

# LLC DÖNÜŞTÜRÜCÜ TABANLI ŞEBEKEYE BAĞLI BİR FOTOVOLTAİK MİKRO-EVİRİCİNİN TASARIMI VE BENZETİMİ

**Atiye Melis YÜZER**

melisyuzer@hotmail.com

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir

**Mutlu BOZTEPE**

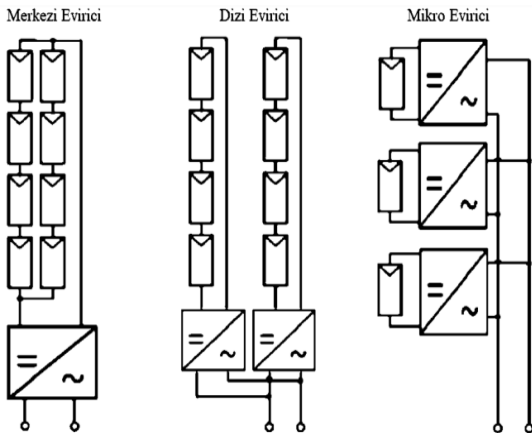
mutlu.boztepe@ege.edu.tr

**ÖZET:** Mikro-eviriciler diğer fotovoltaik eviricilere göre güneş panellerine gölge düşmesi durumunda veriminin ve performansının iyi olması nedeniyle günümüzde popüler hale gelmiştir. Bu çalışmada rezonant dönüştürücü tabanlı şebekeye bağlı bir fotovoltaik mikro eviricinin tasarım detaylarına ve benzetimine yer verilmektedir. Paneller için maksimum güç noktası izleme yöntemi olarak değiştir & gözle algoritmasından yararlanılmıştır. 230Vrms ve 50Hz AC çıkış sağlayan mikro-eviricinin çift aşamalı olmasıyla ve LLC topolojisi kullanarak verimi yüksek tutmak hedeflenmiştir. Analitik hesaplamalar ve Matlab-Simulink benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Fotovoltaik mikro-evirici, LLC Rezonant dönüştürücü, Maksimum güç noktası izleme

## 1. GİRİŞ

Yenilenebilir Enerji Ajansı'na göre, 2050 yılında yenilenebilir kaynaklarından üretilen elektriğin toplam elektrik üretimindeki payının %86'ya yükselmesi beklenmektedir. Küresel enerji arzında payı artmakta olan güneş enerjisinin tarım, endüstri, binalar, savunma sanayisi ve uzay teknolojileri gibi pek çok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır [10].

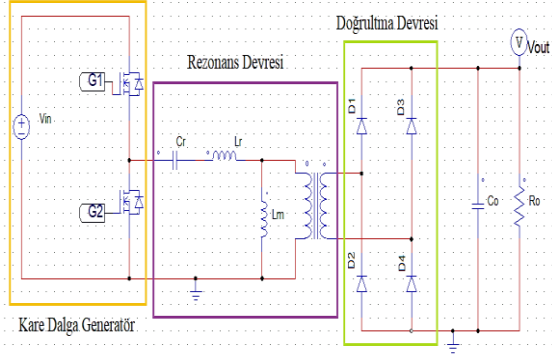


Şekil 1: Merkezi Evirici, Dizi Evirici ve Mikro Evirici Topolojileri.

Mikro eviricilerin topolojisi tek aşamalı ve çift aşamalı olmak üzere ikiye

ayrılmaktadır. Bu ayırım ise kendi içinde izolasyonlu ve izolasyonsuz topolojiler olarak iki alt gruba daha ayrılmaktadır. Bu çalışmada, çift aşamalı bir mikro eviricinin tasarımı anlatılmaktadır. İlk aşama tipik olarak iki görevi gerçekleştirmek için kullanılan bir izolasyonlu DC-DC dönüştürücüdür: Görevlerden ilki fotovoltaik modülün dc gerilimini ikinci aşama için yeterli bir DC seviyesine yükseltmektir. İkinci görev ise fotovoltaik paneli maksimum güce çıkarmak ve bu gücü takip etmektir. İkinci aşama ise, DC-AC dönüşümünü gerçekleştirmektedir. Bu şekilde şebekeye güç aktarımı gerçekleştirilecektir [6][7].

