

Ev Tipi Endüksiyon Isıtmalı Ocakların Analizi

Analysis of Household Induction Hobs

Metin Ozturk^{1,2}, Fatih Züngör^{1,2}, Durmuş Ersoy^{1,2}

¹Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

metinozturk@esenyurt.edu.tr, fatihzungor@esenyurt.edu.tr, durmusersoy@esenyurt.edu.tr

²Mamur Teknoloji Sistemleri Sanayi A.Ş., İstanbul, Türkiye

metin.ozturk@mamurtech.com, fatih.zungor@mamurtech.com, durmus.ersoy@mamurtech.com

Özet

Endüksiyonla ısıtma (EI) teknolojisinin, ev uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olmasının nedeni verimlilik ve güvenli çalışma özellikleri sunmasıdır. Rezonans evirici devreleri, yüksek verimlilikleri ve yumuşak anahtarlama yetenekleri nedeniyle EI sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Ürün maliyeti ve verim arasında bir denge sağlamak amacıyla endüksiyonlu ısıtma sistemlerinde, tek anahtarlı kısmi rezonanslı dönüştürücüler ve yarım köprü seri rezonanslı dönüştürücüler sıklıkla tercih edilmektedir. Son çalışmalar, endüksiyon teknolojisi alanında çok bobinli ve AA-AA tasarımların öne çıktığını göstermektedir. AA-AA rezonanslı dönüştürücülerin kullanılmasının temel nedeni, iletimdeki aktif yarı iletken anahtar adedini azaltabilmektir. Bir üreticiden bir bobinin çalıştırıldığı topolojilerin yanı sıra, bir üreticiden birden fazla bobinin çalıştırılabildiği modern tasarımlar yardımıyla ısı dağılımları iyileştirilebilir. Bu çalışmada, endüksiyon ısıtmalı ocaklarda kullanılan güncel uygulamalar hakkında genel bilgiler verilmiş, özellikle tek anahtarlı kısmi rezonanslı dönüştürücüler ile yarım köprü seri rezonanslı dönüştürücüler için detaylı devre analizleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: AA-AA dönüştürücü, çok bobinli endüksiyonlu pişirme sistemleri, ev türü endüksiyonlu ocak, yarım köprü seri rezonanslı dönüştürücü, tek anahtarlı kısmi rezonanslı dönüştürücü.

Abstract

Induction heating (IH) technology is widely preferred in household applications due to its efficiency and safe operation features. Resonant inverter circuits are commonly used in IH systems for their high efficiency and soft-switching capabilities. To strike a balance between product cost and efficiency in induction heating systems, single-switch quasi-resonant converters and half-bridge series resonant converters are often preferred. Recent studies highlight the prominence of multi-coil and AC-AC designs in the field of induction technology. The use of AC-AC resonant converters is primarily motivated by the ability to reduce the number of active semiconductor switches in the transmission. Modern designs allow for the operation of multiple coils from a single generator, improving heat distribution. In this study, general information about current applications in induction heating cooktops is provided, and detailed circuit analyses are conducted, particularly for single-switch quasi-resonant converters and half-bridge series resonant converters.

Keywords: AC-AC converter, multiple coil induction cooking systems, household induction cookers, single ended quasi resonant converters, half bridge serial resonant converters.

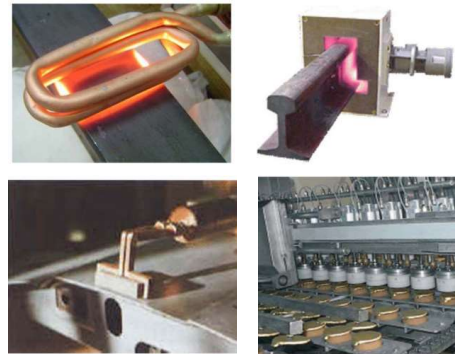
1 Giriş

Endüksiyonla ısıtma teknolojisi, günümüz endüstrisinde özellikle metal ısıtma, eritme ve sertleştirme işlemlerinde geniş bir şekilde tercih edilmektedir [1]–[3]. Ayrıca, metal içeren malzemelerin yapılandırılması, eritilmesi, pişirme, ısıtma ve türevi alanlarda endüksiyon teknolojisinin geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Şekil 1'de endüksiyon teknolojisini kullanan alanlar gösterilmektedir. Bu kullanım alanları, endüstriyel tip kullanım, medikal tip kullanım ve evsel tip kullanım olmak üzere üç temel grupta toplanmaktadır.

Tablo 1'de, endüksiyon teknolojisi alanında yapılan çalışma konularına ve uygulama alanlarına dayalı gereksinimler sunulmuştur. Endüksiyon temelli teknolojilerin elektronik içeriği devre tasarımı, manyetik eleman tasarımı ve kontrol teknikleri açısından belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır [4].

Ana çalışma ilkeleri benzer olmasına rağmen, tüm endüksiyonlu uygulamaların değişik özelliklere ve gereksinimlere sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Endüstriyel tip kullanımlar diğer uygulamalara göre daha yüksek güç talep ederken, medikal tipte kullanımlar daha düşük güç ve hassas kontrol gerektirmektedir. Ev tipi endüksiyon ısıtmalı ocaklar incelendiğinde akademik çalışmalar ve endüstriyel araştırmaların odaklandığı başlıca konular olarak geniş bir yük aralığına uygunluk (farklı tencere ve tavalar), yüksek verimlilik ve düşük maliyet beklentileri bulunmaktadır.

Şekil 2'de, ev tipi kullanım için geliştirilmiş klasik bir endüksiyon ısıtma sisteminde, gücün üretimden tencereye aktarılma sürecindeki güç akışı gösterilmektedir. AA gerilim, doğrultucu ünite kullanılarak DA gerilime çevrilir. Rezonans evirici yardımı ile üretilebilen yüksek frekanslı AA akımlar, bobin elemanında oluşturulan manyetik alan aracılığıyla tencereyi ısıtmak için kullanılır.



Şekil 1. Endüksiyon teknolojisinin kullanıldığı alanlar [4].

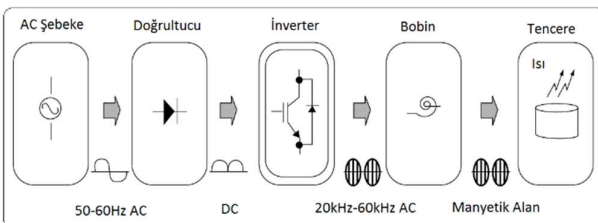
Tablo 1. Kullanıma bağlı olarak endüksiyon uygulamalarından beklenen özellikler [4].

Uygulama	Güç Elektronikliği	Modülasyon ve Kontrol	Manyetik
Endüstriyel	-Yüksek güç. -Geliştirilmiş güvenilirlik. -Montaj hattı uygulaması. -Düşük/yüksek frekans uygulamaları.	-Geliştirilmiş ara yüz ve haberleşme. -Değişken güç ve yük aralığı. -Sıcaklık kontrolü.	-Yüksek verim. -Değişken şekil. -Optimize edilmiş ısı dağılımı.
Ev Tipi	-Düşük maliyet. -Yüksek verim. -Sınırlı soğutma kapasitesi. -Orta çalışma frekansı.	-Güç faktörü ve harmonik kontrolü. -Değişken yük ve güç aralığı. -Akustik gürültüyü giderme ihtiyacı. -Sıcaklık kontrolü.	-Yüksek verim. -Ferromanyetik olmayan metallerin de ısıtılması. -Esnek ve çok bobinli ısıtma yüzeyi.
Medikal	-Düşük maliyet. -Yüksek kalite faktörlü rezonans. -Yüksek çalışma frekansı.	-Tam güç ve sıcaklık kontrolü. -Frekans seçimi.	-Bölgesel ve kısmi ısıtma. -Kontrollü manyetik alan etkileşimleri. -Ferromanyetik akışkanlar.

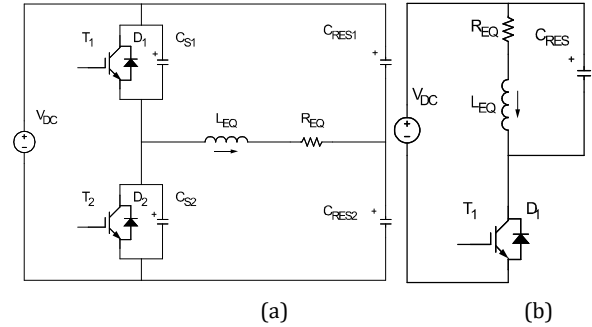
Rezonanslı eviriciler, geleneksel endüksiyon ısıtma sistemlerinin temel bileşenleridir [5]–[7]. Maliyet, verim ve performans arasındaki ilişki göz önüne alındığında literatürde farklı rezonanslı eviriciler önerilmiştir [8]–[10]. Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında rezonanslı eviricilerin tercih edilmesinin en önemli nedeni sinüzoidal dalga şekillerinin sonucu olarak yarı iletkenlerin sıfır gerilim ve sıfır akımda anahtarlanmasıdır [11], [12].

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde en sık kullanılan rezonanslı dönüştürücüler genel devre şemaları Şekil 3'te verilen yarım köprü seri rezonanslı (YKSR) ve tek anahtarlı kısmi rezonanslı (TAKR) dönüştürücülerdir. TAKR dönüştürücüler ile karşılaştırıldığında, YKSR dönüştürücüler yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmalarının yanı sıra tasarım ve kontrol kolaylığı açısından da avantajlıdır. Tüm avantajlarına rağmen YKSR dönüştürücüler TAKR dönüştürücülerden daha maliyetlidir. YKSR dönüştürücü ile TAKR dönüştürücülerin çeşitli açılardan karşılaştırılması amacıyla Tablo 2 hazırlanmıştır. Tablo 2'de verilen tüm değerler çeşitli üreticilere ait ölçüm sonuçlarıdır. YKSR evirici için BSH ve Whirlpool firmalarının ürünleri referans alınırken, TAKR evirici için E.G.O, Copreci, Femaş, Midea ve benzeri firmalarının ürünleri kullanılmıştır.

