



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi

Analysis of a power inverter design considering the demand characteristics of a house with renewable energy sources

Yazar (Author): Uğur S. SELAMOĞULLARI

ORCID: 0000-0002-2272-4355

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Selamoğulları U.S., “Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 257-265, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.521345

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Sahip Bir Evin Talep Karakteristiğine Uygun Bir İnverter Tasarımının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Uğur S. SELAMOĞULLARI*

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 02.02.2019 ; Kabul/Accepted : 28.03.2019)

ÖZ

Dünyamızın artan enerji gereksinimi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjili güç sistemleri şebekeden bağımsız/şebeke bağlantılı evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evde ihtiyaç duyulan sabit genlik ve frekansa sahip AC gerilimin elde edilmesinde bir evirici (inverter) devre kullanılmaktadır. Bir evin elektrik güç kullanımına ait ölçüm verisi incelendiğinde ev elektrik talebinin gün boyunca değişken olduğu ve büyük bir oranda düşük güçlerde kaldığı görülmüştür. Bu yüzden, böyle bir ev için inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki verimin iyileştirilmesi gereklidir. Bu çalışmada, inverter devresinde kullanılan LC filtre devresinde bulunan indüktör değerinin yük akımına göre değişken olmasının inverter devresinin verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan yöntemle inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanmanın düşürülebildiği ve inverter devresinin düşük güçlerdeki veriminin büyük oranda iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Daha verimli bir inverter devresi ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha etkin bir şekilde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, inverter tasarımı, evsel elektrik güç talebi, verim artışı, değişken filtre indüktansı.

Analysis of a Power Inverter Design Considering the Demand Characteristics of a House With Renewable Energy Sources

ABSTRACT

Increasing energy demand in the world has shifted the interest to renewable energy sources. Specifically, solar and wind power systems for both grid connected and stand-alone homes have become a widespread application. An inverter is used to obtain AC voltage with fixed amplitude and frequency in a renewable energy supplied residential house. When measured residential electrical power demand data is analyzed, it is seen that the demand varies within a wide range during a day and stays at low power levels most of the day. Thus, the light load efficiency of inverter circuit must be improved for residential applications. In this study, the effect of variable inductor use-with reference to the load current- at the inverter LC filter circuit on the inverter light load efficiency is investigated. It is shown that the inverter light load efficiency can be considerably improved due to the reduction of current ripple drawn from the inverter. With more efficient inverter design, the energy from renewable sources can be utilized more efficiently.

Keywords: Renewable energy, inverter design, residential electrical power demand, efficiency improvement, variable filter inductance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

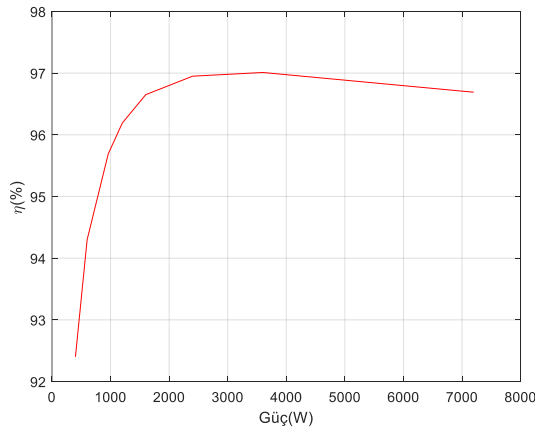
Dünyamızın artan enerji gereksinimi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmış son yıllarda bu alandaki çalışmalarda büyük bir artış olmuştur. Özellikle, güneş ve rüzgar enerjili güç sistemleri hem şebekeden bağımsız hem de şebeke bağlantılı evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir ev dikkate alınmıştır. Evin mümkün olduğunca şebekeden bağımsız olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından beslendiği ancak gereklilik halinde şebeke bağlantısı üzerinden beslenebildiği kabul edilmiştir. Yenilenebilir

enerji kaynaklarından (rüzgar, güneş gibi) elde edilen AC/DC enerjinin, ev için gerekli olan sabit genlik ve frekansa sahip AC gerilime dönüştürülmesinde bir evirici (inverter) devre kullanılmaktadır. İnverter devrelerinde anahtarlama elemanı olarak yarı iletken anahtarlar (IGBT, MOSFET gibi) kullanılmaktadır. İnverter devrelerinde kullanılan bileşenlerin iç dirençleri nedeniyle ortaya çıkan kayıpların yanında yarı iletken anahtarlar ideal olmadıklarından kesim (turn-off), iletim (conduction) ve kapama (turn-on) anlarında da kayıplar ortaya çıkmaktadır. İnverter devresindeki toplam kaybın inverterden çekilen güce göre değişimi lineer olmadığından inverter devrelerinin verimleri yüklenme ile değişkenlik göstermektedir. Tipik bir inverter verim eğrisi Şekil 1'de verilmiştir [1]. Görüldüğü gibi düşük

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : selam@yildiz.edu.tr/ugursavas@yahoo.com

güçlerde verim değerleri de düşük iken yüklenme ile verim artmakta ve belirli bir maksimum yüklenme noktasından sonra verim değeri yine düşüşe geçmektedir.



Şekil 1. Tipik bir inverter devresine ait verim eğrisi (Typical efficiency curve of an inverter)

