

Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynak Makinesi Tasarımı

High Frequency Induction Welding Machine Design

Yusuf EFTELİ¹, İrfan ALAN²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Bornova, İZMİR
yusuf.efteli@ege.edu.tr , irfan.alan@ege.edu.tr

Özet

Bu çalışmada yüksek frekanslı indüksiyon kaynak sistemi tasarımı için bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve küçük güçte bir uygulama gerçekleştirilmiştir. İndüksiyonla ısıtıcı devrelerinin en büyük problemleri şebekeden harmonik içeriği fazla akımlar çekmeleri ve düşük giriş güç faktörüne sebep olmalarıdır. PWM doğrultucu teknolojisi bu problemlere önemli bir çözüm sunmaktadır. Çalışmada yapılan 50 kW'lık PWM doğrultucu benzetim çalışmalarında, giriş güç faktörünün 1'e çekilmesi sağlanmış ve temel bileşen dışındaki harmonik akımları çok düşük seviyelerde tutulmuştur. Yüksek frekans rezonans invertör benzetim çalışmasında, rezonans devresi için paralel rezonans yapısı tercih edilmiştir. Anahtarlama devresi için iki anahtarlı yükseltici tip anahtarlama yapısı kullanılmıştır. Temsili ısıtma yüküne rezonans invertör ile 50 kW güç aktarımı 250 kHz rezonans frekansında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda bir ayarlı DC güç kaynağından 260 kHz frekanslı paralel rezonans devresine tek anahtarlı yapı ile güç aktarımı yapılarak metal ısıtma çalışmaları yapılmıştır. Değişken rezonans frekansının takip edilerek anahtarlama sinyallerinin oluşturulması için PLL (Phase Locked Loop) yapısı kullanılmıştır.

Anahtar sözcükler: İndüksiyonla Kaynak, PWM Doğrultucu, Rezonans İnvörtör, PLL

Abstract

In this study, simulation studies were made for the design of high frequency induction welding system and carried out a low power application. The biggest problems of the induction heating circuits are that they draw currents included more harmonic from grid and cause low input power factor. PWM rectifier technology provides a significant solution to these problems. In this study, unity power factor was obtained and harmonic currents except the fundamental component were kept very low levels in the 50 kW PWM rectifier simulation studies. Parallel resonance structure was preferred for resonant circuit in high frequency resonant inverter simulation study. Boost-type switching structure with two switches was used for the switching circuit. 50 kW power were transferred to heating load by resonant inverter at 250 kHz resonance frequency. In experimental studies, power transfer was made from a regulated DC power supply to 260 kHz frequency parallel resonance circuit with single-switch structure and metal heating studies are made. PLL (Phase

Locked Loop) structure was used to compose of the switching signals following by the variable resonant frequency.

Key words: Induction Welding, PWM Rectifier, Resonance Inverter, PLL

1. Giriş

İndüksiyon kaynağı indüksiyonlu ısıtma sistemlerinin önemli uygulamalarından birisidir. İndüksiyon ile ısıtma temassız ısıtma işlemidir. Bu yöntem ile elektriksel iletkenliğe sahip olan metaller yüksek frekanslı elektrik kullanılarak kesim ve hassas olarak ısıtılırlar. Temel olarak indüksiyon ısıtma elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesidir. Diğer ısıtma sistemlerine göre en önemli özelliği ısının ısıtılacak parçanın içerisinde oluşturulmasıdır. Bu nedenle ısıtılacak parça iletken olmalıdır. İndüksiyonlu ısıtmanın metal ısıtma, eritme, yüzey sertleştirme ve kaynak uygulamaları mevcuttur [1]. İndüksiyonla kaynak yönteminin bilinen diğer kaynak yöntemlerine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları yüksek güç yoğunluğu, dumsız ve atıksız çalışma, temassız kaynak, yüksek kaynak kalitesi, bölgesel ısınma ve kaynak olanağı sağlama, geometrik çarpılma ve içyapı değişikliklerinin olmamasıdır [2].