Fotovoltaik panellerin alüminyum çerçevesine kolaylıkla takılabilecek kompakt bir yapıya sahip olan mikro-evirici tasarımında LLC rezonant dönüştürücü kullanılmasının sebebi, yüksek verim ve geniş çalışma aralığına sahip olması, düşük elektromanyetik gürültüye (EMI) sahip olması, yüksek güç yoğunluğu ve trafonun manyetik endüktansını ( $L_m$ ) kullanarak sıfır voltaj anahtarlamasının elde edilebilir olması gibi avantajlara sahip olmasıdır [1][8].



Şekil 2: Yarım Köprü LLC Rezonant Dönüştürücü PSIM Devresi.

LLC rezonant dönüştürücüler yüksek güç yoğunluğuna sahip olması dolayısıyla farklı çalışmalarda da tercih edilmektedir. Örneđin, elektrikli araçların batarya şarj ünitelerinde [11], OLED TV'lerde güç kartlarında [9], dizüstü bilgisayar şarj adaptörlerinde düşük hacim gerektiren askeri havacılık alanında kullanılmaktadır [3].

Bu makalede şebekeye bağlı rezonant dönüştürücü tabanlı mikro eviricinin topolojisi incelenmiş ve bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

## 2. LLC REZONANT DÖNÜŞTÜRÜCÜ

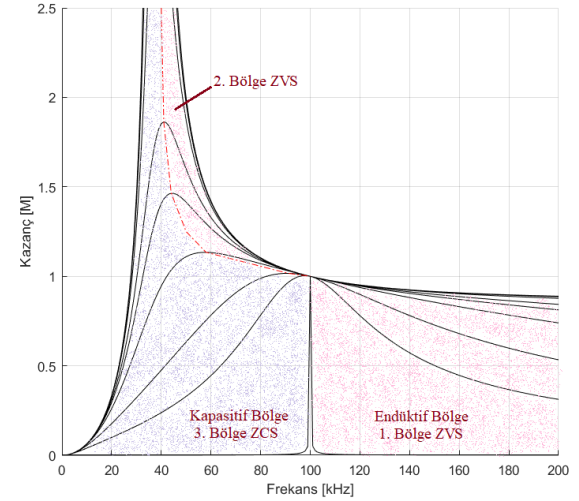
LLC rezonant dönüştürücüler tam köprü veya yarım köprü topolojisi kullanarak oluşturulabilmektedir. Ancak tam köprü topolojisinde daha fazla anahtar kullanılmakta olup maliyet ve iletim artmaktadır. Yarım köprüdeyse daha uygun maliyet ve daha düşük iletim kaybı olmasıyla birlikte gerilim yarıya düştüğü için aynı akımda tam köprü devresinin yaklaşık yarı gücüne ulaşabilmektedir. Bu çalışmada güç değeri <400W altında olacağından yarım köprü seçilmiştir.

LLC dönüştürücüde MOSFET güç anahtarları, girişteki DC kaynaktan aldıkları voltajı yüksek frekanslı kare dalgaya dönüştürmektedirler. Bu kare dalga yüksek frekanslı bir transformatör aracılığıyla

yükseltilir ve ikincil çıkış tarafına aktarılır. Son olarak, diyotlar bu gerilimi doğrultarak bir DC gerilime dönüştürür.

### 2.1. Rezonans Tankı

Rezonans endüktansı ( $L_r$ ), rezonant kondansatörü ( $C_r$ ) ve mıknatıslanma endüktansı ( $L_m$ ) elemanları rezonans tank devresini oluşturmaktadır.

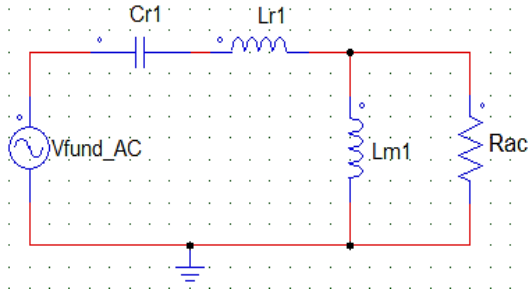


Şekil 3: Farklı Yükler için Gerilim Kazancı Grafiđi.