Son dönem endüksiyonlu ocak çalışmaları dikkatlice incelendiğinde, devre tasarımına yönelik olarak birden fazla bobin içeren ve (veya) köprü doğrultucu içermeyen AA-AA rezonanslı dönüştürücülerin kullanıldığı görülmektedir [5], [13], [14]. AA-AA dönüştürücülerin temel amacı kullanılan yarı iletken sayısını azaltmaktır [5], [15]. Endüksiyonlu ocak uygulamalarında kullanılan AA-AA dönüştürücülere örnek Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 2. Endüksiyonla ısıtma sistemleri için güç akışı.



Şekil 3. (a) YKSR dönüştürücü için genel devre şeması (b) TAKR dönüştürücü için genel devre şeması.

Tablo 2. YKSR ve TAKR eviricili çözümlerin karşılaştırılması.

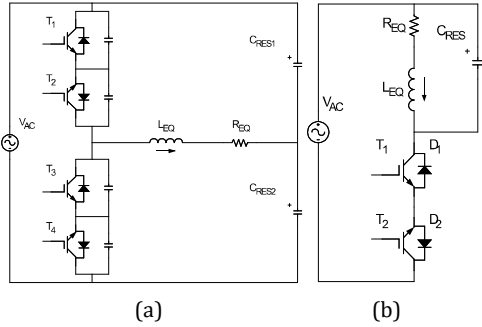
	YKSR Evirici	TAKR Evirici
Maksimum Güç	3600 W	2000 W
Minimum Güç	50 W	1000 W
Tasarım Kolaylığı	Kolay	Zor
Akım Dalga Şekli Simetrikliği	Simetrik	Değil
Tasarım Pahalılığı	Pahalı	Ucuz
Kullanılan Anahtar Sayısı	Bobin x 2	Bobin x 1

Diğer taraftan AA-AA YKSR eviricilerin verimi düşürdüğüne yönelik çalışmalar literatürde yer almaktadır [8]. Önerilen devrede verimi arttırabilmek amacıyla doğrultucu ve evirici eşzamanlı ve birbirlerine bağımlı olarak kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Böylelikle yarı iletkenlere paralel bağlı diyotların kullanılmasına gerek kalmamıştır. Önerilen çözümün dezavantajı yarı iletkenler anahtarların, kaynak gerilimi ve rezonans kondansatör gerilimlerinin toplamına maruz kalmaları ve iletme girme anında anahtar uçlarında bu gerilim değerinin bulunmasıdır [8].

Standart TAKR eviriciye alternatif olarak önerilen AA-AA dönüştürücünün [16] özellikle sistem verimi açısından avantaj sağlarken, verimi arttırmak için SiC temelli JFET yarı iletken kullanımını, toplam tasarım maliyetinde artışa neden olmaktadır.

YKSR evirici devresinden elde edilen AA-AA YKSR yükseltici dönüştürücü çalışması [17], mevcut YKSR eviriciden daha verimli bir çözüm önermektedir. İlgili dönüştürücüde verimi arttırmak için SiC temelli JFET yarı iletkeni kullanılması toplam tasarım maliyetinde artışa neden olmaktadır.

Endüksiyon ısıtılmalarda kullanılan her bir bobin, birbirinden bağımsız üreteçler yardımıyla çalıştırılabildiği gibi, tek üreteç yardımıyla birden fazla bobinin çalıştırılabildiği uygulamalar geliştirilmektedir [15], [18]–[21]. Endüksiyonlu ocaklarda tek üreteçle birden fazla bobinin çalıştırılabildiği ilk uygulamalarda, elektromekanik anahtarlar sayesinde paralel bağlanabilen bobinler bulunmaktadır [22]. Önerilen devrede tam köprü seri rezonanslı evirici devresi kullanılmış, her bobin için ayrı bir kontrol rölesi eklenmiştir. Önerilen çözümde her bir bobin için ayrı bir röle kullanılması, hem elektronik maliyetini arttırmakta hem de anahtarlama anlarında ilave elektriksel gürültüye neden olmaktadır. Ancak özellikle tek bobin çalıştırıldığında yarı iletken kayıplarının azaltılması hedeflenmektedir.

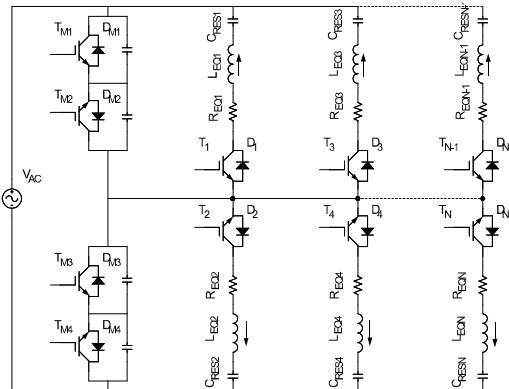


Şekil 4. (a) YKSR Eviricili AA-AA dönüştürücünün devre şeması (b) TAKR Eviricili AA-AA dönüştürücü devre şeması [23].

Literatürde, iki adet bobini kontrol edebilmek amacıyla dört yerine üç adet yarıiletkenin kullanıldığı yeni bir YKSR evirici önerilmiştir [24]. Önerilen çözümde her iki bobin aynı frekansta çalıştırılarak bir adet yarı iletken kazanç sağlansa da her iki bobin birbirlerine bağımlı olarak çalışmak zorunda kalmıştır.

Dört adet bobinin iki adet YKSR evirici yardımıyla birbirlerinden bağımsız olarak çalıştırılabildiği uygulamalar bulunmaktadır [25]. Isıtılacak tencerenin konumu belirlenerek hangi bobinin hangi üreteç yardımıyla kontrol edileceği tespit edilmiş, bu sayede verim ve performans avantajı amaçlanmıştır. Önerilen çözümde rölelerin kullanılması, hem elektronik maliyetini arttırmakta hem de anahtarlama anlarında ilave elektriksel gürültülere neden olmaktadır.

Bir dönüştürücünden birden fazla bobinin çalıştırılması konusunda yapılan ilk çalışmalar, ısıtılacak tencere başına çok sayıda bobinin düştüğü çok bobinli ürünler adına başlangıç niteliğindedir. Böylece, tek üreteçten çok adetli ve standart bobinlere göre çok daha küçük bobinlerin kullanılabilirdiği yeni bir endüksiyon teknolojisi geliştirilmiştir [4], [24]. Şekil 5'de, yeni nesil çok bobinli bir YKSR dönüştürücü örneği gösterilmektedir. Önerilen çözümde, kullanılacak bobin adedi kadar ilave yardımcı yarı iletken kullanılmakta ve bunun sonucu olarak bobin sayısı arttıkça kayıplar artarak verim düşmektedir.



Şekil 5. Çok bobinli AA-AA dönüştürücü devre şeması [4].

2 Ev Türü Endüksiyonlu Ocaklar

Özellikle son dönemlerde elektrikli ev aletlerindeki kullanımın artması ve de elektriksel gereksinimlerin özellikle mutfakta



Şekil 6. Ankastre türü endüksiyon ısıtılmalı ocak modelleri (a) 30 cm (b) 60 cm [26].



Şekil 7. Portatif endüksiyon ısıtılmalı ocak modelleri (a) üst yüzeyden görünüş (b) örnek tasarım [26].

yoğunlaşması sonucu, tercih edeceğimiz elektrikli ev aletinin maksimum güç değerini limitlenmektedir. Diğer taraftan tükenir enerji kaynaklarından olan gazın, hem güvenlik hem de yerel standartların zorlamaları sonucu kullanım alanlarının azalması, elektrikle çalışan pişirici ocakları zorunlu bir tercih haline getirmiştir. Bunun sonucu olarak evlerde kullanılan elektrik şebekesinin güç limitlerine uygun olacak şekilde, endüksiyon ısıtılmalı ocaklar tek ya da iki fazlı çalıştırılacak şekilde tasarlanırlar. Genel olarak ankastre ve 30,60 ve 90cm ölçülerinde tasarlanan endüksiyon ocaklara ilişkin örnekler Şekil 6'da gösterilmektedir. Kontrol ünitesi yardımıyla endüksiyon ocağı kontrol edebilen kullanıcı, genellikle 1-10 aralığındaki seviyelerde tencereyi son derece hassas bir şekilde ısıtabilir.

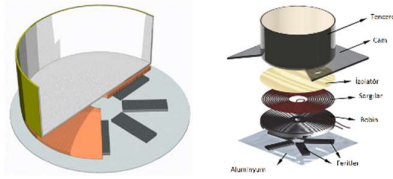
Bunula birlikte Uzakdoğu'da oldukça yaygın şekilde kullanılan ve Şekil 7'de gösterilen taşınabilir endüksiyonlu ocaklar, mevcut ocaklarından vazgeçmeden endüksiyon ocağın avantajlarını kullanmak isteyen kullanıcılar için alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.1 Ev Türü Endüksiyon Isıtılmalı Ocaklar İçin Bobin Modelleri

Ev türü endüksiyon ısıtılmalı ocaklar için tasarlanan bobinler, eviriciler tarafından beslenen ve geometrik olarak ocak yüzeyine uyumlu düzlemsel bobinlerdir [27]. Bahsedilen düzlemsel bobinler ile ilgili olarak yapılan akademik çalışmalar, bobinlerin elektromanyetik modellenmesi [28], [29] bobin kayıp dağılımlarının analizi [30], bobin kayıplarının analizi [31]-[33] ve benzeri konularda yoğunlaşmaktadır.

Şekil 8'de alüminyum plakaya yerleştirilmiş halde bulunan ferit, bobin ve tencere kesiti detaylarının ayrıntılı olarak verildiği bir bobin kesiti gösterilmektedir. Alüminyum plaka feritleri taşımanın yanı sıra manyetik yönlendirme ve soğutma amaçlarıyla da kullanılmaktadır. Ayrıca pratik uygulamalarda bobin ve ısıtılacak tencere arasında 4mm kalınlığında, yalıtımcı ve sıcaklık dayanımı 700C'lere ulaşan seramik temelli bir cam kullanılmaktadır.

Uygulama alanı, performans beklentisi ve talep edilen çıkış gücüne bağlı olarak, ev türü endüksiyon ısıtılmalı ocaklarda kullanılan bobinler, iletken sargılar ve ferit çekirdekler plastik taşıyıcıya



Şekil 8. Endüksiyon bobini kesiti [30], [34].



Şekil 9. Plastik karkaslı bobin örneği.