İnverter devreleri genellikle belirli bir güç aralığında yüksek verime sahip olacak şekilde ve sağlaması gereken maksimum güç değeri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Ancak, bir sonraki bölümde ele alınacağı gibi tekil bir evin elektrik güç talebi geniş bir aralıkta değişmekte ve büyük oranda düşük güçlerde kalmaktadır [1]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir evde kullanılacak inverter devresinin veriminin özellikle düşük güç bölgesinde iyileştirilmesi gereklidir [1]-[3]. Bu amaçla, bu çalışmada evsel güç talebi karakteristiğini dikkate alarak inverter devresinin çıkışında kullanılan LC filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişken olması durumunun inverter devresinin düşük güç bölgesindeki verimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Literatürde değişken L değerinin elde edilmesi ile ilgili pek çok çalışma vardır. Kislovski tarafından yapılan çalışmada değişken indüktörün çalışma prensibi açıklanmıştır [4]. Değişken indüktör, ihtiyaç duyulan indüktans değerinin elde edilmesi için kullanılan sargıya ek olarak bir kontrol sargısının kullanılması ve bu kontrol sargısından geçen DC akımın (DC bias) ayarlanması ile elde edilmektedir [4]-[5]. Perdigao vd. tarafından yapılan çalışmada değişken değerli indüktörlerin ve transformatörlerin aydınlatma devre sürücülerinde kullanımı üzerine kapsamlı bir literatür özeti verilmiştir. Bu çalışmada değişken indüktörün temelleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgi de verilmiştir [6]. Değişken indüktör yükseltici PFC (boost PFC) devrelerin düşük güçlerdeki verimini arttırmaya yönelik uygulamalarda [7]-[8], çok sıralı LED lambalar için dal akımlarının eşitlenmesinde [9]-[10], rezonans anahtarlamalı kondansatörlü LED sürücü devresinde ışık şiddetinin ayarlanmasında [11], tek kademeli LED sürücü devresinde ışık şiddetinin kontrol edilmesinde [12], elektronik balast kontrolünde [13],[14],[15], yüksek frekanslı rezonans güç devrelerinde [16], DC-DC dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama sağlamada [17]-[18], düşürücü (buck) DC-DC dönüştürücü devresinin

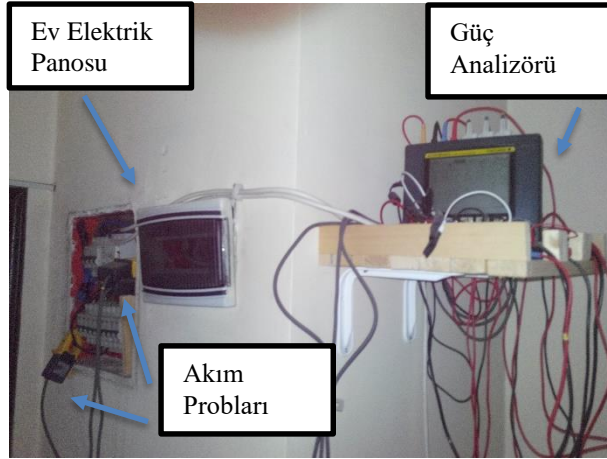
düşük ve orta yüklenme bölgelerindeki veriminin iyileştirilmesinde [19], yüksek güç yoğunluklu çift yönlü DC-DC dönüştürücünün geniş yük aralığında veriminin iyileştirilmesinde [20], elektrik güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında [21]-[22] ve değişken hızlı motor sürücü devrelerinde daha iyi filtreleme ve sürüş etkisi elde etmek amacıyla kullanılmıştır [23]. Ahmed ve diğ. ve Kim ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda DC-DC dönüştürücü devrelerde kullanılan değişken indüktör davranışını elde etmek amacı ile MR (magnetoheological) sıvısının kullanımı incelenmiştir [20], [24]. Stenglein ve diğ. ve Ge ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda sırasıyla basamaklı ve 2D hava aralığı kullanımları ile değişken indüktör davranışının elde edilmesi incelenmiştir [25]-[26]. Perdigao ve diğ. ve Beraki ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda DC bias kullanılarak elde edilen değişken indüktör prototipinin elektrikli araçlarda kullanılan çift yönlü DC-DC dönüştürücülerde kullanımı incelenmiştir [27]-[28]. Değişken indüktör yapısı ile indüktör tasarımında kullanılan nüve malzemesinde %50'ye yakın azalma elde edilirken [27], akım dalgalanmasında yaklaşık %40 azalma elde edilmiştir [28].

Bu çalışmada literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak inverter devresi çıkışında kullanılan LC filtre devresinde yük akımına göre değişen L kullanılmasının inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi üzerine etkisi benzetim çalışması ile incelenmiştir. Böylece, bir evin yük karakteristiğine uygun bir inverter tasarımı elde edilmiştir.

Makalenin ikinci bölümde Türkiye'de 3 kişilik bir ailenin evsel elektrik güç tüketimine ait ölçüm sonuçlarının analizi verilmiştir. Evsel yük karakteristiğinin önemli özelliklerine dikkat çekilmiş ve bu tip bir evde kullanılacak inverter devresinin özellikle düşük güçlerde yüksek verime sahip olması gerekliliği ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde benzetim çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Elde edilen verim eğrileri karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde ölçümden elde edilen yük talebi kullanılarak önerilen inverter tasarımı ile elde edilebilecek enerji kazanım analizi yapılmıştır. Son kısımda sonuçlar verilmiştir.

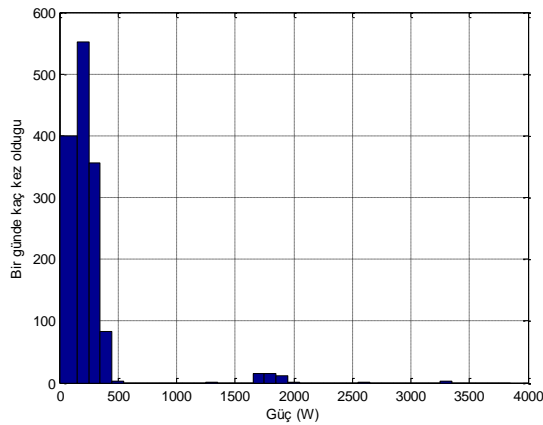
2. EVSEL ELEKTRİK GÜÇ KULLANIMININ ÖLÇÜMÜ (MEASUREMENT OF HOUSEHOLD ELECTRIC POWER USE)

Bir eve ait elektrik güç talebinin değişimini elde etmek amacı ile YOKOGAWA CW240 güç analizörü kullanılarak İstanbul, Türkiye'de yaşayan 3 kişilik üç kişilik bir aileye ait evde Şekil 2'de fotoğrafı verilen ölçüm sistemi kurulmuştur. Ölçüm yapılan evin girişine üç fazlı besleme gelmektedir ve yükler üç faza dağıtılmıştır. Her bir faza ait aktif güç ölçümünü yapabilmek amacı ile 3 adet akım probu kullanılmıştır. Gerilim ölçümleri için her bir faz-nötr gerilimi güç analizörüne doğrudan bağlanmıştır. Evin toplam aktif güç kullanımı her bir faza ait aktif güçlerin toplamıdır.



