



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



ZVS LLC rezonans dönüştürücünün farklı çalışma aralıklarının dönüştürücü performansına etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of different operating regions of ZVS LLC resonant converter on the converter performance

Yazar(lar) (Author(s)): Salih NACAR¹, Selim ÖNCÜ²

ORCID¹: 0000-0003-4843-9648

ORCID²: 0000-0001-6432-0634

To cite to this article): Nacar S. ve Öncü S., “ZVS LLC rezonans dönüştürücünün farklı çalışma aralıklarının dönüştürücü performansına etkilerinin incelenmesi”, *Journal of Poltechnic*, 27(1): 109-119, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Nacar S. ve Öncü S., “ZVS LLC rezonans dönüştürücünün farklı çalışma aralıklarının dönüştürücü performansına etkilerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(1): 109-119, (2024).

Erişim linki (To link to this article):

DOI: 10.2339/politeknik.1089364

ZVS LLC Rezonans Dönüştürücünün Farklı Çalışma Aralıklarının Dönüştürücü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

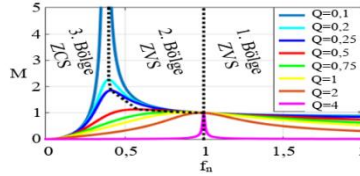
Investigation of the Effects of Different Operating Regions of ZVS LLC Resonant Converter on the Converter Performance

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ ZVS çalışma bölgelerinin dönüştürücü performansına etkilerinin incelenmesi / Investigation of the effects of ZVS operating regions on the converter performance.
- ❖ ZVS çalışma bölgelerinin verim, yumuşak anahtarlama ve anahtar stresleri yönünden karşılaştırılması / Comparison of ZVS operating regions in terms of efficiency, soft switching and switch stresses.
- ❖ ZVS LLC rezonans dönüştürücünün optimum çalışma bölgesi / The optimum operating region of ZVS LLC resonant converter.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Dönüştürücünün farklı çalışma aralıklarının dönüştürücünün çalışma parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu aralıklar verim, yumuşak anahtarlama ve anahtar stresleri yönünden karşılaştırılmıştır. / The effects of the different operating regions of the converter on the operating parameters of the converter are investigated, and these regions are compared from different aspects.



Şekil. Farklı Q değerleri için f_n -M eğrisi / Figure. f_n -M curve for different Q values

Amaç (Aim)

Dönüştürücünün farklı çalışma aralıklarının dönüştürücü çalışma parametrelerine ve performansına etkilerinin ortaya konulması. / To reveal the effects of different operating regions of the converter on the operating parameters and converter performance.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dönüştürücünün ZVS bölgelerinin çalışmaları teorik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. / The operation of ZVS regions of the converter is studied theoretically. The experimental studies are carried out and the results are presented comparatively.

Özgünlük (Originality)

Dönüştürücünün farklı ZVS çalışma bölgelerinin; verim, yumuşak anahtarlama ve anahtar stresleri üzerindeki etkileri deneysel çalışmalarla karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. / The effects of different ZVS operating regions of the converter on the efficiency, soft switching, and switch stresses are revealed comparatively with the experimental studies.

Bulgular (Findings)

Farklı ZVS çalışma bölgelerinde dönüştürücünün birçok çalışma parametresi yanında performansı da etkilenmektedir. / In different ZVS operating regions, the performance of the converter, as well as many operating parameters, is affected.

Sonuç (Conclusion)

Dönüştürücü performansının en iyi olduğu çalışma frekansı, seri rezonans frekansı civarındadır. / The operating frequency at which the converter performance is best is around the series resonant frequency.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

ZVS LLC Rezonans Dönüştürücünün Farklı Çalışma Aralıklarının Dönüştürücü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Salih NACAR^{1*}, Selim ÖNCÜ²

¹Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.03.2022 ; Kabul/Accepted : 13.04.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 25.06.2022)

ÖZ

FM kontrollü ZVS LLC rezonans dönüştürücü, geniş bir giriş gerilim aralığı için yüksek anahtarlama frekanslarında düşük anahtarlama kayıpları ile çalışabilmektedir. Değişen giriş gerilimi ve yüke karşı sabit çıkış gerilimi elde etmek için dönüştürücünün DC gerilim kazancının, dolayısıyla çalışma aralıklarının değiştirilmesi gerekmektedir. Farklı çalışma aralıklarında dönüştürücünün DC gerilim kazancının yanı sıra birçok çalışma parametresi de değişmektedir. Bu çalışmada dönüştürücünün ZVS çalışma aralıkları değişen giriş gerilimine ve yüke karşı sabit çıkış gerilimi için verim, anahtar stresleri ve yumuşak anahtarlama yönünden karşılaştırılmıştır. Giriş gerilim aralığı 80-120 V, nominal giriş gerilimi 100 V ve çıkış gerilimi 8 V olan dönüştürücünün prototip devresi kurulmuştur. Birçok farklı giriş gerilim ve yük değeri için prototip devre üzerinden alınan ölçüm sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Farklı ZVS çalışma aralıklarının dönüştürücünün çalışma parametreleri üzerindeki etkisi birçok yönden ortaya konulmuştur. Ayrıca dönüştürücünün seri rezonans frekansı civarındaki çalışma performansının, bu frekans değerinin uzağındaki çalışma frekanslarına göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LLC rezonans dönüştürücü, ZVS, FM kontrol, yumuşak anahtarlama.

Investigation of the Effects of Different Operating Regions of ZVS LLC Resonant Converter on the Converter Performance

ABSTRACT

FM controlled ZVS LLC resonant converter operates with low switching losses at high switching frequencies for a wide input voltage range. To obtain a constant output voltage against varying input voltage and load, the DC voltage gain of the converter, hence its operating intervals, needs to be changed. In different operating intervals, many operating parameters change besides the DC voltage gain of the converter. In this study, ZVS operating intervals of the converter are compared in terms of efficiency, switch stresses, and soft switching for constant output voltage against varying input voltage and load. The prototype circuit of the converter with the input voltage range of 80-120 V, nominal input voltage of 100 V, and output voltage of 8 V is established. The measurement results obtained from the prototype circuit for much different input voltage and load values are presented comparatively. The effect of different ZVS operating intervals on the operating parameters of the converter is revealed in many ways. Moreover, it is observed that the operating performance of the converter around series resonance frequency is better than the operating frequencies far from this frequency value.

Keywords: LLC resonant converter, ZVS, FM control, soft switching.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

LLC rezonans dönüştürücü batarya şarj, yenilenebilir enerji sistemleri, telekom, veri sunucu, otomotiv, power LED sürücü ve LED TV gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [1-3]. Dönüştürücünün birçok uygulama için tercih edilmesinin nedeni; temel dönüştürücü yapıları olan seri rezonans dönüştürücü (SRC) ve paralel rezonans dönüştürücünün (PRC) aksine daha geniş giriş gerilim ve yük aralıklarında yumuşak anahtarlama şartlarında daha yüksek verimle çalışabilmesidir. Dahası bu dönüştürücü yapısında

çalışma frekansına bağlı olarak kazanç birden büyük veya küçük olabilmekte, yüksüz iken çıkış regüle edilebilmekte ve daha dar frekans aralığında güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. LLC rezonans dönüştürücüde yüksek frekans transformatörünün kaçak ve mıknatıslanma endüktansının rezonans elemanı olarak kullanılması diğer bir avantajdır. Bu avantajlarından dolayı dönüştürücü yüksek anahtarlama frekanslarında (f_s) yüksek verim, düşük elektromanyetik girişim ve yüksek güç yoğunluğu ile çalışabilmektedir [4, 5]. LLC rezonans dönüştürücü üç farklı çalışma aralığına sahiptir. Bu aralıkların ikisinde primer taraftaki anahtarlar sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) şartlarında çalışır iken

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : snacar@bandirma.edu.tr

üçüncü aralıkta sıfır akım anahtarlama (ZCS) şartlarında çalışmaktadır. Ancak dönüştürücünün ZCS çalışma aralığı MOSFET'in kullanıldığı yüksek frekanslı uygulamalar için uygun değildir [5, 6].