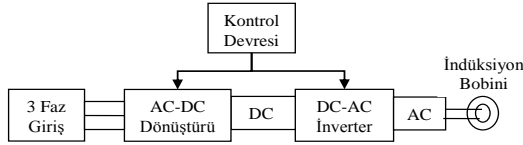
2. İndüksiyonla Kaynağın Temelleri

İndüksiyonlu kaynak cihazı, radyo frekansında elektrik akımı ile enerjilendirilen bir indüksiyon bobini içerir. Bu bobin ile yüksek frekansta elektromanyetik alan üretilir ve kaynak yapılacak metalin indüksiyon bobini içerisinden geçirilmesi ile iletken malzeme üzerinde gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimin oluşturduğu girdap akımları silindirik şeklindeki parçanın birleştirilecek uçlarında yüksek ısının oluşmasına sebep olur. Akımların nüfuz ettiği derinlik frekans değeri ile ters orantılı olarak değişir ve deri etkisi sonucu oluşan bu durum dalma derinliği olarak adlandırılır. Kaynak uygulamalarında 250-400 kHz aralığı tercih edilmektedir. Bobinin meydana getirdiği indüksiyon akımları ile borunun birleştirilen iki ucunda ısı yoğunlaşması sayesinde baskı makaralarının arasından geçerken ek yerinden kaynak edilir. Yüksek ısı ve basınç bu noktaların kaynak edilmesini sağlar [3].

3. Sistemin Yapısı

Çalışmada PWM doğrultucu ve rezonans invertör devreleri için benzetim çalışmaları yapılmış, rezonans invertör devresi ise deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 1 üzerinde

indüksiyonla kaynak sisteminin blok diyagramı görülmektedir.



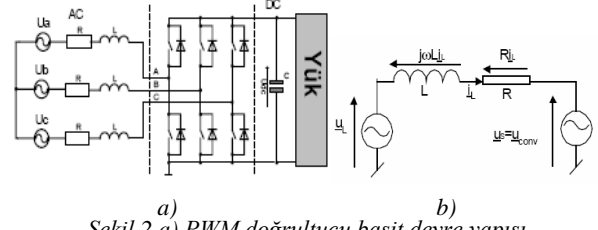
Şekil 1: İndüksiyonla kaynak sistemi blok diyagramı

Basit olarak bir indüksiyonlu kaynak sisteminde indüksiyon bobini devresi iki aşamalı güç dönüşümü içermektedir. İlk aşamada AC kaynak gerilimi DC'ye çevrilir, ikinci aşama da ise bu DC gerilim, invertör devresi ile istenilen genlik ve frekansta AC' ye çevrilir [2]. İndüksiyonla ısıtmada kullanılan güç kaynaklarında hem AC-DC dönüştürücü katında hem de DC-AC invertör katında farklı devre topolojileri tercih edilebilmektedir. Kullanılan devre tipleri başlıca gerilim beslemeli ve akım beslemeli olarak sınıflandırılır. DC kaynak katı sabit ya da değişken çıkışlı olabilir. AC kaynak katında kullanılan invertör devresi değişken frekans, değişken faz, değişken darbe oranı ve sabit güç faktörü gibi farklı kontrol yöntemleri içerebilir. Bunların yanı sıra yük devresinde seri ve paralel rezonans yapıları kullanılabilir.