Şekil 2. Evsel elektrik güç tüketiminin ölçümü için kurulan sistem (Experimental setup to measure residential electrical power consumption)

Şekil 3'te ölçüm sonuçlarından elde edilen bir günlük aktif güç tüketimine ait histogram verilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum güç tüketimi 3.5kW civarında iken güç tüketimi gün boyunca yüksek bir oranda 500W altında kalmaktadır.



Şekil 3. Bir evin günlük elektrik güç talebine ait histogram (Histogram of daily residential electrical power demand)

Çizelge 1'de belirli bir güç aralığındaki evsel elektrik güç talebinin yüzde oranları verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta bir evdeki elektrik güç talebinin 24 saatin yaklaşık 23 saatinde 0-500 W aralığında kalmasıdır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen böyle bir evde kullanılacak inverter devresinin veriminin özellikle düşük güç bölgesinde iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Literatürde bu probleme dikkat çekilmiştir ve hibrit anahtar kullanımına yönelik çözümler önerileri incelenmiştir [1]-[3].

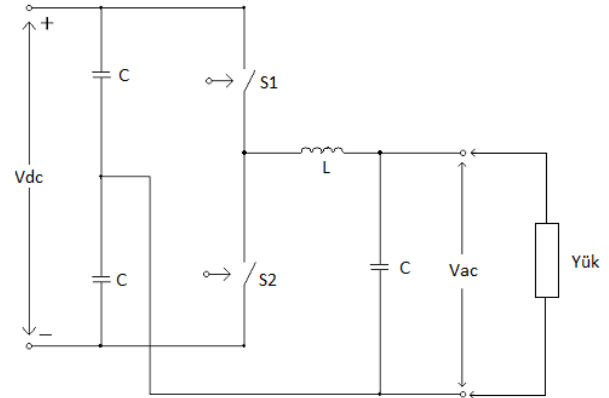
Çizelge 1. Bir evin günlük elektrik güç kullanımının zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzde değerleri (Calculated time and percentage values for different power ranges for daily residential electrical power consumption)

Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüde (%)
$P \leq 100$	4.48	18.68
$100 < P \leq 200$	7.26	30.28
$200 < P \leq 300$	8.13	33.89
$300 < P \leq 400$	2.94	12.29
$400 < P \leq 500$	0.38	1.60
$P > 500$	0.78	3.26

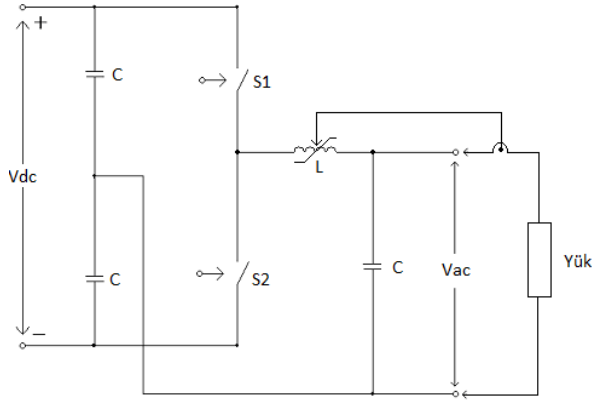
Böyle bir ev için genel olarak her evde bulunan elektrikli cihazların nominal güç değerleri dikkate alınarak elde edilen maksimum yüklenme değeri yaklaşık 10kW olmaktadır [29]. Bir evde bulunan yüksek güç tüketimine sahip yükler rezistif karakteristiğe sahip olduklarından (su ısıtıcısı, ütü, fırın, vb.) yüksek güç kullanım zamanlarında evin toplam güç faktörünün yaklaşık 1 olduğu kabul edilebilir. Bu nedenle, görünür güç yerine aktif güç değeri kullanılmıştır. Dolayısıyla, kullanılacak inverter devresi yaklaşık 10kW maksimum gücü karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ancak, Çizelge 1'den görüldüğü gibi inverter devresi kullanım süresinin büyük bir bölümünde 0-500W aralığında çalışacaktır. Bu nedenle, inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi iyileştirilmelidir.

3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Önerilen yük akımına göre değişen indüktör kullanımının inverter devresinin verimi üzerine etkisini incelemek amacı ile bir yarım köprü inverter devresi kullanılarak hem sabit değerli L durumu için hem de yük akımına göre değişen L durumu için PSIM programı kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Sabit L durumuna ve yük akımına göre değişen L durumuna ait devrelerin blok diyagramları sırasıyla Şekil 4'te ve Şekil 5'te verilmiştir.

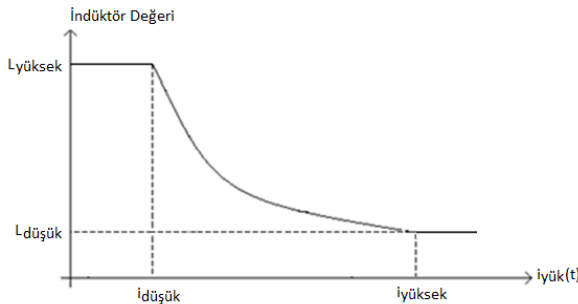


Şekil 4. Sabit L kullanılan filtre devresine sahip yarım köprü inverter devresi (Half bridge inverter circuit with constant filter inductor)



Şekil 5. Yük akımına göre değişen L kullanılan filtre devresine sahip yarı köprü inverter devresi (Half bridge inverter circuit with variable filter inductor with respect to load current)

Önerilen indüktör-yük akımı grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Filtre devresinde kullanılan indüktör değerinin yük akımına göre nonlineer değişimi ile (düşük yük akımlarında yüksek L değerleri) inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma sınırlandırılmış olacaktır, anahtar kayıpları ve devre elemanları iç dirençlerinde oluşan i^2R kayıpları azaltılacaktır. Böylece, inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi önemli oranda iyileştirilebilecektir. Sinüzoidal olarak değişen bir yük akımını düşünüldüğünde, önerilen yöntemde yük akımının düşük değerlerinde yüksek L değeri devrede iken yük akımı tepe değerine yaklaştıkça L değeri küçülmektedir. Benzetim çalışmasında değişken L değerinin yük akımının belirli bir değerine kadar sabit kaldığı, daha sonra üstel bir şekilde azaldığı ve sonrasında yine sabit bir değerde kaldığı kabul edilmiştir. Benzetim çalışmasında $L_{yüksek} = 500\mu\text{H}$, $L_{düşük} = 250\mu\text{H}$, $i_{düşük} = 5\text{A}$, $i_{yüksek} = 10\text{A}$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6. Filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişimi (Variation of L value of filter circuit with respect to load current)

