

Development of a Graphical Interface that can be used for LLC Resonant DC-DC Converter Design

 Mehmet KUBİLAY*  M. Timur AYDEMİR 

Gazi University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 06570, ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 20/05/2020

Revision: 15/06/2020

Accepted: 03/07/2020

Highlights

- DC/DC converter
- Matlab
- PLECS

Keywords

LLC Resonant Converter
 Graphical User Interface
 Soft Switching
 High Efficiency

In this paper, design of LLC resonant DC-DC converters, which have advantages such as high efficiency, low electromagnetic interference (EMI) and high power density, is presented. An interface is designed in MATLAB using by the first harmonic approximation (FHA) analysis method to calculate circuit parameters. The accuracy of the parameters calculated by the interface is tested with simulations conducted in PLECS. Simulation results have shown that intended efficiency and zero voltage switching (ZVS) are achieved over a wide load range, including low load conditions.

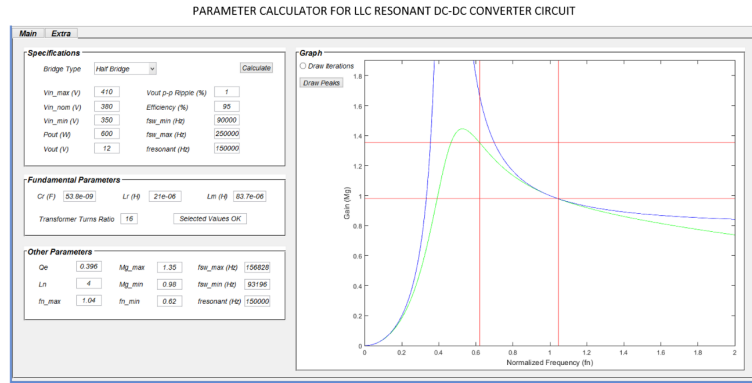


Figure A. Circuit schema of the SST design

Purpose: The main motivation of this study is to design an interface that presents the necessary parameters for the LLC resonant converter intended to be designed. The interface uses the first harmonic approximation (FHA) analysis method in calculations and aims optimal selection of quality factor (Q) and inductance ratio (L_n).

Theory and Methods: MATLAB is used for interface design. Firstly, the LLC resonant DC-DC converter topology has been studied, and then the first harmonic approximation (FHA) analysis method has been explained. Simulations have been conducted in PLECS and thermal modeling method has been used in order to make the efficiency calculations to represent real conditions.

Results: Simulations at 3 different power levels have been conducted. The results have shown that zero voltage switching (ZVS) is achieved over a wide load range. Additionally, maximum efficiency results have been obtained between 95% and 97%.

Conclusion: In this study, a LLC resonant converter design approach that aims to achieve high efficiency is discussed by using FHA analysis method. With this approach, an interface has been designed in MATLAB. The accuracy of the parameters calculated by the interface is tested with simulations conducted in PLECS. The obtained results have shown that reliable results are produced by the presented interface.

GU J Sci, Part C, 8(3): 632-643 (2020)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

LLC Rezonanslı DA-DA Dönüştürücü Tasarımında Kullanılabilecek Bir Grafıksel Arayüzün Geliştirilmesi

Mehmet KUBİLAY* M. Timur AYDEMİR

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 06570, Maltepe, ANKARA

Öz

Bu çalışmada yüksek verimlilik, düşük elektro manyetik girişim (EMG) ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlara sahip olan LLC rezonans DA-DA dönüştürücü tasarımı ele alınmıştır. MATLAB programı ile temel harmonik yaklaşım (FHA) analiz metodu kullanarak devre parametrelerini hesaplayan bir arayüz tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan arayüzde, yüksek verimlilik elde edebilmek için en uygun kalite çarpanı (Q) ve endüktans oranı (L_n) seçimini hedefleyen bir optimizasyon yapılmıştır. Arayüz ile hesaplanan parametrelerin doğruluğunun test edilebilmesi için PLECS programı kullanılarak 3 farklı güç seviyesinde benzetimler yapılmıştır. LLC rezonans dönüştürücünün çıkış gerilimini düzenlemek için değişken frekans kontrol yöntemi kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarıyla düşük yük durumları da dâhil olmak üzere geniş bir yük aralığında sıfır gerilim anahtarlamasının (SGA) sağlandığı görülmüştür. Yine bu yük durumları için verim ölçümleri yapılarak verim grafikleri çıkarılmıştır. Grafikler incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için maksimum verimin %95 ile %97 arasında elde edildiği görülmüştür. Yapılan verim hesaplamalarının gerçek koşullara uygun olması amacıyla PLECS programında ısıl modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/05/2020
Düzeltilme: 15/06/2020
Kabul: 03/07/2020

Anahtar Kelimeler

LLC Rezonans
Dönüştürücü
Grafıksel Kullanıcı
Arayüzü
Yumuşak Anahtarlama
Yüksek Verim

Keywords

LLC Resonant Converter
Graphical User Interface
Soft Switching
High Efficiency

Development of a Graphical Interface that can be used for LLC Resonant DC-DC Converter Design

Abstract

In this paper, the design process of LLC resonant DC-DC converters, which have advantages such as high efficiency, low electromagnetic interference (EMI) and high power density, is presented. An interface which uses the first harmonic approximation (FHA) analysis method to calculate circuit parameters has been designed in MATLAB environment. The interface was optimized to choose the most suitable quality factor (Q) and inductance ratio (L_n) in order to provide high efficiency. Simulations have been carried out in PLECS software for three different power levels to verify the parameters calculated by the developed interface. Variable frequency control method has been used to regulate the output voltage of the LLC resonant converter. Simulation results show that zero voltage switching (ZVS) is achieved over a wide load range, including low load conditions. Also, efficiencies in these load conditions have been measured and the efficiency graphs are presented. When the graphics are examined, it is observed that the maximum efficiency is between 95% and 97% for the three different output power levels chosen. Thermal modeling method has been used in PLECS in order to make the efficiency calculations to resemble the realistic conditions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzün gelişmekte olan güç elektroniği dünyasında, güç dönüştürücülerinden beklenen özellikler değişmektedir. Güç dönüştürücüleri için küçük boyut, yüksek verimlilik ve yüksek güç yoğunluğu en önemli isterler haline gelmiştir. Dönüştürücü boyutunu küçültebilmek ve güç yoğunluğunu arttırabilmek için yüksek anahtarlama frekanslarında çalışarak transformatör, endüktör ve kondansatör gibi hacimli pasif elemanların boyutlarını küçültmek gerekmektedir. Fakat anahtarlama frekansını arttırmak paralelde anahtarlama kayıplarını da arttırmaktadır [1], [2], [3]. Geleneksel PWM dönüştürücülerde anahtarlama işlemi yük altında yapılırken, rezonans dönüştürücülerde anahtarlama sıfır akım ya da sıfır gerilimde

yapılabilmektedir. Bu durum rezonans dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarını azaltarak anahtarlama frekansının arttırılabilmesine imkan tanımaktadır [4], [5]. Bu nedenlerle rezonans dönüştürücüler en çok tercih edilen topolojiler haline gelmiştir.

