

Endüksiyon Isıtma Sistemleri İçin Seri Rezonans Devresinin Parametrik Benzetimine İlişkin Bir Çalışma

Mustafa BAĞIR¹ , Selami BALCI^{2*} 

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Karaman, Türkiye

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye

Alındı/Received: 08/08/2024; Kabul/Accepted: 11/09/2025;Yayın/Published: 23/12/2025

Bu makale SABİT I. Uluslararası Disiplinlerarası Ermenek Kongresi'nde "Endüstriyel Gıda Teknolojileri İçin İndüksiyon Isıtma Sistemleri: Güç Elektronikliği. Devreleri Benzetimi" adıyla özet bildiri olarak sunulmuştur. Ayrıca, İndüksiyon Isıtma Teknolojileri için Güç Elektronikliği Devreleri konusunda Mustafa BAĞIR'ın yüksek lisans tez konusudur.

*Sorumlu yazar e-posta: sbalci@kmu.edu.tr

Öz

Son yıllarda endüksiyon ısıtma sistemleri gıda teknolojisinde ev tipi ve endüstriyel pişiricilerin güç ünitesi olarak sıkça kullanılmaktadırlar. Endüksiyon ısıtma teknolojisinin temeli yüksek frekanslı elektromanyetik alan içerisinde metal parçalar üzerinde girdap akımlarının endüklenmesi ile doğrudan metal parçaların bünyesinde ısı enerjisinin oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu amaçla, yüksek frekanslı olarak tasarlanan bir evirici devresinin çıkışında endüksiyon bobini (L) ve kapasitörden (C) oluşan seri rezonans devresi sistemin en önemli unsurlarından birisidir. Bu bağlamda, LC seri rezonans devre parametrelerinin güç elektronikliği devresinin anahtarlama parametreleri ile etkileşimli olarak ele alınması gerekir ve endüksiyon ısıtmanın performansını etkileyen rezonans frekansı değerinin belirlenmesi çok önemli bir ayrıntıdır. Bu makalede, endüksiyon ısıtma teknolojisinde güç elektronikliği devre parametrelerinin belirlenmesi sürecine yardımcı olacak parametrik benzetim çalışmaları önerilmektedir ve seri rezonans devresinin parametreleri için ANSYS-Electronics/Twin Builder yazılımı ile örnek bir çalışma sunulmuştur. Seri rezonans devresinin endüktans ve kapasitans değerleri ile evirici devresinin anahtarlama frekansı değerleri belirli adımlar ile parametrik çözücü ile koşturulmuştur. Benzetim sonuçlarından elde edilen 3D parametrik grafikler ile akım ve gerilim gibi elektriksel grafikler L ve C değerine bağlı olarak evirici devresinin anahtarlama frekansı değerinin değişimi açıklanmıştır. Böylece, endüksiyon ısıtma sistem tasarımı güç elektronikliği araştırmacıları ve mühendislik eğitiminde kılavuz olabilecek yenilikçi yaklaşımlar olarak parametrik benzetim örneği ve sonuçları rapor edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüksiyon Isıtma, Seri Rezonans, Parametrik Benzetim.

A Study on Parametric Simulation of Series Resonant Circuit for Induction Heating Systems

Abstract

In recent years, induction heating systems have been frequently used in food technology as home and industrial cookers. The basis of induction heating technology is based on the principle of generating heat energy directly within the metal part by inducing eddy currents on metal parts within the high-frequency electromagnetic field. For this purpose, the series resonant circuit consisting of inductor (L) and capacitor (C) at the output of the high frequency designed inverter circuit is one of the most important elements of the system. The LC series resonant circuit parameters must be considered interactively with the switching parameters of the power electronic circuit, and the determination of the resonant frequency value affecting the performance of induction heating is a very important detail. In this article, parametric simulation studies are proposed to assist in the process of determining the power electronic circuit parameters in induction technology, and a sample study is presented with ANSYS-Electronics/Twin Builder software for the parameters of the series resonant circuit. The inductance and capacitance values of the series resonant circuit and the switching frequency values of the inverter circuit were run with the parametric solver with certain steps. The 3D parametric graphics obtained from the simulation results and the electrical graphics are explained as the change of the switching frequency value of the inverter circuit depending on the L and C values. Thus, the parametric simulation example and results are reported as innovative approaches that can guide researchers and engineering education in induction heating system design.

Key Words: Induction Heating, Series Resonance, Parametric Simulation.

Atıf / Töcited: Bağır, M. ve Balcı, S. (2025). Endüksiyon Isıtma Sistemleri İçin Seri Rezonans Devresinin Parametrik Benzetimine İlişkin Bir Çalışma. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Ermenek Akademi Dergisi 2(2): 01-10.

1. GİRİŞ

Endüksiyon ısıtma, elektromanyetik endükleme prensibine dayanan bir teknolojidir ve direkt olarak metal bir malzemenin kendi bünyesinde ısı enerjisi sağlayarak elektrik enerjisi kayıplarını en aza indirmektedir. Başlangıçta metal işleme ve ergitme gibi alanlarda kullanılan endüksiyon ısıtma teknolojisi, son yıllarda ev tipi cihazlar ve endüstriyel gıda işleme teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Bu teknoloji, hızlı, homojen ve kontrollü bir ısıtma sağlama potansiyeline sahip olduğu için enerji verimliliği ve gıda kalitesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Kaya ve İçer, 2019), (Padole ve ark., 2025), (Yang ve ark., 2025), (Efren ve ark., 2023).