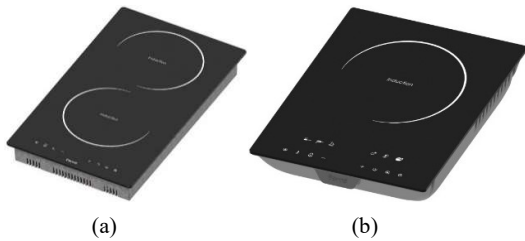
monte edilecek şekilde tasarlanabilir. Bu yöntem ile tasarlanan ve Şekil 9'da bir uygulaması gösterilen bobinler, ilave bir alüminyum plaka ile kullanılmayacaklar ise genellikle < 2000W mertebesinde düşük güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Bu bobinlerde kullanılan ferit nüvelerin BS doyum değerleri de düşük seçilerek maliyet avantajı sağlanmaya çalışılmaktadır. Ancak düşük BS değerine sahip nüvelerin kullanılması sonucu bobinlerin de soğutulması zorunlu hale gelmektedir.

2.1.1 Tencere, üreteç ve bobin sayısı arasındaki ilişki

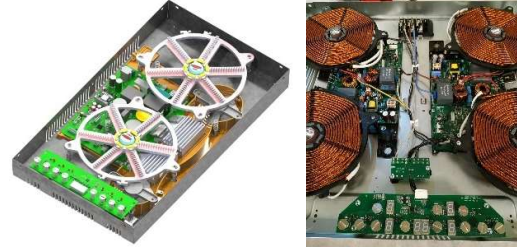
Endüksiyon ısıtmalı ocaklarda kullanılan bobinler, ısıtmak istenen tencerenin türü, boyutu, çıkış gücü, kullanım kolaylığı ve benzeri nedenlerden ötürü çok çeşitli geometrik ölçülerde tasarlanmaktadır. Tek üreteç ile tek bir bobin çalıştırılabileceği gibi, tek üreteçten birden fazla bobinin çeşitli sürme teknikleri ve devre topolojileri yardımıyla çalıştırılabileceği uygulamalar da tercih edilmektedir [35]–[38].

2.1.1.1 Tencerenin tek bir bobin ile ısıtıldığı uygulamalar

Hem Şekil 10'de ve hem de Şekil 11'de her bir bobin için bağımsız bir üreteç içeren standart ev tipi endüksiyon ısıtmalı ocaklar gösterilmektedir. Standart endüksiyon ocaklarda, ısıtmak istenen tencere, cam üzerinde işaretlenmiş bölgeye yerleştirildiğinde en verimli pişirme sağlanmaktadır. Aksi halde ya ısıtma sağlanmaz ya da daha az verimli bir ısıtma yapılmış olur.



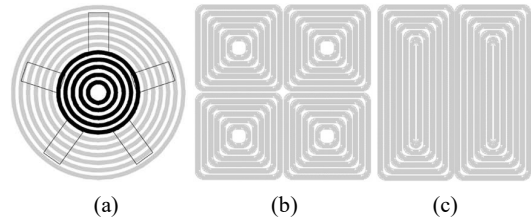
Şekil 10. Endüksiyon ısıtmalı ocak üst yüzey görüntüsü (a) ankastre (b) taşınabilir [26].



Şekil 11. Ankastre türü endüksiyon ısıtmalı ocağın içten görünüşü (a) iki ısıtıcılı ocak (b) dört ısıtıcılı ocak [26].

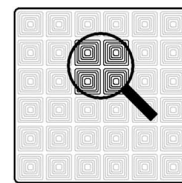
2.1.1.2 Tencerenin birden fazla bobin ile ısıtıldığı uygulamalar

Diğer taraftan, yalnızca cam yüzeyinde işaretlenmiş bölgede ısıtma yapmak, ocak yüzeyinin yalnızca belirli bir kısmında pişirme yapılabilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle son dönemde ocak yüzeyinin tamamını kullanmaya yönelik ve tencere başına birden fazla bobin kullanarak homojen ısıtma yapmayı amaçlayan çalışmalar artmaktadır [38]. Standart uygulamalar ile kıyaslandığında çok bobin içeren bu yöntem sayesinde kullanıcı tencereyi ocak yüzeyinde bulunan herhangi bir bölgeye yerleştirebilir. Elektronik kontrol yöntemleri yardımıyla tencerenin yeri tespit edilerek ilgili bobinler enerjilendirilir ve tencerenin ısıtılması sağlanır. Bununla birlikte çok bobinli yapılarda kullanılan bobinler çok farklı geometrik şekillerde tasarlanabilir. Yuvarlak formulu, kare formulu ya da dikdörtgen formulu tasarlanabilen bu bobinlere ilişkin örnekler Şekil 12'te gösterilmektedir.



Şekil 12. Çok bobinli yapılarda kullanılan bobin örnekleri [24] (a) yuvarlak formulu bobin örneği (b) kare formulu bobin örneği (c) dikdörtgen formulu bobin örneği.

Endüksiyon ısıtmalı ocak sistemlerinde ısıtmak istenen tencerenin türünün tespiti güvenli ve verimli ısıtma için son derece kritiktir. Ayrıca çok bobinli sistemlerde tencere türüne ek olarak tencere konumunun kontrolcü tarafından tespit edilmesi, aktifleştirilecek bobinlerin belirlenebilmesi için son derece kritiktir. Şekil 13'te kare bobinlerden oluşan endüksiyonlu ocak uygulamasında tencerenin konumuna bağlı olarak aktif hale getirilen bobinler gösterilmektedir.

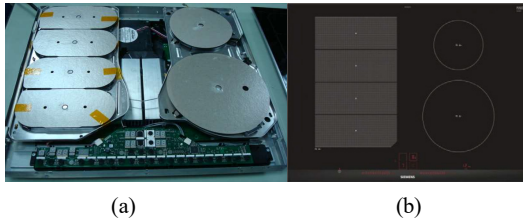


Şekil 13. Tümüyle aktifleştirilmiş yüzey [24].

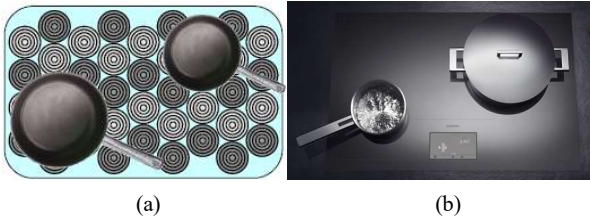


Şekil 14. Tek tencere ısıtma için çoklu bobin uygulama örnekleri.

Uygulamada kullanılan çok bobinli endüksiyonlara örnek olarak Şekil 14 gösterilebilir. Şekil 15’de, hem standart hem de kare bobinlerin birlikte kullanıldığı bir uygulama gösterilmektedir. Bu ve benzeri uygulamaların amacı ise hem ürün maliyetini düşürmek hem de kullanıcı alışkanlıklarıdır. Şekil 16’de 90cm endüksiyonlu ocakta 40 adet bobin, Şekil 17’de 90cm endüksiyonlu ocakta 12 bobin kullanılmaktadır.



Şekil 15. Siemens firmasına ait çok bobinli endüksiyon ısıtılmalı ocak (a) içten görünüşü (b) genel görünüşü.



Şekil 16. Bosch firması çok bobin içeren endüksiyon ısıtılmalı ocak [39] (a) içten görünüşü (b) genel görünüşü.



Şekil 17. De Dietrich firması çok bobin içeren endüksiyon ısıtılmalı ocak (a) içten görünüşü (b) genel görünüşü.

Özellikle çok bobinli endüksiyon ısıtılmalı ocak uygulamalarında, kullanılacak bobin adedi, eviricinin türü, güç kontrol yöntemi ve yük tanıma yöntemleri arasındaki detaylı ilişki, pratik uygulamada çok çeşitli çözümlerin ve ürünlerin oluşmasına neden olmaktadır.

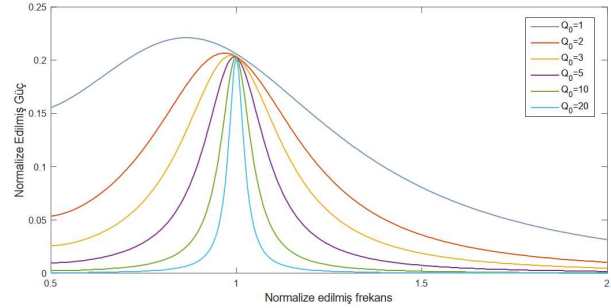
3 Endüksiyon Isıtılmalı Ocak Tasarımları İçin Dönüştürücü Modelleri

Endüksiyon ısıtılmalı ocaklarda ısıtılmak istenen tencerenin türü ve boyutuna bağlı olarak elektronik devredeki eşdeğer direnç ve endüktans değişmektedir. Güç elektroniği devreleri yardımıyla elde

edilebilen yük frekanslı (20kHz-100kHz) akımlar yardımıyla değişken manyetik alan oluşturularak tencere tabanının ısıtılması hedeflenmektedir. Bahsedilen güç elektroniği devreleri sıklıkla YKSR ve TAKR eviriciler olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.1 Yarım Köprü Seri Rezonanslı Evirici (YKSR)

1959 yılından beri kullanılmakta olan YKSR evirici devresi, DA akımı AA akıma çevirebilmek için farklı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. [1], [12]. YKSR eviricide rezonans anında devreden geçen akım sinüzoidaldir. Diğer taraftan yarı iletken anahtarlardan geçen akım yarım dalga sinüs, gerilim ise kare dalgadır [1], [40]. Şekil 3(a)’da verilen L_{EQ} eşdeğer endüktans değerini ve R_{EQ} eşdeğer direnci tanımlarken, C_{RES1} ve C_{RES2} ise rezonans kondansatörlerini tanımlamaktadır. T_1 ve T_2 yarı iletkenler anahtarlar iken V_{DC} değeri ise DA gerilimi tanımlamaktadır. YKSR için devre analizi yapılırken, Q kalite faktörü yeterince büyük seçildiğinde rezonans devresi akımının sinüzoidal olduğu düşünülmüştür. Bu kabul, seri RLC devresinin doğal sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [41].



Şekil 18. Q parametresi ile frekansa bağlı akım değişimi grafiği [42].

