



İndüksiyonla Isıtma Uygulamaları için Bir Seri Rezonans İnverter Topolojisi ve Simülasyonu

A Series Resonant Inverter Topology and Simulation for Induction Heating Applications

Ayşe Tuğba YAPICI^{1,*}, Nurettin ABUT¹

¹ Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Kampüsü, Kocaeli, 41380, Türkiye

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/04/2018

Kabul Tarihi : 01/06/2018

Anahtar Kelimeler

IGBT
İndüksiyon Isıtma
Seri Rezonans İnverter

Research Paper

Received Date : 17/04/2018

Accepted Date : 01/06/2018

Keywords

IGBT
Induction Heating
Series Resonance Inverter

Özet

Metal ısıtma ve eritmenin problemleri ve çevresel kirlilik oluşturduğu koşullarda, indüksiyon ile ısıtma ve eritme işlemi büyük avantajlar sağlamaktadır. Gelişen teknoloji ve kontrol yöntemlerindeki yeniliklerle güç kontrol topolojileri ve bu devrelerin analizleri ile performans ve verimde iyileştirmeler yapılmaktadır. Paralel-seri yarı (Quasi) veya tam rezonans özellikli inverter (evirici) indüksiyon ile ısıtmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada büyük güçlü indüksiyon fırınlarında tristörlerle tasarlanan inverterlere bir alternatif olarak IGBT güç yarıiletkeni kullanılarak tasarlanan inverter ve simülasyon doğrulamaları denmektedir. Seri rezonans inverter topolojisinde MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile çıkışta oldukça ideal sinüs sinyal şeklinin başarılabirliği tartışılmıştır.

Abstract

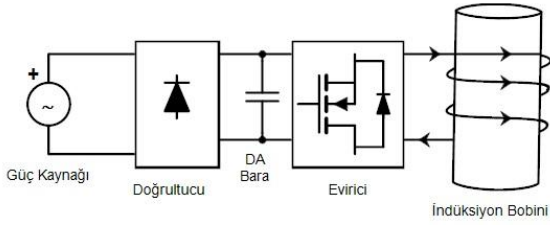
In conditions where metal heating and melting are problematic and environmental pollution occurs, induction heating and melting provide great advantages. Power control topologies with innovations in developing technology and control methods and improvements in performance and efficiency with analysis of these circuits are made. Parallel-series half or full-resonance inverters are widely used in induction heating. In this paper, we are experimented with inverters and simulation verifications designed using IGBT power semiconductors as an alternative to inverters designed with thyristors in large powerful induction furnaces. Simulation results in the MATLAB Simulink environment in serial resonant inverter topology and the achievability of the ideal sinusoidal signal waveform at the output are discussed.

1. Giriş

İndüksiyon ısıtmanın temelinde alternatif gerilim ile frekans değişiminden faydalanarak çalışan devrelerden yararlanılarak yola çıkılmıştır denilebilir. Bu sistemlerin temeli ise Michael Faraday ın magnetik indüksiyon temeline dayanmaktadır[1]. Bu teorinin keşfi transformatör, elektrik motorları, generatör gibi alternatif gerilim ile çalışan elektrik makinelerinin yaygınlaşmasını

sağlamıştır [1]. Bu elektrik makinelerinden transformatör yapısında primer kısmında oluşturulan alternatif akımın sekonder kısmında meydana getirdiği gerilimin kullanılmasına dayanmaktadır. Bu işlem sırasında hem transformatör için hem de diğer elektrik makineleri için manyetik alandan kaynaklanan ısı bu sistemler için istenmeyen bir durum olmuştur[1]. Ancak bu elektrik makineleri için istenmeyen histeresis ve joule kayıplarından meydana gelen ısı aslında indüksiyon ısıtma uygulamalarının temeli olmuştur.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): a.tgb.ypc@hotmail.com

