

AKIM BESLEMELİ PARALEL REZONANS İNVERTERLİ BİR İNDÜKSİYONLU ISITMA UYGULAMASI

Ramazan AKKAYA¹

Mehmet Ali ANADOL²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Selçuk Üniversitesi, 42031, Kampus, Konya

²Selçuk Üniversitesi, T.B.M.Y.O. Elektronik Programı Kampus, Konya

¹e-posta: akkaya@selcuk.edu.tr² e-posta: anadol@selcuk.edu.tr

Anahtar sözcükler: Rezonans, İndüksiyonlu Isıtma, İnverter, Paralel Rezonans

ÖZET

Bu bildiride, akım beslemeli paralel rezonans devreli inverter içeren bir indüksiyonlu ısıtma sistemi, 10kHz, 7,5 kW'lık bir güçte çalışacak şekilde tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. İnverter devresinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler kullanılmıştır. Çalışma parçası ferit nüveli bir trafo üzerinden beslenmiştir. Gerçekleştirilen bu sistem, bilgisayar ortamında PSPICE programı kullanılarak simule edilmiş, sistemden alınan deneysel sonuçlar, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve her iki sonucun uyum içinde olduğu görülmüştür.

beslemeli invertere tercih edilir. Bununla birlikte MOSFET veya SIT kullanan akım beslemeli inverterde ihmal edilemez bir komütasyon endüktansının bulunmasından dolayı gerilim yükselmesi meydana gelir. Bu durum en kötü ihtimalle anahtarlama kayıplarının artmasına ve güç elemanlarının bozulmasına neden olur. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için anahtarlar, iletme girme kayıplarını ortadan kaldıran sıfır gerilimde anahtarlama(ZVS) veya kesime gitme kayıplarını ortadan kaldıran sıfır akımda anahtarlama(ZCS) modunda çalıştırılır [5].

1. GİRİŞ

Günümüzde, indüksiyonlu ısıtma sistemleri, düşük frekanslar($f < 1\text{kHz}$), orta frekanslar($1\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$) ve yüksek frekanslar($f > 100\text{kHz}$)'a göre sınıflandırılan ve en düşük frekanslar için, 100MW'tan başlayıp en yüksek frekanslar için, 5kW'a kadar malzemelerin ısıtılması, eritilmesi, işlenmesi ve birleştirilmesi için ucuz, verimli ve hızlı bir ısıtma metodu olarak geniş çıkış gücü aralığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şebeke frekansı gibi düşük frekanslar, büyük çalışma parçalarının indüksiyonla eritilmesinde kullanılabilir. Birkaç yüz kHz'e kadar olan yüksek frekanslar ise malzemeleri sertleştirmek, tavlamak, şekillendirmek ve birleştirmek için kullanılır[1,2].

Bir indüksiyonlu ısıtma sisteminin temel elemanları; bir AC güç kaynağı, indüksiyon bobini ve ısıtılacak veya eritilecek olan malzeme yani çalışma parçasıdır. Çeşitli indüksiyonlu ısıtma ve eritme sistemleri için güç kaynağı olarak kullanılmak amacıyla farklı yapıda güç kaynakları dizayn edilmiştir. İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinde güç kaynağı olarak genellikle sıfır gerilim anahtarlama ve/veya sıfır akım anahtarlama tekniklerine dayanan rezonans devreli inverterler kullanılır. Bunlar, Akım beslemeli paralel rezonans devreli inverter ve gerilim beslemeli seri rezonans devreli inverter olmak üzere ikiye ayrılır[3,4].