Gıda işleme süreçlerinde ısıtmanın kritik bir rol oynaması, gıdaların mikrobiyal güvenliğinin sağlanmasından, besin değerlerinin korunmasına kadar birçok alanda etkili olmaktadır. Ancak, geleneksel ısıtma yöntemleri enerji kayıplarına yol açmakta ve ısıtma süresi uzadıkça gıdaların besin değerlerinin kaybı artmaktadır. Han ve ark. (2017) yaptığı araştırmada, endüksiyon ısıtmanın geleneksel yöntemlere kıyasla %90'a varan enerji tasarrufu sağladığı ve işlem sürelerini %30 oranında kısalttığı belirtilmiştir. Bu bulgular, endüksiyon ısıtma teknolojisinin endüstriyel gıda işleme süreçlerinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Endüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılan bobin tasarımları, ısıtma performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Bobin, endüksiyon ısıtma sisteminin önemli bileşenidir ve elektromanyetik alanın malzeme üzerine etkili bir şekilde yayılmasını sağlar. Endüksiyon ısıtma teknolojisi ile gıda pişirici uygulamalarında çoğunlukla pankek - düzlemsel bobin yapıları kullanılmaktadır. Literatürde, bobin tasarımlarının endüksiyon ısıtma teknolojisinde farklı uygulamalara uygun olduğu belirtilmektedir (Zinn ve Semiatin, 1988), (Çivi ve ark., 2019).

Endüksiyon ısıtma hem evsel hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kabul görmüştür. Endüstriyel ortamlarda, ağırlıklı olarak yüksek hassasiyet, enerji verimliliği ve güvenilir çalışma gerektiren ısı işlemlerde kullanılmakta ve uygun maliyetli ve optimize edilmiş proseslere olanak sağlamaktadır. Son gelişmeler, yüzey sertleştirme, lehimleme işlemleri gibi metal ısı işlem proseslerinde yüksek frekanslı dönüştürücülerin kullanımında önemli bir artışa yol açmıştır. Bu ilerleme, yumuşak anahtarlama tekniklerini kullanarak anahtarlama performansını iyileştiren ve kayıpları azaltan yeni yarı iletken teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla kolaylaştırılmıştır (Esteve ve ark., 2025), (Kawashima ve ark., 2021).

Endüksiyon ısıtma sistemindeki güç dönüştürücü, iş parçasına maksimum miktarda enerji aktarmaktan (rezonans modu çalışması), yüksek verimlilik sağlamaktan ve yüke (iş parçasına) güç aktarımını kontrol etmekten sorumludur. Ancak, yük parametrelerindeki değişiklikler rezonans frekansını değiştirir ve bu da verimlilikte düşüşe neden olur. Bu nedenle, endüksiyon ısıtma sistemleri, güç dönüştürücünün çalışma frekansını farklı teknikler kullanarak rezonans frekansına uyacak şekilde ayarlar (Efren ve ark., 2023), (Lucía ve ark., 2014).

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel gıda işleme süreçlerinde kullanılan geleneksel ısıtma yöntemlerinin yerini alabilecek bir endüksiyon ısıtma sistemi tasarımında güç elektroniği devrelerinin parametrik benzetim çalışmalarının vurgulanmasıdır. Böylece, endüksiyon ısıtma güç ünitelerinde seri rezonans devrelerinin parametrelerinin belirlenmesi sürecinde ve rezonans frekansının adaptif olarak değiştirilmesi gereken uygulamalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Seri bir rezonans devresinin temel L-C parametreleri ile rezonans frekansı değerleri ANSYS-Electronics/TwinBuilder yazılımı ile modellenmiş ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

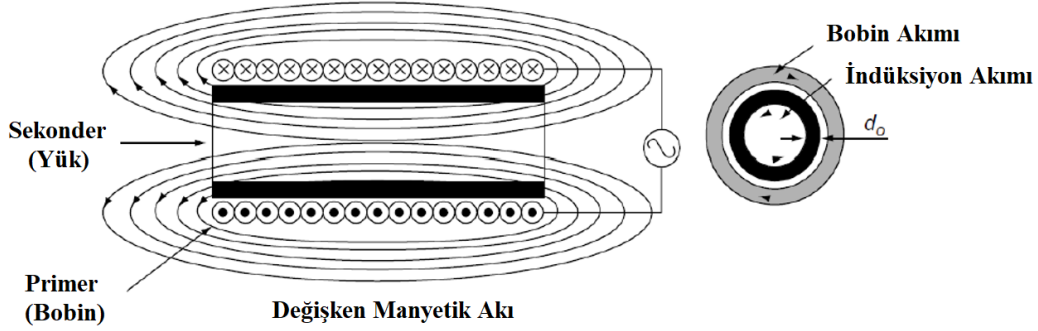
2. ENDÜKSİYON ISITMANIN TEMELLERİ

Bu bölümde endüksiyon ısıtma teknolojisinin teorisi ve rezonans devresi üzerinde durulmuştur. Endüksiyon ısıtma teknolojisinde endüksiyon ısıtmada kullanılan ve yüksek frekanslı elektromanyetik alanı meydana getiren bobin seri L-C devresinin en önemli bileşenidir. Endüksiyon bobinine seri kapasitör bağlanarak rezonans devresi oluşturulmaktadır.

2.1. Elektromanyetik Endüksiyon

Endüksiyon ısıtma, elektromanyetik endüksiyon prensibine dayanan bir teknolojidir. Endüksiyon ısıtma sistemleri, verimli ve hassas ısıtma yetenekleri sunarak çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynar. Bu sistemler, iletken malzemelerde ısı üretmek için elektromanyetik endüksiyonu kullanır ve doğrudan temas veya açık alev ihtiyacını ortadan kaldırır. Endüksiyon ısıtma sistemlerinin önemi, hızlı ve lokal ısıtma sağlama kabiliyetlerinde yatmaktadır ve bu da onları metal eritme, dövme ve ısı işlem gibi prosesler için ideal hale getirir (Vishnuram ve ark., 2020), (Lucía ve ark., 2014), (Meng ve ark., 2011). İlk olarak 19. yüzyılın ilk çeyreğinde Michael Faraday tarafından keşfedilen elektromanyetik endüksiyon, endüstriyel uygulamalara 20. yüzyılın başlarında girmiştir (Fairchild, 2000).