3.1. AC-DC PWM Doğrultucu

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan AC-DC doğrultma devreleri genelde 3 fazlı kontrolsüz ve kontrollü doğrultucu devreleridir. Giriş katındaki bu devrelerden ötürü indüksiyonlu kaynak sistemlerinde en önemli problemler, düşük güç katsayısı ve yüksek harmonik bozulma faktörü ile çalışmadır [4]. İndüksiyonlu kaynak sistemlerinin düşük güç katsayısında çalıştırılması güç hatlarında daha yüksek akımla çalışmaya, daha yüksek gerilim düşümlerine ve daha yüksek kayıplara neden olur. Buna bağlı olarak kaynak yapılması için parçaya aktarılan enerji düşüktüğü, geçen süre artmakta bu da işletmenin çalışma masraflarını artırmaktadır [5]. AC'nin istenilen değerde DC'ye dönüştürüldüğü doğrultucu sisteminde yapılacak iyileştirmelerle sistemin güç katsayısı yükseltilebilir ve harmonikler azaltılabilir. Ayrıca bu iyileştirmelerle güç kaynağının genel boyutlarının küçültülmesi de sağlanabilir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan diyot ve tristörlü doğrultucular düşük güç katsayısına ve yüksek genlikli harmoniklere sebep olmaktadır [6]. Bu sakıncaların giderilmesi için pek çok araştırma yapılmıştır [7]. Standart doğrultucu sistemler yerine PWM doğrultucu sistemin kullanılması pek çok sakıncayı ortadan kaldırabilir. PWM doğrultucularda doğrultma işlemi sırasında elektrik şebekesinden çekilen fakat istenmeyen harmonik akımların yok edilmesi sağlanır ve giriş güç faktörünü 1'e yaklaştırılır. Bu teknoloji indüksiyon kaynak makinelerinde kullanılarak mevcut sistemlerde tipik olarak %80'lerde olan verimin iyileştirilmesi sağlanabilir [8].

Doğrultucu bloğunda bulunan 6 adet anahtarlama elemanı, şebekeden çekilen akımın şebeke gerilimi ile neredeyse aynı formda (sinüs formunda) ve aynı fazda olmasını, dolayısıyla giriş güç faktörünün 1'e ayarlanmasını ve harmonik akımlarının minimum düzeyde olmasını sağlayacak şekilde anahtarlanır.



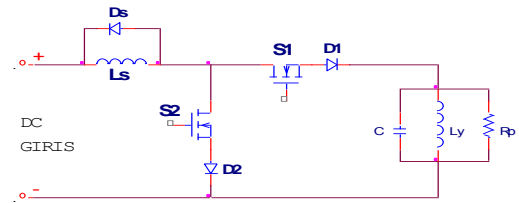
Şekil 2 a) PWM doğrultucu basit devre yapısı, b) PWM doğrultucu bir faz eşdeğer devresi

Şekil 2.a'da PWM doğrultucu için basitleştirilmiş devre gösterimi verilmiştir. Şekil 2.b'de ise bu devreye ait bir fazlı eşdeğer devre gösterilmektedir. L ve R hat indüktörünü temsil eder. \underline{U}_L hat gerilimini, \underline{U}_S ise DC bara gerilimine göre kontrol edilebilen köprü dönüştürücü gerilimini gösterir [9]. Bir fazlı eşdeğer devre kullanılarak gerilim eşitlikleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2. Rezonans İnvörtör Devresi

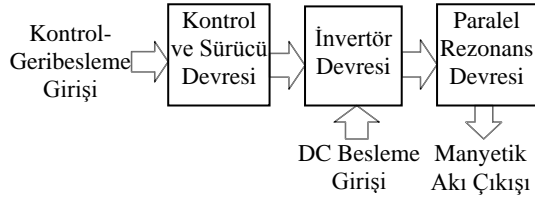
İndüksiyonla ısıtma uygulamalarında, ısıtılacak parçaya enerjinin en uygun ve etkin şekilde aktarılabilmesi için rezonans invertör devreleri kullanılmaktadır. Uygulama için ihtiyaç duyulan güce bağlı olarak çoğunlukla yarım köprü ve tam köprü tipi rezonans invertör devreleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise yük üzerinde istenen frekansta AC akım oluşturmak için yükseltici tip yüksek frekans rezonans invertör devresi üzerinde çalışma yapılmıştır. Yük devresi, bir paralel LC devresidir. Şekil 3'de görülen anahtarlardan S2'nin görevi rezonans geriliminin negatif alternansında L_s bobini üzerine enerji yüklemek, S1 anahtarının görevi ise rezonans geriliminin pozitif alternansında bobin üzerinde depolanan enerjiyi AC çıkış uçlarına aktarmaktır. S1 rezonans frekansında anahtarlanarak çıkış uçlarına bağlı olan LC paralel rezonans devresi üzerinde bu frekansta sinüzoidal AC link oluşması sağlanır [10].