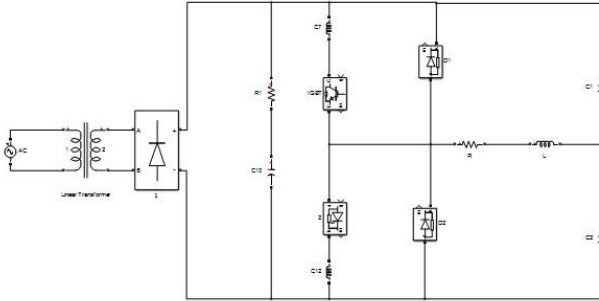


Şekil 1. İndüksiyon ısıtma Sistemi

Şekil 1' de indüksiyon ısıtma sisteminin aşamaları gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, indüksiyon ısıtma işlemi 3 kısımdan oluşmaktadır. Birinci aşama, güç kaynağından alınan gerilimin doğrultulması işlemidir. Sonrasında, elde edilen bu doğru gerilimin evirici ile istenilen genlik ve frekanstaki alternatif gerilime dönüşmesidir. Son olarak bu alternatif gerilimin indüksiyon bobininde meydana getirdiği manyetik alanla iş parçasının ısıtılması işlemidir[2].

2. İndüksiyon Isıtma

İndüksiyon ısıtma, uygun frekanstaki akımı sağlayacak olan güç kaynağı seçimi ile başlar ve ısıtma bobinindeki iş parçasının ısıtılmasını sağlayacak olan dönüştürücü devreleri ile devam eder ve en son olarak ısıtma işleminin gerçekleşmesi ile sonlanır.



Şekil 2. Seri Rezonans İnverterli İndüksiyon Isıtma Devresi

Şekil 2' den görüldüğü gibi, sistemin inverter kısmı iki adet anahtarlama elemanı olan IGBT, 2 adet diyot ve seri rezonans yapı için kullanılan bobin, kondansatör ve dirençten oluşmaktadır. Günümüzde indüksiyon ısıtma uygulamalarında, kontrol teknolojisinin gelişimine paralel olarak tristör anahtarlama elemanlarının yerini MOSFET ve IGBT almaktadır[3]. Bu çalışmada alınan evirici topolojisi simüle edilirken anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir. MOSFET yerine IGBT seçilmesinin sebebi, yüksek giriş empedansı ve yüksek anahtarlama hızında çalışabilme özelliğidir [4].

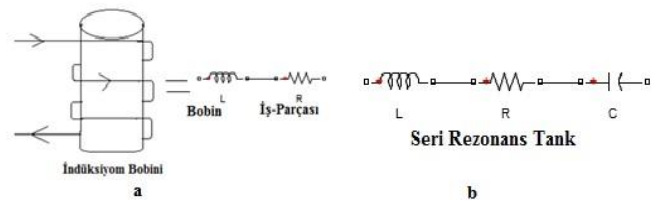
Şekil 2' deki topolojiden görüldüğü gibi, güç kaynağından alınan alternatif gerilim doğrultucu devre ile doğru gerilime dönüştürülür. Daha sonra elde edilen doğru gerilim inverter aracılığı ile ısıtma işlemi için gerekli olan

frekanstaki alternatif gerilime dönüştürülür. Isıtma bobini üzerinde akım geçişi sağlandığında, bobin içerisinde yoğun ve hızla değişen bir magnetik alan oluşturur. Isıtma bobini içerisine yerleştirilen iş parçası bobin tarafından üretilen magnetik alana maruz kalır. Sonuç olarak iş parçası üzerinde de gerilim indüklenmesi olur. İndüklenen bu gerilim elektron akışına sebep olmaktadır. İş parçası üzerinden akan bu akım bobindeki akıma ters yönlüdür ve ısıtma için gerekli sıcaklığın oluşumunu sağlayan bu akımlar eddy akımları olarak adlandırılır. Dolayısıyla indüksiyon ısıtma için gereken temel faktörler, değişen bir magnetik alan ve bu magnetik alan içerisine ısıtılmak istenen elektriksel iletken olan malzemenin yerleştirilmesidir. Bu magnetik alanı oluşturmak için indüksiyon bobinine gerekli olan uygun frekanstaki akım ya da gerilimin aktarılması gerekmektedir. Bu uygun frekanstaki AC gerilimin oluştuğu işlem basamağı inverter kısmıdır.

