Science*, vol. 35, no. 3, pp. 896-915, 2022.
- [4] 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*, vol. 50, 101824, 2022.
- [5] Z. M. Dalala, Z. S. Hamdan, H. Al-Taani, M. Al-Addous, and A. Albatayneh, "Battery charging application with thermoelectric generators as energy harvesters," *The Academic Research Community Publication*, vol. 3, no. 1, pp. 248-259, 2019.
- [6] Y. Singh, S. K. Singh, and P. Hazra, "The quest for high-efficiency thermoelectric generators for extracting electricity from waste heat," *JOM*, vol. 73, no. 12, pp. 4070-4084, 2021
- [7] H. L. Tsai, and J. M. Lin, "Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink," *Journal of Electronic Materials*, vol. 39, no. 9, pp. 2105-2111, 2010.