Endüksiyon ısıtma sistemleri elektromanyetik endüksiyon, deri etkisi ve ısı transferi olmak üzere üç temel faktörden oluşur. Ancak endüksiyon ısıtmanın temel teorisi bir transformatörün teorisine çok benzer. Elektromanyetik endüksiyon ve deri etkisi bu bölümde açıklanmaktadır. Elektromanyetik endüksiyonu ve deri etkisini açıklamak için endüktif ısıtma bobinleri ve akımdan oluşan temel bir sistem Şekil 1’de verilmiştir. Dönüştürme oranına göre sekonder akımın primer akıma doğru orantılı olduğu bir transformatörün en basit formu modellenmiştir. Primer ve sekonder kayıplar sargıların direncinden kaynaklanır ve iki devre arasındaki bağlantı katsayısı birdir. Burada manyetik akım kaçığı göz ardı edilmiştir. Sekonder bobini sadece bir sarım olarak kısa devre yapıldığında, artan yük akımı (sekonder akım) nedeniyle önemli bir ısı kaybı olur. Böylece, kaynaktan sağlanan enerji primer ve sekonder birleşik kayıpla aynı miktarda olduğu endüksiyon ısıtma kavramını göstermektedir. Primer tarafın endüktif bobini çok sayıda sarımlı iken, sekonder taraf ise yalnızca bir sarımlı kısa devre yapılarak endüktif ısıtma bobini ve yük, küçük bir açıklıkla birbirinden yalıtılmıştır (Fairchild, 2000), (Dereci, 2010).



Şekil 1. Endüksiyon ısıtmanın temel prensibi (Fairchild, 2000), (Dereci, 2010).

Şekil 1’de görüldüğü gibi, AA enerjisi bir bobine girdiğinde, bobinin etrafında Ampere Yasası’na göre Eş. 1 ile hesaplanan değişken bir manyetik alan (MMK) ve buna bağlı olarak Eş. 2 ile verilen manyetik akı (φ) oluşur:

$$\int H di = Ni = MMF \quad (1)$$

$$\phi = \mu HA \quad (2)$$

Değişken manyetik alana maruz kalan bir nesne manyetik akının kuvvet çizgilerinde değişikliğe neden olur. Manyetik alanın yoğunluğu, nesne yüzeyden merkeze yaklaştıkça azalır. Faraday Yasasına göre, iletken bir nesnenin yüzeyinde oluşan akım, Eş.3’te açıklandığı gibi endüktans devresindeki akımla ters orantılıdır ve nesnenin yüzeyindeki yüksek frekanslı değişken akım bir girdap akımı oluşturmaktadır (Fairchild, 2000):

$$E \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

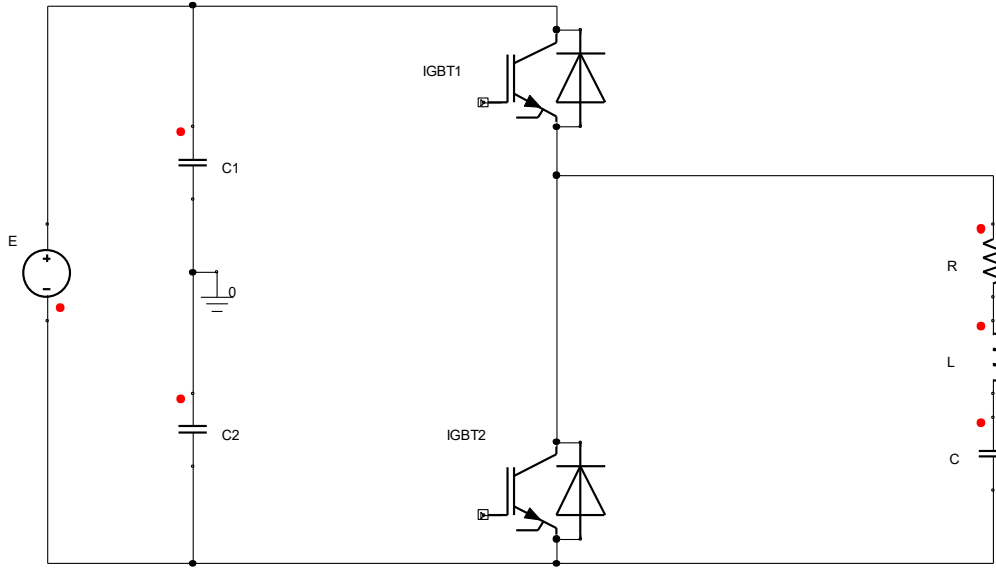
Böylece, endüklenen akım ve girdap akımının neden olduğu elektrik enerjisi, Eş. 4’te gösterildiği gibi ısı enerjisine oluşturabilmek için elektriksel güce (P) dönüşmektedir.

$$P = \frac{E^2}{R} = i^2 R \quad (4)$$

Bir nesne demir gibi iletken özelliklere sahipse, manyetik histerezis nedeniyle ek ısı enerjisi üretilir. Histerezis tarafından oluşturulan ısı enerjisi miktarı, histerezisin büyüklüğüyle orantılıdır. Genel olarak bu ek enerji göz ardı edilir, çünkü endüksiyon akımı tarafından üretilen enerjiden çok daha küçüktür (%10’dan az) (Fairchild, 2000).

2.2. Seri L-C rezonans devresi

Endüksiyon ısıtma sistemlerinde yüksek frekanslı gerilim beslemeli bir yarım köprü veya tam köprü evirici devresi kullanılmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi evirici çıkışına bir seri rezonans devresi bağlanır. Bu rezonans devresi, rezonans kapasitörü C, endüksiyon ısıtma bobini L ve eşdeğer seri direnç R’den oluşur (Vishnuram ve ark., 2021), (Esteve ve ark., 2022).