LLC Rezonant dönüştürücünün üç farklı çalışma bölgesi vardır. 1. bölgede, rezonant frekansından daha yüksek bir frekansta çalıştırıldığı için tank devresi endüktif karakterdedir ve ZVS (sıfır voltaj anahtarlama) yumuşak anahtarlama elde edilir. 2. bölgede çalışma frekansı seri ve paralel rezonans frekanslarının arasındadır. Bu bölgede de tank devresi endüktif karakterde olduğundan ZVS yumuşak anahtarlama bölgesidir. 3. bölgede ise, tank devresi rezonans frekansının altında çalıştığından kapasitif karakterdedir ve dolayısıyla dönüştürücü ZCS anahtarlama yaptığından tercih edilmez. Buna göre çalışma bölgesinin 1.bölgeden uzak tutulması, 2. ve 3. bölgede çalışması gerekir.

LLC rezonant dönüştürücünün temel harmonik eşdeğer devresi Şekil 4'te verilmiştir. Eşdeğer devredeki eşdeğer yük direnci  $R_{ac}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir [5]:

$$R_{ac} = \frac{8n^2 V_o^2}{\pi^2 P_o} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o \quad (1)$$



Şekil 4: LLC Rezonant Dönüştürücü AC Eşdeğer Devresi.

Rezonans frekansındaki kazanç ise yük değeri dikkate alınmaksızın şu şekilde ifade edilebilir [5],

$$M = \sqrt{\frac{L_p}{L_p - L_r}} = \sqrt{\frac{m}{m - 1}}, w = w_o \quad (2)$$

Burada  $m = L_p/L_r$  olarak belirlenmiştir. Rezonans endüktansı, rezonant kondansatörü ve mıknatıslanma endüktansı aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir [5],

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 C_r} \quad (3)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi Q f_o R_{ac}} \quad (4)$$

$$L_m = L_r (m - 1) \quad (5)$$

Trafonun sarım oranı  $n$  ise [5];

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{in,max}}{2(V_o + V_f)} M \quad (6)$$

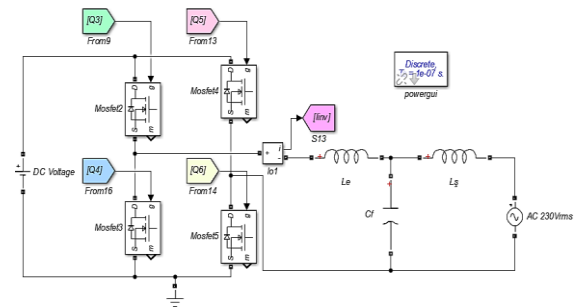
eşitliği ile hesaplanabilir. Eşitlikte  $V_f$  parametresi ikincil tarafta yer alan doğrultucu diyotun gerilim düşümüdür.

Çalışmada OST-80 güneş paneli kullanılacağından güç 80W olarak alınır, DC bara gerilimi aşağıdaki gibi elde edilir [5],

$$V_{DC} = \sqrt{2 \cdot (V_G)^2 - \frac{P_{pv}(1-D)}{C_{DC} \cdot f_L}} \quad (7)$$

### 3. EVİRİCİ TASARIMI

Şebeke etkileşimli eviricilerin tasarımında üçüncü mertebeden filtre olan LCL filtre tipi en çok kullanılmaktadır. Evirici devresinin LCL filtresinin teorik değerlerinin hesaplanabilmesi için bazı parametrelerin belirlenmesi gerekir.



Şekil 5: LCL Evirici Benzetim Devresi.

" $\alpha$ " değişkeni akımın dalgalanma oranı olmak üzere, LCL filtresinin kondansatör değeri aşağıdaki Eşitlik 8 ile hesaplanır [7].

$$\Delta i_{L,max} = \alpha \frac{P_o \sqrt{2}}{V_{ac}} \quad (8)$$

Evirici tarafındaki bobinin endüktansı ( $L_e$ ) değeri Eşitlik 9 yardımıyla bulunur [7].

$$L_e = \frac{V_G}{16 f_s \Delta i_{L,max}} \quad (9)$$

LCL filtrenin kapasitör değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [6].