YKSR devre analizinde kullanılacak temel değişkenler sırasıyla, rezonans frekansını tanımlayan ω_0 , devrenin karakteristik empedansını tanımlayan Z_0 ve kalite faktörünü tanımlayan Q değerleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 18’de frekans ve akıma bağlı Q grafiği gösterilmektedir.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{EQ}C_{RES}} \quad (1)$$

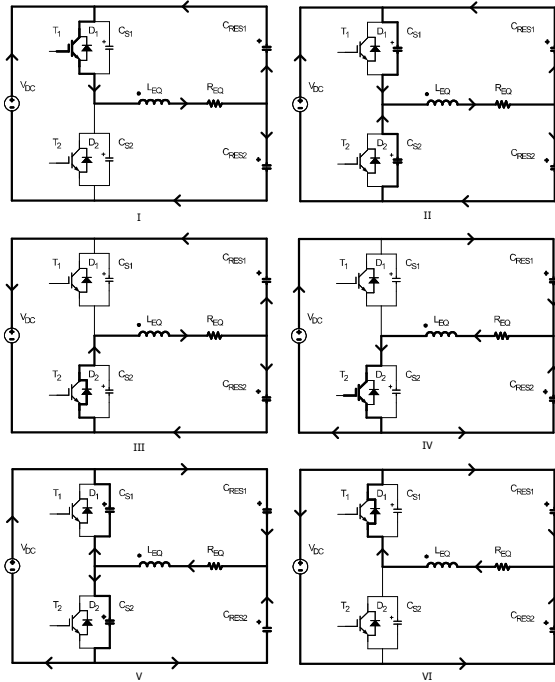
$$Z_0 = \sqrt{L_{EQ}/C_{RES}} = \omega_0 L_{EQ} = 1/(\omega_0 C_{RES}) \quad (2)$$

$$Q = \omega_0 L_{EQ}/R_{EQ} = 1/(\omega_0 C_{RES}R_{EQ}) = Z_0/R \quad (3)$$

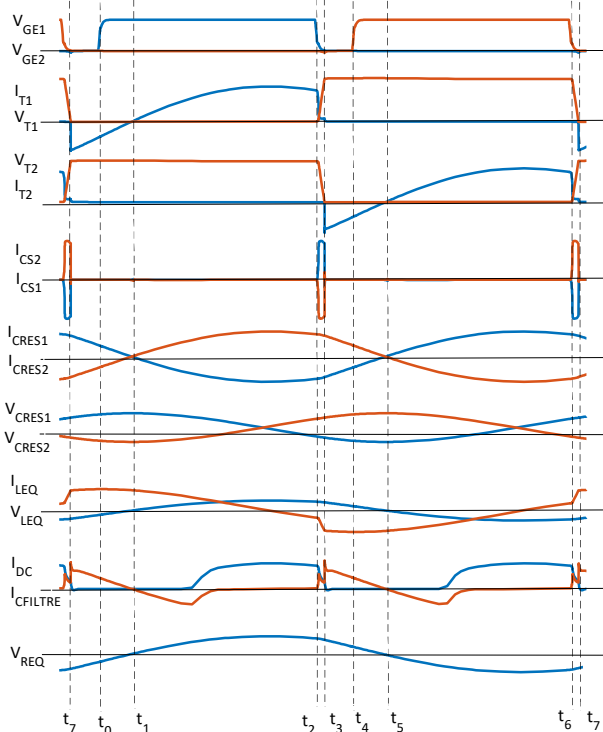
YKSR eviricili ndüksiyonlu ocak uygulamalarında çalışma frekansı f , f_0 rezonans frekansının üzerinde bir noktada seçilerek güç kontrolü yapılır [1]. Endüktif bölgede çalışılmanın temel nedeni, hem iletim hem de kesim anında yumuşak anahtarlama yapılabilmesi ve iletim ve anahtarlama kayıplarının ters orantılı olarak değişmesidir. YKSR dönüştürücü için tanımlanmış 6 farklı çalışma evresi Şekil 19’de gösterilmektedir.

Şekil 20’de ise simülasyon çalışmaları sonucunda bulunan gerilim ve akım dalga şekilleri detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

Başlangıçta; T_1 ve T_2 yarı iletken anahtarları kesim durumundadır. V_{DC} giriş gerilimi V kabul edildiğinde C_{RES1} ve C_{RES2} rezonans kondansatörlerinin gerilim değeri $V/2$ ’dir. L_{EQ} ile gösterilen endüktör elemanından akım geçmemektedir.

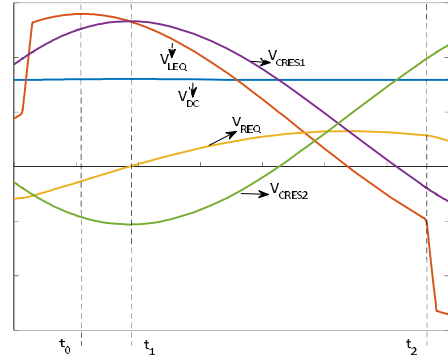


Şekil 19. YKSR eviriciye ait çalışma evreleri [42].

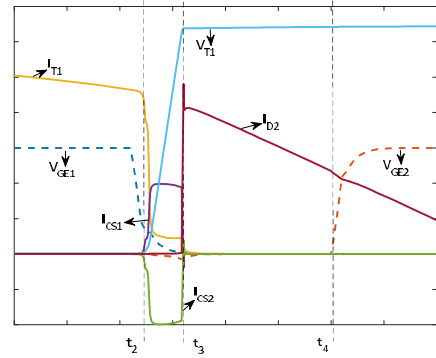


Şekil 20. YKSR eviriciye ait gerilim ve akım dalga şekilleri [42].

Evre I ($t_1 < t < t_2$); Şekil 20 ve Şekil 21’ de detaylı olarak gösterildiği gibi, D_1 diyodu kesime girerken, T_1 yarı iletkeninin iletme girmesiyle ilgili evre başlayacaktır. Girişten çekilen akım I_{DC} , $T_1 - L_{EQ} - R_{EQ} - C_{RES2}$ devre elemanlarından geçerek çevrimini tamamlayacaktır. C_{RES1} rezonans kondansatörü, I_{CRES1} akımı ile



Şekil 21. $t_0 < t < t_2$ evresine ait gerilim dalga şekilleri.



Şekil 22. $t_2 < t < t_4$ evresine ait gerilim ve akım dalga şekilleri.

deşarj olurken C_{RES2} kondansatörü I_{CRES2} akımı ile şarj olacaktır. L_{EQ} endüktöründen geçen akım değerinin yarısı C_{RES1} kondansatörünündeşarj akımı I_{CRES1} , diğer yarısı ise giriş şebekesinden çekilen kaynak akımı I_{DC} ’dir.

$$V_{DC} = v_{LEQ}(t) + v_{REQ}(t) + v_{CRES2}(t) \quad (4)$$

$$v_{LEQ}(t) + v_{REQ}(t) - v_{CRES1}(t) = 0 \quad (5)$$

Evre II ($t_2 < t < t_3$); Şekil 22’te detaylı olarak gösterildiği gibi T_1 yarı iletken anahtarının kesime girmesiyle başlayacaktır. T_1 yarı iletken anahtarının kesime girmesiyle, bastırma kondansatörü C_{S1} DA gerilim ile şarj olurken (I_{CS1}) aynı zamanda bastırma kondansatörü C_{S2} deşarj olacaktır (I_{CS2}). Çalışma evresi sonlanıncaya kadar kaynaktan çekilen I_{DC} akımı devreden geçmeye devam edecektir. T_1 yarı iletkeni kesime girdiğinde C_{S1} bastırma kondansatörünün şarj olması sonucu, T_1 uç gerilimi bir anda yükselmez. Böylece T_1 yarı iletken anahtarının yumuşak anahtarlama ile (ZVS) kesime girmesi sağlanacaktır.

Evre III ($t_3 < t < t_5$); Bastırma kondansatörü C_{S1} ’in I_{CS1} akımı ile şarj olması ve bastırma kondansatörü C_{S2} ’nin I_{CS2} akımı iledeşarj olması sonucu D_2 diyotu üzerinden I_{D2} akımı geçmeye başlayacaktır. D_2 diyotundan I_{D2} akımının geçmesi sonucu kaynak akımının yönü değişir. L_{EQ} ile gösterilen endüktör elemanı kaynak gibi davranarak devreden geçen akımın hızlıca sifira inmesine izin vermeyecektir. Bunun sonucu olarak rezonans devre akımının tamamı D_2 diyot elemanı üzerinden geçecektir ($I_{LEQ} = I_{D2}$). İlk iki evrede olduğu gibi üçüncü evrede de C_{RES1} kondansatör elemanıdeşarj olmaya devam ederken C_{RES2} kondansatör elemanı şarj olmaya devam edecektir.

Evre IV ($t_5 < t < t_6$); D_2 diyot elemanı kesime girerken T_2 yarı iletken anahtarı iletme girecektir. D_2 diyot elemanı iletimdeyken T_2 yarı iletken anahtarına sürme sinyali uygulanarak anahtarlama

kaybının azaltılması amaçlanmaktadır. Bunun nedeni D_2 diyodu iletimde olduğu sürece T_2 yarı iletken anahtarının iletime giremeyecek olmasıdır. Rezonans akımının yön değiştirmesi sonucu T_2 anahtarı sıfır gerilimde iletime girecektir (ZVT). Girişten çekilen akım I_{DC} , $C_{RES1} - R_{EQ} - L_{EQ} - T_2$ devre elemanları üzerinden çevrimini tamamlarken C_{RES2} kondansatör akımı I_{CRES2} , $R_{EQ} - L_{EQ} - T_2$ devre elemanları üzerinden çevrimini tamamlayacaktır. IV. evrede C_{RES1} kondansatör elemanı şarj olmaya başlarken C_{RES2} kondansatör elemanı deşarj olmaya başlayacaktır. L_{EQ} endüktöründen geçen I_{LEQ} akımının yarısı C_{RES2} kondansatörü deşarj akımı I_{CRES2} sağlarken, diğer yarısı ise DA kaynak akımı I_{DC} sağlayacaktır. IV. evre için tanımlanmış devre denklemleri alta verilmektedir.

$$V_{DC} = v_{CRES1}(t) - v_{REQ}(t) - v_{LEQ}(t) \quad (6)$$

$$v_{CRES2}(t) + v_{LEQ}(t) + v_{REQ}(t) = 0 \quad (7)$$

Evre V ($t_6 < t < t_7$); T_2 anahtarının kesime girmesi sonucu paralel bağlı bastırma kondansatörü C_{S2} kaynaktan çekilen I_{CS2} akımı ile şarj olurken, bastırma kondansatörü C_{S1} , I_{CS1} akımı ile deşarj olacaktır. T_2 yarı iletkeni kesime girdiğinde C_{S2} bastırma kondansatörünün şarj olması sonucu, T_2 uç gerilimi bir anda yükselemez. Böylece T_2 yarı iletkenin anahtarının yumuşak anahtarlama ile (ZVS) kesime girmesi sağlanacaktır.