Şekil 2. Seri rezonans devresi

Seri rezonans devresinde giriş empedansı $Z(\omega)$ için Eş.5 yazılabilir (Esteve ve ark., 2025):

$$Z(\omega) = R + i \left(L\omega + \frac{1}{C\omega} \right) = L \left[\frac{\omega_o}{Q} + i \left(\frac{\omega^2 - \omega_o^2}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

Burada rezonans devresinin kalite faktörü (Q) ve rezonans frekansının açısal hızı (ω_o) olarak sırasıyla Eş. 6 ve Eş. 7 ile ifade edilebilir (Esteve ve ark., 2025):

$$Q = \frac{L\omega_o}{R} \quad (6)$$

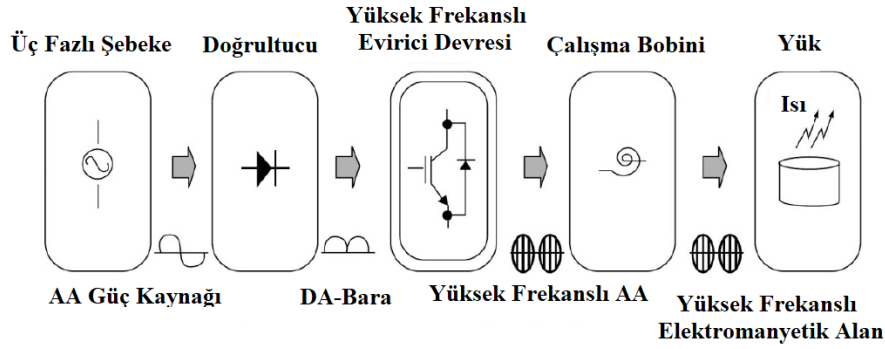
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

Böylece, rezonans frekansı (f_o) Eş. 8 ile kolaylıkla elde edilebilir (Fairchild, 2000):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

2.3. Endüksiyon Isıtma Güç Sisteminin Topolojisi

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinin şebeke bağlantılı olarak temel blok diyagramı Şekil 2’de görülmektedir (Fairchild, 2000). Şekil 3’te tek bobinli endüksiyon ısıtma sistemlerinde yaygın olarak bulunan birincil güç dönüşüm şeması verilmiştir. Sistem, güç dönüştürücünün elektromanyetik standartları karşıladığından emin olmak için bir elektromanyetik uyumluluk (EMC) filtresiyle başlar. Ardından bir AA-DA dönüştürücü, evirici bloğuna güç sağlayan bir DA bara sağlamaktadır. Doğrultucu devresi, sistemin gereksinimlerine bağlı olarak diyot doğrultucu gibi kontrolsüz veya tristör kontrollü olabilir. Kontrollü doğrultucu uygulaması, kontrol sistemi için ek bir esneklik getirir (Vishnuram ve ark., 2020) veya bir diyot doğrultucu ve bir DA-DA dönüştürücünün bir kombinasyonu (Meng ve ark., 2011) olarak gerçekleştirilebilir. Bu kontrollü doğrultucu konfigürasyonu, endüksiyon ısıtma sisteminin kontrolünün esnekliğini artırarak güç dönüştürme sürecinde daha gelişmiş ayarlamalar ve optimizasyona olanak tanımaktadır (Esteve ve ark., 2025).



Şekil 3. Endüksiyonla ısıtma sistemleri güç ünitesinin temel blok diyagramı (Fairchild, 2000).

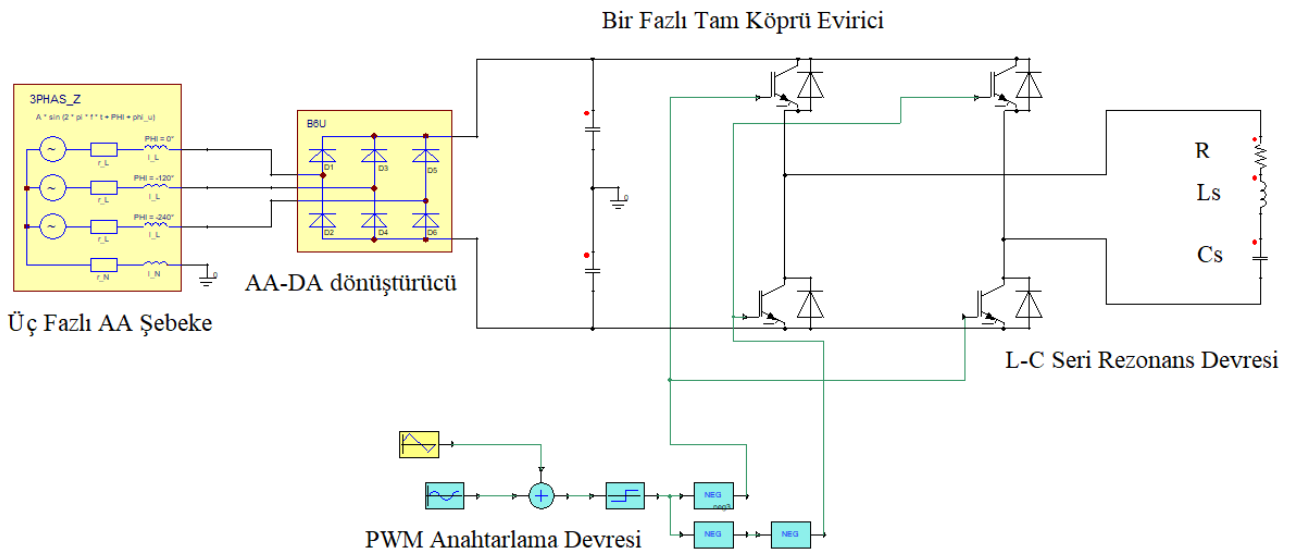
Bu temel topolojide, şebeke gerilimi önce tam köprü doğrultucu devresi AA-DA güç dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Daha sonra bu doğrultulan gerilim yüksek frekanslı bir evirici devresi yardımıyla tekrar AA elektrik enerjisine (yüksek frekanslı AA) çevrilerek endüksiyon bobinine uygulanmaktadır (Dalcı ve ark., 2020). Bunun neticesinde pankek bobin üzerinde bulunan pişirme kabı içerisinde gerilim endüklenerek, kap içerisinde yüksek frekanslı girdap akımlarının dolaşması sağlanmaktadır. Böylece, yüksek frekanslı girdap akımları (I^2R) ısı enerjisine dönüşerek pişirme kabının kendi bünyesinde ısı enerjisi açığa çıkarmaktadır.