İnverter beslemesi için akım ya da gerilim besleme olarak iki seçim yapılabilir. Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılan gerilim beslemeli yapı seçilmiştir ve bu nedenle işlemin inverter kısmında dönüştürücü işlemleri için gerilim takibi yapılmaktadır. İnverterde akım beslemeli topoloji tercih edildiğinde, akım harmoniklerinin azaltılması için girişte kullanılan şok bobininin evirici kayıplarını azaltırken maliyeti artırması ve verimi azaltmasıdır[5]. Gerilim beslemeli inverter yapı kullanılması ile , akım beslemeli topolojiye göre giriş şok bobini yapısı kaldırılarak daha kompakt bir yapı elde edilerek verim artırılmıştır [5].

2.1. Seri Rezonans İnverter

İndüksiyon ısıtma uygulamalarında ısıtmanın gerçekleştirilebilmesi için girişten alınan enerji, bazı aşamalardan geçirilerek çıkışta yüksek frekanslı bir AC gerilim elde edilmelidir[6]. Bunun için girişte uygulanan AC gerilim önce doğrultucu ile DC gerilime dönüştürülür ve daha sonra inverter ile, çıkışta istenilen genlik ve frekanstaki AC gerilime dönüştürülür. Doğrultucu çıkışındaki doğru gerilimin inverterde minimum kayıpla alternatif gerilime dönüştürülmesi istenir. Bu nedenle inverter devrelerinde anahtarlama kayıplarını azaltmak amacıyla rezonans topoloji kullanılmaktadır.



Şekil 3. a. Bobin-İş parçası ve Eş Değeri, b. Seri Rezonans Tank

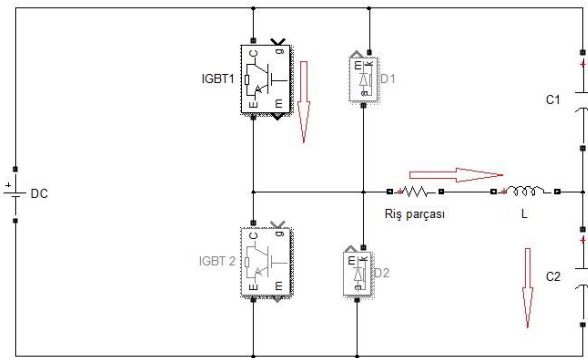
Şekil 3 (a)' da indüksiyon bobini ve iş parçası modeli ve (b) de seri rezonans yapısının bağlantı şekli gösterilmektedir. Burada bobin, indüksiyon bobinini direnç ise iş parçasını temsil etmektedir. Rezonans durumu için DC baradan alınan enerji bobin üzerinden kondansatör ile rezonansa geçerek iletilir.

Rezonans dönüştürücü devrelerinde rezonans frekansında daha yüksek çıkış gücü oluşur ve verim artar [6]. Bu nedenle rezonans devrelerinin kullanımı indüksiyon ısıtma uygulamalarında tercih edilmektedir. Yüksek frekansta enerji aktarımında maksimum verimin elde edilebilmesi için sıfır akımda anahtarlama (ZCS) veya sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) yapılmaya çalışılır[7]. Böylelikle anahtarlama kayıpları azaltılarak daha fazla verim elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu durumu sağlayabilmek için L-C elemanlarından oluşturulan rezonans devreleri kullanılır[8]. Bu çalışmada olduğu gibi, elemanlar seri olarak bağlandıkları için seri rezonans inverter olarak adlandırılmıştır. Seri rezonans bağlantı, doğal kısa devre koruması, rezonans akımındaki sınırlı harmonikler, minimum anahtarlama frekansında maksimum güç aktarımı vb gibi avantajlar içerir [9].