İçerdiği pasif rezonans tank elemanı (L, C) sayısına bağlı olarak değişen bir çok rezonans dönüştürücü konfigürasyonu vardır [6], [7]. Seri rezonans (SRC) [8], [9] ve paralel rezonans dönüştürücüler (PRC) [10], iki rezonans elemanından oluşan en temel rezonans dönüştürücülerdir. Seri rezonans dönüştürücüler, reaktif akımları minimuma indirerek yüksek kısmi yük verimi sağlarken yüksüz durumda çıkış gerilim regülasyonunu sağlayamazlar [11]. Paralel rezonans dönüştürücüler ise, seri rezonans dönüştürücülerin aksine yüksüz durumlarda rezonans frekans üzerinde çalışarak çıkış gerilimini kontrol edebilirler. Buna karşın hafif yüklerde düşük verimlidirler [12].

SRC ve PRC'nin bahsedilen bu dezavantajlarını önleyebilmek için üç rezonans elemanına sahip LLC en yaygın kullanılan rezonans dönüştürücü topolojilerindedir. LLC rezonans dönüştürücüler çıkış gerilimi regülasyonunu dar bir frekans aralığında gerçekleştirirler [11]. Bunun yanı sıra primer anahtarlar için sıfır gerilim anahtarlama (SGA) ve senkron doğrultucular için sıfır akım anahtarlama (SAA) özelliği ile elektromanyetik girişimi (EMG) de azaltırlar [13], [14].

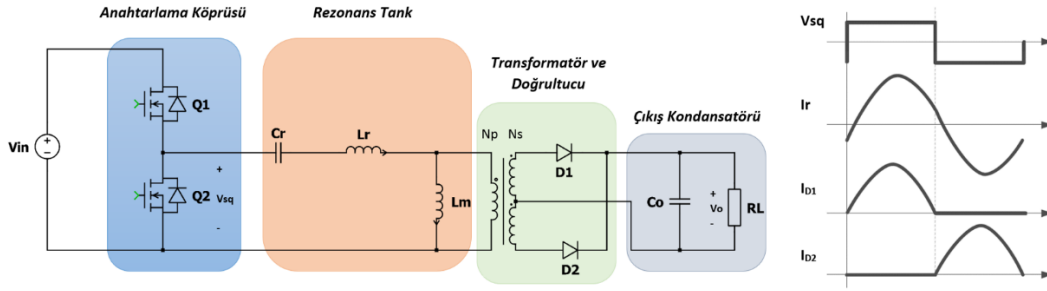
Bu avantajlarının yanı sıra LLC rezonans dönüştürücü tasarım parametreleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Geniş bir yük aralığında, dönüştürücünün dar bir frekans bandında kontrolünün sağlanabilmesi için LLC rezonans dönüştürücü f_0 rezonans frekansı civarında çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca LLC rezonans dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri verimliliğidir. Bu verimlilik tüm çalışma aralığında primer taraf anahtarlar için sıfır gerilim anahtarlamanın (SGA) sağlanabilmesiyle büyük ölçüde elde edilir. Tüm çalışma aralığında SGA'nın sağlanabilmesi için en uygun $L_n - Q_e$ değeri yapılan yinelemeli işlemler sonucu hesaplanmalıdır [15]. Bu durumlar göz önüne alındığında PWM dönüştürücüler ve temel rezonans dönüştürücülere kıyasla tasarımcılar için LLC rezonans dönüştürücü tasarımı ve optimizasyonu daha karmaşık bir konu haline gelmektedir. Literatürde LLC rezonans dönüştürücü tasarımı hakkında birçok araştırma bulunmaktadır [15-17]. Ancak LLC rezonans dönüştürücü tasarımının karmaşıklığı konusunda kullanıcılara kolaylık sağlayacak bir arayüz geliştirilmemiştir. Bu çalışma kapsamında avantajları ile dikkat çeken LLC rezonans dönüştürücülerin devre parametrelerini hesaplayarak kullanıcıya tasarımı konusunda kolaylık sağlayacak bir arayüz yazılımı geliştirilmiştir. Arayüz, sunduğu veriler ve grafikler sayesinde kullanıcılara LLC topolojisinin çalışma mantığı ve tasarım kriterleri açısından öğretici bilgiler vermektedir. Bunun yanı sıra tasarım ve optimizasyon süresini kısaltacağı ve devre elemanlarının seçimi konusunda kullanıcıya kolaylık sağlayacağı için LLC rezonans dönüştürücü topolojisi kullanımının yaygınlaşmasında fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Makalenin ikinci bölümünde LLC rezonans dönüştürücü çalışma prensibi genel hatlarıyla anlatılmıştır. LLC rezonans dönüştürücü tasarımında rezonans tank elemanları hesaplanırken kalite çarpanı (Q) ve endüktans oranının (L_n) seçimi önem arz etmektedir. Üçüncü bölümde devre parametrelerini optimum Q ve L_n değerlerine göre hesaplamasını sağlayan bir arayüz tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde üç farklı güç seviyesi için hazırlanan benzetimlerin sonuçları değerlendirilerek arayüz tarafından hesaplanan parametrelerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Son olarak beşinci bölümde yapılan tüm çalışmalar ve sonuçları yorumlanmıştır.