Şekil 3 Yükselten tip anahtarlama rezonans invertör devresi

3.3. Deneysel Devre Bileşenleri

Çalışmada deneysel incelemeler yalnızca rezonans invertör devresi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de devre blok şeması verilmiştir.



Şekil 4 Yüksek frekans paralel rezonans invertör devresi blok şeması

3.3.1 Paralel rezonans LC tank devresi

Paralel rezonans devresi ısıtılmak istenen parçaya enerji aktarılan devre kısmıdır. LC tank devresi ısıtılacak parçanın içine girerek yoğun manyetik alana maruz kaldığı iş bobini ve kapasitör bankasından oluşmaktadır. İndüksiyonla kaynak uygulamalarında, kaynak edilecek parçanın özelliklerine bağlı olarak çeşitli boyut ve şekillerde bobin tasarımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada silindirik nesnelere kaynağı hedef alındığından selenoid şeklinde bobin tasarımı tercih edilmiştir. 16 mm² kesitli ve kalınlığı 4.5 mm olan bakır kablo kullanılarak hazırlanan 11 sarımlık bobinin yüksekliği 75 mm olmuştur. Yaklaşık 4.4 cm çaplı selenoidin endüktansı 2,47 µH olarak hesaplanmıştır. Bu bobin değeri ile tercih edilen 250 kHz rezonans frekansı için kapasitör değeri 150 nF olarak hesaplanmıştır. Bu kapasitör değeri her biri 3 A akım taşıyabilen, 2000 Vdc, 700 Vac gerilime dayanıklı 1 nF değerinde 150 adet kapasitör paralel bağlanarak elde edilmiştir. Böylelikle 450 A akım taşıyabilecek bir kapasitör bankası elde edilmiştir.

3.3.2 Anahtarlama elemanları ve sürücü devresi

Anahtarlama frekansının yüksekliği düşünüldüğünde kullanılacak en uygun elemanlar MOSFET'lerdir. Ancak MOSFET'ler akım aşımı kapasitesi çok yüksek olmayan elemanlardır. Aynı zamanda yüksek akım ve gerilim kapasiteli MOSFET'ler oldukça pahalı elemanlardır. Bu nedenle MOSFET'lerin paralellendirilerek kullanılmasıyla ucuz ve yeterli bir anahtarlama grubu elde edilmiştir. Anahtarlama elemanı olarak 36 A akım ve 600 V gerilim kapasitesine sahip IXFH36N60 güç MOSFET'i tercih edilmiştir. S1 ve S2 anahtarları için bu MOSFET'lerden 3'er adet paralellendirilerek 108 A - 600 V kapasiteli anahtar grupları oluşturulmuştur. Kullanılan MOSFET'lerin hızlı ve doğru bir şekilde iletme-kesime geçirilebilmesi için her bir paralel MOSFET grubu için bir adet IXDD414 entegrtesi kullanılmıştır. Ayrıca kontrol devresi ile sürücü devresinin birbirinden izolasyonu için kontrol sinyalleri 6N137 optokuplör entegrtesi kullanılarak iletilmiştir.

3.3.3 Kontrol devresi

Kontrol ünitesi, sistemin çalışma frekansının ve çıkış geriliminin takip edilerek anahtarların anahtarlama zamanının ayarlandığı bölümdür. İndüksiyonla ısıtma sisteminde değerleri sabit olan LC tank devresi elemanları vardır. Bu elemanlar rezonans için uygulanması gereken tetikleme frekansı hakkında yaklaşık bir bilgi verir. Ancak indüksiyonla ısıtma sistemlerinde indüksiyon bobini içindeki değişken yükün ve sıcaklık değişiminin de tank devresi endüktansına