Evre VI ($t_7 < t < t_1$); Bastırma kondansatörü C_{S1} 'nin I_{CS1} akımı ile deşarj olması sonucu D_1 diyodu üzerinden I_{D1} akımı geçmeye başlayacaktır. L_{EQ} ile gösterilen endüktör elemanı kaynak gibi davranarak devreden geçen akımın hızlıca sıfıra inmesine izin vermeyecektir. Bunun sonucu olarak rezonans devre akımının tamamı D_1 diyot elemanı üzerinden geçecektir ($I_{LEQ} = I_{D1}$). İlk iki evrede olduğu gibi altıncı evrede de C_{RES1} kondansatör elemanı şarj olmaya devam ederken C_{RES2} kondansatör elemanı deşarj olmaya devam edecektir.

3.2 Tek Anahtarlı Kısmi Rezonanslı Evirici (TAKR)

TAKR eviriciye ait devre şeması Şekil 3 (b)'de gösterilmektedir. T_1 yarı iletken anahtarının iletime girmesi ile birlikte DA kaynak gerilimi bobine uygulanır. L_{EQ} endüktörünün akım değeri yükselerek endüktörde enerji depo edilir. Anahtarın kesime girmesinin sonucu olarak endüktör ve kondansatör arasında rezonans başlar. Kondansatörün deşarj olmasının sonucu olarak diyot iletime girecek ve V_{CE} geriliminin sıfırın altına inmesini önleyecektir [43]-[46].

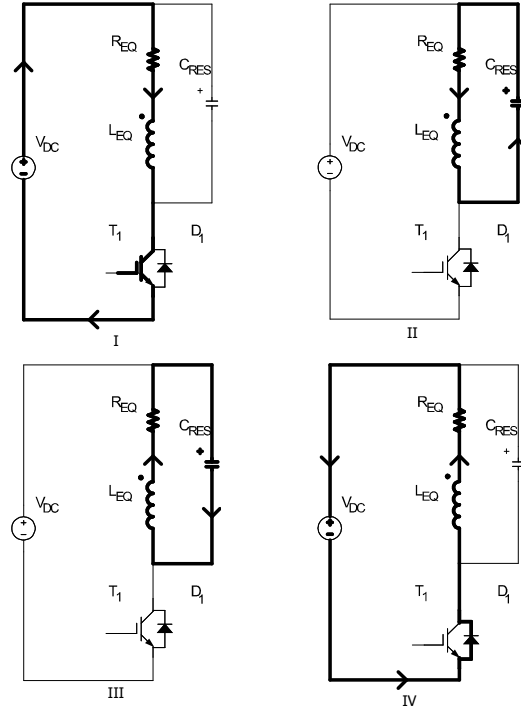
Şekil 23'te TAKR eviricinin dört temel çalışma evresi, Şekil 24'te ise bu evrelere ait gerilim ve akım dalga şekilleri gösterilmektedir. $t_1 < t < t_2$ evresinde T_1 anahtarı iletimdedir ve bu evrede devre seri RL devresi şeklinde çalışır. Diğer taraftan $t_2 < t < t_4$ evresinde L_{EQ} ve C_{RES} arasında rezonans oluşacak ve devre seri RLC devresi şeklinde çalışacaktır.

Evre I ($t_1 < t < t_2$); yarı iletken anahtarın ters paralel bağlı diyot sayesinde sıfır gerilimde iletime girmesiyle başlayacak (ZVT), T_1 yarı iletken anahtarı kesime girdiğinde sona erecektir. I_{DC} kaynaktan akımı, $T_1 - L_{EQ} - R_{EQ}$ devre elemanlarından geçerek çevrimini tamamlayacaktır. RL devresi şeklinde modellenen bu evre süresince endüktör akımı I_{LEQ} , T_1 yarı iletkeninden geçmektedir. İlgili evreye ait devre denklemleri aşağıda gösterilmektedir.

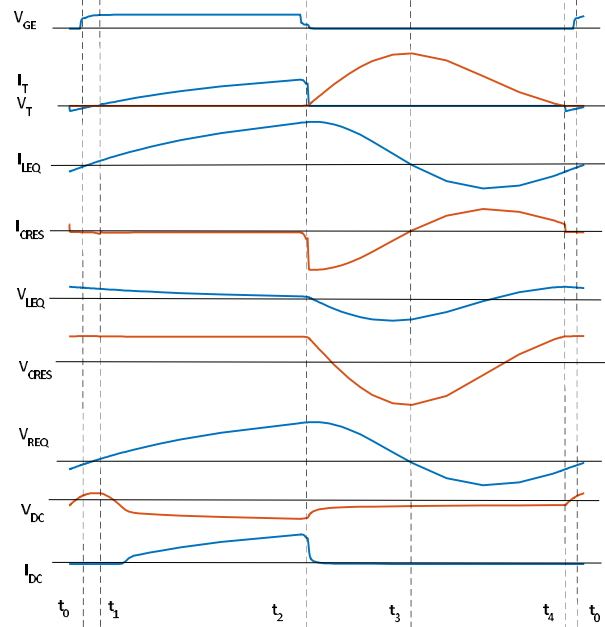
$$i_{LEQ}(0) = 0 \quad (8)$$

$$i_{LEQ} = i_T = \frac{V_{DC}}{R_{EQ}} \left(1 - e^{-\left(\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}\right)t}\right) \quad (9)$$

$$V_{DC} = v_{LEQ} + v_{REQ} \quad (10)$$

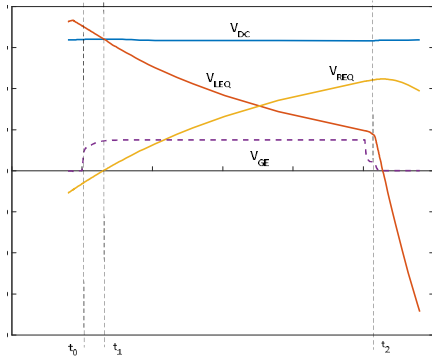


Şekil 23. TAKR eviricinin çalışma evreleri [43], [44].

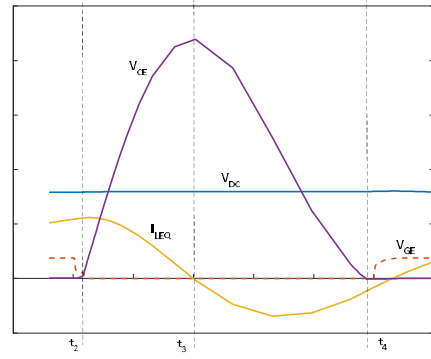


Şekil 24. TAKR eviriciye ait gerilim ve akım dalga şekilleri.

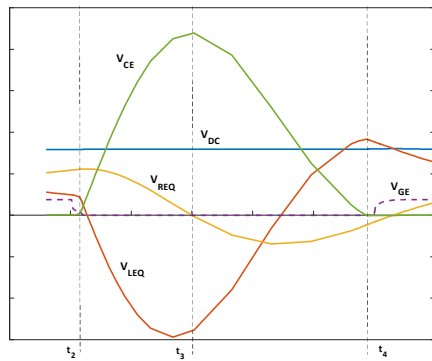
Evre I için kaydedilen gerilim dalga şekilleri Şekil 25'te ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Yarı iletken anahtarın kesime girmesinden hemen sonra V_{CE} gerilim değeri, V_{DC} gerilim değerine ulaşana kadar rezonans devresi akımı artmaya devam edecektir. Ancak rezonans akımındaki artış değeri analizin kolaylığı için ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan dolayı RL devresi olarak çalışılan evrede ölçülen maksimum I_{LEQ} akımı, TAKR devresinde dolaşan maksimum $I_{LEQ MAX}$ değerine eşit kabul edilerek analiz yapılmaktadır.



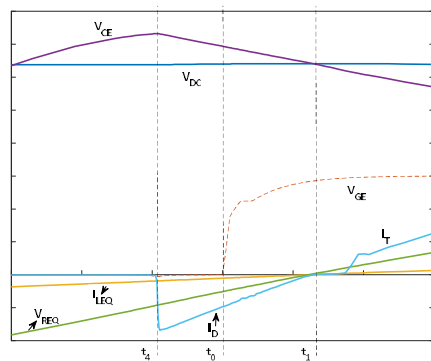
Şekil 25. $t_0 < t < t_2$ evresine ait gerilim dalga şekilleri.



Şekil 27. $t_2 < t < t_4$ evresine ait gerilim ve akım dalga şekilleri.



Şekil 26. $t_2 < t < t_4$ evresine ait gerilim dalga şekilleri.



Şekil 28. $t_3 < t < t_4$ evresine ait gerilim ve akım dalga şekilleri.