2. LLC REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLE OF LLC RESONANT DC-DC CONVERTER)

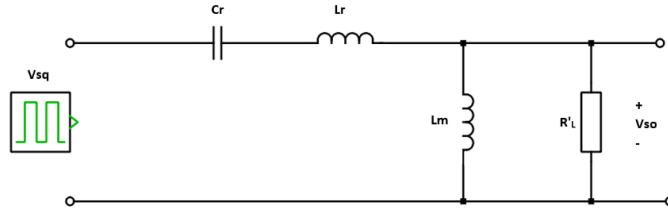
Yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü topolojisinin genel şeması Şekil 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi dönüştürücü dört bölümden oluşmaktadır. Anahtarlama köprüsü, tam köprü ya da yarım köprü olarak seçilebilir. Q_1 ve Q_2 MOSFET'leri, anahtarlama periyodunun yarısında çalışarak rezonans tankı uyarmak için kare dalga üretirler (V_{sq}). SGA elde edebilmek için anahtarlama geçişleri arasına küçük bir ölü zaman eklenir. Rezonans tank devresi, rezonans kondansatörü (C_r), rezonans endüktörü (L_r) ve mıknatıslanma endüktörü (L_m) olmak üzere üç elemandan oluşur. Rezonans tank devresi, yüksek dereceli harmonik akımları süzer. Rezonans tankı, girişine kare dalga uygulanmasına rağmen üzerinden sadece sinüzoidal akımın akmasına izin verir. Şekil 1'de görüldüğü gibi rezonans tankı üzerinden akan akım (I_p), rezonans tankına uygulanan gerilimden (V_{sq}) geridedir. Bu durum MOSFET'lerin sıfır gerilim altında açılmasını sağlar. Sekonder tarafında bulunan iki diyot (D_1, D_2) orta uçlu doğrultucuyu oluşturur. Transformator ile

genliği düşürülen rezonans sinüzoidal akım burada doğrultulur. Çıkış kondansatörü (C_o), doğrultulmuş AA akımı süzerek DA çıkış gerilimi sağlar [15-17].



Şekil 1. Yarım Köprü LLC Rezonans Dönüştürücü Devre Şeması

LLC rezonans dönüştürücü çalışma mantığını daha iyi anlayabilmek için, dönüştürücü eşdeğer devresi ve gerilim kazancını incelemek gerekir. Şekil 2’de rezonans dönüştürücünün eşdeğer devresi verilmiştir. Dönüştürücü kazancı, anahtarlama köprüsü kazancı, rezonans tank kazancı ve transformator sarım oranının (N_p/N_s) çarpımıdır. Anahtarlama köprüsü kazancı tam köprü konfigürasyonu için 1, yarım köprü konfigürasyonu için 0.5 olarak hesaplanır. Rezonans tankının kazancı ise Şekil 2’de verilen eşdeğer devrenin transfer fonksiyonunun genliğidir. Rezonans tankının kazancı (M_g), 1 numaralı denklem ile verilmiştir [17].



Şekil 2. LLC Rezonans Dönüştürücü Eşdeğer Devresi

Denklem 1’de gösterilen üç adet birimsiz parametreden L_n endüktansların arasındaki oranı, Q_e kalite çarpanını ve f_n normalize frekansı yani anahtarlama frekansının (f_{sw}), rezonans frekansına (f_0) oranını ifade etmektedir [15]. Denklemden de görüldüğü gibi kazanç L_n , Q_e ve f_n parametrelerine bağlı olarak değişir. Devre elemanları belirlendikten sonra L_n ve Q_e parametreleri sabitleneceği için, bu denklemde, f_n kontrol değişkenidir. Devrenin kontrolü, rezonans frekans sabit olduğu için, anahtarlama frekansı değiştirilerek sağlanır [2].

$$M_g = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q_e \times L_n]} \right| \quad 1$$

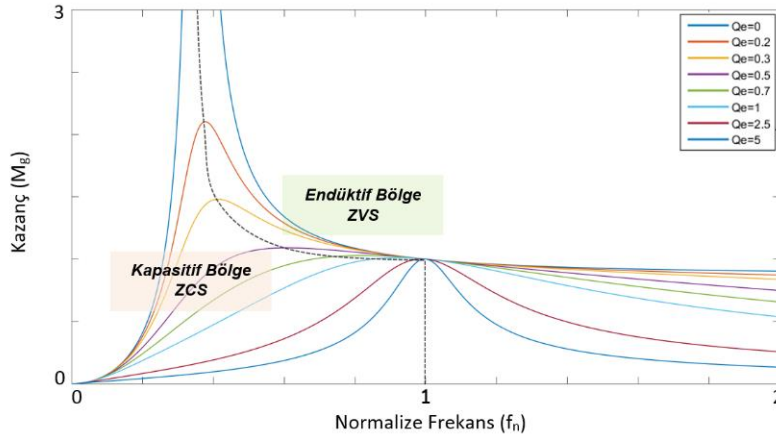
$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad 2$$

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e} \quad 3$$

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \quad 4$$

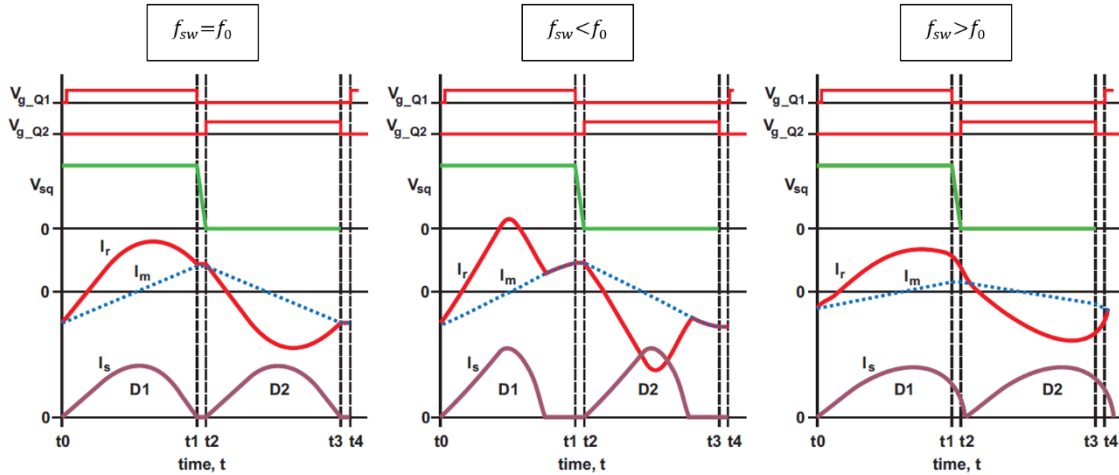
Rezonans tankı kazancının (M_g), farklı kalite çarpanları (Q_e) ve sabit bir L_n değeri için normalize frekansa (f_n) göre değişimi, MATLAB programında çizdirilmiş ve sonuç Şekil 3’te verilmiştir. Grafikte düşük Q_e değerleri hafif yükleri, yüksek Q_e değerleri ise ağır yükleri ifade etmektedir. Kazancın değeri yükten bağımsız olarak rezonans frekansında bire eşittir. Görüldüğü gibi eğrilerin tepe noktalarını birleştiren kesikli çizgi kapasitif ve endüktif çalışma bölgeleri arasındaki sınırı oluşturmaktadır. Endüktif bölgede, rezonans tank akımı (I_p), rezonans tankına uygulanan gerilimden (V_{sq}) geride olduğu için sıfır gerilimde anahtarlama (SGA) gerçekleşir. Kapasitif bölgede ise I_p , V_{sq} ’dan ileride olduğu için sıfır akımda anahtarlama (SAA) gerçekleşir. Genellikle, MOSFET uygulamalarında SGA tercih edilmektedir. Bu durum çalışma frekans aralığını SGA’nın sağlandığı endüktif bölge içinde tutmayı gerekli kılar. Kapasitif bölgeye

geçişini önleyebilmek için minimum anahtarlama frekansı, endüktif ve kapasitif bölgeyi ayıran tepe kazanç frekansı ile sınırlı tutulmalıdır [16], [18], [19].