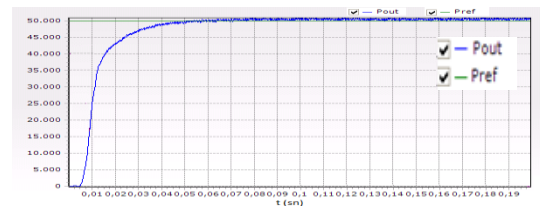
etkisi vardır, dolayısıyla rezonans frekansı sürekli şekilde değişkenlik göstermektedir. Bu durumda anahtarlama durumlarına karar verilebilmesi için değişken rezonans frekansı sürekli olarak takip edilmelidir. Yapılan uygulamada çıkış sinyalinin frekansının ve fazının takibi için CD4046 entegre PLL (Phase Locked Loop – Faz Kilitlemeli Döngü) devresi kullanılmıştır. Çıkış sinyalinin kontrol devresinden izole edilmesi için rezonans gerilimi bir yüksek frekans gerilim transformatörü ile küçültülerek PLL devresine verilmiştir. Isıtma bobini akımlarının ölçülebilmesi için de bir yüksek frekans akım transformatörü kullanılmıştır.

4. Benzetim Sonuçları

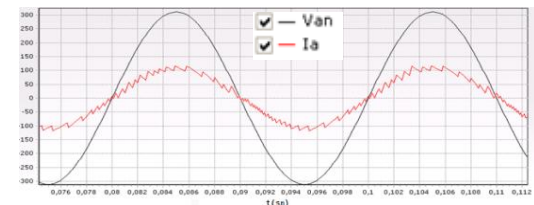
3 fazlı PWM doğrultucu ve rezonans invertör benzetim çalışmaları ACSLX (Advanced Continuous Simulation Language) programı ile yapılmıştır.

4.1. PWM doğrultucu benzetim sonuçları

Benzetim çalışması yapılan 3 fazlı PWM doğrultucu için giriş faz arası gerilimi 380 Vac - 50 Hz, çıkış gücü 50 kW, çıkış gerilimi 400 Vdc olarak belirlenmiştir. PWM doğrultucudan beklentiler, istenen güç değeri için sabit DC çıkış gerilimi, giriş güç faktörünün 1 olması ve hat akımlarında harmonik bozulmaların en aza indirgenmesidir. Bu şartlar için benzetim çalışmasında ayarlanması gereken kontrol parametreleri ise giriş referans gücü, çıkış referans gerilimi ve giriş referans gücü baz alınarak hesap edilen giriş faz akımıdır. PWM doğrultucu için gerçekleştirilen benzetim çalışmasına ait örnek dalga şekilleri aşağıda sıralanmıştır. Şekil 5'de 10 kHz anahtarlama frekansında 50 kW giriş gücü referans değerine karşın elde edilen çıkış güç değerinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 6'da giriş A fazına ait akım ve gerilim grafikleri görülmektedir. Faz akımı formu saf sinüse çok yakın ve akım-gerilim arasındaki faz farkı sıfırdır. Dolayısı ile giriş güç faktörü 1'e çekilmiştir [8]. Şekil 7'de PWM doğrultucu çıkış gerilimi ve yük akımı gösterilmiştir. Çıkış gerilimi de referans gerilim olan 400 Vdc'ye iyi bir şekilde regüle edilebilmektedir.

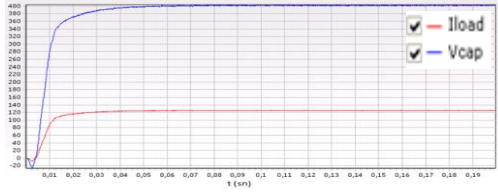


Şekil 5 Çıkış gücü (Pout), istenen çıkış gücü (Pref)

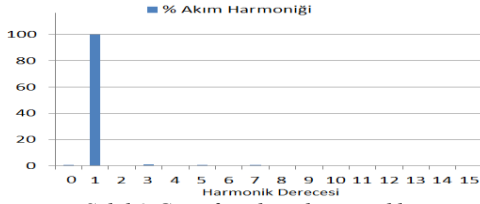


Şekil 6 A fazı gerilim dalga şekli (Van), A fazı akım dalga şekli (Ia)