ZVS LLC rezonans dönüştürücü ile gerçekleştirilen çalışmalarda çıkış geriliminin değişken veya sabit olduğu uygulamalar bulunmaktadır. Çalışmalarda dönüştürücü tasarımı verimin en yüksek olduğu, anahtarlama ve iletim kayıplarının minimum olduğu seri rezonans frekansına göre yapılmaktadır [7, 8]. Bununla birlikte değişen yük veya giriş gerilimine karşı çıkış gücünü regüle edebilmek için anahtarlama frekansının seri rezonans frekansının sağ veya sol tarafına doğru kaydırılması gerekmektedir. Bunun sonucunda rezonansa dahil olan elemanların yanı sıra anahtarların yumuşak anahtarlama şartları ve akım/gerilim stresleri değişmektedir. Dönüştürücünün değişen çalışma aralığı çalışma parametrelerini etkilediği gibi verimi de etkilemektedir. Dönüştürücünün yükseltici gibi çalıştığı bölgede seri rezonans frekansından uzaklaştıkça rezonans akımı artmaktadır. Bunun sonucunda iletim kayıpları artarken verim azalmaktadır. Dönüştürücünün alçaltıcı olarak çalıştığı bölgede seri rezonans frekansından uzaklaştıkça artan anahtarlama frekansı ile anahtarlama kayıpları artmakta ve verim azalmaktadır. Dolayısıyla ZVS LLC rezonans dönüştürücünün verimine etki eden kayıplar arasında anahtarlama ve iletim kayıpları önemli bir yer tutmaktadır [9-11].

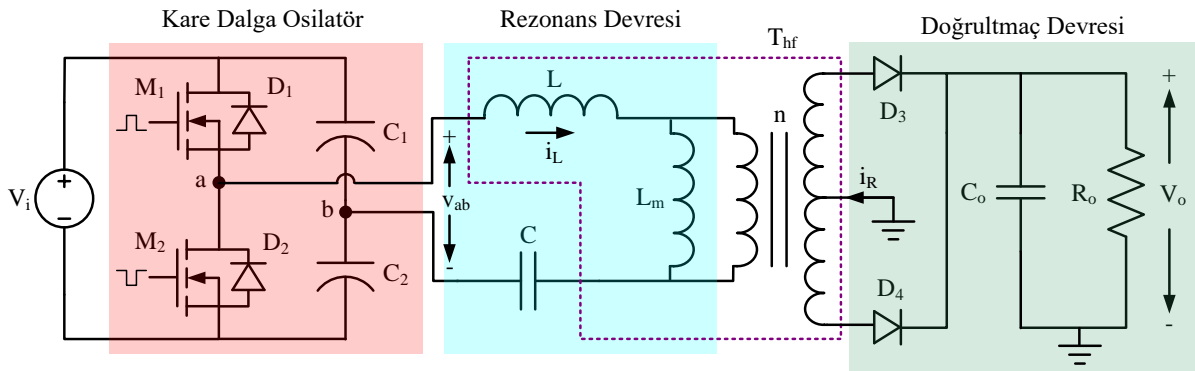
LLC rezonans dönüştürücünün ZVS çalışma aralıklarının ve bu çalışma aralıklarında dönüştürücü veriminin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan [6, 12, 13]'de giriş ve çıkış gerilimi sabit iken farklı çıkış güç değerleri için dönüştürücü veriminin değişimi sunulmuştur. Batarya şarj uygulamasının gerçekleştirildiği çalışmalar [14, 15]'de sabit giriş gerilimi ve değişken çıkış gerilimi veya akımı için dönüştürücü verim eğrileri paylaşılmıştır. Çalışma [5, 16]'da simülasyon programları kullanılarak sabit giriş gerilimi ve değişken çıkış gerilimi veya akımı için farklı çıkış güç değerlerine göre dönüştürücünün verim değerleri sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmalarda dönüştürücünün ZVS çalışma aralıklarının avantaj ve

dezavantajları ortaya konulmakta ve en yüksek verim değerlerinin seri rezonans frekansı civarında elde edildiği vurgulanmaktadır. LLC rezonans dönüştürücünün giriş enerji kaynağı, şebeke beslemeli DC kaynaklar veya rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen DC gerilim olabilmektedir. LLC rezonans dönüştürücü, çalışma [17] ve [18]'de sıra ile rüzgar tribünü ve güneş paneli için maksimum güç noktası izleyici (MPPT) olarak kullanılmıştır. Çalışma [17]'de MPPT olarak kullanılmak üzere aralarında LLC rezonans dönüştürücüsünde olduğu üç farklı dönüştürücü yapısı, farklı güç değerleri için verim yönünden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi sonucunda en yüksek verim değerinin LLC rezonans dönüştürücü ile elde edildiği verim-güç grafiği ile ortaya konulmuştur. Yukarıda değinilen çalışmalardan anlaşılacağı üzere LLC rezonans dönüştürücü, giriş enerji kaynağının doğrusal olmadığı gibi yükünde doğrusal olmadığı uygulamalarda [2, 14, 15] etkin ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada dönüştürücünün ZVS çalışma aralıkları değişen giriş gerilimi ve yük için verim, yumuşak anahtarlama ve anahtar stresleri yönünden incelenmiştir. Dahası dönüştürücünün prototipi laboratuvar ortamında kurulmuş ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Dönüştürücünün tasarımı nominal giriş geriliminde 8 V çıkış verecek şekilde seri rezonans frekansına göre gerçekleştirilmiştir. Birçok farklı yük değeri dönüştürücüye uygulanmıştır. Değişen giriş gerilimi ve yük için dönüştürücü çıkış gerilimi açık çevrimli bir şekilde kontrol edilmiştir. Farklı giriş gerilimi ve yük değeri için deneysel çalışmalar tekrarlanmış ve prototip devre üzerinden alınan ölçüm sonuçları grafikler ile karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

2. LLC REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ (LLC RESONANT CONVERTER)

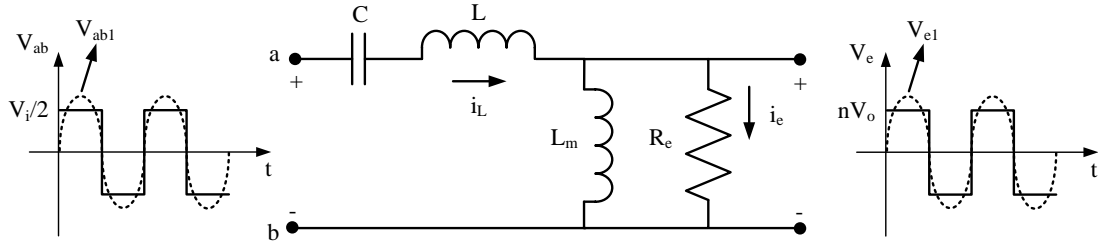
Şekil 1'de devre yapısı verilen LLC rezonans dönüştürücü genel olarak osilatör, rezonans ve doğrultmaç devresinden oluşmaktadır



Şekil 1. LLC rezonans dönüştürücü (LLC resonant converter)

LLC rezonans dönüştürücü temel rezonans dönüştürücü yapılarından biri olan SRC'ye benzer bir yapıdır. Bununla birlikte haricen rezonans bobini ilave

Dönüştürücünün normalize frekansa ($f_n=f_s/f_{sr}$) göre DC gerilim kazanç eğrisi Eşitlik 5 kullanılarak farklı Q değerleri için çizdirilmiş ve Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Dönüştürücünün eşdeğer devresi (The equivalent circuit of the converter)

edilmeyerek yüksek frekans transformatörünün (T_{hf}) kaçak endüktansı ve diğer kaçak endüktansların toplamı rezonans bobini (L) olarak kullanılmaktadır. Ayrıca transformatörün mıknatıslanma endüktansının (L_m) rezonans devresine dahil olduğu çalışma aralığına sahiptir.