2.2. Seri Rezonans İnverter Çalışma Modları

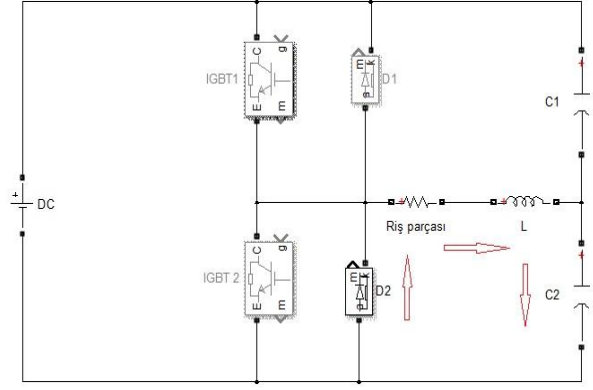
Şekil 2' de gösterilen indüksiyon ısıtma sistemi devresinin inverter kısmında bulunan iki adet anahtarın iletimde olma durumuna göre dört adet çalışma modu bulunmaktadır.

Mod 1: IGBT 1 iletim durumunda, IGBT 2 ise kesim durumundadır. C2 kondansatörü L bobini üzerinden şarj olmaktadır[10]. Akımın yönü Şekil 4' de gösterildiği gibidir.



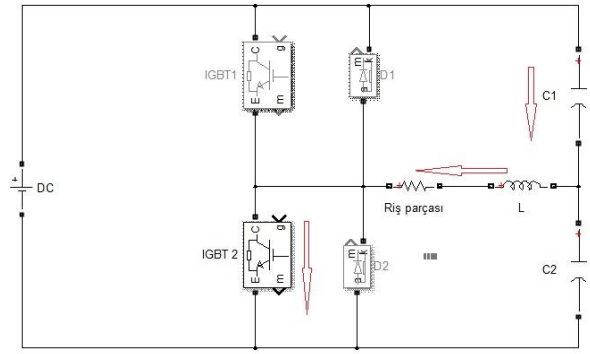
Şekil 4. Mod-1

Mod 2: IGBT 1 kesim durumuna geçmiştir. IGBT 2 iletim durumuna geçene kadar geçen sürenin olduğu moddur. IGBT 2 iletim durumuna geçmek üzeredir ancak bu modda kesim durumundadır. Akımın yönü Şekil 5' de gösterildiği gibidir. Şarj olan C2 kondansatörü D2 diyotu üzerinden deşarj olmaktadır.



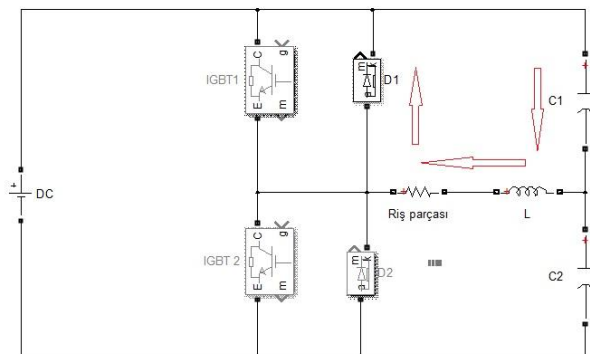
Şekil 5. Mod-2

Mod 3: IGBT 2 iletim durumuna geçmiştir, IGBT 1 ise kesim durumundadır. Akımın yönü Şekil 6' daki gibidir. C1 kondansatörü şarj olmaktadır.



Şekil 6. Mod-3

Mod 4: IGBT 2 kesim durumuna geçmiştir. Akımın yönü Şekil 7' de gösterildiği gibidir. Şarj olan C1 kondansatörü D1 diyotu üzerinden deşarj olmaktadır.