Bu amaçla, endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan bobinin 3 temel görevi vardır.

- Manyetik alan yardımıyla çalışma kabına enerji aktarmak,
- Manyetik enerjinin dengeli bir şekilde kap içerisinde yayılmasını sağlamak,
- Kapasitör ile birlikte rezonans devresinin bir parçası olmak,

3. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRESİ İLE ENDÜKSİYON BOBİNİ BENZETİM ÖRNEĞİ

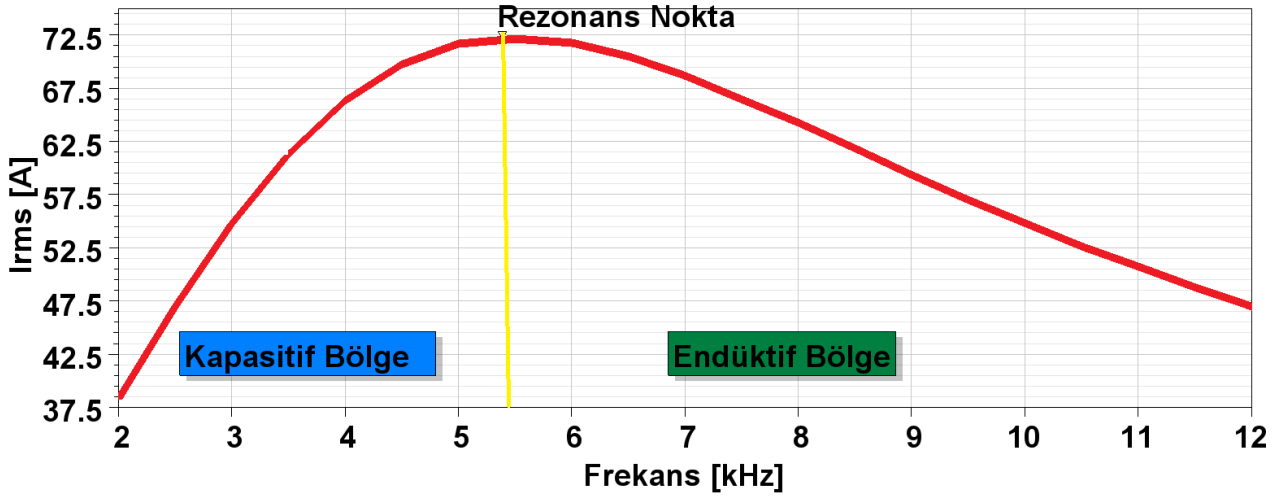
Endüksiyon sistemlerinin güç elektroniği devrelerinin optimize edilebilmesi için benzetim çalışmaları (Şekil 4) sonucunda endüksiyon bobinlerinin rezonans davranışı ve devre elemanlarının değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmektedir. Böylece, deneysel çalışmalar öncesinde son derecede yararlı bilgiler sağlanılmaktadır. Endüksiyon güç ünitesinde 400 V (rms) değerinde AA şebeke gerilimi DA gerilime dönüştürüldükten sonra yaklaşık 530 V DA bara gerilim elde edilmektedir. Bu DA bara gerilimi anahtarlandıktan sonra yüksek frekanslı tepe değeri yaklaşık 500 V olan yüksek frekanslı AA çıkış gerilimi endüksiyon bobin (L) ve seri bağlı kapasitör (C) rezonans devresine uygulanmaktadır. Burada, kullanılan topoloji bir fazlı tam köprü evirici devresi olup genellikle endüksiyon sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 4. Endüksiyon ısıtmaya ait güç elektroniği devresi benzetim devresi.

3.1. Parametrik Benzetim Örneği

Bu seri rezonans devresinde $50\mu\text{H}$ endüktans ve $100\mu\text{F}$ kapasitans değeri ile anahtarlama frekansı değeri 2 kHz ile 12 kHz değerleri arasında parametrik olarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Böylece, rezonans frekansı değeri sınır noktası olarak seri rezonans devresinin kapasitif ve endüktif bölgeleri belirlenebilmektedir (Şekil 5).



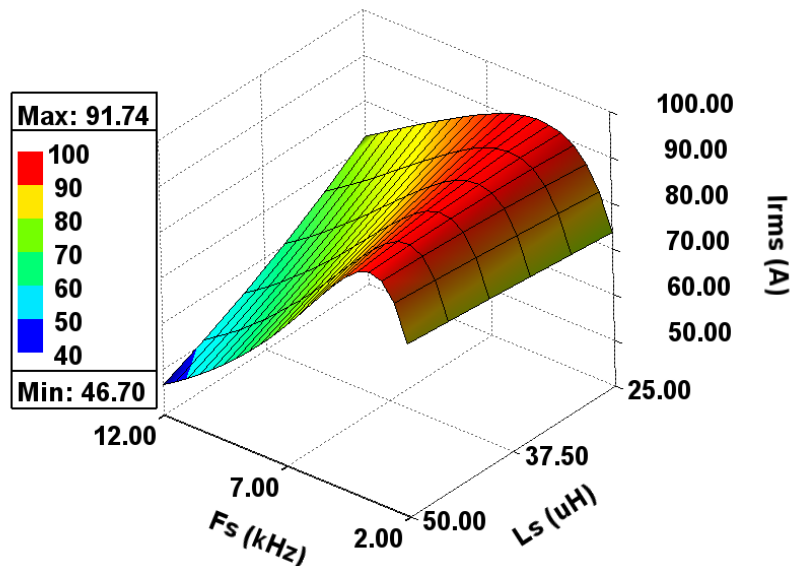
Şekil 5. Rezonans frekansı değeri sınır noktası olarak seri rezonans devresinin kapasitif ve endüktif bölgeleri.