$$C_f = \frac{\%5 P_o}{2\pi f_{ac} V_{ac}^2} \quad (10)$$

LCL filtrede şebeke tarafındaki bobinin endüktans ( $L_{ac}$ ) değeri hesaplanırken şebeke ile evirici bobinleri arasındaki "r" katsayısından yararlanır [7]. Bu katsayı değeri  $0 < r \leq 1$  aralığındadır. Bu çalışmada  $r = 0.2$  seçilmiştir.

$$L_{ac} = r \cdot L_e \quad (11)$$

Eşitlik (8), (9), (10 ve (11) yardımıyla  $L_e = 2.5$  mH,  $C_f = 450$  nF ve  $L_{ac} = 0,5$  mH olarak hesaplanmıştır. Şebekeye aktarılacak akımın dalga şekli ve fazı önemli olduğu için denetleyici yöntemi olarak akım denetleyicinin kullanılması önemlidir.

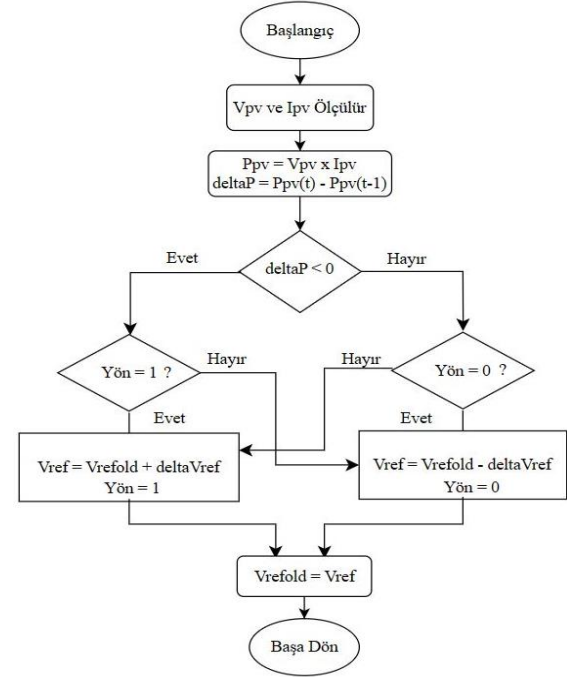
Ayrıca değişkenlerin denetimi için doğrusal, doğrusal olmayan, dayanıklı, adaptif, öngörülü ve akıllı vb. çeşitli denetleyiciler mevcuttur. Doğrusal olanlar, klasik geri bildirim kontrol teorisi ile çözümlenir. Diğer denetleyiciler, iyi bir tepki gösterebilirler de sistem bütününde bir zaman gecikmesi oluşturur. Bu sebeple doğrusal denetleyiciler daha çok tercih edilip doğrusal akım denetleyicileri arasında PI ve PR denetleyiciler en yaygın kullanılanlardır [6].

PI denetleyicisi kullanılarak güneş panelinin çıkış voltajı, değişen voltaj değeri ile karşılaştırılır ve kararlı durum hatası ortadan kaldırılabilir.

#### 4. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME

Çevresel koşulların etkisiyle güneş panellerinin akımı ve gerilimi sürekli olarak değişmekte olduğundan, maksimum çıkış

gücünü takip etmek gereklidir. En yaygın olarak kullanılan Değiştir ve Gözle (P&O) algoritmasında, anlık gerilim  $V_{pv}(t)$  ve akım  $I_{pv}(t)$  ölçülür ve hesaplanan güç  $P_{pv}(t)$ , bir önceki güç olan  $P_{pv}(t-1)$  ile karşılaştırılarak arama adımlarının yönü belirlenir.



Şekil 6: MPPT Algoritması Akış Diyagramı.

PV modülden en yüksek verimi almak için kullanılan Değiştir&Gözle yöntemi Şekil 6'da yer almaktadır. PV gerilimi  $V_{pv}$  ve akımı  $I_{pv}$ , gücü  $P_{pv}$ 'yi hesaplamak için güneş panelinden ölçüm alınır.  $\Delta P < 0$  yönünde ilerlendiğinde  $Yön=1$ , diğer yönden gidildiğinde  $Yön=0$ 'dır.  $Yön$  olarak 1 yönünde ilerlendiğinde "+ $\Delta V_{ref}$ ",  $Yön=0$  ise "- $\Delta V_{ref}$ " ile algoritma belirlenmiştir. Yani, blok gücün önceki değerini mevcut değerle karşılaştırır. Güçteki artış pozitifse referans voltajı değişkeni önceki adım boyutuna göre artırılır. Bu sayede algoritma güç/gerilim eğrisinin maksimum güç noktasından sapmamış olacaktır [12] [13].