Bir indüktör için herhangi bir zaman aralığında akımın zamana göre değişimi 1'deki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{L} \quad (1)$$

1'den görüldüğü gibi inverter devresindeki anahtarlama frekansı, yük uçlarındaki gerilimin efektif değeri ve DC bara gerilimi belirlendikten sonra incelenen inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma L değerinin değişimi ile kontrol edilebilir hale gelmektedir.

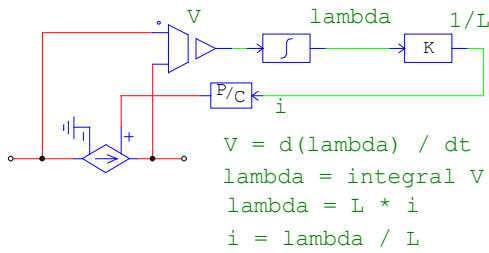
Önerilen yük akımına göre değişken L kullanımının inverter devresinin verimi üzerine etkisini incelemek için özellikle güç elektroniği devrelerinin benzetimi için tasarlanmış PSIM programında yarı köprü inverter devresine ait benzetim çalışmaları yapılmıştır. Anahtarlama frekansı 20 kHz ve ölü zaman $1\mu\text{s}$ olarak alınmıştır. Yarı köprü inverter devresinde 220Vrms çıkış gerilimi elde edebilmek amacı ile DC bara gerilimi 800V olarak seçilmiştir. Böylece, yaklaşık 0.8 modülasyon indeksi kullanılarak 220Vrms çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Sabit L değerli filtre devresindeki elemanların değerleri $L=250\mu\text{H}$ ve $C=10\mu\text{F}$ olarak hesaplanmıştır [30]. Yarı iletken anahtar olarak FGT40N120SMD anahtarına ait PSIM modeli oluşturulmuş ve benzetim çalışmasında kullanılmıştır [31]. Amacımız belli bir çalışma noktasında kararlı hale ulaştıktan sonra verim hesabı olduğundan, benzetim çalışmasında açık çevrim sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu kullanılmıştır. Her bir yüklenme durumu için inverter devresinin çıkışında hem sabit L değerli hem de değişken L değerli çıkış filtresinin bulunması durumları için yük uçlarındaki gerilimin 220Vrms olması sağlanmıştır. Böylece, inverter devresinin çıkış gücünün her bir durum için aynı olması sağlanmıştır.

Bir eve ait güç faktörü de gün boyunca değişiklik göstermektedir. Özellikle düşük güç kullanımının olduğu zaman aralığında (0-500W) en temel yük olarak buzdolabı karşımıza çıkmaktadır. Yapılan ölçümlerde düşük güçlerde güç faktörünün 0.8 civarında olduğu görülmüştür. Ancak, evin günlük güç faktörünün büyük bir zaman aralığında 1 değeri civarında kaldığı görülmüştür. Benzetim çalışmasında güç faktöründeki değişimi dikkate alabilmek amacı ile özellikle düşük güç bölgesinde (0-500W aralığında) güç faktörünün 0.8 olduğu kabul edilmiştir. 500W üzerindeki yüklenmeler için güç faktörü 1 olarak kabul edilmiştir. Güç faktöründeki değişimi elde etmek amacı ile inverter devresinin çıkışında seri bağlı bir RL yükü kullanılmıştır. Güç faktörünün 1 olması durumu için inverter devresinin çıkışında R yükü kullanılmıştır.

Verim hesabında her bir devre için DC bara gerilimi ile DC baradan çekilen akımın çarpımının ortalaması alınarak giriş gücü hesaplanmıştır. Yük tarafında harcanan aktif çıkış gücü yük uçlarındaki gerilim ile yükten geçen akımın anlık çarpımının bir periyot boyunca ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Her bir yüklenme durumu için çıkış gücünün giriş gücüne oranı alınarak verim değerleri elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında yarı iletken anahtar modeli haricindeki tüm elemanlar idealdir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar önerilen değişken indüktör kullanımının yarı iletken anahtar kayıpları üzerindeki etkisini vermektedir. PSIM programında sunulan Device Database Editor vasıtasıyla

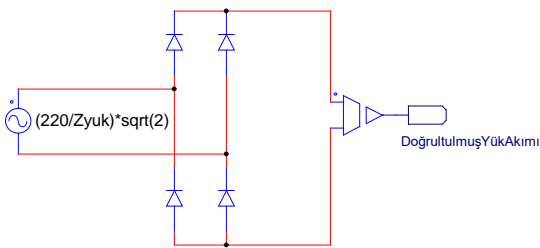
yarı iletken anahtar teknik veri dökümanında verilen V_{ce-I_c} , E_{on-I_c} , E_{off-I_c} , V_d-I_d gibi grafikler kullanılarak modellenilebilmektedir. Böylece, her benzetim adımında yarı iletken anahtardan geçen akım değerine karşılık gelen ilgili değerler grafikler kullanılarak bulunmaktadır. Böylece, yarı iletken anahtar kayıpları gerçeğe en yakın şekilde hesaplanabilmektedir [32].

Benzetim çalışmasında istenilen L değişimini elde edebilmek amacı ile PSIM programında bulunan indüktör modeli kullanılmıştır (Şekil 7). İndüktör bağımlı akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bağımlı akım kaynağının uçlarındaki gerilimin integrali alınarak λ (flux linkage) değeri hesaplanmaktadır. İndüktör akımı ise λ/L formülü ile hesaplanmaktadır.