2.1. Dönüştürücünün Eşdeğer Devresi (The Equivalent Circuit of the Converter)

LLC rezonans dönüştürücünün analizinde özellikle seri rezonans frekansına (f_{sr}) yakın frekanslarda oldukça doğru sonuçlar veren ilk harmonik yaklaşımı (FHA) sıkça kullanılmaktadır [16]. FHA tekniğinde yalnızca evirici geriliminin (v_{ab}) temel bileşeninin güç aktarımı yaptığı kabul edilmektedir. Böylece doğrusal ve sinüzoidal olmayan dönüştürücü devre yapısı doğrusal ve sinüzoidal bir devre yapısına dönüştürülmektedir. Dönüştürücünün FHA analizinde kullanılan eş değer devre Şekil 2'de verildiği gibidir.

Dönüştürücünün L ve L_m endüktanslarından dolayı iki farklı rezonans frekansı ortaya çıkmaktadır. Bu frekanslardan seri rezonans frekansı (f_{sr}) L ve C tarafından oluşturulur iken paralel rezonans frekansı (f_{pr}) $L+L_m$ ve C tarafından oluşturulmaktadır. f_{sr} ve f_{pr} frekans eşitlikleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verildiği gibidir.

$$f_{sr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$f_{pr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_m)C}} \quad (2)$$

Devrenin kalite faktörü Q Eşitlik 3'de verilmiştir.

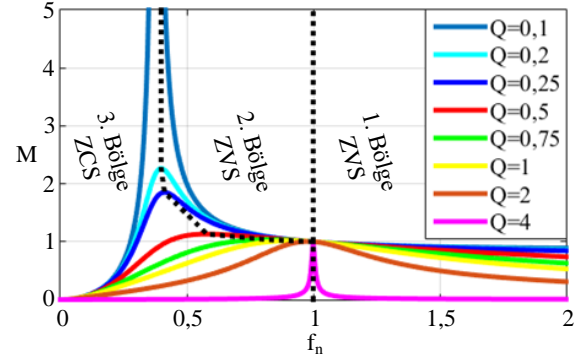
$$Q = \frac{\omega_{sr}L}{R_e} \quad (3)$$

Eşitlikteki R_e direnci çıkış geriliminin temel bileşeninin primer tarafa yansıtılması ile elde edilmiş ve Eşitlik 4'de verilmiştir.

$$R_e = \frac{V_{e1}}{I_e} = \frac{4nV_o}{\pi I_o} = \frac{8n^2V_o}{\pi^2 I_o} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o \quad (4)$$

Eşdeğer devrenin transfer fonksiyonu dolayısıyla DC gerilim kazancı (M) Eşitlik 5'de verildiği gibidir.

$$M = \frac{V_{e1}}{V_{ab1}} = \frac{4nV_o}{4V_{in}} = \frac{V_o n}{V_{in}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{X_L - X_C}{X_m}\right)^2\right) + \left(\frac{X_C - X_L}{R_e}\right)^2}} \quad (5)$$

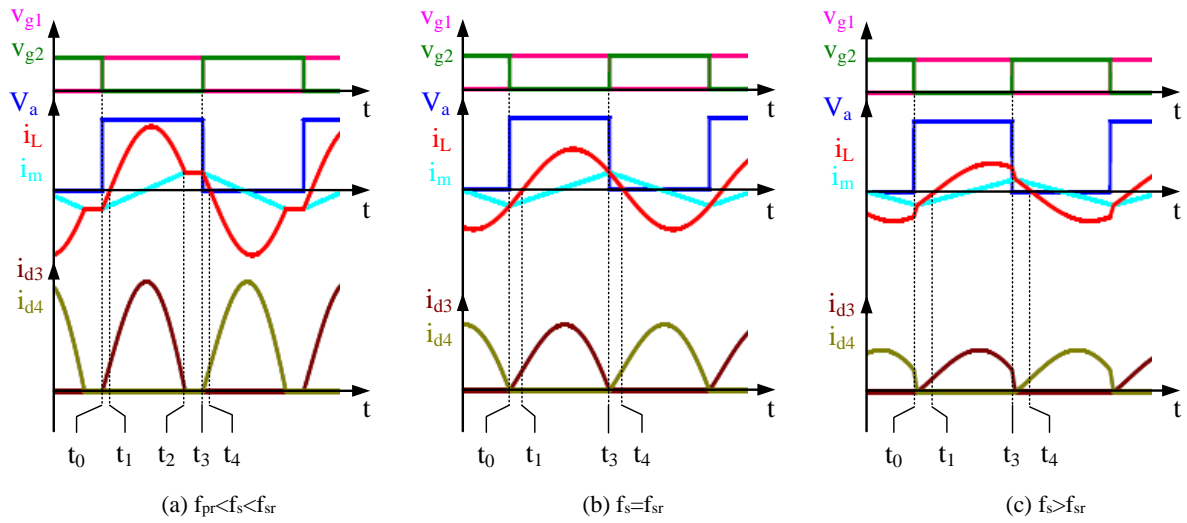


Şekil 3. Farklı Q değerleri için f_n -M eğrisi (f_n -M curve for the different Q values)

Dönüştürücünün 3 farklı çalışma aralığı olmakla birlikte kapasitif bölge olan ZCS MOSFET'in kullanıldığı yüksek frekanslı uygulamalar için uygun değildir [5, 6]. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen bölümlerinde endüktif bölgeler olan 1. ve 2. bölgenin çalışma aralıkları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda bu bölgeler verim, anahtar stresleri ve yumuşak anahtarlama yönünden karşılaştırılmıştır.

2.2. Dönüştürücünün Çalışma Aralıkları (The Operating Intervals of the Converter)

Dönüştürücünün ZVS çalışma bölgesine ait farklı çalışma aralıkları ($f_{pr} < f_s < f_{sr}$, $f_s = f_{sr}$, $f_s > f_{sr}$) için dalga şekilleri Şekil 4'de verilmiştir. Rezonans devresinin empedansının sıfırlandığı $f_s = f_{sr}$ için rezonans akımı saf bir sinüs şeklindedir. Seri rezonans frekansında ($X_L = X_C$ veya $\vec{V}_L + \vec{V}_C = 0V$) girişten çıkışa doğru herhangi bir zorluk gösterilmeden güç akışı sağlanmaktadır. Seri rezonans frekansında dönüştürücünün DC gerilim kazancının yükten bağımsız olması bu çalışma noktasını yüksek verim ve tasarım kriteri için uygun kılmaktadır. Bu noktadan uzaklaşıldığında seri rezonans empedansı sıfırdan farklı olduğundan dönüştürücünün çalışması yüke bağlı olmaktadır [19].



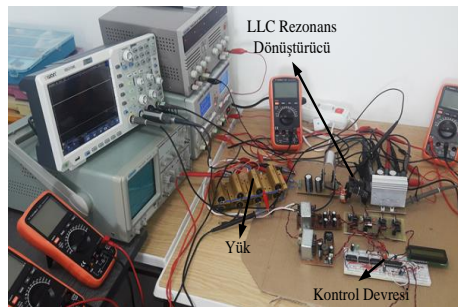
Şekil 4. ZVS çalışma bölgesinin farklı çalışma aralıkları (The different operating intervals of ZVS operating region)

Dönüştürücünün $f_s = f_{sr}$ ve $f_s > f_{sr}$ için çalışması SRC ile benzerdir. Bu çalışma durumları için rezonans elemanları L ve C rezonans'a dahil olmaktadır. $f_s = f_{sr}$ çalışma durumu için tüm anahtarların yumuşak anahtarlama şartları sağlanmakla birlikte rezonans akımının tepe değeri de düşüktür. $f_s > f_{sr}$ çalışma durumu için dönüştürücü alçaltıcı gibi çalışmakta ve rezonans akımı da yüke bağlı olmaktadır. MOSFETlerin ZVS şartları sağlanmakta ancak sekonder taraftaki doğrultma diyotlarının ZCS şartları kaybolmaktadır. $f_{pr} < f_s < f_{sr}$ çalışma aralığında SRC'de bulunmayan çalışma aralığı olan $t_2 - t_3$ aralığı bulunmaktadır. Bu çalışma aralığında L_m rezonansa dahil olmaktadır. Bu çalışma aralığı esasında LLC rezonans dönüştürücüyü SRC'den ayırmaktadır. L_m 'nin rezonansa dahil olmasıyla birlikte dönüştürücü bu bölgede yükseltici gibi çalışmaktadır. Rezonans akımının tepe değeri bu çalışma aralığında yüksek olsa da yüke bağlıdır. Sekonder taraftaki doğrultma diyotların ZCS şartları da karşılanmakta ve bütün anahtarlar yumuşak anahtarlama şartlarında çalışmaktadır.