Evre II ($t_2 < t < t_3$); yarı iletken anahtarın kesime girmesi ile birlikte başlayacaktır. Bobinden geçen akım ani olarak sıfıra düşmeyecek, endüktör bir kaynak haline dönüşerek devreyi beslemeye başlayacaktır. Bobinin tam anlamıyla deşarj olması ile birlikte Evre II sona erecektir. Evre II için geçerli devre denklemi aşağıda verilmektedir. Şekil 26’de gösterildiği gibi i_{LEQ} bobin akımının azaldığı ve bunun sonucu olarak di_{LEQ}/dt değerinin negatif olduğu Evre II süresi boyunca yarı iletken anahtarın maruz kaldığı V_{CE} gerilimi artacaktır.

$$V_{CRES} = V_{LEQ} + V_{REQ} \quad (11)$$

$$V_{CE} = V_{DC} - V_{LEQ} - V_{REQ} \quad (12)$$

Evre III ($t_3 < t < t_4$); Şekil 27’de detaylı akım ve gerilim dalga şekilleri ile gösterildiği gibi endüktör enerjisinin kondansatöre tamamen aktarılması sonucu rezonans devresi akımının yönünün değişmesi ile başlayacaktır. Evre III boyunca kondansatör devre elemanında biriken enerji rezonans devresine geri aktarılacaktır. Evre III’e ilişkin devre denklemi aşağıda gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$V_{CE} = V_{DC} - V_{LEQ} - V_{REQ} \quad (13)$$

Anahtarın kesim anında maruz kaldığı en yüksek gerilim olan $V_{CE MAX}$ gerilimi, rezonans akımının yön değiştirdiği anda oluşmaktadır. Her koşulda anahtar uç gerilimi V_{CE} , yarı iletkeni anahtarın gerilim dayanım sınırını aşmamalıdır. V_{DC} DA gerilim, $I_{LEQ MAX}$ maksimum endüktör akımı, Z_0 karakteristik empedans ve $V_{CE MAX}$ T_1 yarı iletken anahtarının maksimum uç gerilimi olarak düşünüldüğünde, $V_{CE MAX}$ değeri aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir [41].

$$V_{CE MAX} = V_{DC} + I_{LEQ MAX} Z_0 \quad (14)$$

Diğer taraftan, TAKR evirici devresi $t_2 < t < t_4$ evresinde seri RLC devresi olarak analiz edilecektir. Bu nedenle Evre II ve Evre III için geçerli olacak şekilde bobin akımı i_{LEQ} denklemleri aşağıda gösterildiği şekliyle ifade edilir.

$$i_{LEQ}(t) = e^{-\alpha t} [B_1 \cos(\omega_d t) + B_2 \sin(\omega_d t)] \quad (15)$$

$$di_{LEQ}(t)/dt = -e^{-\alpha t} [(B_1 \omega_d + B_2 \alpha) \sin(\omega_d t) + (B_1 \alpha - B_2 \omega_d) \cos(\omega_d t)] \quad (16)$$

$$i_{LEQ}(t_2) \Rightarrow B_1 = I_0 \quad (17)$$

$$di_{LEQ}(t_2)/dt \Rightarrow$$

$$B_2 = ((V_{DC} - R_{EQ} I_0) / (L_{EQ} \omega_d) + (\alpha I_0) / \omega_d \quad (18)$$

İlgili denklemler yardımıyla hem devre analizi [43] hem de devre tasarımı [44] yapmak mümkün hale gelmektedir.

Aynı şekilde yarı iletken anahtar gerilimi V_{CE} nin elde edilebilmesi için ilgili gerilim denklemleri aşağıda gösterildiği şekliyle ifade edilir.

$$v(t) = V_{DC} + e^{-\alpha t} [A_1 \cos(\omega_d t) + A_2 \sin(\omega_d t)] \quad (19)$$

$$dv(t)/dt = -e^{-\alpha t} [(A_1 \omega_d + A_2 \alpha) \sin(\omega_d t) + (A_1 \alpha - A_2 \omega_d) \cos(\omega_d t)] \quad (20)$$

$$v(t_0) \Rightarrow A_1 = -V_{DC} \quad (21)$$

$$dv(t_0)/dt \Rightarrow A_2 = (I_0 / C_{RES} - \alpha V_{DC}) / \omega_d \quad (22)$$

Evre IV ($t_4 < t < t_1$); Şekil 28'da detaylı gerilim ve akım dalga şekilleriyle gösterildiği gibi v_{CE} geriliminin sıfıra ulaşması sonucu yarı iletken anahtara ters paralel bağlı D_1 diyot elemanının iletme girmesiyle başlayacaktır. D_1 diyotu iletimde olduğu sırada T_1 anahtarına sürme sinyali uygulanarak (t_0) ZVT sağlanmaktadır. T_1 anahtarının iletme girmesi sonucu yeniden ($t_1 < t < t_2$) ile sınırlandırılan Evre I başlayacaktır. Evre IV için geçerli devre denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$V_{DC} = v_{REQ} + v_{LEQ} \quad (23)$$

Ayrıca Evre IV için detaylı devre denklemleri altta verilmektedir. İlgili denklemlerde diyot akımı iletim süresi t_D ve diyot tepe akımı I_{Dmax} olarak ifade edilmektedir.

$$i_{LEQ}(t) = \frac{V_{DC}}{R_{EQ}} + (I_{Dmax} - \frac{V_{DC}}{R_{EQ}})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t} \quad (24)$$

$$i_{LEQ}(t_D) = 0 = \frac{V_{DC}}{R_{EQ}} + (I_{Dmax} - \frac{V_{DC}}{R_{EQ}})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t_D} \quad (25)$$

$$t_D = \ln \left[\frac{V_{DC}/R_{EQ}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}} \right] \left(-\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}} \right) \quad (26)$$

$$t_D = -\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{Dmax}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}} \right) \quad (27)$$

4 Uygulama Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, III. bölümde ayrıntılı olarak analizi yapılan YKSR [42] ve TAKR [44] eviriciler ile ilgili uygulama sonuçları paylaşılmaktadır.

Şekil 29'da endüksiyon ısıtmalı ocak uygulamalarında sıklıkla kullanılan tencere modelleri gösterilmektedir. Turuncu renkli olan **Döküm**, kırmızı renkli olan Silit marka **Silargan**, diğer tencere ise ferromanyetik **Çelik** tencedir.



Şekil 29. Uygulamada kullanılan genel tencere modelleri [44].



Şekil 30. YKSR İnverter için uygulama devresi [42].

4.1 YKSR Evirici İçin Uygulama Devresi

Şekil 30'da tencere, ocak, ve test düzeneğinden oluşan ve YKSR evirici içeren uygulama devresi örneği gösterilmektedir.

Ana besleme gerilimi 230 VAC olduğundan dolayı DC bara gerilimi 320 VDC'dir. Doğrultucu devresinde GSIB2560 diyot köprüsü kullanılmıştır. Yarı iletken anahtar olarak gövde diyotlu IHW30N60R5 IGBT kullanıldığından devrede ilave bir diyota ihtiyaç duyulmaz. YKSR uygulamasında kullanılan bobinin teknik özellikleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. YKSR eviricili endüksiyon uygulamasında kullanılan bobine ilişkin teknik özellikler.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Bobin sarım sayısı	n	28	
Bobinin dış çapı	$a_{n=28}$	83.4	mm
Bobinin iç çapı	a_1	25	mm
Bir litz telinin tel miktarı		66	
Tek telin tel çapı	r_0	0.135	mm
CCA telin iletkenliği	σ_{cca}	3.37×10^7	S/m

YKSR eviricinin bir sonucu olarak C_{RES} rezonans kapasitör değeri C_{RES1} ve C_{RES2} olacak şekilde iki eş parçaya bölünmüş ve 340 nF olarak seçilmiştir. C_F filtre kondansatörü 5 μF , L_F filtre bobini ise 250 μH olarak seçilmiştir. Bastırma kapasitörleri C_{S1} ve C_{S2} 11 nF olarak seçilmiştir. Diğer tüm devre parametreleri Tablo 4'te verilmektedir.

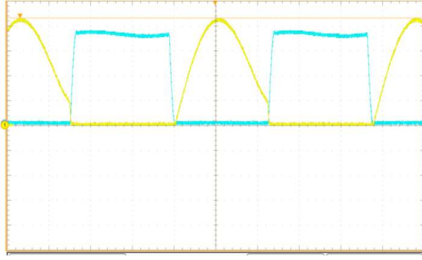
Tablo 4. YKSR eviricili endüksiyon devresi parametre değerleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Mak. rezonans devresi akımı	$I_{ResInmax}$	42.26	APEAK
Rezonans frekansı	f_{Res}	20.65	kHz
Minimum anahtarlama frekansı	f_{SWmin}	21	kHz
Tenceresiz eşdeğer endüktans	$L_{EQNoLoad}$	103	μH
Tenceresiz eşdeğer direnç	$R_{EQNoLoad}$	0.085	Ω
Döküm tencereli eşdeğer endük.	L_{EQPan}	88.27	μH
Döküm tencereli eşdeğer direnç	R_{EQPan}	4.876	Ω
Toplam rezonans kapasitesi	C_{RES}	680	nF
Kalite faktörü	Q_L	4.69	
Toplam bastırma kondansatörü	C_S	22	nF
Ölü zaman	T_{Dead}	1.5	μs

YKSR eviricili endüksiyon ocak ile yapılan uygulama sonucunda Tablo 5'te verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 5. YKSR eviricili endüksiyon devresi sonuçları.

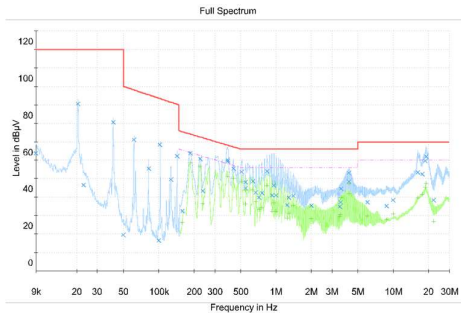
Parametre	Uygulama Sonucu
Maksimum bobin akımı	43.6A @21kHz
Minimum kesme akımı	9.65A @21kHz
Maksimum kesme akımı	22.48A @ 24.1kHz
Ortalama Giriş Gücü	2197W



Şekil 31. Prototip devre kullanılarak elde edilen ayrıntılı dalga biçimleri. Mavi sinyal: IGBT kolektör emitör voltajı V_{CE} (90V/div), Sarı sinyal: IGBT Akımı (10A/div).

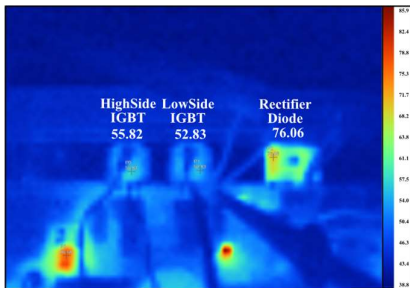
Şekil 31’de YKSR eviricili uygulama devresi yardımıyla elde edilen ve yarı iletken akımı ve gerilimini gösteren osiloskop görüntüsü gösterilmektedir.