Pratik bir indüksiyon ısıtma uygulaması için akım beslemeli paralel rezonans devreli inverter, koruma kolaylığından dolayı seri rezonans devreli gerilim

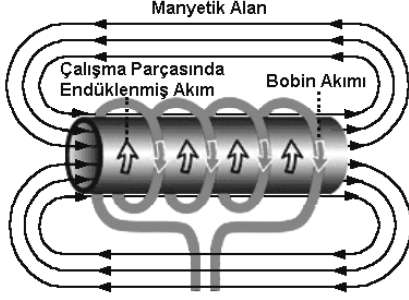
Bu çalışmada, şebeke girişinde bir EMI filtre, kontrolsüz doğrultucu, şok bobini, tek fazlı akım beslemeli paralel rezonans devreli bir inverter, ferrit nüveli bir trafo ve indüksiyonlu ısıtma endüktöründen meydana gelen 10kHz 7,5kW gücündeki bir indüksiyonlu ısıtma sistemi tasarlanarak simule edilmiş ve pratik olarak gerçekleştirilmiştir.

2. İNDÜKSİYONLU ISITMA PRENSİBİ

Bir bobine uygulanan alternatif akım, şekil 1'de görüldüğü gibi indüksiyon bobininden geçerken bobin etrafında değişken bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan, ısıtılacak parçada bir gerilim indükler ve bu gerilim, manyetik alan içinde kalan indüksiyon bobini içine yerleştirilmiş olan çalışma parçasında eddy akımlarının geçmesine sebep olur. Parça direncinden geçen bu akım, parça içinde ısı meydana getirir. Böylece çalışma parçası ve indüksiyon bobini arasında her hangi bir fiziksel temas olmadan çalışma parçası, ısıtılmakta ve eritilmektedir. Isıyı endüksiyon akımı meydana getirdiğinden, bu işleme, İndüksiyonlu Isıtma denir[6].

İletken bir çalışma parçası, bobin içine yerleştirildiğinde manyetik alan, çalışma parçası ve bobin arasındaki hava aralığında kuvvetli; iletken malzemede ise yoğunluğu azalarak nüfuz edecek şekilde dağılmıştır. Deri olayından dolayı indüksiyonlu ısıtmada akımın çoğu, çalışma parçasının yüzeyinden geçer. Çalışma parçasının

merkezine doğru akım yoğunluğu üstel olarak azalır ve merkezde akım akışı neredeyse sıfır olur. Bütün akımın malzeme yüzeyinden itibaren yüzeydeki yoğunlukla geçmesi halinde erişebileceği derinliğe Nüfuz Derinliği denir. Isıtma işlemi süresince manyetik parçaların sıcaklığı, Curie sıcaklığına ulaştığında yükün direnci ve endüktansı değişir. Pratikte, çalışma parçası, hem manyetik(demir veya çelik gibi) hem de manyetik olmayan(alтын veya alüminyum gibi) malzeme olabilir. Manyetik malzemelerde ek olarak mıknatıslanma kayıpları olduğundan bu tip malzemelerin ısıtılması daha kolaydır[4].



Şekil 1. İndüksiyon olayının prensip şeması

İndüksiyonla ısıtmada önemli bir büyüklük olarak malzemenin cinsine, büyüklüğüne ve amaca göre uygun frekansın belirlenmesini sağlayan nüfuz derinliği, e^{-1} değerine bağlı olarak değişen manyetik alanın büyüklüğüdür ve aşağıdaki formülle ifade edilir[1,7].

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (1)$$

Burada f , anahtarlama frekansı(Hz); ρ , çalışma parçasının özgül direnci($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$); δ , nüfuz derinliği(mm); ve μ_r , çalışma parçasının bağlı manyetik geçirgenliğidir. Çalışma parçasında endüklenen akımın genliği, yüzeye olan x mesafesi (2)'deki gibi üstel olarak azalır.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2)$$

Burada I_0 , yüzeydeki akımdır. Çalışma parçasına geçen ısıtma gücü ise;

$$P = k \cdot I^2 \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f} \quad (3)$$

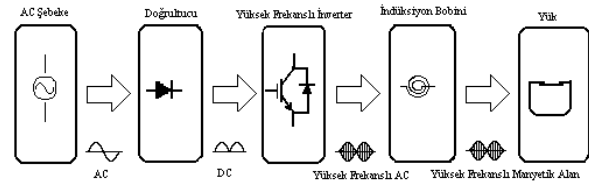
Burada, k , sabit; P , ısıtma gücü(w); I , indüksiyon bobininden geçen akım(A)'dır.