## 5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Simülasyon çalışmasında kullanılan OST-80 güneş panelinin Standart Test Koşullarındaki (STK) parametreleri Tablo-1’de verilmiştir. LLC rezonans dönüştürücü anahtarlama frekansını 100 kHz seçilmiştir. Panellerden iki adet seri bağlandığında 36V DC gerilim LLC rezonant dönüştürücü ile 400V DC gerilime yükseltildikten sonra, DC-AC evirici ile 400V DC gerilim şebekenin 230Vrms ve 50Hz gerilimine dönüştürülmüştür.

Tablo 1. OST-80 Modül Parametreleri.

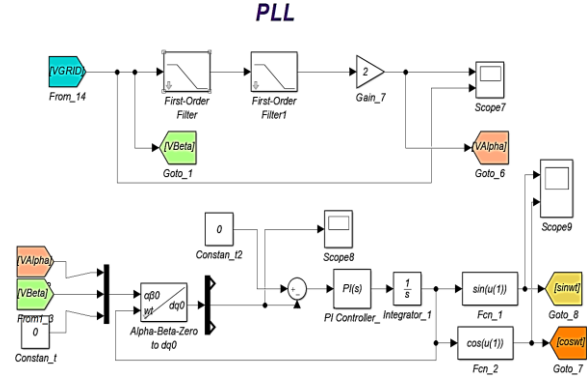
Parametre	Değer (STK)
Maksimum Gerilimi, $V_m$	18V
Maksimum Akımı, $I_m$	4.5A
Maksimum Gücü, $P_m$	80W
Açık Devre Gerilimi, $V_{oc}$	22V
Kısa Devre Akımı, $I_{sc}$	4.9A

STK: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

Güç elektroniği uygulamalarında akım ve gerilim denetleyicileri kullanılmaktadır. Sistemde çıkış akımını istenen seviyede tutmaya yardımcı olması için akım denetleyicisi tercih edilmiştir. Benzer şekilde, yenilenebilir enerji kaynakları uygulamalarındaki gibi kullanılan kaynaklar dalgalı çıkış gerilimlerine sahiptir ve kaynakların güç sistemlerine uyumunu sağlaması gerekir. Bununla birlikte gerilim denetleyici, gerilimi istenen seviyeye sabitleyerek sistem istikrarını sağlar ve aşırı gerilim veya düşük gerilim durumlarını önlemesi için de gerilim denetleyicisi kullanılmıştır. LLC dönüştürücü için her iki denetleyici de PI tercih edilmiştir.

Sinüzoidal çıkış akımı sağlayan eviricide ise daha iyi performans hedeflendiği için PR denetleyici kullanılmıştır.

İkinci aşama için faz kilitlemeli çevrim (PLL) tasarımı yapılmıştır (bkz. Şekil-7). PLL, şebeke geriliminin fazını ve frekansını izlemek için kullanılmaktadır.