Şekil 32’de uygulama devresinden elde edilen Conducted EMI sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlar dikkatli bir şekilde incelendiğinde sonuçların her zaman standardın belirlediği limitlerin altında olduğu kolaylıkla gözlemlenebilir.



Şekil 32. Uygulama devresinin yapılan emisyon testi sonuçları.

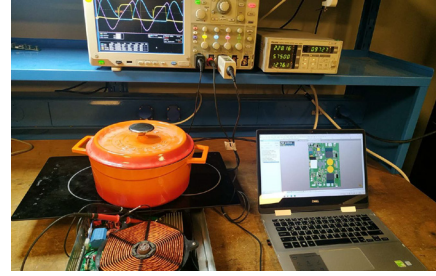
Şekil 33’te uygulama devresi ile 10 dakikalık ısıtma sonunda yapılan ısıl ölçümlerde, üst anahtarın sıcaklığının 55 C, alt anahtarın sıcaklığının 52 C derece, köprü doğrultucu sıcaklığının ise 76 C olduğu görülmektedir.



Şekil 33. Uygulama devresinin termal görüntüleri.

4.2 TAKR Evirici İçin Uygulama Devresi

Şekil 34’te tencere, ocak, ve test düzeneğinden oluşan ve TAKR evirici içeren uygulama devresi gösterilmektedir.



Şekil 33. TAKR İnvter için uygulama devresi [44].

Tablo 6’da pratik uygulama devresinde kullanılan endüksiyon bobininin fiziksel ve elektriksel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 6. Endüksiyon bobininin fiziksel ve elektriksel özellikleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Bobin sarım sayısı	n	28	
Bobinin dış çapı	a_n	180	mm
Bobinin iç çapı	a_1	30	mm
Bir litz telinin tel miktarı		66	
Tek telin tel çapı		0,27	mm
Ferit için manyetik geçirgenlik	μ_r	800	

Tablo 7’de ise Şekil 29’da verilen üç farklı tencere ve tenceresiz durumlar için ölçülen eşdeğer endüktans ve direnç değerleri gösterilmektedir.

Tablo 7. 3 farklı tencere ve tenceresiz durumlara ait eşdeğer endüktans ve direnç değerleri.

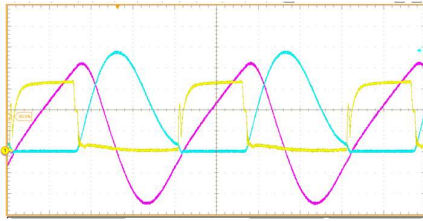
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Tenceresiz eşdeğer endüktans	$L_{EQNoLoad}$	110	μH
Tenceresiz eşdeğer direnç	$R_{EQNoLoad}$	0,12	Ω
Döküm tencere için eşdeğer endüktans	$L_{EQ-Döküm}$	89,76	μH
Döküm tencere için eşdeğer direnç	$R_{EQ-Döküm}$	4,21	Ω
Çelik tencere için eşdeğer endüktans	$L_{EQ-Çelik}$	81,81	μH
Çelik tencere için eşdeğer direnç	$R_{EQ-Çelik}$	3,36	Ω
Silargan tencere için eşdeğer endüktans	$L_{EQ-Silit}$	69,07	μH
Silargan tencere için eşdeğer direnç	$R_{EQ-Silit}$	2,48	Ω

Tablo 7’den anlaşılacağı üzere, pratik ev uygulamalarında kullanılan döküm, çelik ve silit silargan benzeri tencereler, farklı ferromanyetik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Bu tencere türleri endüksiyonlu ocakta kullanıldığında, farklı bobin akımları ve anahtarlama gerilimleri ortaya çıkar. Üç farklı tencere modeli kullanıldığında elde edilen bobin akımı, anahtar gerilimi ve çıkış gücü değerleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 8. Üç farklı tencere modeli için elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri.

Giriş Değerleri			Çıkış Değerleri		
R_{EQ}	L_{EQ}	C_{RES}	I_{LEQMAX}	V_{CEMAX}	P
4,21 Ω	89,76 μH	270 nF	42,4 A	928 V	1276 W
3,36 Ω	81,81 μH	270 nF	42,8 A	968 V	1270 W
2,48 Ω	69,07 μH	270 nF	45,6 A	920 V	1255 W

Şekil 35'te ilgili uygulama devresi yardımıyla elde edilen yarı iletken akımı, gerilimi ve sürme işaretleri gösteren osiloskop görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 34. Prototip devre kullanılarak elde edilen ayrıntılı dalga biçimleri. Mavi sinyal: IGBT kolektör emitör voltajı V_{CE} (200V/div), Mor sinyal: bobin akımı I_{LEQ} (10A/div), Sarı sinyal: IGBT geçit kontrol sinyali (5V/div).

5 Sonuçlar

Bu çalışmada endüksiyon ısıtmalı ocaklarda kullanılan güncel uygulamalar hakkında bilgi verilmiş, endüksiyon ısıtmalı ocaklarda yaygın olarak kullanılan tek anahtarlı kısmi rezonanslı dönüştürücüler ve yarı köprü seri rezonanslı dönüştürücüler için detaylı devre analizleri yapılmıştır. Sonrasında YKSR ve TAKR evirici içeren uygulama devresi sonuçları paylaşılmıştır. YKSR ve TAKR eviriciler için yapılan ilgili devre analizleri kullanılarak her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları hakkında bilgiler paylaşılmış ve sonraki çalışmalara ışık tutulmaya çalışılmıştır.

6 Kaynaklar

- [1] S. Zinn and S. L. Semiatin, *Elements of Induction Heating Design, Control and Applications*, Second Edi. California, Ohio: EPRI, ASM International, 1988.
- [2] I. R. Valery, L. Don, C. Raymond, and M. Black, *Handbook of Induction Heating: Manufacturing Engineering and Materials Processing*, Second Edi. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [3] M. K. Salih NACAR, Selim ÖNCÜ, "Induction Heated Metal Hydride Tube for Hydrogen Storage System," *Pamukkale Univ. J. Eng. ...*, vol. 28, no. 5, pp. 676–680, 2022, doi: 10.5505/pajes.2021.97692.
- [4] O. Lucia, P. Maussion, E. Dede, and J. M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: Past Developments, current Technology, and future challenges," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 05, pp. 2509–2520, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- [5] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. M. Burdío, "A Class-E Direct AC-AC Converter With Multicycle Modulation for Induction Heating Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2521–2530, May 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281164.
- [6] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. M. Burdío, "Direct AC-AC Resonant Boost Converter for Efficient Domestic Induction Heating Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1128–1139, Mar. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2262154.
- [7] S. Aslan, M. Ozturk, and N. Altıntaş, "A comparative study of SiC and Si power devices in induction cookers," in *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, May 2018, pp. 297–301, doi: 10.1109/ICEEE2.2018.8391350.
- [8] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. M. Burdío, "Efficient and cost-effective ZCS direct AC-AC resonant converter for induction heating," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2546–2555, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2262752.
- [9] M. Öztürk and N. Altıntaş, "Ev Tipi İndüksiyon Ocaklar İçin Çok Bobinli AC-AC Dönüştürücü Tasarımı," *EEMKON 2017*, pp. 118–123, 2017, [Online]. Available: http://eemkon.org.tr/wp-content/uploads/2017/12/eemkon2017_bildirilerkitabiv3.pdf.
- [10] M. A. Dzienciakowski, "Power Electronics Converters in Induction Heating – the survey," *2017 Prog. Appl. Electr. Eng.*, 2017, doi: 10.1109/PAEE.2017.8009013.
- [11] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Second edi. New York ,Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [12] I. Nagy, *Inverters-Resonant Converters*. CRC, 2002.
- [13] S. Sakamoto, T. Mishima, and C. Ide, "A Phase-Shift PWM-Controlled ZVS Boost Full-Bridge AC-AC Converter for Metal-Surface High-Frequency Induction Heating Applications," *2016 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 0–6, doi: 10.1109/ECCE.2016.7854755.
- [14] K. S. Zachariah, M. Vennila, M. E. Madhusudhanan, and M. E. Mahavishnu, "High Power Frequency Parallel Resonance Inverter With Bridgeless Rectifier For Induction Heating Application," *2016 Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech.*, pp. 4847–4852, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755641.
- [15] M. Pérez-tarragona, S. Member, H. Sarnago, and Ó. Lucia, "Design and Experimental Analysis of PFC Rectifiers for Domestic Induction Heating Applications," *IEEE Trans. Power Electron. (Vol. 33, Issue 8, Aug. 2018)*, vol. 8993, no. c, doi: 10.1109/TPEL.2017.2755367.
- [16] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. M. Burdío, "A class-e direct AC-AC converter with multicycle modulation for induction heating systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2521–2530, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281164.
- [17] J. M. Sarnago, H. ; Lucia, O. ; Mediano, A. ; Burdío, "Direct AC – AC Resonant Boost Converter for," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1128–1139, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2262154.
- [18] H. Sarnago, O. Lucia, S. Member, J. M. Burdío, and S. Member, "Multiple-Output ZCS Resonant Inverter for Multi-Coil Induction Heating Appliances," doi: 10.1109/APEC.2017.7931010.
- [19] W. Han, K. T. Chau, Z. Zhang, and C. Jiang, "Single-Source Multiple-Coil Homogeneous Induction Heating," *IEEE Trans. Magn. (Vol. 53, Issue 11, Nov. 2017)*, vol. 53, no. 11, doi: 10.1109/TMAG.2017.2717867.
- [20] P. Taylor and B. S. Sazak, "A Capacitor Voltage Clamped Dual Half-Bridge Series-Resonant Inverter for Home