Bir indüksiyonlu ısıtma sisteminin yükü, gerçekte ısıtılacak parçanın yerleştirildiği bir endüksiyon bobinidir. İndüksiyon bobini endüktiftir ve yük bobin endüktansı ile seri veya paralel bir eşdeğer direnç ile

gösterilir. Bobinin direkt beslenmesi, görünür gücün aktif güce göre oranının çok yüksek olması ile sonuçlanır. Bu nedenle ısıtma bobininin kompanze edilmesi gerekir. Bobin endüktansından dolayı oluşan düşük güç faktörünü kompanze etmek ve bobin endüktansına sinüsoidal akım sağlamak için bir rezonans kondansatörü bobine seri veya paralel bağlanır. İlk durumda, seri endüktansdan dolayı yük, bir akım kaynağı gibi davranır ve bu nedenle bobin, bir gerilim kaynağı tarafından (gerilim beslemeli inverter) beslenmelidir. İkinci durumda yük, bir paralel rezonans devresidir ve paralel bağlı kondansatörden dolayı bir gerilim kaynağı gibi davranır. Bu nedenle yük, bir akım kaynağı tarafından (akım beslemeli inverter) beslenmelidir[3].

3. GÜÇ KAYNAĞI

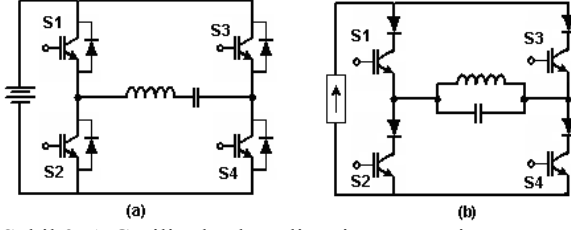
İndüksiyonlu ısıtma uygulamalarında ısıtma ihtiyaçlarını optimum şekilde karşılamak için pek çok farklı yapıda güç kaynağı üretilmiştir. Bazı ısıtma işlemi uygulamaları; frekans, güç seviyesi, bobin gerilimi/akımı ve güç katsayısını içine alan endüktör parametrelerine ihtiyaç duyar. Çalışma frekansı ve çıkış gücü, indüksiyonlu ısıtma güç kaynağı için iki temel şarttır. Çıkış gücü şartını karşılamak için yükün direnci belirlenmelidir. Ayrıca birçok durumda çalışma frekansı şartını karşılamak için yükün endüktans değeri de bilinmelidir. Nüfuz derinliği üzerinde birincil etken olan frekans uygulamaya göre seçilir. Güç devresini oluşturan elemanlar, bu frekansta yüksek güvenilirlikte sonuç almak için yeterli sınır değerlerinde çalışacak şekilde tasarlanmış olmalıdır. Hemen hemen tüm indüksiyonlu ısıtma güç kaynakları için şekil 2'de gösterilen temel blok diyagram kullanılabilir.



Şekil 2. Bir indüksiyonlu ısıtma sisteminin temel blok diyagramı

3.1. Rezonans Devreli İnverterler

İndüksiyonlu ısıtma uygulamalarında yüksek frekanslı güç kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılan gerilim beslemeli seri rezonans ve akım beslemeli paralel rezonans inverter olmak üzere iki tip devre şeması vardır. Şekil 3.'de görüldüğü gibi gerilim beslemeli inverterlerin girişinde, büyük bir filtre kondansatörü ile sağlanan sabit bir dc gerilim kaynağı ve çıkışında, seri bağlı rezonans yük devresi, akım beslemeli inverterlerin girişinde ise, değişken bir dc gerilim kaynağından büyük bir endüktör ile sağlanan sabit bir dc akım kaynağı ve çıkışında, paralel bir rezonans yük devresi bulunur.