Ayrıca, 3D parametrik çözücü analiz değerleri anahtarlama frekansı (F_s), endüktans (L_s) ve kapasitans (C_s) parametreleri için Tablo 1'de verilmiştir. Bu parametreler tabloda belirtilen çözücü adımlar ve analiz aralığında çeşitli varyasyonlar ile rezonans devresinin optimizasyonu için parametrik benzetim olarak koşturulmuş ve 3D grafikler ile yorumlanmıştır.

Tablo 1. Parametrik benzetim için değer aralıkları

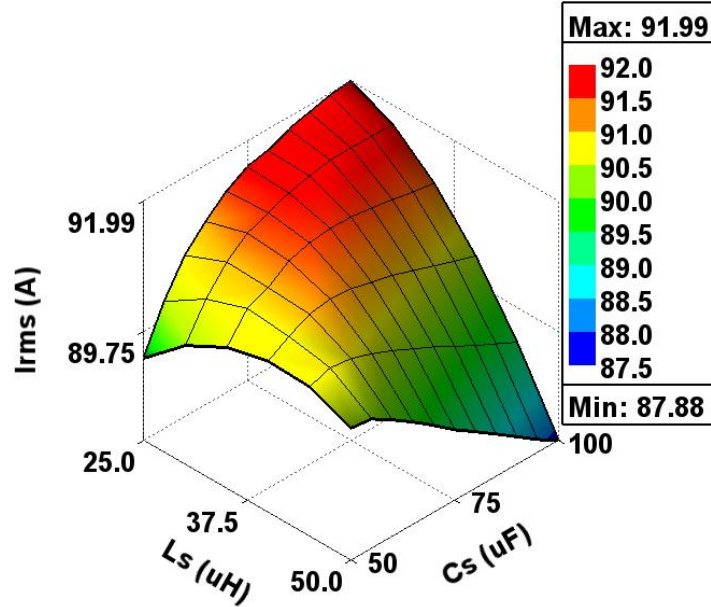
Parametre	Analiz Aralığı	Çözücü Adımı
F_s	2-12 kHz	0,5 kHz
L_s	25-50 μH	5 μH
C_s	50-100 μF	5 μF

Parametrik benzetim çalışmalarından elde edilen verilere göre belirli bir kapasitör değeri sabit tutulduğunda (örneğin 50 μF) rezonans frekansı ve bobinin endüktans değerlerine bağlı olarak rezonans devresi akımındaki değişim için parametrik 3D grafik Şekil 6'da görülmektedir. Böylece, endüksiyon ısıtma sisteminin davranışına ait önemli bir detay olarak evirici devresinin anahtarlama frekansı (F_s) güç sisteminin rezonans frekansını oluşturmaktadır.



Şekil 6. Belirli bir kapasitör değeri sabit tutulduğunda 3D parametrik rezonans grafiği.

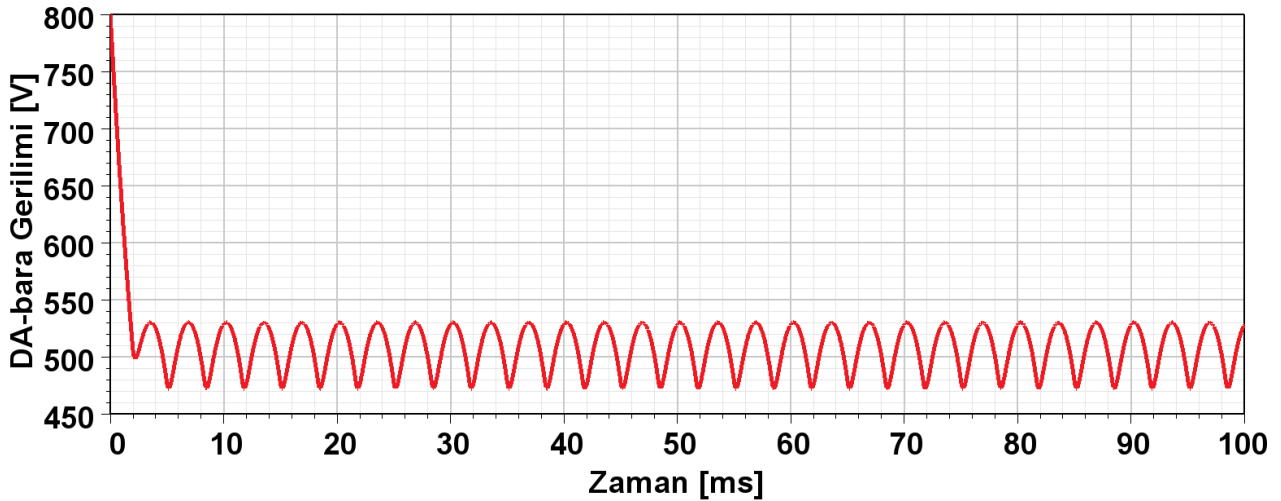
Diğer taraftan, rezonans frekansı değeri sabit tutulduğunda (örneğin 5,8 kHz) seri rezonans devresinin L ve C değerlerine bağlı olarak devreden geçen akımın değerinin değişimi için Şekil 7 verilmiştir. Böylece, endüksiyon ısıtma sisteminin en önemli bileşeni olan bobinin endüktans değeri belirlendikten sonra kolaylıkla kapasitör değerinin değişimine bağlı güç ve verim kontrol edilebilir.



Şekil 7. Belirli bir rezonans frekans değerine bağlı 3D parametrik L-C grafiği.