Şekil 3. Rezonans Tank Gerilim Kazancı

LLC rezonans dönüştürücü, Şekil 4'te gösterildiği gibi rezonans frekans altında, üstünde ve rezonans frekansta olmak üzere üç modda çalışabilir. Anahtarlama frekansı, rezonans frekansına eşit olduğunda ($f_{sw} = f_0$) rezonans tank kazancı birdir ve en iyi çalışma noktası elde edilir. Anahtarlama periyodunun yarısında, mıknatıslanma akımı (I_m), rezonans akımına (I_r) eşitlenir. Kesintisiz güç aktarımı vardır. Primer MOSFET'lerde SGA ve doğrultucu diyotlarda yumuşak anahtarlama sağlanır [17], [2]. Anahtarlama frekansı, rezonans frekansının altında çalıştığı durumda ($f_{sw} < f_0$) anahtarlama yarı döngüsü tamamlanmadan (I_m), (I_r)'ye eşitlenir ve güç aktarımı anahtarlama yarı döngüsü sonlanana kadar durur. Primer MOSFET'lerde SGA ve doğrultucu diyotlarda yumuşak anahtarlama sağlanır. Rezonans tankta yüksek dolaşım akımı oluşur. Bu durum iletim kayıplarının artmasına neden olur. Anahtarlama frekansının, rezonans frekansının üzerinde olduğu durumda ($f_{sw} > f_0$) primer MOSFET'lerde SGA sağlansa da tıkamaya geçiş kayıpları artar. Sekonder diyotlarda yumuşak anahtarlama gerçekleşmez ve ters toparlanma kayıpları oluşur [15], [20].

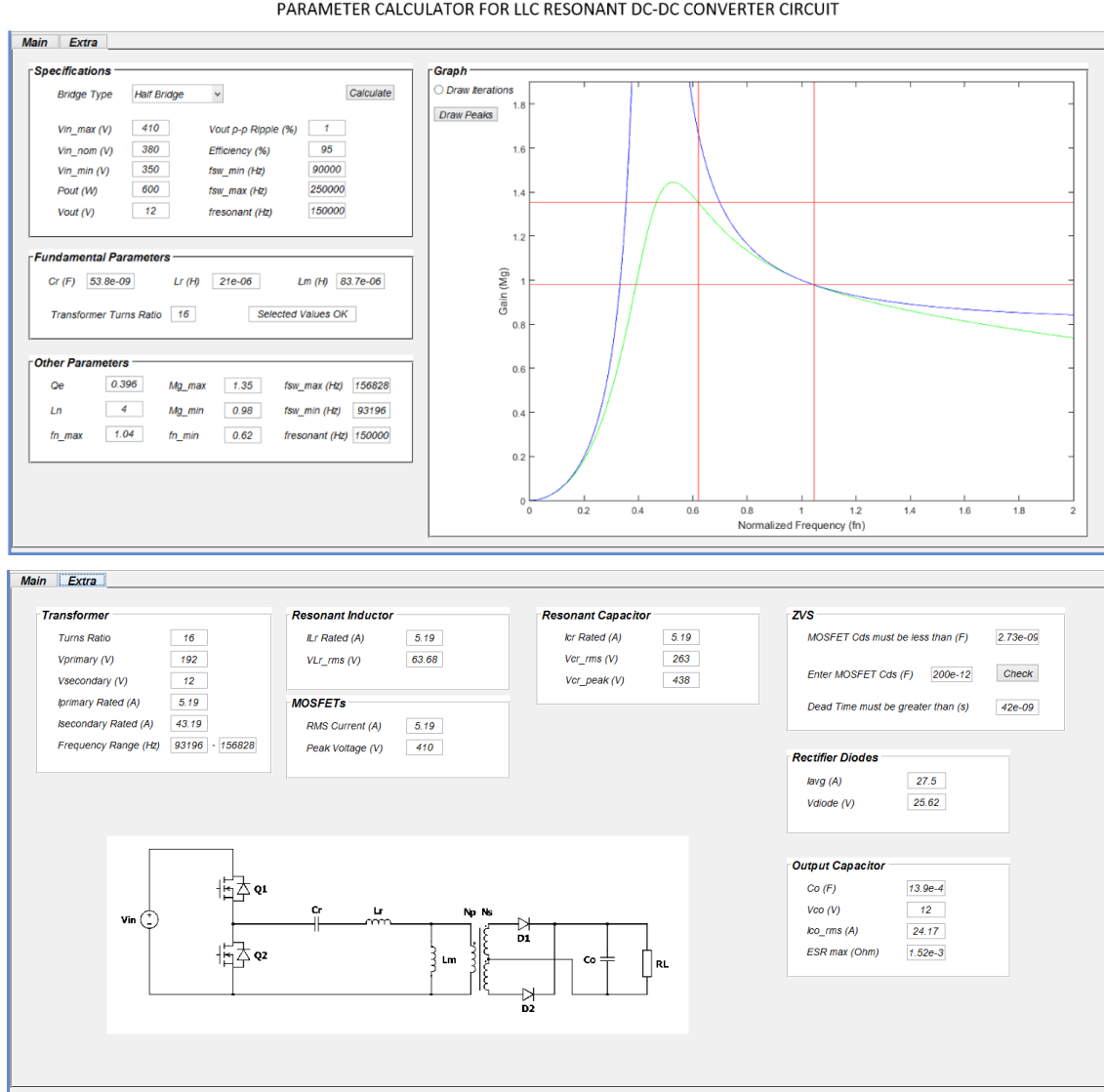


Şekil 4. LLC Rezonans Dönüştürücü Çalışma Bölgeleri [15]

3. LLC REZONANS DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRE PARAMETRELERİNİ HESAPLAYAN ARAYÜZ TASARIMI (INTERFACE DESIGN THAT CALCULATES LLC RESONANT DC-DC CONVERTER CIRCUIT PARAMETERS)