Şekil 3 a) Gerilim beslemeli seri rezonans inverter,
b) Akım beslemeli paralel rezonans inverter

Bir inverter ile beslenen rezonans yükte, çıkış gerilimi ve akımı arasında daima bir faz kayması vardır. Bu da, seri yük durumunda akımın, bazı aralıklarda yükten güç kaynağına doğru akmasına sebep olur. Bu nedenle, seri rezonans yüklü bir inverterde(seri inverter) anahtarlar, gerilimde tek yönlü ve akımda iki yönlü olmalıdır. Paralel rezonans yüklü bir inverterde(paralel inverter), çıkış geriliminin çıkış akımına zıt olduğu bazı aralıklar olacaktır. Bu durumda anahtarlar, gerilimde iki yönlü, akımda tek yönlü olmalıdır. Çıkış akım ve gerilimi arasındaki faz farkı, inverter çıkış frekansını belirleyen anahtarlama frekansına bağlıdır. Tablo 1’de seri ve paralel rezonans inverterlerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 5.1 Seri ve Paralel Rezonans İnverterlerin Karşılaştırılması

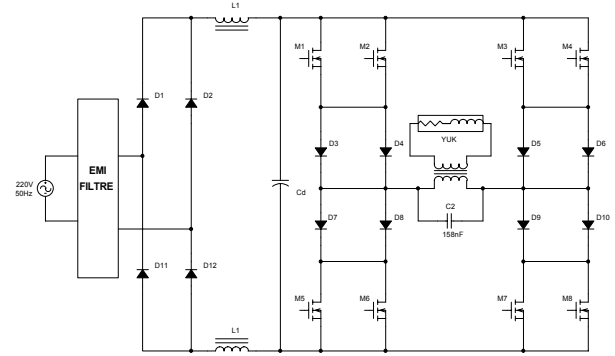
	SERİ REZONANS İNVERTER	PARALEL REZONANS İNVERTER
Avantajları	Basit bir yapıya sahip ve daha ucuz olması	Yüksüz çalışması mümkün
	Güç faktörünün birim kontrolünün daha basit olması	Çalışma bobininde kısa devre mümkün
	Kontrolsüz doğrultucular ile beslenmesi	Yüksek gerilim kondansatörleri gereklidir
		Transistörler sadece aktif akımı iletir.
Dezavantajları	Yüksüz çalışması sadece karmaşık bir kontrol ile mümkündür	Kontrolü daha karmaşıktır
	Kısa devre kabiliyeti yok	Bir kıyıcı veya kontrollü doğrultucu ile beslenir.
	Değişken frekansla yapılan güç kontrolü bazı uygulamalarda probleme neden olur	Boyutu daha büyüktür.
	Transistörler endüktör akımının tümünü iletme zorundadır.	Girişinde filtre olarak bir şok bobinine ihtiyaç vardır.

Gerilim beslemeli seri rezonans inverterlerle karşılaştırıldığında akım beslemeli paralel rezonans inverterler bazı avantajlara sahiptir. Akım beslemeli inverterin sabit akım çekme özelliği hat tarafına geçen harmonikleri azaltır. Ayrıca tipik gerilim beslemeli seri rezonans inverterlerde gerilim kazancı, kalite faktöründeki değişimden oldukça etkilendiğinden frekans, rezonans frekansına yaklaşırken inverter çıkış gerilimi artar. Bunun aksine akım beslemeli paralel rezonans inverterlerde gerilim kazancı, kalite faktöründeki değişimden etkilenmediğinden frekans, rezonans frekansına yaklaşırken çıkış gerilimi azalır[8].