Şekil 7. Benzetim çalışmasında kullanılan indüktör modeli (Inductor model used in the simulation study)

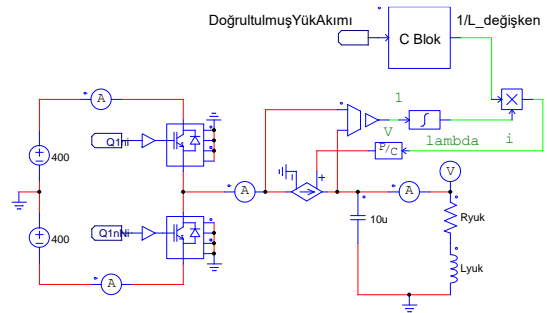
Yük akımı örnekleme için tepe değeri $\sqrt{2} \times 220/Z_{yük}$ olan bir gerilim kaynağı kullanılmıştır (Şekil 8). Yük akımına karşılık gelen bu gerilim bir doğrultucudan geçirilmiş ve elde edilen doğrultulmuş sinüs dalgası bir C blok girişinde kullanılarak Şekil 8'de verilen indüktör modelinde L değerinin yük akımına göre değişimi elde edilmiştir.



Şekil 8. Benzetim çalışmasında kullanılan yük akımı örnekleme devresi (Load current sampling circuit used in the simulation study)

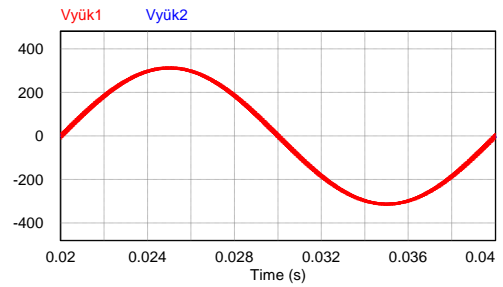
Yük akımına göre değişen indüktör kullanımına ait devre benzetim devresi Şekil 9'da verilmiştir. PSIM programında sunulan C Blok elemanı sayesinde yük akımının belirlenen eşik akım değerleri ile karşılaştırılması C programlama ile kolaylıkla yapılabilmektedir. C blok çıkışında indüktör modelinde kullanılan L değeri elde edilmiştir. L değerinin yük akımına göre değişimini gösterebilmek amacıyla 100W

ve 2000W yüklenme durumları için benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir

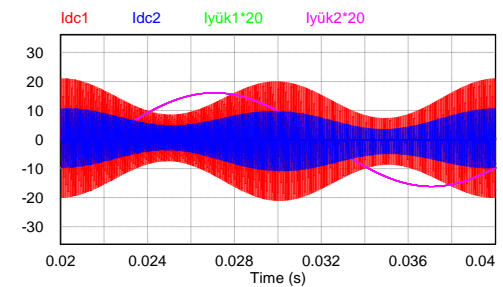


Şekil 9. Benzetim devresine ait şematik (Schematics of the simulation circuit)

Yükün aktif gücünün 100W olması durumu için sabit L ve değişken L durumlarına ait yük uçlarındaki gerilimler, yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları Şekil 10'da verilmiştir. (Buradan itibaren şekillerde 1 indisi sabit L değerli duruma ait grafikleri gösterirken 2 indisi değişken L durumuna ait grafikleri göstermektedir).



(a)

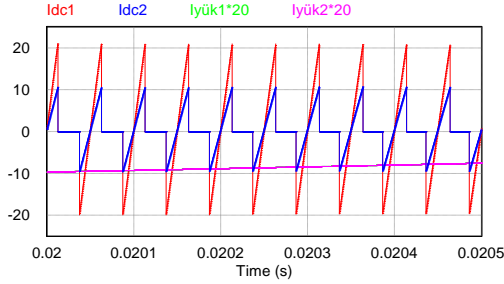


(b)

Şekil 10. 100W yüklenme durumu için (a) yük uçlarındaki gerilimler, (b) yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları ((a) Load voltages for 100W loading, (b) DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 100W loading)

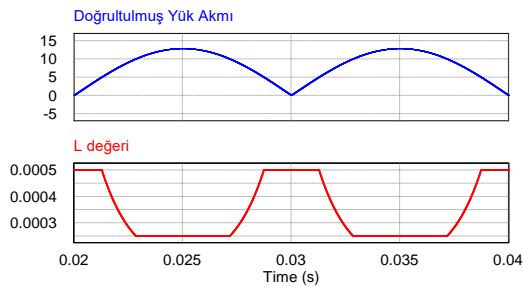
Şekil 11'de yarı köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri verilmiştir. Bu yüklenme

durumunda yük akımının anlık değeri seçilen 5A'lık en düşük eşik akım değerini hiçbir zaman geçmediği için değişken L değeri $500\mu\text{H}$ olarak kalmaktadır. Idc2 akımı değişken L değerinin $500\mu\text{H}$ olduğu duruma ait akımı göstermektedir. Görüldüğü gibi DC kaynaktan çekilen akımın tepe değeri $250\mu\text{H}$ 'lik sabit indüktörlü durumda yaklaşık 20A iken yüksek L değerinin devrede bulunması durumunda yaklaşık 10A'dır.



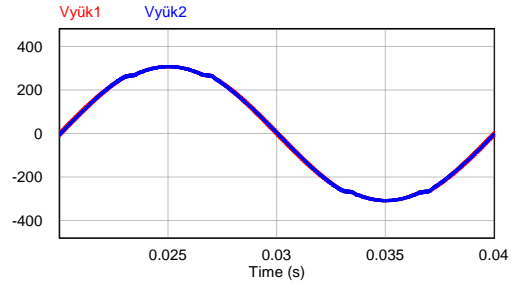
Şekil 11. 100W yüklenme durumu için yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri (20ms-20.05m aralığı) (Detailed views of the DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 200W loading (20ms-20.05ms range))

2000W yüklenme durumunda yük akımının tepe değeri 12.85A olmaktadır. Bu durumda yük akımı 5A olana kadar L değeri $500\mu\text{H}$ olarak kalırken, yük akımının 5-10A aralığında olması durumunda L değeri $500\mu\text{H}$ den exponansiyel olarak $250\mu\text{H}$ değerine düşmektedir. Yük akımının 10A üzerinde olduğu durum için L değeri $250\mu\text{H}$ olmaktadır (Şekil 12).