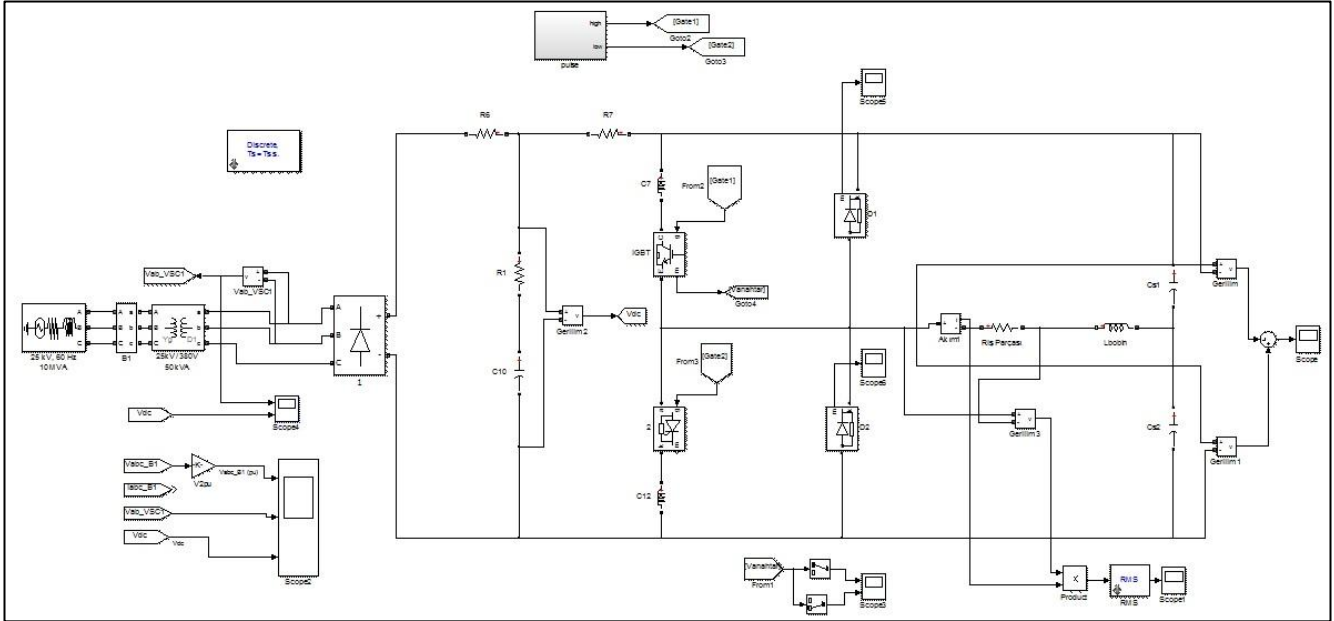
Şekil 7. Mod-4

2.3. Seri Rezonans İnverterli İndüksiyon Isıtma Sistemi Simülasyon Sonuçları

Seri rezonans inverterli indüksiyon ısıtma sisteminin Matlab Simulink programı ile simülasyon devresi Şekil 8' de gösterilmektedir. Yapılan simülasyon çalışmasında

İndüksiyon ısıtma sisteminin simülasyonu yapılarak özellikle inverter kısmının verdiği sonuçlar irdelenmiştir. Çünkü ısıtma işleminin gerçekleştirilmesi için oluşturulacak manyetik alan burada oluşturulur.

İndüksiyon ısıtma eviricisinde, bobinde oluşturulan manyetik alan sinüsoidal AC gerilim ile gerçekleştirilir. Bobinde oluşan manyetik alanda kalan iş parçasında ısı oluşur.