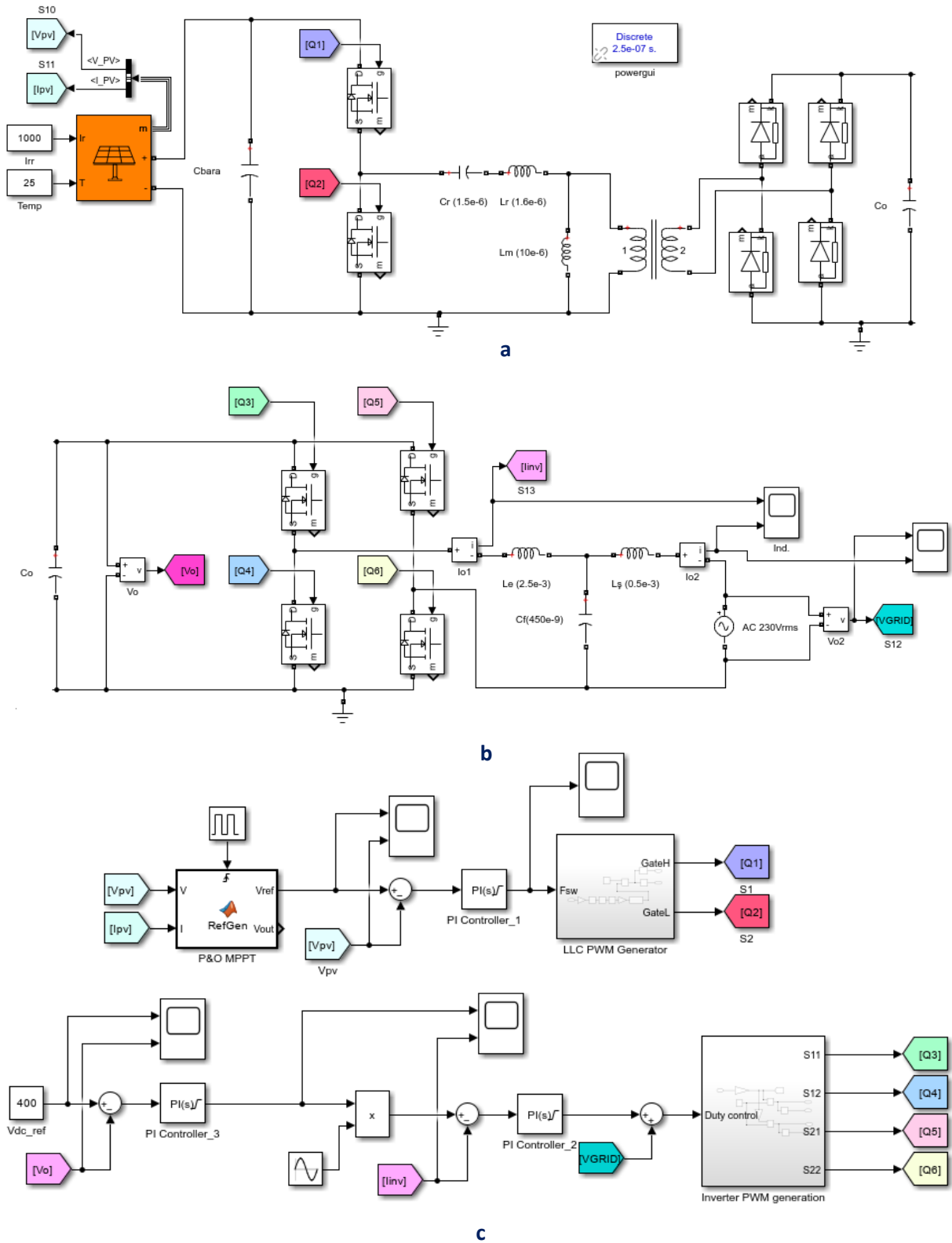
Şekil 7: PLL Devresi.

PLL ile şebeke gerilimine senkron olacak şekilde bir  $\cos(\omega t)$  aktif akım referansı ve  $\sin(\omega t)$  reaktif akım referansı üretilir.

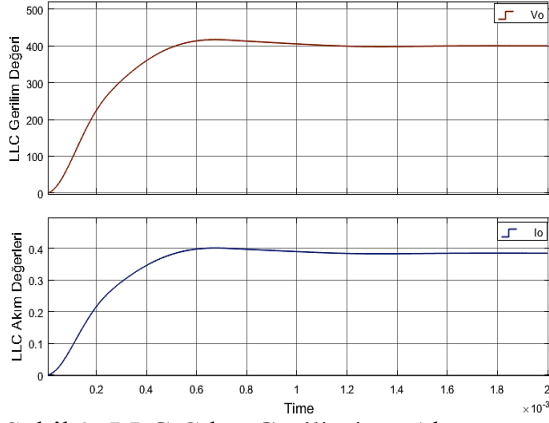
Tablo 2. Mikro-evirici Parametreleri.