Şekil 8'de giriş akım harmonikleri yüzde olarak gösterilmiştir. Karşılaştırılabilecek en etkin harmoniklerden 3. harmoniğin %1.21, 5. harmoniğin ise %0.7 seviyesinde kaldığı gözlemlenmiştir. 50. harmoniğe kadar alınan değerler ile giriş akımının toplam harmonik bozulması %THD = %4.85 olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler, benzetimi yapılan PWM doğrultucunun harmonik eleme performansının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



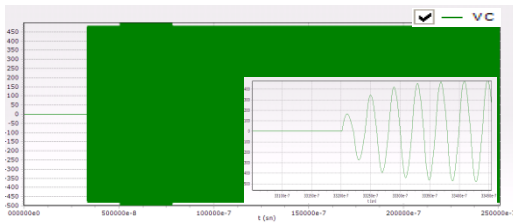
Şekil 7 Çıkış gerilimi (Vcap), çıkış akımı (Iload)



Şekil 8 Giriş faz akımı harmonikleri

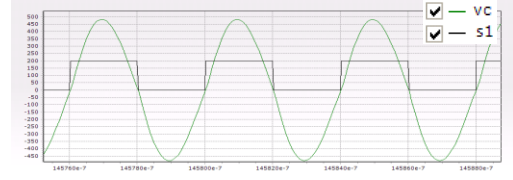
4.2. Yüksek Frekanslı Paralel Rezonans İnvörtör Benzetim Sonuçları

İndüksiyonla kaynak için kullanılan yüksek frekanslı rezonans invertör yapısı için benzetim çalışmalarında devre giriş gerilimi 400 Vdc, çıkış gerilimi frekansı 250 kHz, çıkış gücü 50 kW olarak belirlenmiştir. Benzetim çalışmasındaki en önemli kontrol parametreleri Ls bobin akımı ve Vc rezonans gerilimidir. Rezonans devresine yeterli güç aktarımı için Ls bobin akımı büyük önem taşımaktadır. Devre başlangıç durumunda S2 anahtarı ile Ls bobini üzerinde enerji biriktirilerek istenen akım değerine ulaşıldığında S1 anahtarı ile rezonans devresine güç aktarımı yapılmaya başlanmaktadır. Bu andan itibaren rezonans devresinde oluşan gerilim Şekil 9 ve Şekil 10 ile gösterilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü üzere rezonans gerilimi Vc, Ls bobin akımı belirlenen başlangıç değerine ulaştıktan sonra salınım yapmaya başlamaktadır. Rezonans geriliminin yalnızca pozitif alternansında iletme geçirilen S1 anahtarının durumu da Şekil 10'da Vc gerilimi ile birlikte gösterilmiştir.

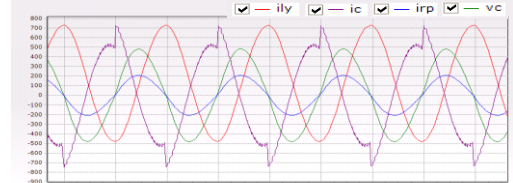


Şekil 9 Rezonans gerilimi dalga şekli (Vc)

S1 anahtarının iletimde olduğu durumlar lojik 1 olarak ifade edilmekte olup şekiller üzerinde karşılaştırılmalı olarak gözlenebilmesi için abartılı olarak çizdirilmiştir. Şekillerde gösterilmiş olan Vc gerilimi paralel rezonans devresi kapasitör gerilimi dolayısıyla rezonans gerilimidir.