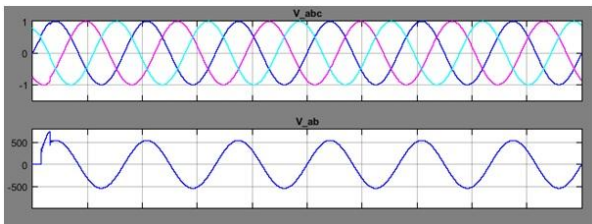


Şekil 8. Seri Rezonans İnverterli İndüksiyon Isıtma Sistemi Matlab Simulink Devresi

Tablo 1. Simülasyon Parametreleri

Giriş Gerilimi	500V
Anahtarlama Frekansı	1kHz
$R_{eş}$	1 Ω
L_{bobin}	100mH
C_{seri}	116nF

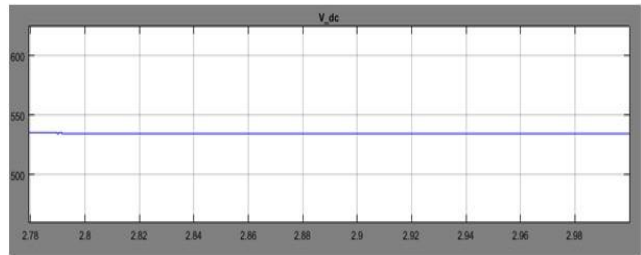
Bu çalışmada orta frekans bir indüksiyon ısıtma sistemi simülasyonu yapılmıştır. Yük olarak seri R-L-C kullanılmıştır. R iş parçasını temsil etmektedir. Çıkış gerilimi değeri için her iki kondansatöründe olduğu yük geriliminin toplamı alınmıştır.



Şekil 9. İndüksiyon ısıtma Sistemi Giriş Gerilimi

Şekil 9' da görüldüğü gibi sistemin girişine

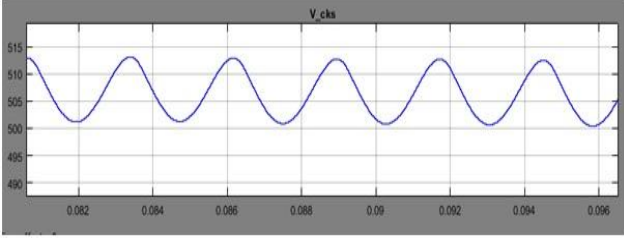
uygulanan 60 Hz 500 V AC gerilimin üç faz U_{abc} ve faz arası gerilimlerinden birisi olan U_{ab} gösterilmiştir. Şekil 10'da ise bu AC gerilimin doğrultucu ile yaklaşık DC 500V a dönüştürüldüğü gözlemlenebilir.



Şekil 10. İnverter Gerilim Beslemesi (Doğrultucu ile Doğrultulmuş Gerilim)

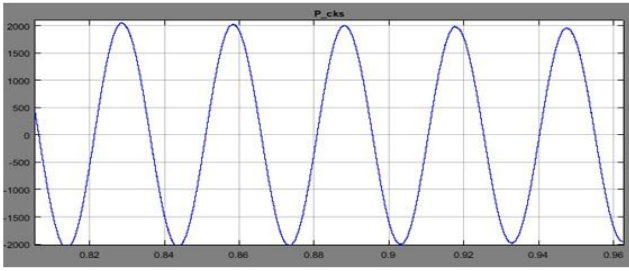
Çalışmanın ikinci dönüşüm işlemi için inverter kısmında doğrultucu ile elde edilen DC gerilimin inverter gerilim beslemesi olarak alınıp, çıkışta AC gerilime dönüşmesi beklendiğinden bahsedilmiştir.

Şekil 11 de görüldüğü gibi, DC gerilimin inverter çıkışında yaklaşık olarak AC 500V olarak elde edildiği gözlemlenebilir. Bu AC gerilim indüksiyon ısıtma bobininde manyetik alan oluşturarak içerisindeki iş parçasının ısıtılmasını sağlayacaktır.



Şekil 11. İndüksiyon Isıtma Çıkış Gerilimi(İnverter ile AC ye Dönüştürülmüş Gerilim)

Şekil 12 de ise iş parçasında oluşan güç değeri iş parçası üzerindeki akım ve gerilim çarpımı ile elde edilmiştir.