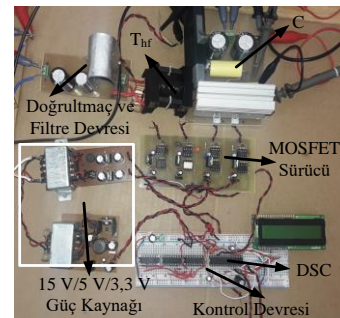
Dönüştürücünün f_{sr} frekansında çalışmasının yüksek verim ve yükten bağımsız olması gibi avantajları olsa da giriş gerilimindeki değişimlere karşın DC gerilim kazancı da değişmektedir. Dolayısıyla dönüştürücünün çıkışını regüle etmek için anahtarlama frekansının 1. bölgeye veya 2. bölgeye doğru kaydırılması gerekmektedir. Dönüştürücünün yükseltici gibi çalıştığı 2. bölgenin çalışması 1. bölgeye göre daha karmaşıktır. Bununla birlikte 2. bölgedeki dar bir frekans değişimi ile DC gerilim kazancı daha geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu durum 2. bölgeyi geniş giriş ve çıkış uygulamaları için uygun hale getirmektedir [13, 15].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (THE EXPERIMENTAL STUDIES)

Şekil 5a'da verilen deney düzeneği LLC rezonans dönüştürücünün ZVS çalışma aralıklarının karşılaştırılması için kurulmuştur. Dönüştürücü ve kontrol devresi tek bir board üzerinde Şekil 5b'de verilmiştir. Güç anahtarlarının kontrol sinyallerinin üretilmesi için dspic33fj16gs502 sayısal sinyal denetleyicisinin (DSC) hızlı PWM modülü kullanılmıştır.



(a) Deney düzeneği



(b) Dönüştürücü devresi

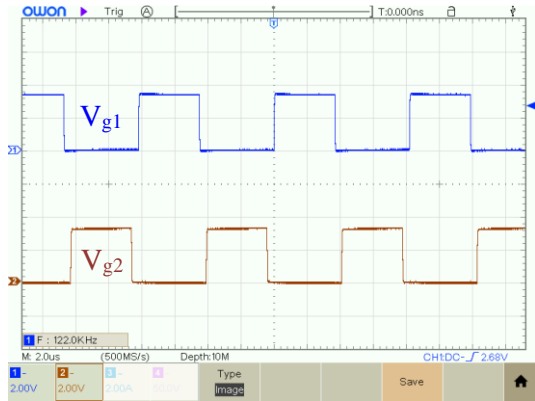
Şekil 5. Deney düzeneği ve dönüştürücü devresi (The experimental setup and converter circuit)

Dönüştürücünün çıkış yükü, 100 W - 10 Ω dirençlerden 8 tanesinin kullanılması ile elde edilmiştir. Dönüştürücünün çalışma parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

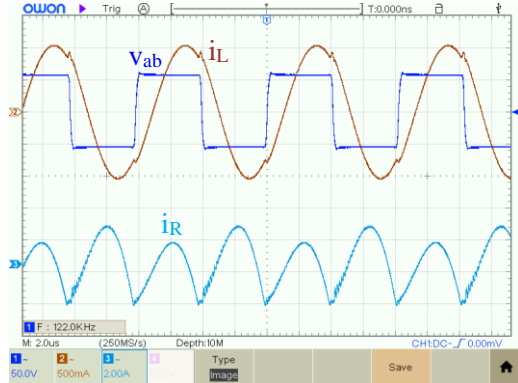
Çizelge 1. Dönüştürücünün çalışma parametreleri (The operating parameters of the converter)

V_i	80-120 V	C	50 nF
V_o	8 V	f_{sr}	121,89 kHz
P_o	55 W	C_o	1000 μ F
n	20:3	C_{1-2}	470 μ F
L	34,1 μ H	M_{1-2}	IRFP260N
L_m	78,63 μ H	D_{3-4}	DSSK 30-0045A

Yüksek frekans transformatörünün (T_{hf}) imalatında 3C90 ETD29/16/10 kullanılmıştır. Transformatörünün primer ve sekonder sargıları yan yana ve aralarında yeterince boşluk olacak şekilde sarılmıştır. 100 V nominal giriş gerilimi, 8 V çıkış gerilimi ve 3,26 Ω 'luk nominal yük değeri için dönüştürücünün çıkış gücü 19,62 W'tır. Nominal çalışma şartları için Şekil 6a'da dönüştürücünün güç anahtarlarının kontrol sinyallerinin ve Şekil 6b'de doğrultma diyotlarının akım (i_R), evirici gerilim (v_{ab}) ve akım (i_L) dalga şekilleri verilmiştir. Rezonans akımının ölçülmesinde Tektronix 011-0105-00 AC akım probu kullanılmıştır. i_R akımının ölçülmesinde AC akım probu ile kalibre edilmiş 1:100 oranında ve çıkışında 100 Ω olan ferrit nüve kullanılmıştır.



(a) Güç anahtarlarının kontrol sinyalleri



(b) Doğrultma diyotlarının akımı, evirici gerilim ve akımı

Şekil 6. 100 V giriş gerilimi, 8 V çıkış gerilimi ve 3,26 Ω nominal yük değeri için dönüştürücü dalga şekilleri (The converter waveforms for input voltage 100 V, output voltage 8 V and nominal load 3.26 Ω)

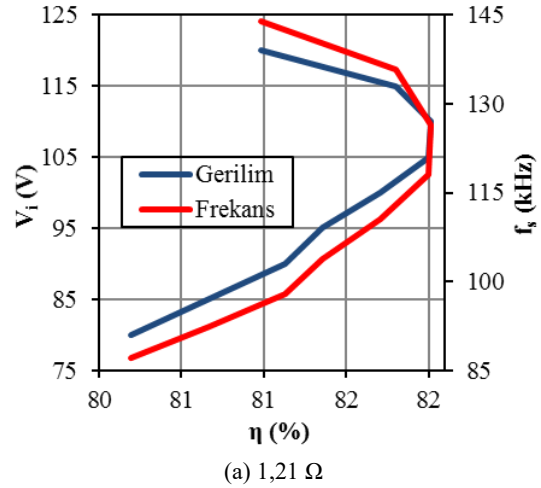
Şekil 6a'dan da görüleceği üzere anahtarlar arasında kısa devreyi önlemek için yeterince ölü zaman bırakılmıştır. Şekil 6b'de verilen dalga şekillerinden primer taraftaki güç anahtarlarının ZVS ile iletme geçtiği ve sekonder taraftaki doğrultma diyotlarının ZCS şartlarında çalıştığı görülmektedir.