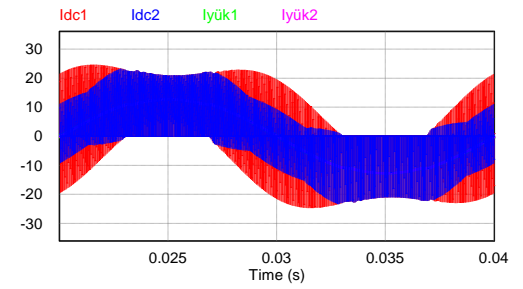


Şekil 12. 2000W yüklenme durumu için indüktör değerinin değişimi (Variation of L value under 2000W loading)

2000W yüklenme durumu için sabit L ve değişken L durumlarına ait yük uçlarındaki gerilimler, yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları Şekil 13'te verilmiştir.



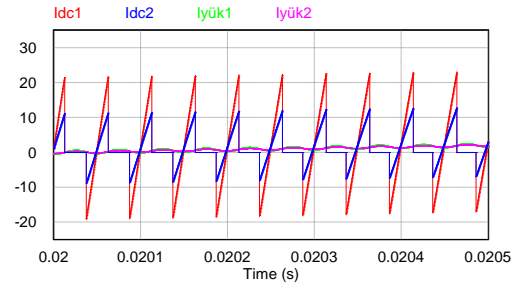
(a)



(b)

Şekil 13. 2000W yüklenme durumu için (a) yük uçlarındaki gerilimler, (b) yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımlar ve yük akımları ((a) Load voltages for 2000W loading, (b) DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 2000W loading)

Şekil 14'te yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri verilmiştir.



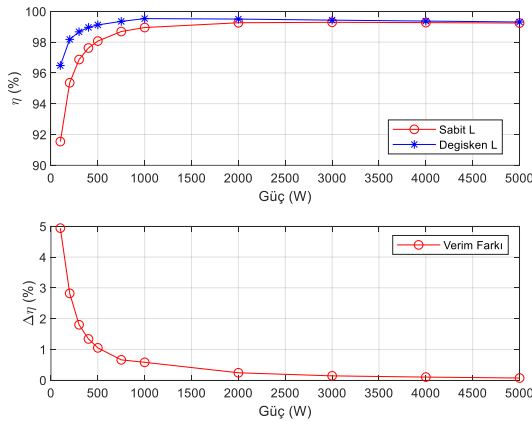
Şekil 14. 2000W yüklenme durumu için yarım köprü inverter devresinde üst tarafta bulunan DC kaynaktan çekilen akımların ve yük akımlarının detaylı gösterimleri (20ms-20.05ms aralığı) (Detailed views of the DC currents from the top DC source of the half bridge inverter circuit and load currents for 2000W loading (20ms-20.50ms range))

Tüm yüklenme durumlarına ait verim değerleri elde edilerek Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çizelge 2'deki veriler kullanılarak elde edilen verim eğrileri ve her bir durum için elde edilen verim kazanımı ($\Delta\eta$) Şekil 15'te verilmiştir.

Çizelge 2. Benzetim çalışmasından elde edilen verim değerleri (Efficiency values obtained from the simulation study)

Güç (W)	Güç Faktörü	Sabit L	Değişken L [L:500µH↔250µH]
100	0.8	91.54	96.48
200	0.8	95.36	98.05
300	0.8	96.87	98.67
400	0.8	97.62	98.96
500	0.8	98.07	99.12
750	1	98.69	99.35
1000	1	98.95	99.53
2000	1	99.26	99.50
3000	1	99.29	99.43
4000	1	98.27	99.37
5000	1	99.24	99.31

Şekil 15'ten görüldüğü gibi inverter çıkışında bulunan filtre devresinde yük akımına göre değişen L kullanımı ile inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki (0-500W aralığında) veriminde önemli oranda artış elde edilmiştir. Evsel elektrik güç talebinin büyük oranda 0-500W aralığında kaldığı düşünüldüğünde önerilen filtre yapısı ile özellikle düşük güçlerde elde edilen verim artışı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha etkin bir şekilde kullanılabilir.



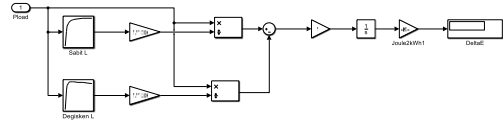
Şekil 15. Verim eğrileri ve elde edilen verim artışı (Efficiency curves and obtained efficiency improvement)

4. ENERJİ ANALİZİ (ENERGY ANALYSIS)

Enerji analizi için şebekeden bağımsız evin en az bir yenilenebilir enerji kaynağına sahip olduğu ve sistemde enerji depolama elamanı olarak batarya grubu bulunduğu kabul edilmiştir. Rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları meteorolojik değişkenlere bağlı çıkış gücü ürettiklerinden böyle bir sistemde şebekeden bağımsız çalışma için bir batarya grubu gereklidir. Analizde batarya grubunun mümkün olduğunca yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden şarj edildiği kabul edilmiştir. Ancak, gerekli durumlarda şebeke üzerinden şarj

işleminin de yapılabildiği kabul edilmiştir. Böyle bir ev üniversitemizde bulunan akıllı şebekeler laboratuvarında bulunmaktadır.

Önerilen yük akımına göre değişken L kullanımı ile inverter devresinin verimindeki artış ile elde edilebilecek enerji kazanımı hesabı için MATLAB/Simulink programında oluşturulan model Şekil 16'da verilmiştir. Bu modelde yük tarafından talep edilen güç sabit L değerli inverter devresinin ve değişken L değerli inverter devresinin verimlerine bölünerek her bir inverter devresinin DC bara tarafındaki güçler hesaplanmaktadır. Daha sonra hesaplanan bu güçler arasındaki farkın integrali alınarak elde edilecek enerji kazanımı hesaplanmaktadır. Yük profili olarak ölçüm sonucu elde edilen günlük güç değerleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında belirli güç değerlerindeki verim değerleri elde edilmiştir. Farklı güç değerlerindeki verim değerlerini bulmak amacıyla MATLAB/Simulink programında 'look-up' tablo kullanılmış ve ara güç değerleri için verim değerleri interpolasyon/extrapolasyon kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 16. Enerji kazanımı analizi için kullanılan MATLAB/Simulink blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram used for energy saving analysis)

Daha verimli inverter devresi ile elde edilen günlük ve yıllık enerji kazanımları Çizelge 3'te verilmiştir. Yaklaşık bir hesap yapıldığından, yıllık enerji kazanımları günlük enerji kazanımı 365 ile çarpılarak bulunmuştur.