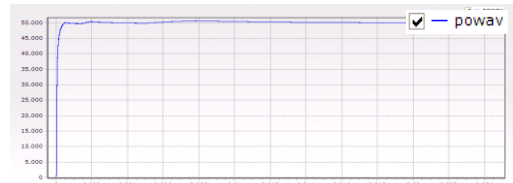


Şekil 10 Rezonans gerilimi (Vc) ve S1 anahtarlama durumu



Şekil 11 Rezonans gerilimi (Vc), bobin akımı (Ily), kapasitör akımı (Ic), temsili yük akımı (Irp)

Rezonans devresinin paralel kollarından akan akımlar, kapasitör akımı Ic, yük bobini akımı Ily ve temsili yük direnci Irp akımıdır. Rezonans devresi akımlarının tümü Vc gerilimi ile birlikte Şekil 11'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Irp yük akımı Vc gerilimi ile aynı fazdadır. Yüke aktarılan gücün ortalama değeri Şekil 12'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 12 Yüke aktarılan ortalama güç (powav)

5. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar yalnızca rezonans invertör yapısı üzerinde yapılmıştır. Bölüm 3'de anlatılan ve bölüm 4'de benzetim sonuçları verilen iki anahtarlı rezonans invertör yapısı tam olarak gerçekleştirilememiştir. Devre yalnızca S1 anahtarı ile rezonans geriliminin pozitif alternanslarında rezonans devresine güç aktararak gerçekleştirilmiş, fazladan enerji aktarımı için kullanılması amaçlanan S2 anahtarı kontrol düzeneğindeki yetersizlik nedeniyle kullanılamamıştır. Ancak S1 anahtarının kullanımı ile istenen frekansta ısıtma çalışmaları başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Deneysel sonuçlar alınırken güç devresinde 0-250 V ayarlı DC güç kaynağı kullanılmıştır. İki farklı metal parça üzerinde ısıtma testleri yapılmıştır. Isıtma parçalarından ilki krom-nikel'den yapılmış, eşkenar altgen şeklinde, en uzun köşegen uzunluğu 2,5 cm ve ısıtma bobini içerisinde işlenen kısmı yaklaşık 10 cm uzunluğunda olan içi dolu bir metaldir. Isıtılan kısmının yaklaşık ağırlığı 200 gr'dır. İkinci parça demirden yapılmış 1,5 cm çaplı, 7 cm uzunluğunda, et kalınlığı 1,5 mm ve 20 gr ağırlığında metal boru parçasıdır. Şekil 13'de, krom-nikel parça ısıtılırken rezonans frekansında çalışma durumuna bir örnek gösterilmiştir. Mavi renkli dalga şekli MOSFET gate-soruce gerilimini, sarı renkli dalga şekli ise yüksek frekans gerilim trafosu çıkışından gözlenen paralel rezonans gerilimini göstermektedir. Isıtma bobini içerisinde bulunan metal parça ile devre 260 kHz'de rezonansa girmektedir.

Şekilden görüleceği üzere MOSFET'in anahtarlanması rezonans geriliminin sıfır geçişlerinde yapılmakta ve yalnızca rezonans geriliminin pozitif alternansında iletme geçirilmektedir. Şekil 14'de paralel rezonans gerilimi (mavi) ve bobin akımı (sarı) birlikte verilmiştir. Krom-nikel parçanın bu şartlar altında ısıtılması deneyinde, sıcaklığının 1 dakika içerisinde oda sıcaklığından (25 °C) 730 °C'ye kadar çıkarıldığı görülmüştür. Şekil 15.a'da parçanın bobin içerisinde ısıtılma anı ve infrared termometre ile sıcaklığının ölçülmesi gösterilmiştir. Demirden yapılmış boru ısıtma denemesinde ise borunun sıcaklığı daha düşük güç aktarımı ile oda sıcaklığından 800 °C'ye 20 saniyede çıkarılabilmektedir. Şekil 15.b'de borunun ısıtılması anına dair bir görüntü verilmiştir.