LLC rezonans dönüştürücü yüksek verimlilik, düşük elektromanyetik girişim (EMG) ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları ile dikkat çekse de tasarım ve optimizasyonu karmaşık bir topolojidir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen bir arayüz yazılımı ile kullanıcılar için LLC rezonans dönüştürücü tasarım ve optimizasyon aşamalarının kolaylaştırılması ve pratik hale getirilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen bu

arayüz ile FHA yöntemi kullanılarak, MATLAB programı ile LLC rezonans dönüştürücü parametreleri ve devre elemanlarının seçimine yardımcı olacak veriler hesaplanmaktadır. Arayüz, girdi olarak kullanıcıdan; giriş gerilim aralığı, çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış gerilim dalgalanma oranı, çalışılmak istenen frekans aralığı, hedeflenen verim ve anahtarlama köprüsünün konfigürasyon bilgilerini alır. MOSFET'lere, rezonans tank elemanlarına, transformatöre, doğrultucu diyotlara ve çıkış kondansatörüne ait parametreler ile devrenin çalışacağı frekans aralığı ve rezonans frekansı ise arayüzün çıktılarıdır. Hazırlanan arayüz görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Arayüz Görünümü

LLC rezonans dönüştürücü iki rezonans frekansa sahiptir (f_0, f_p). Bunlardan biri (f_0), L_r ve C_r 'nin rezonansa girmesi ile elde edilir. Diğeri ise L_r , C_r ve L_m 'nin rezonansa girmesi ile elde edilen f_p 'dir. Şekil 3'te gösterildiği gibi f_0 rezonans frekansında yükten bağımsız olarak kazanç bire eşittir. Bu LLC rezonans dönüştürücülerini seri rezonans dönüştürücülerden avantajlı kılan en önemli özelliktir. Bu nedenle LLC rezonans dönüştürücüler f_0 civarında çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu durum bize, rezonans tank akımının rezonans frekans civarında bir sinüzoidal olduğu yönünde ipucu verir. Bu ipucunun yanı sıra rezonans tankın yüksek harmonikleri filtreleme davranışı da göz önüne alındığında, LLC rezonans dönüştürücü tasarımında temel harmonik yaklaşım (FHA) metodu kullanımının güvenilir sonuçlar verdiği kabul edilmektedir. Bu yaklaşım rezonans tank girişine uygulanan kare dalga geriliminin, sadece temel bileşenin güç aktarımına katkıda bulunduğunu varsayar. Böylece tank geriliminin ve tank akımının yüksek dereceli harmoniklerini ihmal eder ve tamamen sinüzoidal olarak ele alır [15], [16]. Arayüz yazılımının akış diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yazılım Akış Diyagramı

Şekil 6’da görüldüğü gibi arayüzde girilen parametreler doğrultusunda ilk olarak transformatör sarım oranı hesaplanır. Transformatör sarım oranı (n); nominal kazançta, nominal giriş geriliminin nominal çıkış gerilimine oranı olarak hesaplanır. Denklem 5’te görüldüğü gibi hesaplama anahtarlama köprüsü konfigürasyonuna göre değişiklik göstermektedir.

$$n = M_{g_nom} \frac{V_{in_nom}}{V_{o_nom}} k_{sw} \Big|_{M_{g_nom}=1} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 5$$

Çıkış gerilim regülasyonunu sağlayabilmek için tüm yük koşullarını içine alan minimum ve maksimum kazanç değerleri (M_{g_max}, M_{g_min}) hesaplanır ve Şekil 5’te görüldüğü gibi grafik üzerinde kırmızı yatay çizgiler ile gösterilir. Dönüştürücü minimum giriş geriliminde ve tam yük koşulundayken maksimum kazanç ile çalışır. Diğer taraftan maksimum giriş gerilimi ve minimum çıkış gerilimi durumunda da dönüştürücü kazancı minimum olacaktır. Bu doğrultuda M_{g_max}, M_{g_min} değerleri denklem 6 ve 7’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$M_{g_min} = \frac{n \times V_{o_min}}{V_{in_max}/k_{sw}} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 6$$

$$M_{g_max} = \frac{n \times V_{o_max}}{V_{in_min}/k_{sw}} \begin{cases} tam köprü, k_{sw} = 1 \\ yarım köprü, k_{sw} = 0.5 \end{cases} \quad 7$$

Yukarıda Şekil 3’te anlatıldığı gibi LLC rezonans dönüştürücüler, tepe kazanç frekansının üstünde endüktif bölgede çalışabilirler ve SGA’nın sağlanabilmesi için bu bölgede çalışmaları istenir. Bu nedenle tepe kazanç belirlenmesi kritik olan bir parametredir. Denklem 1’de de görüldüğü gibi kazanç eğrileri L_n ve Q_e değerlerine bağlı olarak değişir. Bunun yanı sıra L_n değerinin büyük seçilmesi, mıknatıslanma akımını azaltarak iletim kayıplarının düşmesini sağlar. Fakat L_n ’nin yükselmesi, tepe kazanç değerini düşüreceği için SGA’yı olumsuz yönde etkileyecektir. Yüksek Q_e değerleri ise kazanç eğrisini daraltarak dar bir frekans kontrol aralığı sağlayacaktır. Buna karşın yine tepe kazanç değerini düşüreceği için SGA’yı olumsuz yönde etkileyecektir [21]. Anlaşılacağı üzere optimal L_n ve Q_e seçiminin rezonans tank elemanlarının hesaplanmasındaki önemi büyüktür. Tasarlanan arayüz, belirlenen bir aralıkta her bir L_n ve Q_e değerine karşılık gelen tepe kazanç değerlerini bir matriste tutar. Yük geçişlerinde ve ilk çalışma anında

da SGA'yı garanti edebilmek için hesaplanan $M_{g,max}$ değerine % 10 tolerans eklenerek yeni bir tepe değeri elde edilir [16]. Oluşturulan matriste bu değere karşılık gelen $L_n - Q_e$ çiftleri bulunur. Belirli bir kazanç noktasına karşılık gelen L_n değerleri artarken Q_e değerleri azalmakta ya da tam tersi durum söz konusu olmaktadır. Yapılan çalışmalarda L_n 'nin arttığı Q_e 'nin azaldığı yönde çalışma frekans aralığının genişlediği ve tam ters yönde çalışma frekans aralığının daraldığı görülmüştür. Şekil 5'teki grafikte görüldüğü gibi minimum çalışma frekansı tam yükteki kazanç eğrisi ile $M_{g,max}$ doğrusunun kesişim noktası olarak alınır. Maksimum çalışma frekansı ise yüksüz durumdaki kazanç eğrisi ile $M_{g,min}$ doğrusunun kesişimi olarak alınmaktadır [15]. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 6'da gösterildiği üzere kullanıcı tarafından girilen çalışma frekans aralığı kontrol edilerek $L_n - Q_e$ çiftleri arasından en uygun değer yapılan yinelemeli işlem sonucunda hesaplanır.