Çizelge 3. Daha verimli inverter tasarımı ile elde edilen günlük ve yıllık enerji kazanımları (Daily and yearly energy savings with more efficient inverter design)

Günlük Enerji Kazanımı [kWh/gün]	Yıllık Enerji Kazanımı [kWh/yıl]
0.1271	46.39

Türkiye İstatistik Kurumu tarafından yapılan araştırmada ülkemizdeki hane sayısı 19.481.678, ortalama hanehalkı büyüklüğü ise 3,8 olarak belirlenmiştir. Hanehalklarının %20'si tek katlı binalardaki, %25,5'i 4-5 katlı binalardaki, %23,1'i de 6 ve daha üzeri katlardaki binalardaki konutlarda yaşamaktadır [33]. Buna göre, güneş ve/veya rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kolaylıkla kullanılabilmesi tek katlı bina sayısı 3.896.336 olarak hesaplanmıştır. Bu tek katlı binaların %20'sinde yakıfın gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı kabul edilirse, 779.268 binada önerilen inverter yapısı kullanılabilir. Bu durumda

Çizelge 3'te verilen yıllık enerji kazanımlarını 779.268 ile çarparak toplam enerji kazanımı 36.15GWh olarak bulunur. Dikkate alınan evlerin mümkün olduğunca şebekeden bağımsız bir yapıda çalıştığı kabul edilse de yenilenebilir enerji kaynaklarının meteorolojik koşullara bağlı güç üretimleri nedeni ile evin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin %30'luk kısmının şebekeden alınmak zounda olduğu kabul edildiğinde 36.15GWh'lik enerji kazanımının %30'una karşılık gelen 10.845GWh'lik enerjinin şebeke tarafında üretilmesine gerek kalmayacağı sonucuna ulaşılabilir. Bu hesaplamalarda elde edilen değerler sadece yaklaşık değerlerdir. Amacımız küçük bir değer gibi gözüken günlük enerji kazanımının toplamda önemli bir enerji kazanımı sağlayabileceğini göstermektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir evin bir günlük elektrik güç tüketimi incelendiğinde, güç tüketiminin günün büyük bir zamanında düşük güçlerde (0-500W aralığında) kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, tekil bir evin yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenmesi durumunda DC-AC dönüşümü sağlayan güç inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki veriminin iyileştirilmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada inverter çıkışında kullanılan LC filtre devresindeki L değerinin yük akımına göre değişken olması durumunun inverter devresinin düşük güç bölgesinde verimi üzerine etkisi benzetim tabanlı incelenmiştir. İnverter çıkış filtre devresindeki L değerinin yük akımının küçük değerleri için yüksek değere sahip olması ile inverter devresinden çekilen akımdaki dalgalanma azaltılmakta ve anahtarlama kayıpları düşürülmektedir. Elde edilen sonuçlar 0-500W aralığında inverter devresinin veriminde önemli oranda iyileştirme elde edilebileceğini göstermiştir.

Pratikte bu çalışmada önerilen yük akımına göre değişen L değeri aktif veya pasif tasarımlarla elde edilebilmektedir. Pasif indüktör tasarımında değişken indüktör, kullanılan hava aralığının yapısı ile oynanarak veya hava aralığında farklı manyetik geçirgenliğe sahip malzeme kullanılarak elde edilirken, aktif indüktör tasarımında değişken indüktör bir yardımcı sargı kullanılarak ve bu sargıdan geçen DC bias akımının ayarlanması ile nüvenin B-H eğrisi üzerinde hareket ederek elde edilmektedir. Bu çalışmada ele alınan 500uH-250uH'lik indüktör değişiminin pasif tasarımla elde edilebileceği kabul edilebilir. Bu nedenle, elde edilen verim farkı pratik uygulamada ulaşılacak bir hedef olacaktır. Aktif tasarım kullanılmasında kullanılacak ek sargıda oluşan kayıplar da dikkate alınmalıdır. Ancak, aktif tasarımda indüktör değişimi daha geniş aralıkta elde edilebilecektir. Buna karşılık düşük güçlerde elde edilebilecek verim farkı daha yüksek olacaktır.

Benzetim çalışmasında yarı iletken anahtar modeli haricindeki tüm elamanlar idealdir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar önerilen değişken indüktör kullanımının yarı iletken anahtar kayıpları üzerindeki etkisini vermektedir. Verimdeki değişimin nedeni filtre

devresinde yük akımına göre değişken indüktör kullanımı ile DC baradan çekilen akımın dalgalanmasının sınırlandırılması ile anahtar kayıplarının düşürülmesidir. 0-500W aralığında önerilen yöntemle elde edilen verim değerleri ile filtre devresindeki L değerinin sabit bir değere sahip olması durumundaki verim değerleri karşılaştırıldığında %5-%1 aralığında bir verim artışı elde edilmiştir. Daha verimli bir inverter devresi ile elde edilebilecek yaklaşık enerji kazanımları hesaplanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen ev sayısının artması ile enerji kazanımının katlanarak artacağı gösterilmiştir.