Parametre	Değer (STK)
Giriş Gerilimi, $V_G$	36V
DC Bara kondansatörü, $C_{Bara}$	1000 $\mu$ F
Çıkış Gerilimi / Frekansı	230Vrms / 50Hz
LLC Anahtarlama Frekansı, $f_o$	100kHz
Rezonans Endüktansı, $L_r$	1.6 $\mu$ H
Rezonans Kondansatörü, $C_r$	1.5 $\mu$ F
LLC Çıkış Kondansatörü, $C_o$	100 $\mu$ F
Mıknatıslama Endüktansı, $L_m$	10 $\mu$ H
Trafo Sarım Oranı, $n$	0.05
Evirici Frekansı, $f_{ac}$	50kHz
Eviricinin Endüktansı, $L_e$	2.5mH
Eviricinin Kondansatörü, $C_f$	450nF
Şebeke Endüktansı, $L_{ac}$	0.5mH
S1 & S2 MOSFET	İdeal
S3 & S4 & S5 & S6 MOSFET	İdeal
D1 & D2 & D3 & D4 Diyotları	İdeal

Tablo 2’de hesaplanan parametre değerleri benzetim çalışmasında uygulandığında sistem kararlı bir performans göstermektedir. Devrenin son ve toplam görünümüne ise Şekil 8’de ulaşılabilmektedir.

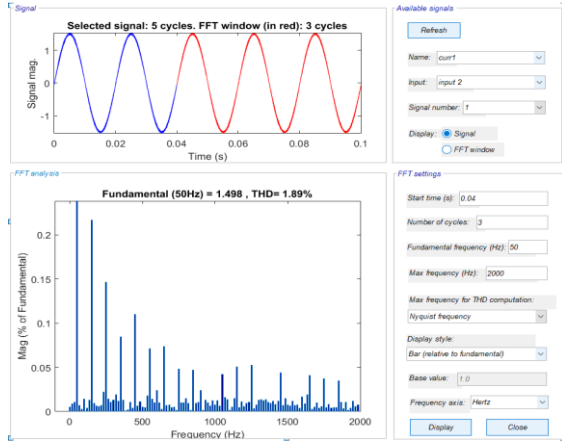


Şekil 8: Mikro-evirici (a) LLC Kısım, (b) Evirici Kısım ve (c) Denetleyici Kısımlarının Benzetimi.



Şekil 9: LLC Çıkış Gerilimi ve Akımı.

Panellerden alınan maksimum güç gerilimi, LLC dönüştürücü ile çıkışta 400V'a yükseltilmiştir. DC-AC eviricinin bu durumda girişten 0.384A akım çektiği görülmektedir.



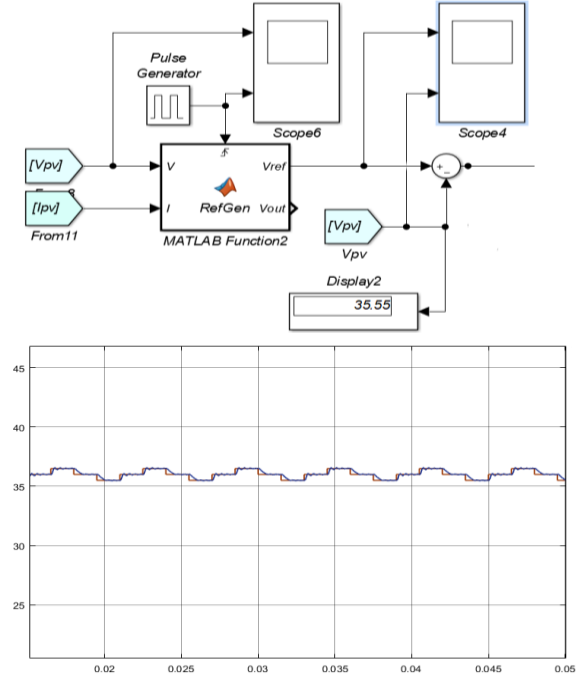
Şekil 10: Evirici Devresinin THD Analizi.

Benzetim sonuçlarına bakıldığında hem şebekeye güç aktarımı gerçekleşecek hem de verimin en yüksek olduğu sistemden dinamik bir çalışma sağlanacak böylece mikro-eviricinin benzetim sonuçları teorik sonuçlar ile desteklenerek tutarlı bir neticeye varılmış olacaktır.