$L_n - Q_e$ değerleri belirlendikten sonra, Denklem 8, 9, 10'da gösterildiği gibi rezonans tank elemanları L_r , C_r ve L_m hesaplanır.

$$C_r = \frac{1}{2\pi \times Q_e \times f_o \times R_e} \quad 8$$

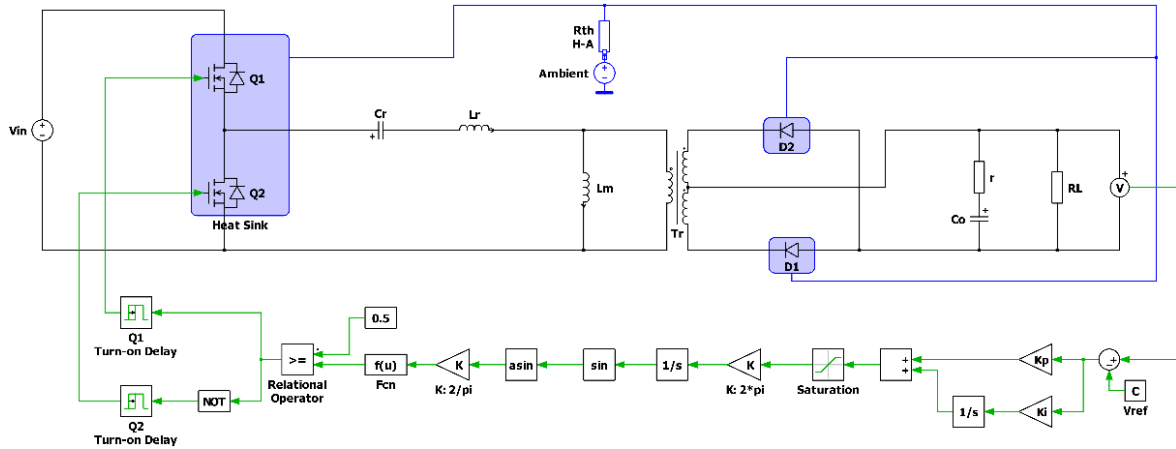
$$L_r = \frac{1}{(2\pi \times f_o)^2 C_r} \quad 9$$

$$L_m = L_n \times L_r \quad 10$$

$$R_e = \frac{8 n^2 V_o^2}{\pi^2 P_o} \quad 11$$

Rezonans tank parametreleri de belirlendikten sonra Şekil 5'te gösterilen MOSFET, transformatör, doğrultucu diyot ve çıkış kondansatörü parametreleri hesaplanarak arayüz üzerinde gösterilir.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)



Şekil 7. PLECS Programında Hazırlanan LLC Rezonans Dönüştürücü Devresi

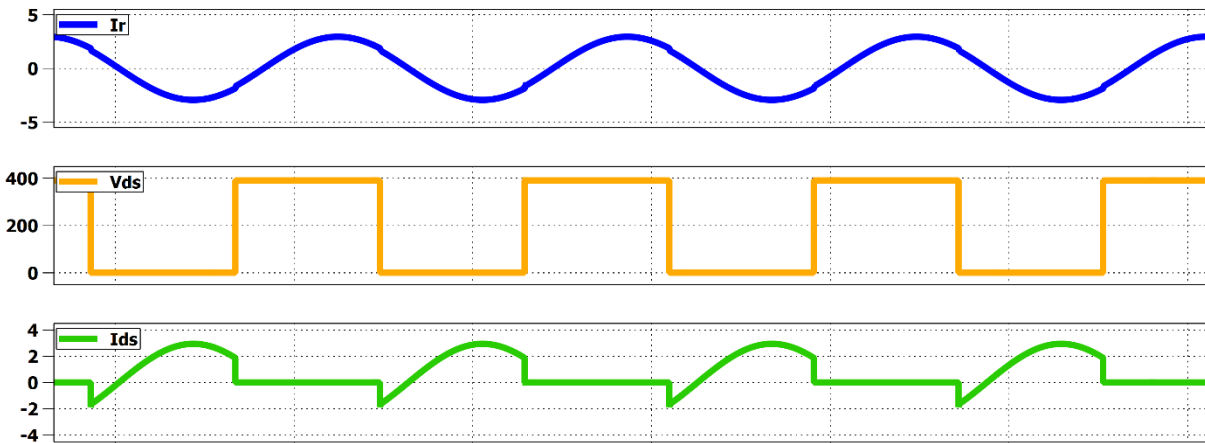
Tasarlanan arayüz çıktıları, PLECS programında hazırlanan benzetimler ile doğrulanmıştır. PLECS, güç kaynakları ve güç dönüştürücüleri gibi güç elektroniği sistemlerinin yüksek hızlı benzetimlerini ve modellerini hazırlamak için tercih edilen bir programdır. Arayüzün farklı güç seviyeleri için güvenilir sonuçlar verdiğini test edebilmek adına 192W, 300W ve 600W çıkış güçlerinde 3 farklı benzetim hazırlanmıştır. Sonuçların kıyaslanabilmesi için bu 3 farklı güç seviyesinde hazırlanan örnekler literatürden seçilmiştir [15], [16], [21]. Şekil 7'de PLECS programı ile hazırlanan LLC rezonans dönüştürücü çizimi verilmiştir. Benzetimlerde kullanılan devre elemanları ve değerleri ise Tablo 1'de yer almaktadır. Tablo 1 istenen dönüştürücü özelliklerini ve arayüz ile hesaplanan temel parametreleri içermektedir. Değişen giriş gerilimi ve yük durumlarında çıkış gerilimini düzenlemek için değişken frekans kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında verim hesaplamalarının gerçek koşullara uygun sonuçlar verebilmesi için PLECS programının ısı modelleme özelliği kullanılmıştır. Seçilen MOSFET ve diyotların veri sayfalarında yer alan bilgiler ısı modeline işlenerek hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 1. Benzetimlerde Kullanılan Devre Parametreleri