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Gerçekleştirilen indüksiyonlu ısıtma sisteminin temel devre yapısı şekil 4’de görülmektedir. Güç kaynağının girişinde, şebekede meydana gelen elektromanyetik karışımları önleyici bir EMI filtre devresi bulunmaktadır. DC güç kaynağı devresi, diyotlarla gerçekleştirilen tek fazlı tam köprü bir dönüştürücü ve silisli saçlardan oluşan bir nüve üzerine sarılmış L_1 şok bobininden meydana gelmektedir. Devrede olabilecek ani akım ve gerilim darbeleri şok bobiniyle etkisiz hale getirilmiştir.

Uygulama devresi 10kHz frekans ve 7,5kW güçte çalışabilecek şekilde gerçekleştirilen akım beslemeli paralel rezonans devreli tek fazlı tam köprü bir inverterdir. İnverter köprüsünün her bir bacağına birbirine paralel bağlı iki adet MOSFET(IXFN34N80) bulunmaktadır. Bu devrede MOSFET’leri ters gerilimlere karşı korumak için her bir MOSFET’e seri olarak hızlı diyotlar(DSEI30) bağlanmıştır. Frekans, 50k Ω ’luk çok turlu bir potansiyometre ile kontrol edilmektedir.

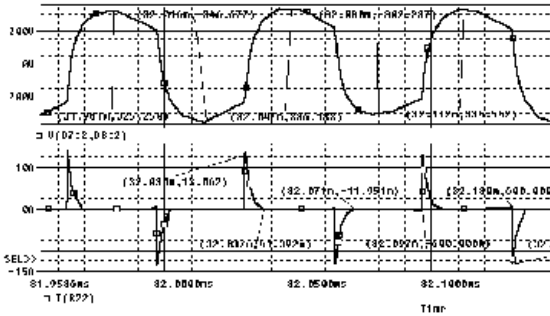


Şekil 4. İndüksiyonlu ısıtma sisteminin temel yapısı

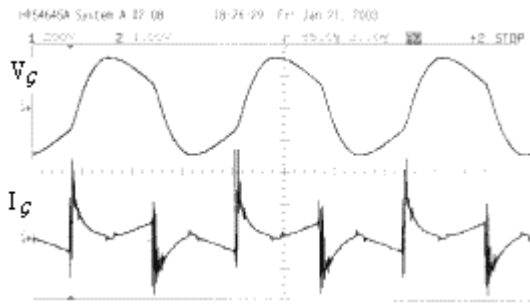
İnverterin çıkış uçlarına, indüksiyonlu ısıtma işleminde endüktörün ihtiyaç duyduğu akımı elde etmek için dönüştürme oranı 25:1 olan U tipi ferrit nüveli(3C6 ferroxcube) bir trafo, 158nF’lık rezonans kondansatörüyle paralel olarak bağlanmıştır. Tasarlanan indüksiyonlu ısıtma sistemi PSPICE programıyla simüle edilmiş ve pratik olarak gerçekleştirilerek laboratuvarında çalıştırılmış ve aşağıdaki değişimler alınmıştır.

Şekil 5’de inverter çıkışındaki akım ve gerilimlerin değişimi verilmiştir. Devrenin özelliğinden dolayı akım kare dalga şeklinde değişirken gerilim sinusoidal olarak değişmektedir. Şekil 6’da ise yük uçlarındaki gerilim ve içinden geçen akımın değişimi görülmektedir. Değişimlerden de görüldüğü gibi yük uçlarına uygulanan gerilim ve yükten geçen akımın değişimi sinusoidaldir ve tam rezonansta çalışma olmadığından akım ve gerilim arasında çok küçük bir faz farkı vardır. Şekil 7’de bir MOSFET’in içinden geçen akım ve uçlarındaki gerilimin değişimi görülmektedir. Şekildeki değişimlerden, anahtarlama frekansının, rezonans frekansından büyük olduğu

durum için MOSFET'lerin sıfır gerilimde anahtarlendiği ve böylece iletme girme kayıplarının büyük ölçüde giderildiği görülmüştür.