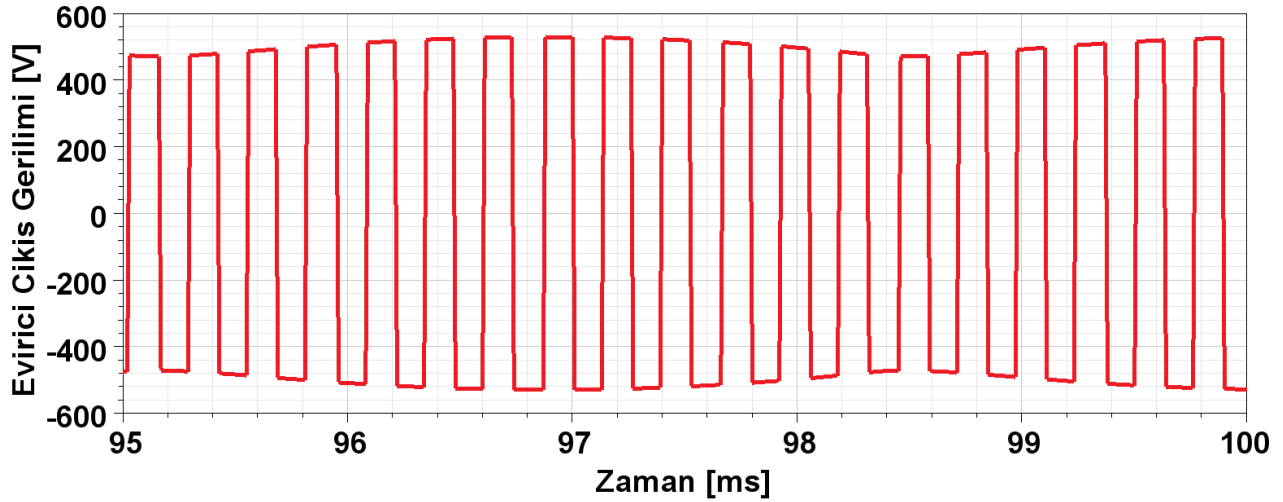
3.2. Endüksiyon Isıtma Güç Sisteminin Benzetim Örneği

Endüksiyon güç ünitesinde fazlar arası 400 V değerinde üç fazlı AA şebeke gerilimi DA elektrik enerjisine dönüştürüldükten sonra yaklaşık 530 V DA gerilim elde edilmektedir (Şekil 8).



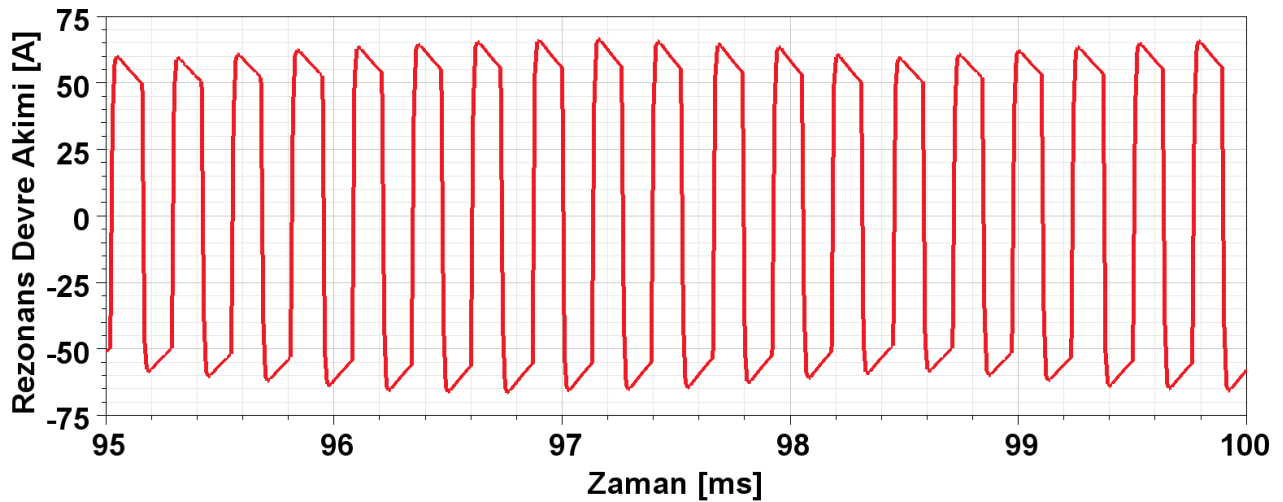
Şekil 8. Endüksiyon güç ünitesinin üç fazlı 6-darbe doğrultucu çıkış (DA-bara) gerilimi.

Bu DA bara gerilimi bir fazlı tam köprü evirici devresinde anahtarlandıktan sonra tepe değeri yaklaşık 500 V olan yüksek frekanslı AA çıkış gerilimi endüksiyon bobin (L) ve seri bağlı kapasitör (C) rezonans devresine uygulanmaktadır (Şekil 9).



Şekil 9. Endüksiyon bobinlerine uygulanan evirici çıkışı yüksek frekanslı gerilim grafiği.

Endüksiyon bobinlerine uygulanan yüksek frekanslı AA gerilim yüksek frekanslı elektromanyetik alanı oluşturabilmek için L-C seri rezonans devresinden akım geçirmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Endüksiyon rezonans devresinden geçen yüksek frekanslı akım grafiği.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Endüksiyon ısıtma sistemlerinin tasarımında rezonans frekansının enerji verimliliği ve güç elektroniği devre tasarımı açısından önemli bir rolü bulunmaktadır. Yüksek frekanslı elektromanyetik endüksiyon yoluyla metal parçalar üzerinde girdap akımlarının oluşturulması prensibiyle metal parçalarının doğrudan kendi bünyelerinde hızlı ısıtma sağlanması rezonans devresinin optimize edilmesiyle başarılmaktadır. Bu çalışmada, seri LC rezonans devresinin parametreleri ve rezonans frekansı değerleri ANSYS-Electronics/Twin Builder parametrik çözücüsü ile belirli adımlara göre koşturulmuş ve elde edilen bulgular 3D grafikler ile açıklanmıştır. Ayrıca, güç elektroniği devresine ait evirici devresinin benzetim örneği de verilerek araştırmacılar için bir rehber olması düşünülmektedir. Bu bağlamda, rezonans frekansı endüksiyon ısıtma teknolojisinde izlenmesi gereken çok önemli bir ayrıntı olarak devreden geçen akımın endüktif ve kapasitif karakterini de değiştirmektedir. Parametrik çözücü ile elde edilen veriler endüksiyon ısıtma teknolojilerinde güç elektroniği devre parametrelerinin ön kestirimi için kullanışlı bilgiler sağlamaktadır.