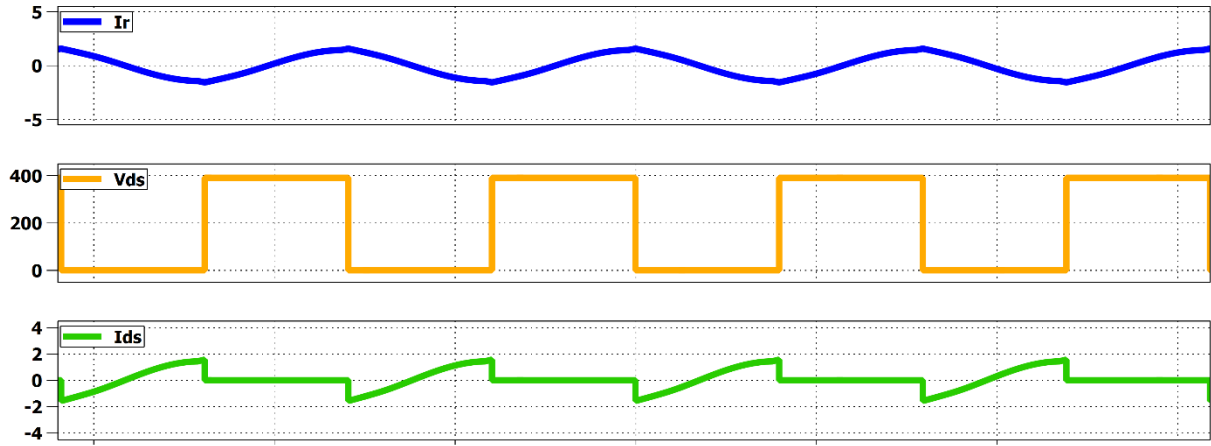
	192 W	300 W	600 W
V_{in}	350-400 V	375-405 V	350-410 V
V_o	24 V	12 V	12 V
P_o	192 W	300 W	600 W
f_0	100 kHz	120 kHz	150 kHz
f_{sw}	75 – 103 kHz	71 – 123 kHz	91 – 158 kHz
n	8	16	16
L_m	310 μ H	250 μ H	90 μ H
L_r	155 μ H	50 μ H	20 μ H
C_r	17 nF	37 nF	57 nF
Q_1 - Q_2	IPW60R280P6	IPW60R280P6	IPW60R280P6
D_1 - D_2	STPS5L60	STPS15L25D/G	VS-100BGQ030HF4

Hazırlanan benzetimler tam yükten, %10 yüke kadar farklı yük koşullarında denenmiştir. Farklı yük koşulları için rezonans kondansatör ve endüktör gerilim dalga şekilleri, tank akımı gerilim dalga şekli, transformatör giriş-çıkış gerilim dalga şekli ve diyotlar üzerindeki gerilim ve akım dalga şekilleri incelenmiştir. Şekil 8’de 300W çıkış gücünde yapılan benzetimden elde edilen tam yük ve %10 yük koşulları için rezonans akım ile Q_2 MOSFET drain-source akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Görüldüğü üzere iki yük koşulu için de MOSFET açılırken, drain-source akımı negatiftir. Bu gövde diyotunun iletimde olduğu ve SGA’nın sağlandığı anlamına gelir. Bu örnekte olduğu gibi diğer iki güç seviyesi için de incelemeler yapılmış ve tüm benzetimlerde MOSFET’lerin geniş bir yük aralığında SGA ile iletme girdiği görülmüştür.

Makalenin ikinci bölümünde anlatıldığı gibi sıfır gerilim anahtarlama (SGA), kazanç eğrilerinin her noktasında sağlanamamaktadır. Bu nedenle hazırlanan arayüz ile maksimum ve minimum kazanç eğrileri bu durum göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Kazanç eğrileri, kalite çarpanı (Q_e) ve endüktans oranına (L_n) bağlı olduğu için arayüz, en uygun $L_n - Q_e$ değerini yapılan yinelemeli işlemler sonucunda hesaplar. Benzetim sonuçları ile istenilen yük aralığında MOSFET’lerin SGA ile iletme girdiği görülmektedir. Bu durum arayüzün maksimum ve minimum kazanç değerlerini ve $L_n - Q_e$ parametrelerini hedeflenen şekilde hesaplayabildiğini göstermektedir.



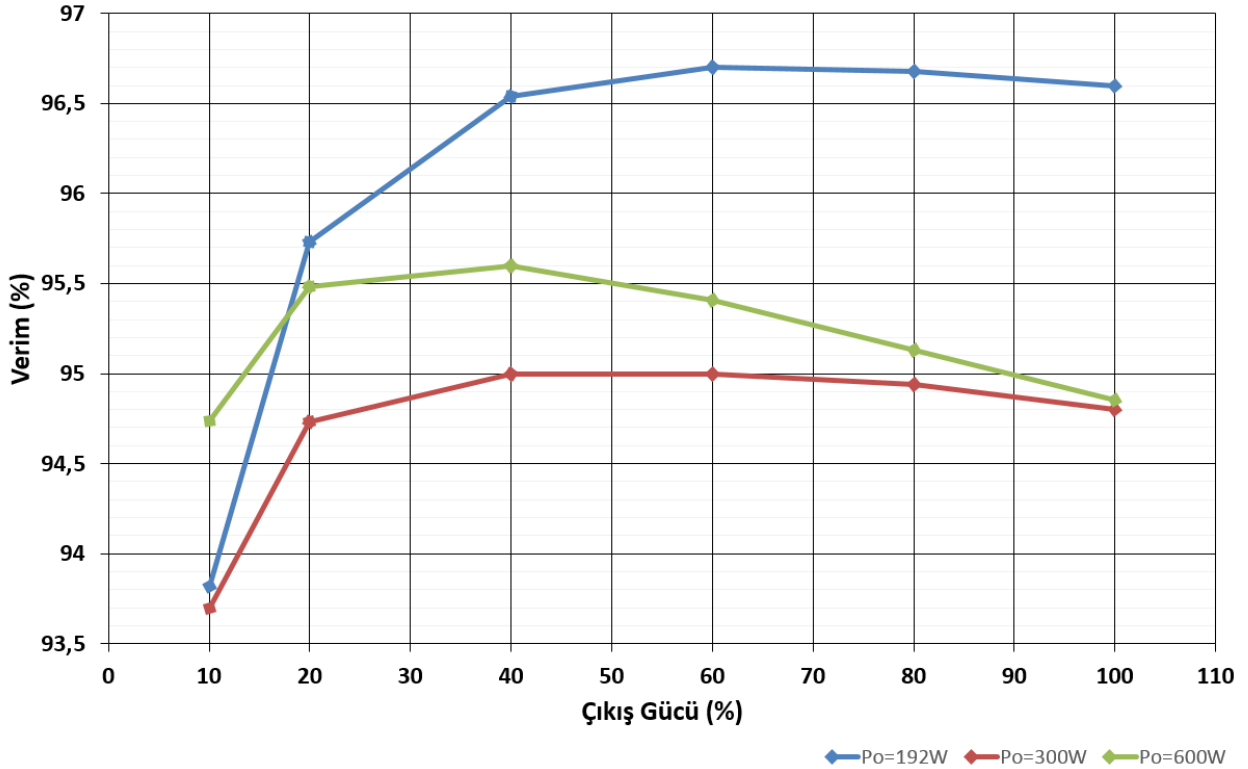
(a)