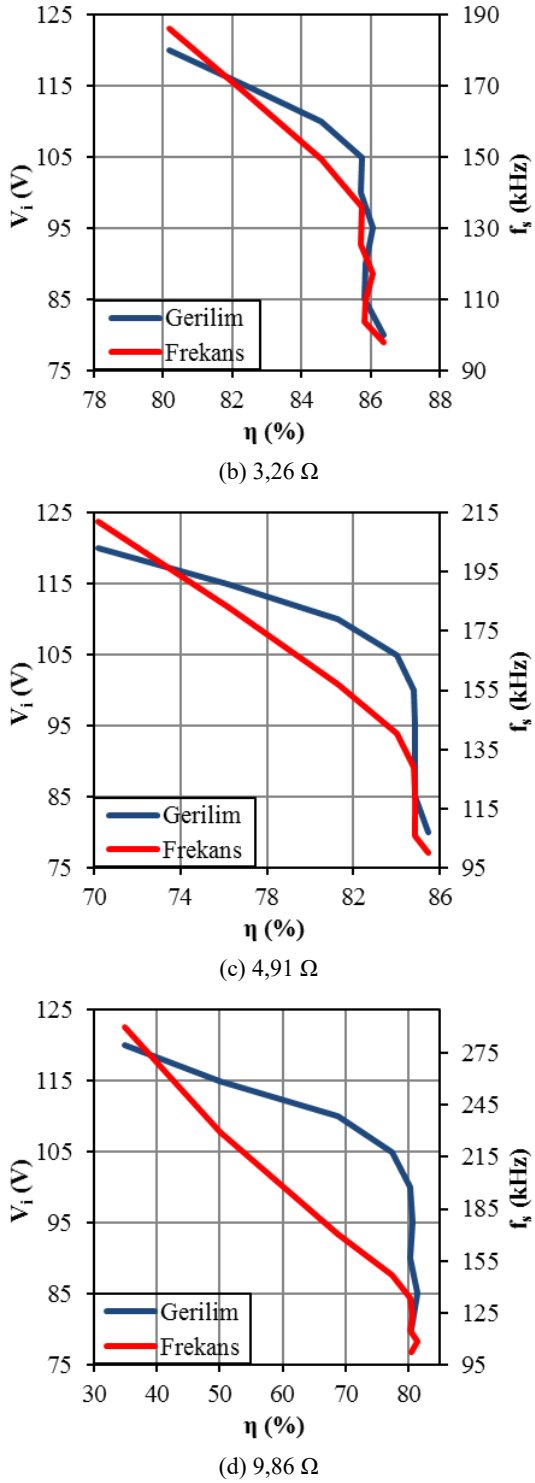
3.1. Farklı Giriş Gerilimi ve Yük Değerleri için Test Sonuçları (The Test Results for Different Input Voltage and Load Values)

Dönüştürücünün ZVS çalışma aralıklarını verim, yumuşak anahtarlama ve anahtar stresleri yönünden karşılaştırmak için çıkış yükü 1,21 Ω , 3,26 Ω , 4,91 Ω ve 9,86 Ω olarak seçilmiştir. Giriş gerilimi 120 V'tan 80 V'a kadar 5 V aralıklar ile azaltılmış ve dönüştürücüye uygulanmıştır. Dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilim/akım değerleri her bir yük için multimetre ile ölçülmüştür. Dönüştürücünün verimi (η); çıkış gücünün ($V_o I_o$), giriş gücüne ($V_i I_i$) bölünmesi ile elde edilmiştir. Değişen giriş gerilimi ve yüke karşı sabit çıkış gerilimi için gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre dönüştürücünün çıkış gücü 1,21 Ω için 52,86 W iken 9,86 Ω için 6,5 W'tır. Bu güç değerlerinin belirtilen şartlarda elde edilmesi için anahtarlama frekansının minimum değeri 87,11 kHz iken maksimum değeri 290 kHz'dir. Dönüştürücü üzerinden alınan ölçümler çalışmanın ilerleyen bölümlerinde grafikler ile ifade edilerek karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

3.2. Giriş Gerilimi-Verim-Frekans Değişimi (The Input Voltage-Efficiency-Frequency Variation)

Şekil 7'de her bir yük ve değişen giriş gerilimi için giriş gerilimi-verim-frekans eğrileri verilmiştir.





Şekil 7. Farklı yük değerleri için giriş gerilimi-verim-frekans eğrisi (Input voltage-efficiency- frequency curve for different load values)

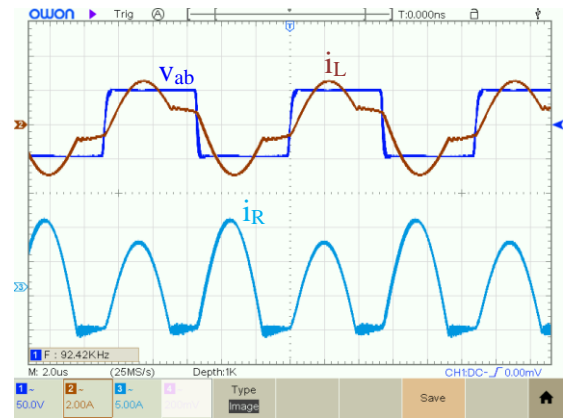
Şekil 7’de verilen eğrilerden genel olarak her bir yük için seri rezonans frekansı civarında dönüştürücü veriminin diğer çalışma frekans değerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Dahası yüksek giriş gerilim değerlerinde yük direncindeki artışla birlikte verimdeki düşüş artmaktadır. Bunun nedeni artan anahtarlama frekansı ile artan anahtarlama kayıplarıdır. Bununla birlikte tersi

durumda yani düşük giriş gerilim değerlerinde yük direncindeki azalmayla birlikte verimdeki düşüş çok fazla değildir.

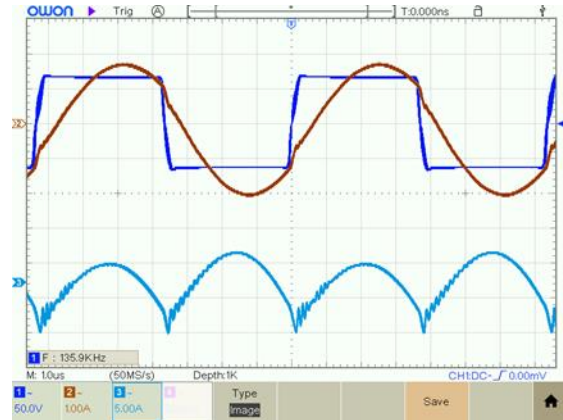
3.3. Güç Anahtarlarının Akım/Gerilim Stres

Değişimi (The Current/Voltage Stress Variation of Power Switches)

Farklı giriş gerilimi, yük ve çalışma bölgesi için doğrultma diyotlarının akım, evirici gerilim ve akım dalga şekilleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’den dönüştürücünün güç anahtarlarının akım ve gerilim streslerinin değişen giriş gerilimi ve yüke karşı değiştiği görülmektedir.



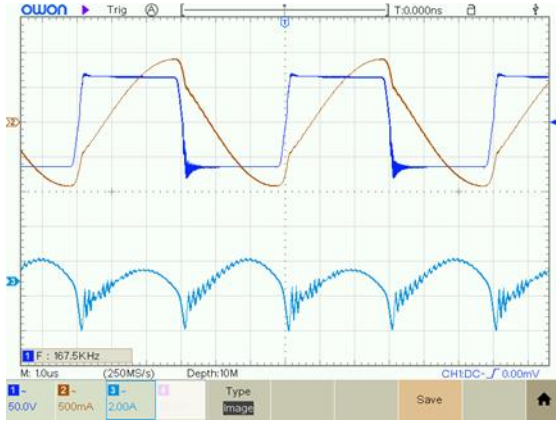
(a) $V_i = 85 \text{ V}$ ve $R_o = 1,21 \Omega$



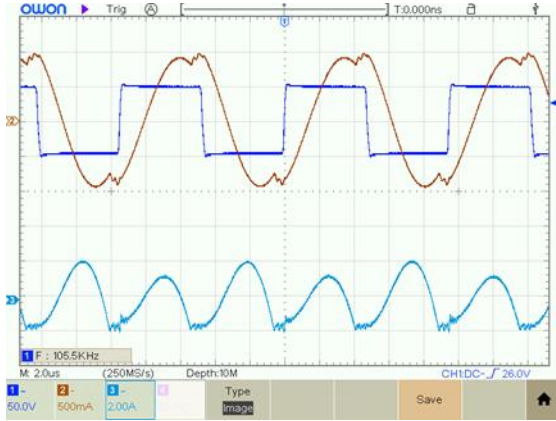
(b) $V_i = 115 \text{ V}$ ve $R_o = 1,21 \Omega$



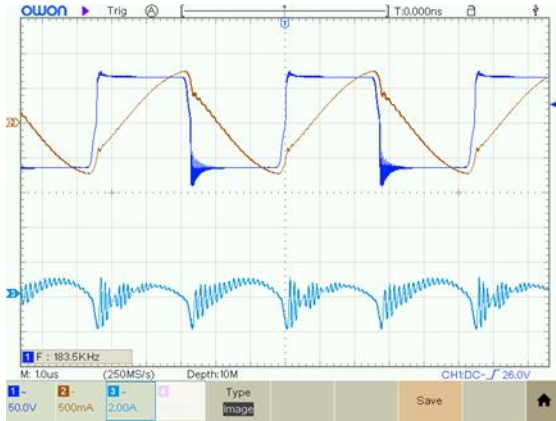
(c) $V_i = 85 \text{ V}$ ve $R_o = 3,26 \Omega$