Önerilen yük akımına göre göre değişen L değerinin kullanılması ile sabit anahtarlama frekansında çalışan bir inverter devresinde yüksek anahtarlama frekansı kullanılmış gibi bir etki elde edilmektedir. Yazarın bir sonraki çalışmasında önerilen değişken indüktör tasarımı pratik olarak gerçekleştirilecek ve deneysel çalışma yapılacaktır.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Selamogullari, U.S., "A systems approach for stand-alone residential fuel cell power system design", *Doktora Tezi*, Rensselaer Polytechnic Institute, (2005).
- 2) Selamogullari U.S, Torrey D.A., Salon S. "A Systems Approach fo a Stand-alone Residential Fuel Cell Inverter Design", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25: 741-749, (2010).
- 3) Akca H., Selamogullari U.S., "Hybrid switch use for light load efficiency improvement of a power inverter for stand-alone residential renewable energy system", *15th European Conference on Power Electronics and Applications*, 1-6, (2013).
- 4) Kislovski A. S., "Quasi-Linear Controllable Inductor", *IEEE Proceedings*, 75: 267-271, (1997).
- 5) Medini D., Ben-Yaakov S., A., "Current Controlled Variable-Inductor for High Frequency Resonant Power Circuits", *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, FL , USA, 219-225, (1994).
- 6) Perdigao, M.S., Menke, M.F., Seidel, A.R., Pinto, R.A., Alonso, J.M., "A Review on Variable Inductors and Variable Transformers: Applications to Lightning Devices ", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52: 531-547, (2016).
- 7) Li D., Zhu Z.Q, Qin Y. A., "Novel Variable Reactor and Its Application to Shunt Power Quality Controller", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31: 4148-4158, (2016).
- 8) Vaya, A.K., Parida, T. K., Singh, S.K., "Efficiency Improvement of a Boost PFC Converter using Non-linear Inductor", *International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*, Thrissur, India, 1-6. (2014).
- 9) Alonso J.M., Perdigao M.S., Costa M. A. D., Martinez G., Osorio R., "Analysis and Experiments on a Single-Inductor Half-Bridge LED Driver With Magnetic Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 9179-9190, (2017).
- 10) Pinto R.F., Alonso J.M, Perdigao, M.S., F. da Silva M., N. do Prado R., "A New Technique to Equalize Branch Currents in Multiarray LED Lamps Based on Variable Inductors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52: 521-530, (2016).

- 11) Martins M., Perdigao M.S., Mendes A.M.S., Pinto R.A., Alonso J.M., "Analysis, Design, and Experimentation of a Dimmable Resonant-Switched-Capacitor LED Driver With Variable Inductor Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 3051-3062, (2017).
- 12) Hu Y., Huber L., Jovanovic M.M., "Single-Stage, Universal-Input AC/DC LED Driver With Current-Controlled Variable PFC Boost Inductor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 1579-1590, (2012).
- 13) Alonso J.M., Dalla Costa M. A., Rico-Secades M., Cardesin J., Garcia J., "Investigation of a New Control Strategy for Electronics Ballasts Based on Variable Inductor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(1), 3-10, (2008).
- 14) Perdigao M.S., Saraiva, E.S, Alonso, J.M, Cervi, M., "The Controllable Non-linear Reactor in Electronic Ballasts Applications: A Behavioral Analysis of the Inductance as a Function of both ac and dc Bias Currents", *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padova-Italy, (2008).
- 15) Zhang L., Xia Y., Lu K., Fang Y., Ma J., Pan H., Wang D., "Stress-Based Variable Inductor for Electronic Ballasts", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51: 840504, (2015).
- 16) Gulko M., Medini D., Ben-Yaakov S., "Inductor-controlled current sourcing resonant inverter and its application as a high pressure lamp driver", *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, FL, USA, 434-440, (1994).
- 17) Stadler M., Pforr J., "Feed-forward control of non-linear inductors providing soft switching of DC-DC converters", *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Danimarka, (2007).
- 18) Bakan A. F., "A new LVI assisted PSPWM DC-DC Converter", *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa-Türkiye, 230-233, (2009).
- 19) Wang, L., Pei, Y., Yang, X., Qin, Y., Wang, Z., "Improving Light and Intermediate Load Efficiency of Buck Converters with Planar Nonlinear Inductors and Variable On Time Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 342-353, (2011).
- 20) Ahmed, H.F., Cha, H., Kim, S., Kim, D., Kim, H., "Wide Load Range Efficiency Improvement of a High-Power-Density Bidirectional DC-DC Converter Using an MR Fluid-Gap Inductor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51: 3216-3226, (2015).
- 21) Li D., Zhu Z.Q, Qin Y., "A Novel Variable Reactor and Its Application to Shunt Power Quality Controller", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31: 4148-4158, (2016).
- 22) Nakamura K., Yamada Y., Nono R., Ohinata T., Arimatsu K., Ichinokura O., "A Novel 3-D Concentric-Winding-Type Three-Phase Variable Inductor for Reactive Power Compensation in Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Magnetics*, 53: 2600204, (2017).
- 23) Bao-quan K., Hong-jiang T., Ying-qi L., "Research of Adjustable Inverter Output Filter Based on DC Magnetic Flux Controllable Inductor", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin-China, 1-5. (2008).
- 24) Kim, D., Cha, H., Lee, S., Kim, D., "Characteristic of a Variable Inductor Using Magneto-rheological Fluid for Efficient Power Conversion", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49: 1901-1904, (2013).
- 25) Stenglein, E., Kuebrich, D., Albach, M., "Prediction of the Non-linear Behavior of a Stepped Air Gap Inductor", *IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, Torenheim-Norway, (2016).
- 26) Ge T., Ngo K. D. T., Moss J., "Two-Dimensional Gapping to Reduce Light-Load Loss of Point-of-Load Inductor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32: 540-549, (2017).
- 27) Perdigao, M.S., Trovao, J. P., Alonso J.M., Saravia, E.S., "Large Signal Characterization of Power Inductors in EV Bidirectional DC-DC Converters Focused on Core Size Optimization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62: 3042-3051, (2015).
- 28) Beraki M.W, Trovao J.P.F., Perdigao M.S, Dubois M.R., "Variable Inductor Based Bidirectional DC-DC Converter for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(10): 8764-8772, (2017).
- 29) Elma, O., Selamogullari, U.S., "A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment", *Energy*, 91: 720-731, (2015).
- 30) https://issuu.com/mahmoud66/docs/fuel_cell_inverter_-_10_kw_design_, "2001 Future Energy Challenge, Texas A&M University Fuel Cell Inverter", (01 Ocak 2019).
- 31) <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/FGH40T120SMD-D.PDF>, "FGH40T120SMD teknik doküman", (01 Ocak 2019).
- 32) <http://powersimtech.com/drive/uploads/2017/11/PSIM-User-Manual.pdf>, "PSIM User Manual", (01 Ocak 2019).
- 33) www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=15843, "Türkiye İstatistik Kurumu, Nüfus ve Konut Araştırması", (24 Mayıs 2018).