(b)

Şekil 8. Tam Yük ve %10 Yük Koşullarında Rezonans Akım Dalga Şekli ve MOSFET Gerilim, Akım Dalga Şekli. (a) Tam Yük Koşulu (b) %10 Yük Koşulu

Şekil 9’da sırasıyla 192W, 300W ve 600W çıkış gücü ile yapılan çalışmalar için farklı yük koşullarında elde edilen verim hesaplamaları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için elde edilen maksimum verimin %95 ile %97 arasında değiştiği görülmektedir. Hedeflenen yük aralığı için primer taraftaki MOSFET’lerin SGA altında çalıştığının görülmesi ve elde edilen yüksek verim sonuçları, LLC rezonans dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri olan yüksek verimliliğin, çalışma frekans aralığını endüktif bölgede tutacak şekilde yapılacak bir tasarım ile sağlanabildiğini göstermektedir. Tablo 1’de arayüz ile hesaplanan rezonans frekans f_0 ve hesaplanan çalışma frekans aralığı f_{sw} ile verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü gibi istenilen çalışma aralığında tüm benzetim sonuçlarında %93 üzerinde verim elde edilmiş olması arayüz ile hesaplanan çalışma frekans aralığının rezonans frekans civarında ve hedeflenen bölgede olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Hazırlanan Benzetimlerden Elde Edilen Verim Sonuçları

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında FHA analiz metodu kullanılarak yüksek verim elde etmeyi hedefleyen bir LLC rezonans dönüştürücü tasarım yaklaşımı ele alınmıştır. Ele alınan bu yaklaşım ile MATLAB programı kullanılarak, kullanıcıya tasarlanması hedeflenen LLC rezonans dönüştürücü için gerekli olan parametreleri sunan bir arayüz hazırlanmıştır. Bu arayüzü doğrulayabilmek için PLECS programı kullanılarak 192W, 300W ve 600W çıkış güçlerinde üç benzetim hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek üç güç seviyesi için geniş bir yük aralığında dönüştürücülerin sıfır gerilim anahtarlama ile çalıştığı gözlenmiştir. Yine elde edilen sonuçlar incelendiğinde üç farklı çıkış gücü için elde edilen maksimum verimin %95 ile %97 arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan bu değerlendirmeler hazırlanan arayüzün tutarlı sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

Yapılan çalışma ile literatürde daha önce ele alınmayan bir arayüz tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu arayüzün LLC rezonans dönüştürücü tasarım ve optimizasyon süresini kısaltacağı ve devre elemanlarının seçimi konusunda kullanıcılara büyük kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sayede arayüzün, LLC rezonans dönüştürücü topolojisi kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir. Gelecekte bu çalışma kapsamında hazırlanan benzetimlerin laboratuvar ortamında yapılacak deneysel çalışmalar ile desteklenmesi, geliştirilen arayüzün güvenilirliğini arttıracaktır. Ayrıca arayüz farklı kontrol algoritmalarının denenebileceği biçimde geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. S. M. Almardy "Three-Phase High-Frequency Transformer Isolated Soft-Switching DC DC Resonant Converters", Ph.D. Dissertation, University of Victoria, 2011.
- [2] N. E. Topuz "Design and Implementation of LLC Resonant Converter and High Frequency Transformer", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2019.
- [3] Y. Gu, Z. Lu, L. Hang, Z. Qian, G. Huang "Three-Level LLC Series Resonant DC/DC Converter", IEEE Transactions On Power Electronics, 20(4), 781-789, July 2005, 10.1109/TPEL.2005.850921.
- [4] S. Üçer "Seri Rezonans DA/DA Çeviricisinin Analiz, Tasarım Ve Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2001.
- [5] A. Awasthi "Analysis, Design & Control of Low-Q LLC DC-DC Resonant Converter for Wide Input Voltage and Load Range Applications", Master Thesis, Queen's University, September 2019.
- [6] D. Huang, F. C. Lee, D. Fu "Classification and Selection Methodology for Multi-Element Resonant Converters", IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011, 10.1109/APEC.2011.5744651.
- [7] X. Tan, X. Ruan "Equivalence Relations of Resonant Tanks: A New Perspective for Selection and Design of Resonant Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 10.1109/TIE.2015.2506151.
- [8] L. Rossetto, G. Spiazzi "Series Resonant Converter with Wide Load Range" IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, 1326-1331, 1998, 10.1109/IAS.1998.730316.
- [9] P. Jain "A Novel Frequency Domain Modelling of a Series Resonant DC/DC Converter" 12th International Conference on Telecommunications Energy, 343-350, 1990, 10.1109/INTLEC.1990.171270.
- [10] A. K. S. Bhat, M. M. Swamy "Analysis and Design of a High Frequency Parallel Resonant Converter Operating Above Resonance" 3rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 182- 189, 1988, 10.1109/APEC.1988.10565.

- [11] A. Pawellek, C. Oeder, T. Duerbaum “Comparison of Resonant LLC and LCC Converters for Low-Profile Applications”
- [12] R. L. Steigerwald “A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies”, IEEE Transactions on Power Electronics, 3(2), 174–182, April 1988, 10.1109/63.4347.
- [13] B. C. S. Cheng “Modelling and Control of the LLC Resonant Converter”, Master Thesis, The University of British Columbia, December 2012.
- [14] C. Fei “Optimization of LLC Resonant Converters: State-trajectory Control and PCB based Magnetics”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2018.
- [15] H. Huang “Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter”, Power Supply Design Seminar, 2010, Retrieved from power.ti.com/seminars
- [16] Fairchild semiconductor corporation “Half-Bridge LLC Resonant Converter Using FSFR-Series Fairchild Power Switch (FPS)”, Application Note, 2014.
- [17] S. A. Rahman “Resonant LLC Converter: Operation and Design 250W 33Vin 400Vout Design Example”, Infineon Technologies, Application Note, 2012.
- [18] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee, J. D. Van Wyk “Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter”, Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006, 10.1109/APEC.2006.1620590.
- [19] S. Çetin “Veri Merkezi Uygulamaları için Yüksek Verimli Bir LLC Rezonanslı DC-DC Dönüştürücü Tasarımı”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji, 5(1), 45-54, 2017.
- [20] W. Feng “State-Trajectory Analysis and Control of LLC Resonant Converters”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2013.
- [21] F. D. Domenico, A. Steiner, J. Catly “Design of a 600 W HB LLC Converter Using 600 V C o o l M O S P 6”, Infineon Technologies, Application Note, 2015.