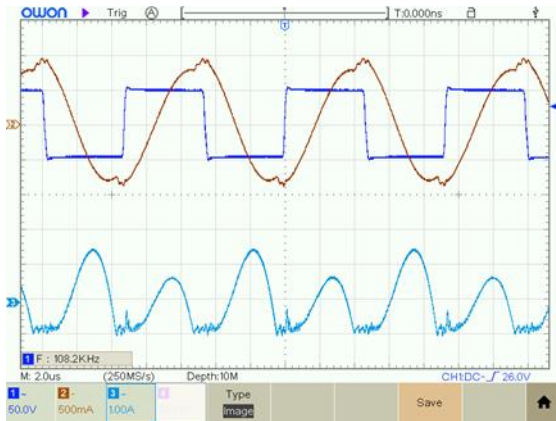
(d) $V_i = 115 \text{ V}$ ve $R_o = 3,26 \Omega$



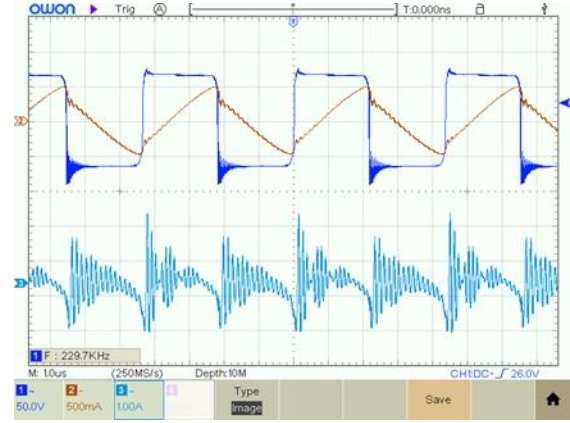
(e) $V_i = 85 \text{ V}$ ve $R_o = 4,91 \Omega$



(f) $V_i = 115 \text{ V}$ ve $R_o = 4,91 \Omega$



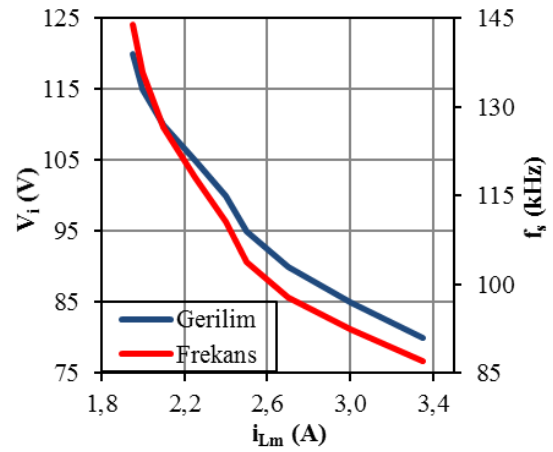
(g) $V_i = 85 \text{ V}$ ve $R_o = 9,86 \Omega$



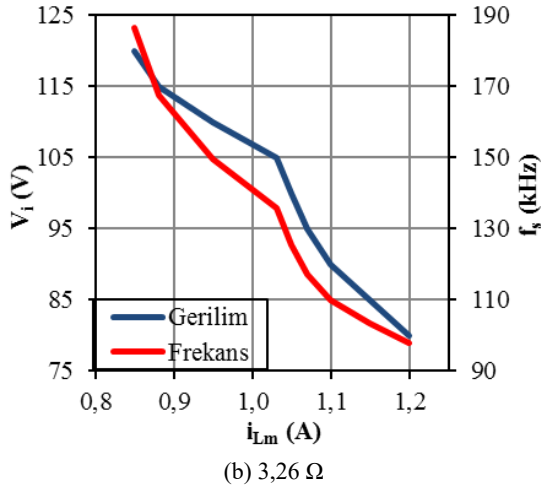
(h) $V_i = 115 \text{ V}$ ve $R_o = 9,86 \Omega$

Şekil 8. Farklı giriş gerilimi, yük ve çalışma bölgesi için doğrultma diyotlarının akım, evirici gerilim ve akım dalga şekilleri (The current of rectifier diodes, inverter voltage and current waveforms for different input voltage, load and operating region)

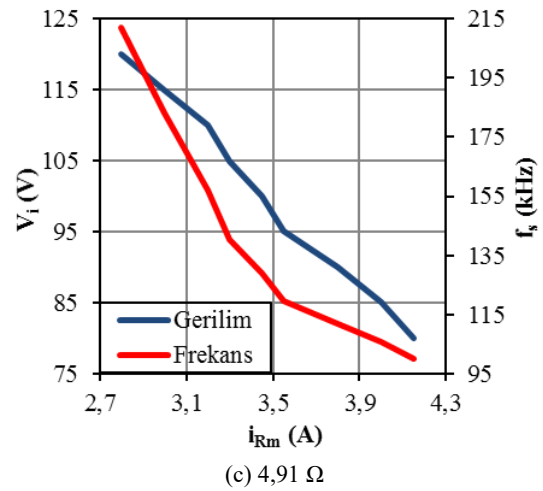
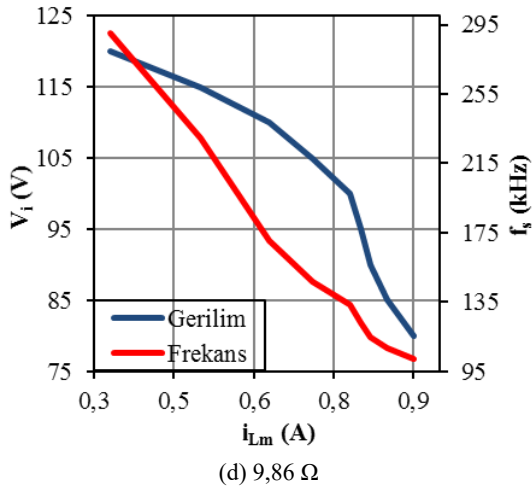
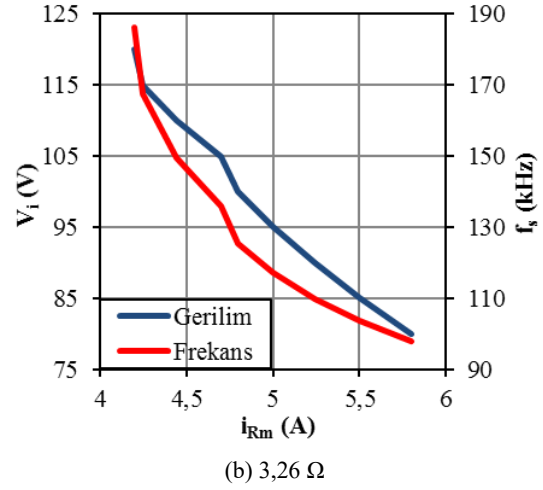
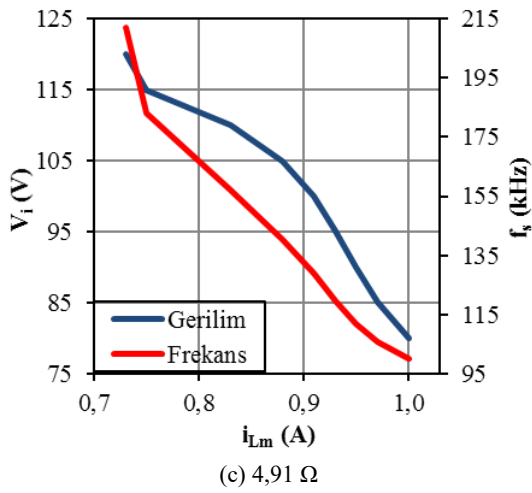
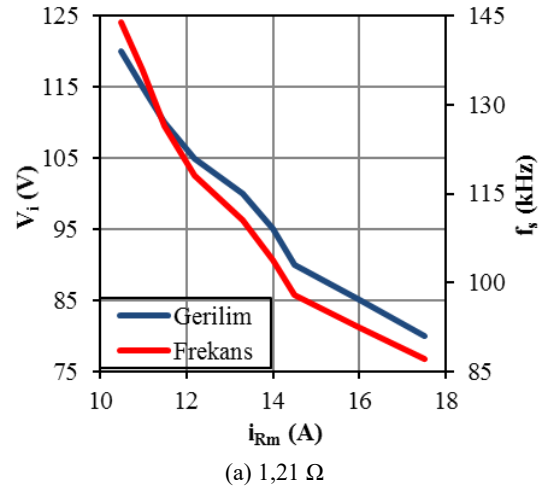
1. ve 2. bölgede rezonans akımı (i_L), evirici gerilimine (v_{ab}) göre geri fazlı olduğundan primer taraftaki güç anahtarlarının ZVS çalışma şartları sağlanmaktadır. Sekonder taraftaki doğrultma diyotlarının akımları 1. bölgede devamlı olmakla birlikte ZCS çalışmaları ortadan kalkmaktadır. 2. bölgede doğrultma diyotlarının akımları kesintili hale gelmekte ve diyotların ZCS şartları sağlanmaktadır. Şekil 9’da her bir yük için giriş gerilimi-maksimum rezonans akımı-frekans eğrileri verilmiştir.