Şekil 12. İndüksiyon Isıtma Sistemi Çıkış Gücü

Yapılan simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi, indüksiyon ısıtma sistemi için iki dönüşüm işleminin (AC/DC, DC/AC) sağlandığı ve ayrıca inverter çıkışından alınan AC gerilimin indüksiyon ısıtma işlemi için gerekli olan istenilen frekanstaki sinüs formulu AC gerilimi sağladığı gözlenmiştir. Sistemin girişine uygulanan 500V, 60Hz AC gerilim doğrultucu ile yaklaşık 500V DC gerilime dönüştürülmüş ve inverter ile daha yüksek frekansta, 1kHz ve yaklaşık 500V AC gerilim olarak çıkışta elde edilmiştir. İş parçası için 2000W olarak elde edilen çıkış gücü orta frekans bir indüksiyon ısıtma sisteminde ısıtma işlemi için yeterli olacaktır.

3.Sonuç

Hızla gelişen teknoloji ile günümüzde birçok alanda yenilikler yapılarak birçok uygulamanın kullanımı yaygınlaştırılarak önemi artırılmıştır. İndüksiyon ısıtma da özellikle anahtarlama elemanları üzerinde yapılan teknolojik çalışmalar ile günümüzde kullanımı oldukça fazla yaygınlaşan uygulamalardandır. Bu çalışmada indüksiyon ısıtma sistem yapısı ile seri rezonans inverter topolojisi simüle edilmiştir. Yapılan simülasyon çalışması ile kontrol sistemi ve rezonans özellikleri ile çıkış geriliminin sinüs şekli incelenmiştir. Çalışmada dönüştürücü devrelerin çalışma aşamaları ele alınmıştır. İlk aşamada doğrultucu ile dönüşüm, ikinci aşamada ise inverter ile dönüşüm işlemi yapılarak ısıtma işlemi için

indüksiyon bobinine aktarılacak düzgün bir sinüs formulu AC gerilimin elde edilmesi gözlenmiştir. Sonuç, seri rezonans inverter yapısının indüksiyon ısıtma uygulama sistemleri için beklenen sonucu sağladığını göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Dereci S. , 2010. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 296831.
- [2] Kulkarni V. V., Swami L. B., 2014. MOSFET Based High Frequency Inverter for Induction Heating Equipment Using MATLAB/SIMULINK Environment. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, **1**(1), 1-7.
- [3] Anjana M. P., Sija G., Eldhose K. A., 2013. Improved AC-AC for Induction Heating Applications. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, **1**(2), 55-59.
- [4] Kukku J., Benny K. K., 2014. High Frequency LLC Resonant Inverter for Induction Heating with Asymmetrical Control. International Journal of Advanced Information Science and Technology, **30**, 257-262.
- [5] Diwan A. P. , Kanagaraj R. ,2015. Implementation and Simulation of High Frequency Series Resonant Inverter for Induction Heating Application. Indian Journal of Science and Technology, **8**(32), 1-5.
- [6] Samathal M. , Usha P., 2013. DUAL MODE RESONANT CONVERTER FOR INDUCTION HEATING SYSTEM. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, **1**(7), 54-57.
- [7] Anadol M. A., Akkaya R., 2012. İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması için Akım Beslemeli Paralel Rezonans Devreli Bir İnverterin Simülasyonu ve Gerçekleştirilmesi. Selçuk Teknik Dergisi, **11**(2), 82-95.
- [8] Bal G., Öztürk N., 2009. Comparison of Sinusoidal PWM Zero Current Transition Inverter with Resonant Link Inverter. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Karabük, 213-217.
- [9] Shaikh A. H. A. R. , Akireddy S. K. , 2013. Simulation of MOSFET Based Inverter for Induction Heating In MATLAB. International Journal of Science and Research, **4**(11), 28-31.
- [10] Öncü S., Sazak B. S., 2006. Tek Anahtarlı İnverterde Bazı Kontrol Palslerinin Silinmesiyle Güç Kontrolü. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, **21**(1),123-127.