## 6. SONUÇ

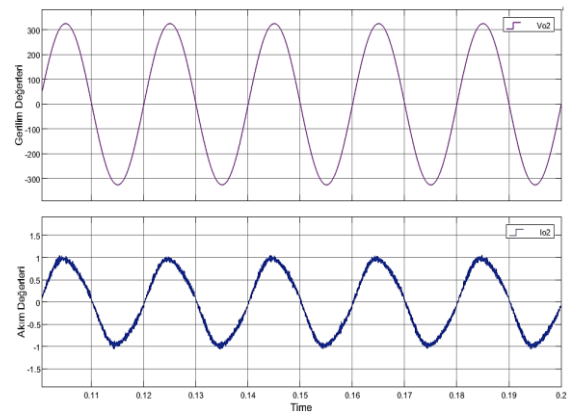
Bu çalışmada fotovoltaik modüller ile şebekeye bağlı LLC dönüştürücü tabanlı bir mikro-evirici tasarımı ve benzetimi sunulmuştur. Tasarımın ana ilkeleri açıklanmış ve tasarım kriterlerine

değinelmiştir. Maksimum güç noktası izleme için Değiştir&Gözle metodu kullanılmıştır.



Şekil 11: MPPT Algoritmasının Scope4'ten Alınan Gerilim Takibi.

160 W güce sahip güneş paneli için tasarımı yapılmış ve teorik hesaplamalar ile benzetim sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Tasarlanan mikro-eviricinin deneysel prototipi üretilerek, ölçüm sonuçlarının alınması ve teorik sonuçlar ile karşılaştırılması sonraki çalışma olarak planlanmaktadır.



Şekil 12: Mikro-eviricinin Şebeke Çıkışındaki Gerilim-Akım Eğrisi.



## KAYNAKLAR:

- [1] Alluhaybi, K., Batarseh, I. ve Hu, H., 2020, "Comprehensive Review and Comparison of Single-Phase Grid-Tied Photovoltaic Microinverters", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8, 1310 – 1329s.
- [2] Başoğlu, M. E. ve Çakır, B., "Investigation of Solar Panel Characteristics and MPPT Performance Under Partial Shading Conditions", *9th International Conference on Electrical*
- [3] El H.M., "Askeri Havacılık Uygulamaları İçin Yüksek Güç Yoğunluklu DA/DA Yarım Köprü Tip Çevirici Tasarımı", Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2016.
- [4] Erickson R.W., "Fundamentals of Power Electronics", 3rd Edition.
- [5] Fairchild. "Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-Series Fairchild Power Switch (FPS™)". <http://www.resonant-converters.eu/fairchild-an.pdf>
- [6] Karafil A, "Pasif seri sönümlenme direncinin LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici üzerine etkisi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 927-934, 2020.
- [7] Karafil A., "Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricide LCL Filtre Parametre Değerlerinin ve Seri Sönümlenme Direnç Değerinin Değişim Etkisi", *EMO Bilimsel Dergi*, 9 Haz. 2020.
- [8] Karafil A., "Yarım Köprü LLC Rezonans Dönüştürücünün Analizi", *2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 135-142s, 2020.
- [9] Nil M., Öztürk, Y. , Özdemir, S. , Sözen, H. ve Nil, M., "Half Bridge LLC Resonance Converter Reliability Analysis for OLED TVs", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 1295-1313s, 2019.
- [10] Yılmaz M., "Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi", *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54 (2012).
- [11] Yılmaz, Ü. ve Kırçay, A., "Elektrikli Araçlarda Batarya Şarj Ünitesi için LLC Rezonans Dönüştürücünün Kurulumu, Modellemesi ve Analizi", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 298-308s, 2021.
- [12] Zengin S., Devenci F. Boztepe M., "Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler İçin Flyback Mikro-evirici Tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 30-36, 2015.
- [13] Zhuang Y., Liu F., Zhang X., Diao X., Jiang J., Sun J. , "Direct Frequency Control Based MPPT Algorithm of LLC Resonant Converter for Photovoltaic System". *IEEE 2019 Energy Conversion Congress and Exposition*