(a) $1,21 \Omega$

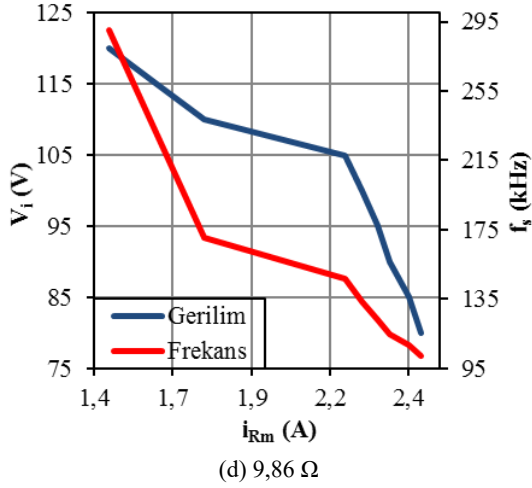


bir yük için giriş gerilimi-maksimum diyot akımı-frekans eğrileri verilmiştir.



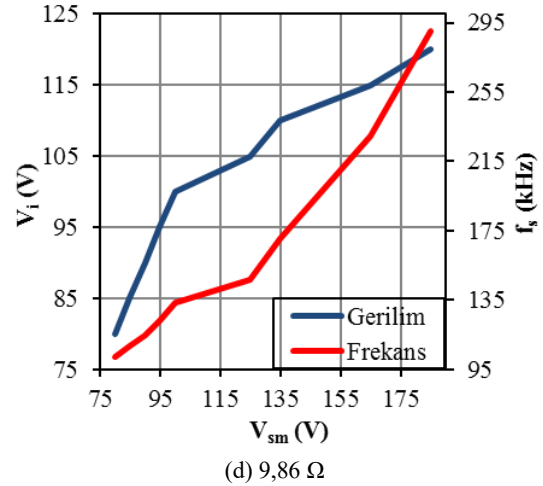
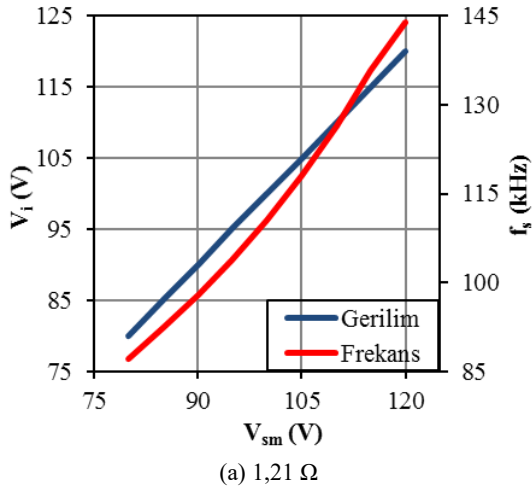
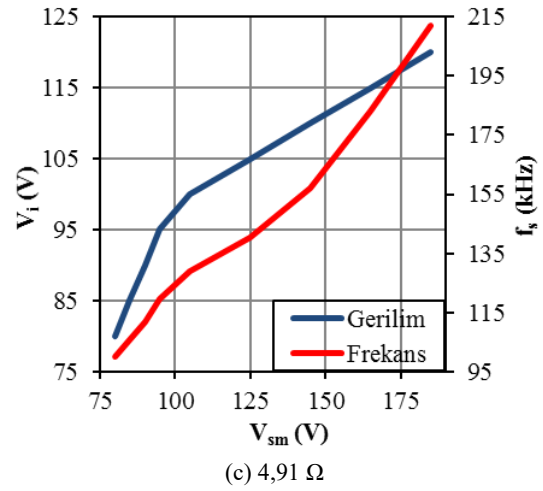
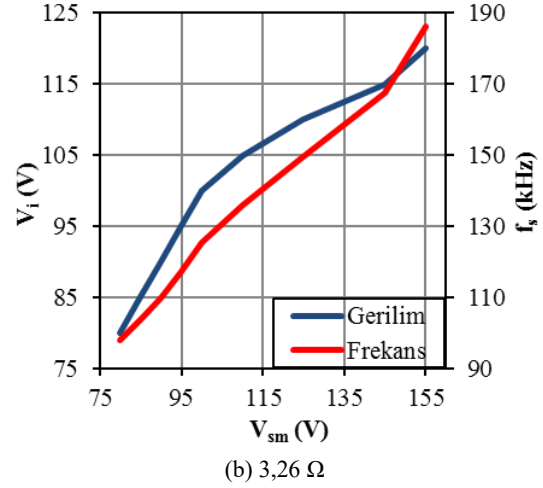
Şekil 9. Farklı yük değerleri için giriş gerilimi-maksimum rezonans akımı-frekans eğrisi (Input voltage-maximum resonance current-frequency curve for different load values)

Sabit çıkış gerilimi için azalan çıkış akımı ile rezonans akımının tepe değeri azalmakta tersi durumda artmaktadır. Dolayısıyla rezonans akımı SRC’de olduğu gibi yüke bağımlı olarak değişmektedir. Şekil 10’da her



Şekil 10. Farklı yük değerleri için giriş gerilimi-maksimum diyot akımı-frekans eğrisi (Input voltage-maximum diode current-frequency curve for different load values)

Farklı yük ve giriş gerilim değerleri için doğrultma diyotlarının (D_3 ve D_4) akımlarının değişimi rezonans akımı ile paralellik göstermektedir. Bununla birlikte yük direnç değerinin azalması ve i_R akımının kesintili hale gelmesiyle birlikte doğrultma diyotlarının tepe akım değerleri oldukça artmaktadır. Bu durum iletim kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Şekil 11'de farklı yük değerleri için giriş gerilimi-anahtar gerilimi (V_{sm})-frekans eğrisi verilmiştir.



Şekil 11. Farklı yük değerleri için giriş gerilimi-anahtar gerilimi-frekans eğrisi (Input voltage-switch voltage-frequency curve for different load values)

Primer taraftaki anahtarların gerilim stresleri; nominal giriş gerilimi 100 V ve daha düşük giriş gerilim değerlerinde ayrıca 1,21 Ω 'luk yük durumunda yaklaşık giriş gerilimi kadardır. Bununla birlikte nominal giriş geriliminden yüksek gerilim değerlerinde ve yük direncinin artması ile anahtar uçlarındaki gerilim stresi artmaktadır. Anahtar gerilim stresi özellikle giriş geriliminin maksimum olduğu 120 V için 1,21 Ω 'luk yük haricinde giriş geriliminin 1,5 katı kadar olabilmektedir. Yüksek giriş gerilim değerlerinde ve yük direncindeki artış ile anahtar gerilimin stresinin bu kadar yüksek olması dönüştürücü veriminin de düşmesine neden olmaktadır.

3.4. Deneysel Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması (The Comparison of Experimental Study Results)

Nominal giriş gerilimi (100 V) ve yükü (3,26 Ω) için çıkış gücü 19,62 W olan dönüştürücü; 80-120 V aralığındaki giriş gerilimi ve birçok farklı yük için gerçekleştirilen testler sonucunda ZVS çalışma aralığının birçok yerinde çalıştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen ve karşılaştırmalı sunulan sonuçlar şu şekildedir.