Diğer taraftan, bu çalışmadan farklı olarak ev tipi endüksiyon ısıtma uygulamaları için literatüre eklenen SiC güç anahtarları ile rezonanssız tam köprü çok çıkışlı yeni bir evirici topolojisi de önerilmektedir. Böylece, ev tipi endüksiyon ısıtma sistemlerine esnek ve bağımsız güç kontrol yetenekleri ile yüksek verimli çoklu çıkışların hassas kontrol olanağı, gelişmiş algılama teknikleri ve frekans modülasyon yöntemleri sunulmaktadır (Aslan ve ark., 2025).

Genel olarak, endüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılan bobin seri rezonans devresinin endüktans (L) değerini oluşturmakta ve özellikle hareketli sistemlerde endüktans değişimi söz konusu olabilmektedir. Esasen güç elektroniği devresinin anahtarlama frekansı değeri endüksiyon ısıtma sistemindeki rezonans frekansı değeri olduğundan evirici

devrelerinin anahtarlama sinyallerinin adaptif olarak kontrol edilebilmesi olanağı bulunmaktadır. Böylece, sistemin çalışması sırasında endüktans (Ls) ve kapasitans (Cs) değerlerine bağlı olarak evirici devresinin anahtarlama frekansı adaptif olarak değiştirilebilir. İleride yapılabilecek çalışmalar olarak rezonans frekansı ve rezonans devre parametrelerinin etkileşimli olarak analiz edilebilmesi için parametrik veri seti oluşturulabilir. Daha sonra parametrik veri seti kullanılarak yapay zekâ teknikleri ile parametre tahminleri güç elektroniği devresinin adaptif kontrolü için geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Aslan, S.; Oktay, U.; Altıntaş, N. (2025). A Novel Non-Resonant Full-Bridge Multi-Output Topology for Domestic Induction Heating Applications, *Electronics*, 14, 596, <https://doi.org/10.3390/electronics14030596>.
- Çivi, C., Yılmaz, T., & Başaran, A. (2019). Gıda İşleme Proseslerinde İndüksiyon ile Isıtma Kullanımının Değerlendirilmesi. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 7(2), 158-168. <https://doi.org/10.29130/dubited.466369>.
- Dalcalı, A., Özbay, H., & Öncü, S. (2020). İndüksiyon Isıtmada Çalışma Frekansının Isıtma Derinliğine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 43-49. <https://doi.org/10.46387/bjesr.702816>
- Dereci, S. (2010). İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Efrén, F. G., Luz Roxana, D. L.L., José Álvaro V.R., and Rubén, L. L. (2023). Analysis of a Resonant Frequency Tracking Method for Induction Heating Systems, *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, pp. 1-3, doi: 10.1109/ROPEC58757.2023.10409318.
- Esteve, V.; Jordan, J.; Dede, E.J.; Sanchis-Kilders, E.; Martinez, P.J.; Maset, E.; Gilabert, D. (2022). Optimal LLC Inverter Design with SiCMOSFETs and Phase Shift Control for Induction Heating Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 69, 11100–11111.
- Esteve, V.; Jordán, J.; Bellido, J.L. (2025). Optimizing the Efficiency of Series Resonant Half-Bridge Inverters for Induction Heating Applications. *Electronics*, 14, 1200. <https://doi.org/10.3390/electronics14061200>.
- Fairchild., (2000), “AN9012 Induction Heating System Topology Review”, Fairchild Semiconductor.
- Han, W., Chau K. T., and Zhang, Z. (2017). Flexible Induction Heating Using Magnetic Resonant Coupling," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 1982-1992, doi: 10.1109/TIE.2016.2620099.
- Kawashima, R.; Mishima, T.; Ide, C. (2021). Three-Phase to Single-Phase Multiresonant Direct AC-AC Converter for Metal Hardening High-Frequency Induction Heating Applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 36, 639–653.
- Kaya, O., & İçier, F. (2019). İndüksiyon ve Ohmik Isıtma İşlemlerinin Gıdalara Uygulanabilirliğinin Karşılaştırılması. *Akademik Gıda*, 17(1), 111-120. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.544844>.
- Lucia, O.; Maussion, P.; Dede, E.J.; Burdío, J.M. (2014). Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61, 2509–2520.
- Meng, L., Cheng K. W. E., and Chan, K. W. (2011). Systematic Approach to High-Power and Energy-Efficient Industrial Induction Cooker System: Circuit Design, Control Strategy, and Prototype Evaluation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3754-3765, doi: 10.1109/TPEL.2011.2165082.
- Padole, A. S., Rane, M., Sawant, R. R., Rao, Y. S., and Chaudhari, B. N. (2025). A Modular Three-Phase Induction Heating Generator with Enhanced Power Factor, *International Conference on Power Electronics Converters for Transportation and Energy Applications (PECTEA)*, Jatni, India, pp. 1-7, doi: 10.1109/PECTEA61788.2025.11076559.
- Vishnuram, P., Ramachandiran, G., Ramasamy, S., and Dayalan, S. (2020). A comprehensive overview of power converter topologies for induction heating applications," *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, Vol. 30, No. 10, Art. no. e12554.
- Vishnuram, P.; Ramachandiran, G.; Sudhakar Babu, T.; Nastasi, B. (2021). Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting Applications: A Systematic Review on Modelling, Converter Topologies and Control Schemes. *Energies*, 14, 6634.
- Yang, Q., Ma, F., Wang, J., Zang, Z., Huang, G., Peng, Q., and Liu, S. (2025). A Comprehensive Induction Heating Power System for Large All-Metal Cooking Pots With Energy Storage, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 1916-1927, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3507949.

Zinn, S. L and Semiatin, S. (1988). Elements of Induction Heating Design, Control and Applications. USA.