Şekil 13 Paralel rezonans gerilimi (CH1 –Sarı – (5V/div) ve MOSFET gate-source gerilimi (CH2 – Mavi - (5V/div))



Şekil 14 Bobin akımı (CH1 –Sarı – (5V/div)x(6A/V)) ve paralel rezonans gerilimi (CH2 – Mavi – (1V/div)x(140))

Sistemin genel verimini elektriksel olarak incelemek için krom-nikel parçanın ısıtılma anındaki veriler değerlendirilebilir. Isıtma çalışması anında parçadaki sıcaklık değişimleri göz önünde bulundurularak parçaya anlık olarak 1175 W güç aktarıldığı hesap edilmiştir. Bu anda ayarlı DC kaynaktan 142 V çıkış geriliminde çekildiren akım değeri 10 A olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla sisteme aktarılan güç 1420 W olarak bulunur. Bu durumda indüksiyonla ısıtıcının verimi %82.7 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 35 a)Krom-Nikel parçanın indüksiyon ile ısıtılması, b)demir boru parçasının indüksiyon ile ısıtılması

6. Sonuç

Bu çalışmada, sanayide geniş kullanım alanı bulan indüksiyonla ısıtma sistemlerinden biri olan yüksek frekanslı

indüksiyon kaynak sistemi tasarımı için bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve küçük güçte bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki ana güç dönüştürücü devre yapısı incelenmiştir. Bunlardan birincisi devre giriş gücünün ayarlandığı PWM doğrultucu sistemi, diğeri ise metal ısıtma işleminin yapıldığı yüksek frekans rezonans invertör devresidir. PWM doğrultucu yapısı yalnızca benzetim çalışmaları ile incelenmiş, rezonans invertör devresi için ise hem benzetim çalışmaları hem de küçük güçte deneysel çalışmalar yapılmıştır. PWM doğrultucu benzetim çalışmalarında, giriş güç faktörünün iyileştirilmesi ve harmonik akımlarının azaltılması açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Rezonans invertör devresi benzetim çalışmalarında başarılı bir şekilde istenen frekans ve güçte rezonans gerilimi oluşturulmuştur. Ayrıca rezonans devresi için yapılan küçük güçlü uygulama ile metal ısıtma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Zinn, S., and Semiatin, S.L. "Elements of Induction Heating: Design, Control and Applications," *ASM International*, 2-5, 1998
- [2] Sazak, B.S., "Design of a 500W Resonant Induction Heater", *P.Ü. Müh. Bil. Dergisi*, 5(1):871-878, 1999
- [3] Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., and Black, M., *Handbook of Induction Heating*, Marcel Dekker Inc., Monticello, NY 12701-518, 18-20, 2002
- [4] Nuns, J., Foch, H., Metz, M. and Yang X., "Radiated and Conducted Interferences in Induction Heating Equipment: Characteristics and Remedies," *The European Power Electronics Association*, 194-199, 1993
- [5] Andrews, D., Bishop, M. and Witte J., "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility," *IEEE Tr. on Industry Appl.* 32(3):617-624, 1996
- [6] Cavallini, A. Loggini, M. and Montanari, G.C., "Comparison of Approximate Methods for Estimate Harmonic Currents Injected by AC/DC Converters," *IEEE Tran. On Industrial Electronics*, 41(2):256-262, 1994
- [7] Kim, S., Enjeti, P. and Rendusara, D., "New Method to Improve THD and Reduce Harmonics Generated by a Three-Phase Diode Rectifier Type Utility Interface," *Conf.Record of Industrial Appl. Conf. 29. Annual Meeting*, 2:1071-1077, 1994
- [8] Thiyagarajah, K., Ranganathan, V.T. and Iyengar, B.S.R., "A High Switching Requency IGBT PWM Rectified Inverter System for AC Motor Drives Operating from Single Phase Supply", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6(4):576-584, 1991
- [9] Kazmierkowski, M.P., "Control Strategies for PWM Rectifier/Inverter-Fed Induction Motors" *IEEE Conference*, (1):15 -23, 2000
- [10] Alan, I., "The Feasibility Study of a Completely Isolated Three Phase to Three Phase Induction Motor/Induction Generator Power Conversion System Based Upon 20 kHz Paralel Resonant High Frequency Ac Link," *Ph.D. Dissertation, Univ. of Wisconsin-Madison*, 1993