- Nominal yük değerinde dönüştürücü neredeyse bütün giriş gerilim değerleri için en yüksek verim değerine sahiptir. Ayrıca azalan giriş gerilim değeri ile birlikte verim artmakta tersi durumda azalmaktadır.
- Nominal yük değeri için primer taraftaki anahtarların gerilim stresi giriş geriliminin nominal değerinden büyük olduğu durumlarda artmaktadır. Ancak bu artış daha yüksek yük direnci değerlerinde ortaya çıkan artış kadar büyük değildir.
- 1,21 Ω 'luk yük durumunda dönüştürücü verimi bütün giriş gerilim değerleri için düşük olmakla birlikte seri rezonans frekansından uzaklaştıkça verimdeki düşüş çok fazla değildir.
- 1,21 Ω 'luk yük durumunda primer taraftaki anahtarların gerilim stresi giriş gerilimi kadar iken sekonder taraftaki doğrultma diyotlarının akım stresleri oldukça yüksektir.
- 9,86 Ω yük durumunda dönüştürücü verimi genel itibarıyla düşüktür. 1,21 Ω yük durumundan farklı olarak özellikle giriş geriliminin nominal değerinden yüksek olduğu dolayısıyla anahtarlama frekansının seri rezonans frekansından oldukça uzaklaştığı durumda verimdeki düşüş çok fazladır.
- 9,86 Ω yük durumunda primer taraftaki anahtarların gerilim stresi giriş geriliminin nominal değerinden yüksek olduğu değerler için oldukça yüksektir.
- Ara yük değeri için seri rezonans frekansı civarında dönüştürücü verimi nominal yük harici diğer yük durumlarına göre yüksektir. Ancak giriş geriliminin nominal değerinden yüksek olduğu ve anahtarlama frekansının seri rezonans frekansından çok fazla uzaklaştığı durumlarda verim oldukça düşmektedir.
- Ara yük değerinde giriş geriliminin nominal değerinden yüksek olduğu durumlarda primer

taraftaki anahtarların gerilim stresi artan giriş gerilimi ile oldukça artmaktadır. Sekonder taraftaki diyotların akımı giriş geriliminin nominal değerinden düşük olduğu durumlarda süresizdir ve giriş gerilimi azaldıkça diyotların akım stresi artmaktadır.

ZVS LLC rezonans dönüştürücü sabit çıkış gerilimi şartını çok geniş giriş gerilimi ve yük aralığında sağlamakla birlikte performans yönünden en iyi olduğu çalışma frekansı tasarım kriteri olan seri rezonans frekansı civarındadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; değişen giriş gerilimi ve yüke karşı sabit çıkış gerilimi şartları için ZVS LLC rezonans dönüştürücünün çalışma aralıklarının dönüştürücünün çalışma parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu aralıklar farklı yönlerden karşılaştırılmıştır. Belirtilen şartlar için dönüştürücünün güç kontrolü, 52,86 W'tan 6,5 W'a kadar değişken frekans kontrol ile gerçekleştirilmiştir. Bu güç değerlerinin belirtilen şartlarda elde edilebilmesi için anahtarlama frekansının 87,11 kHz'den 290 kHz'e kadar değiştirilmesi gerekmiştir. Bu sayede dönüştürücü ZVS çalışma aralıklarının birçok yerinde çalıştırılarak test edilmiştir. Karşılaştırma işlemleri sonucunda dönüştürücü performansının en iyi olduğu çalışma frekansının seri rezonans frekansı civarı olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte giriş gerilimi ve yükteki değişimler sonucu çıkış gerilimini regüle etmek için seri rezonans frekansından uzaklaştığında dönüştürücü performansında düşüşler olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek giriş gerilimi ve yük direnci değerlerinde artan anahtarlama frekansı ile anahtar gerilim stresleri ve anahtarlama kayıpları artmakta bunun sonucunda da dönüştürücü performansı oldukça düşmektedir. Dönüştürücü performansındaki bu düşüşleri önlemek veya azaltabilmek için değişken frekans kontrolle birlikte sabit anahtarlama kontrol teknikleri olan faz kaymalı kontrol veya darbe yoğunluk modülasyon kontrol bir arada kullanılabilir. Böylece yüksek giriş gerilimi ve yük direnci değerleri için anahtarlama frekansındaki artışların önüne geçilerek anahtar gerilim stresleri ve anahtarlama kayıpları azaltılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Salih NACAR: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Ayrıca makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Selim ÖNCÜ: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir..

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zeng J., Zhang G., Yu S. S., Zhang B. and Zhang Y., “LLC resonant converter topologies and industrial applications – A review, *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 6(3):73-84, (2020).
- [2] Menke M. F., Duranti J. P., Roggia L., Bisogno F. E., Tambara, R. V. and Seidel A. R., “Analysis and design of the LLC LED driver based on state-space representation direct time-domain solution”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, 35(12): 12686-12701, (2022).
- [3] Tang C. Y., Wu H. J., Liao C. Y. and Wu H. H., “An optimal frequency-modulated hybrid MPPT algorithm for the LLC resonant converter in PV power applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1): 944-954, (2022).
- [4] Nacar S. and Öncü S., “Implementation of hydrogen generation system with resonant converter”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4): 2163-2175, (2022).
- [5] Kubilay M. and Aydemir M. T., “Development of a graphical interface that can be used for LLC resonant DC-DC converter design”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(3): 632-643, (2020).
- [6] Çetin S., “A high efficiency design of LLC resonant converter for data center applications”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(1): 45-54, (2017).
- [7] Bulut, Y. E., Aşçı M. and Akın B., “Implementation of 480W LLC resonant converter”, *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 3(1): 34-40, (2020).
- [8] Nacar, S. and Öncü S., “PI controlled LLC resonant converter”, *Ist International Conference on Energy Systems Engineering*, Karabük, 55-59, (2017).
- [9] Karimi S. and Tahami T., “Design optimization of high-frequency WBG-based LLC resonant converter for telecom applications”, *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Budapest, 72-77, (2018).
- [10] Farooq H., Khalid H. A., Khalid M. U., Farooqi M. M. and Malik Q., “Loss analysis of full bridge LLC resonant converter with wide input range using Si and SiC switches”, *2021 16th International Conference on Emerging Technologies*, Islamabad, 1-6, (2021).
- [11] Glitz E. S. and Ordonez M., “MOSFET power loss estimation in LLC resonant converters: time interval analysis”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(12): 11964-11980, (2019).
- [12] Fei C., Gadelrab R., Li Q. and Lee F. C., “High-frequency three-phase interleaved LLC resonant converter with GaN devices and integrated planar magnetics”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(2): 653-663, (2019).
- [13] Özçelik Ç. and Obdan A. H., “Application of 24V / 20A LLC resonant converter for OLED TVs”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(5): 837-845, (2018).
- [14] Zhao Z., Xu Q., Dai Y. and Yin H., “Analysis, design and implementation of improved LLC resonant transformer for efficiency enhancement”, *Energies*, 11(12): 1-19, (2018).
- [15] Deng J., Mi C. C., Ma R. and Li S., “Design of LLC resonant converters based on operation-mode analysis for level two PHEV battery chargers”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4): 1595-1606, (2015).
- [16] Çetin S., “High efficiency design approach of a LLC resonant converter for on-board electrical vehicle battery charge applications”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(2): 103-111, (2017).
- [17] Hu P., Yin R., Wei B., Luo Y. and Blaabjerg F., “Modulated isolated LLC DC/DC conversion system for offshore wind farm collection and integration”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(6): 6713-6725, (2021).
- [18] Tang C. Y., Wu H. J., Liao C. Y. and Wu H. H., “An optimal frequency-modulated hybrid MPPT algorithm for the LLC resonant converter in PV power applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1): 944-954, (2022).
- [19] Yılmaz Ü. and Kırçay A., “Installation, modeling and analysis of LLC resonance converter for battery charger in electric vehicle”, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 7(3): 298-308, (2021). <http://www.solec.org/wp-content/uploads/2014/02/SOLKOTEbrochure.pdf>