- Cooking Applications,” no. October 2014, pp. 37–41, 2006, doi: 10.1080/00207210410001712165.
- [21] B. S. S. Sevilay ÇETİN, “Mutfak Tipi Isıtma Uygulamaları İçin İki Çıkışlı Bir İndüksiyon Isıtma İnverteri Tasarımı,” *Pamukkale Univ. J. Eng. ...*, vol. 12, no. 3, pp. 397–401, 2006.
- [22] F. Monterde, P. Hernández, J. M. Burdío, J. R. García, and A. Martínez, “Multiple-Output Series-Resonant Inverter for Induction Cookers Previous state-of-the-art F1,” *EPE 99 - Lausanne*, pp. 1–8.
- [23] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, and J. M. Burdío, “A class-e direct AC-AC converter with multicycle modulation for induction heating systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2521–2530, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281164.
- [24] F. Forest, S. Faucher, J. Y. Gaspard, D. Montloup, J. J. Huselstein, and C. Joubert, “Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwinding coils in induction cooking appliances,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 441–452, 2007, doi: 10.1109/TIE.2006.888797.
- [25] M. Saoudi, D. Puyal, H. Sarnago, D. Anton, and A. Mediano, “A new multiple coils topology for domestic induction cooking system,” *Proc. 2011 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–7, 2011.
- [26] M. Öztürk, “MS061 İndüksiyonlu Cam Ocak - Ferre Türkiye - Ferre Ankastr,” <https://www.ferreturkiye.com/>, 2020. <https://www.ferreturkiye.com/product/ms061-induksiyonlu-cam-ocak/7101/>.
- [27] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdío, L. A. Barragán, and C. Carretero, “A model of losses in twisted-multistranded wires for planar windings used in domestic induction heating appliances,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 1247–1253, 2007, doi: 10.1109/APEX.2007.357674.
- [28] J. Acero, J. M. Burdío, L. A. Barragán, and R. Alonso, “A model of the equivalent impedance of the coupled winding-load system for a domestic induction heating application,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. 1, pp. 491–496, 2007, doi: 10.1109/ISIE.2007.4374646.
- [29] F. Tourkhani and P. Viarouge, “Accurate analytical model of winding losses in round Litz wire windings,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 1, pp. 538–543, 2001, doi: 10.1109/20.914375.
- [30] P. Hernandez, F. Monterde, and J. M. Burdío, “About the power losses distribution in inductors for induction cooking appliances,” *Epe*, pp. 1–7, 1999, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle>About+the+power+losses+distribution+in+inductors+for+induction+cooking+appliances#0>.
- [31] A. D. Podoltsev, I. N. Kucheryavaya, and B. B. Lebedev, “Analysis of Effective Resistance and Eddy-Current Losses in Multiturn Winding of High-Frequency Magnetic Components,” *IEEE Trans. Magn. VOL. 39, NO. 1, JANUARY 2003*, vol. 39, no. 1, pp. 539–548, 2003.
- [32] C. R. Sullivan, “Computationally Efficient Winding Loss Calculation Geometry,” *IEEE Trans. POWER Electron. VOL. 16, NO. 1, JANUARY 2001*, vol. 16, no. 1, pp. 142–150, 2001.
- [33] P. Hernandez, F. Monterde, J. M. Burdi, J. R. Garcia, and S. Llorente, “Power Losses Distribution in the Litz-wire Winding of an Inductor for an Induction Cooking Appliance,” *IEEE 2002 28th Annu. Conf. Ind. Electron. Soc. IECON 02, 2002*, doi: 10.1109/IECON.2002.1185432.
- [34] J. Acero, C. Carretero, R. Alonso, and J. M. Burdío, “Quantitative Evaluation of Induction Efficiency in Domestic Induction Heating Applications,” *IEEE Trans. Magn. VOL. 49, NO. 4, April 2013*, vol. 49, no. 4, pp. 1382–1389, 2013.
- [35] M. Saoudi, D. Puyal, D. Antón, and A. Mediano, “Domestic induction cooking with a new loads multiplexing topology using mechanical switches,” *Proc. - ISIE 2011 2011 IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 233–238, 2011, doi: 10.1109/ISIE.2011.5984163.
- [36] T. Hirokawa, E. Hiraki, T. Tanaka, M. Imai, K. Yasui, and S. Sumiyoshi, “Dual-frequency multiple-output resonant soft-switching inverter for induction heating cooking appliances,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2, pp. 5028–5033, 2013, doi: 10.1109/IECON.2013.6699950.
- [37] L. C. Meng, K. W. E. Cheng, and P. C. K. Luk, “Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting patterns,” *6th IET Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives (PEMD 2012)*, pp. F21–F21, 2012, doi: 10.1049/cp.2012.0359.
- [38] O. Lucia, J. M. Burdío, I. Millán, and J. Acero, “Multiple-output resonant inverter topology for multi-inductor loads,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, no. c, pp. 1328–1333, 2010, doi: 10.1109/APEC.2010.5433401.
- [39] Ó. Lucia, J. M. Burdío, L. A. Barragán, J. Acero, and I. Millán, “Series-resonant multiinverter for multiple induction heaters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2860–2868, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2051041.
- [40] “Mutfak Uygulamaları İçin Yarım Köprü Seri Rezonans İntertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı,” *Pamukkale Univ. J. Eng. ...*, vol. 8, no. 2, pp. 167–172, 2002, [Online]. Available: <http://pajes.pau.edu.tr/jvi.aspx?un=PAJES-80963&volume=>.
- [41] Marian K. Kazimierczuk and C. Dariusz, *Resonant Power Converters*, Second. New Jersey, Canada: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2011.
- [42] F. Zungor, H. Bodur, M. Ozturk, and H. Obdan, “Design Methodology of Series Resonant Half Bridge Inverter for Induction Cooker,” *IEEE Access*, vol. 11, no. November, pp. 135476–135492, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3338542.
- [43] M. Ozturk, F. Zungor, B. Emre, and B. Oz, “Quasi Resonant Inverter Load Recognition Method,” *IEEE Access*, vol. 10, no. August, pp. 89376–89386, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3201355.
- [44] M. Ozturk, “A Simplified Design Method for Quasi-Resonant Inverter Used in Induction Hob,” *Electronics*, vol. 12, no. 19, p. 4145, Oct. 2023, doi: 10.3390/electronics12194145.
- [45] B. S. Sazak and S. Cetin, “Reducing the number of measurements in induction cooker design,” *ICEMI 2009 - Proc. 9th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments*, no. 1, pp. 1450–1454, 2009, doi: 10.1109/ICEMI.2009.5274832.
- [46] B. S. Sazak, “Design of a 500W Resonant Induction Heater,” *Pamukkale Univ. J. Eng. ...*, vol. 5, no. 1, pp. 871–878, 1999, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267858491_DESIGN_OF_A_500W_RESONANT_INDUCTION_HEATER.

Özgeçmişler



Metin Ozturk, 1981 yılında Kastamonu’da doğmuştur. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden Lisans Derecesi ile mezun olmuştur. 2007 yılında “Üç Fazlı Asenkron Motorun Farklı Modülasyon Teknikleriyle Kontrol Edilmesi” üzerine yaptığı Tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Anabilim Dalından Yüksek Lisans Derecesi ile mezun olmuştur. 2018 yılında “Ev Türü Endüksiyonlu Ocaklar İçin Yeni Bir AC-AC Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” üzerine yaptığı Tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Anabilim Dalından Doktora Derecesi ile mezun olmuştur. 2006-2016 yılları arasında Arçelik A.Ş. Ar-Ge Merkezi’nde sırasıyla Mühendis, Uzman Mühendis ve Kıdemli Uzman Mühendis olarak görev yapmıştır. 2016 yılından günümüze kadar geçen süreçte Mamur Teknoloji Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Merkezi’nde Elektrik ve Elektronik süreçlerin kurulması sürecini yönetmiş ve halen Elektronik projelerden Sorumlu Ar-Ge Yöneticisi olarak görev yapmaktadır. Ayrıca 2019 yılından günümüze kadar geçen süreçte İstanbul Esenyurt Üniversitesi’nde (IESU) Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmakta, 2023-2024 ders yılı itibarıyla IESU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Bölüm Başkanı olarak görev yapmaktadır. Araştırma ilgi alanları arasında ev tipi endüksiyonla pişirme ve endüksiyonla ısıtma amacıyla kullanılan yarım köprü seri rezonans evirici ve tek anahtarlı kısmi rezonanslı eviricinin geliştirilmesi konuları yer almaktadır.



Fatih Zungor, 1994 yılında İstanbul’da doğdu. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi’nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Alanından Lisans derecesini aldı. 2018 yılında “Yeni Bir İleri Yönlü Dönüştürücü Tasarımı” üzerine yaptığı tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Anabilim Dalından Yüksek Lisans Derecesi ile mezun olmuştur. 2024 yılında “Seri Rezonanslı Yarım Köprü İnverterli Ev Türü Endüksiyon Ocaklarının Analizi Ve Yeni Bir Tasarım Metodolojisinin Geliştirilmesi” üzerine yaptığı Tez çalışmasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Anabilim Dalından Doktora Derecesi ile mezun olmuştur. 2016-2018 yılları arasında Gedik Kaynak Ar-Ge Merkezi’nde sırasıyla Mühendis ve Uzman Mühendis olarak görev yapmıştır. 2018 yılından günümüze kadar olan geçen süreçte Mamur Teknoloji Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Merkezi’nde Elektrik ve Elektronik süreçlerin kurulmasında, Elektronik projelerden sorumlu Takım Lideri olarak görev yapmaktadır. Ayrıca 2023 yılından günümüze kadar geçen süreçte İstanbul Esenyurt Üniversitesi’nde (IESU) Öğr. Gör. olarak görev yapmaktadır. Araştırma ve ilgi alanları arasında güç faktörü düzeltme, anahtarlama güç kaynakları, yüksek frekans güç dönüşümü, endüksiyon ısıtma ve güç elektroniklerinde aktif ve pasif bastırma hücreleri bulunmaktadır.



Durmuş Ersoy, 2014 yılında İstanbul Üniversitesi’nden elektrik ve elektronik mühendisliği alanında lisans derecesini ve 2020 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi’nden elektronik ve haberleşme mühendisliği alanında yüksek lisans derecesini aldı. Şu anda İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Programı’nda doktora derecesini sürdürmektedir. 2021 yılından bu yana İstanbul Esenyurt Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2022 yılından bu yana Mamur Teknoloji A.Ş.’nin Araştırma ve Geliştirme Departmanında Elektrik Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Mevcut araştırma ilgi alanları arasında gömülü sistemler, elektronik devrelerde optimizasyon teknikleri ve yapay zeka bulunmaktadır.