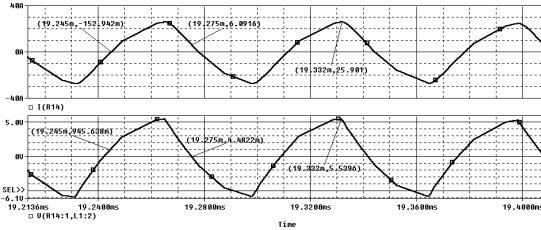


(a)

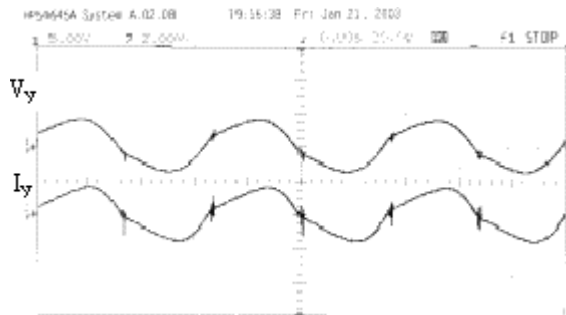


(b)

Şekil 5. inverter çıkış akım ve geriliminin değişimi
a) Simülasyon, b) Deneysel(200V/div, 5A/div)

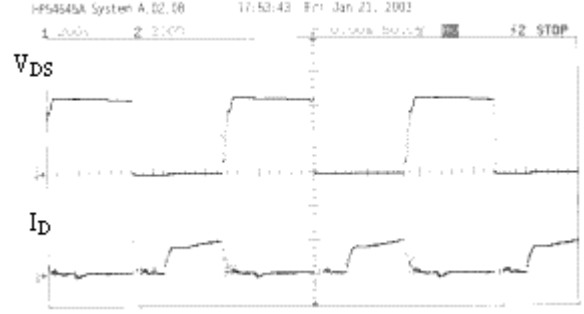


(a)



(b)

Şekil 6. Yük gerilimi ve Yük akımının değişimi a) Simülasyon, b) Deneysel(200V/div, 5A/div)



Şekil 7. MOSFET gerilimi V_{DS} ve akımı I_D 'nin ve değişimi (200V/div, 5A/div)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, endüksiyonlu ısıtma uygulamalarında kullanılmak üzere orta güç ve frekanslar için MOSFET'li akım beslemeli paralel rezonans inverterle gerçekleştirilen sistemin simülasyonu ve deneysel sonuçları verilmiştir. Girişte kontrolsüz doğrultucu kullanıldığından yüke verilen güç, inverter anahtarlama frekansı değiştirilerek kontrol edilmiştir. Yük devresinde bulunan çalışma parçası, inverter tam yükte çalışmadığı halde çok kısa bir sürede ısınmıştır. Yük uçlarındaki ölçümlerden, ısınan metalde direncin ve endüktansın değişimine bağlı olarak rezonans frekansının kaymasından dolayı zamanla rezonans frekansında, akım ile gerilim arasında çok az bir faz kayması olduğu gözlenmiştir. Bu kayma, anahtarlama frekansının hassas kontrolü ile yok edilebilir.

Bu çalışma, Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.(Proje No:2002/015)

KAYNAKLAR

- [1] Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P., Power Electronics; Converters, Applications and Design, 2nd ed. John Wiley, 1995.
- [2] Grajales, L., Analysis and Design of a 500 kHz Resonant Inverter for Induction Heating Applications, UMI No. 9701830, Virginia, 1995.
- [3] Dede, E. J., 25 kW / 200kHz Parallel Resonant Converter for Induction Heating, ETEP, Vol. 2, No. 2, pp.103 – 109, 1992.
- [4] Bodur,H., Akkaya, R., Yaman, C., Endüksiyonla Isıtmada Rezonans Devreli İverterler ve Örnek bir Endüksiyonla Isıtma Uygulaması, ELMEKSEM'93 Bursa, pp. 384-391, 1993.
- [5] Akagi, H., 130 kHz 7,5 kW Current Source Inverters Using Static Induction Transistors for Induction Heating Applications, IEEE Trans. On Power Elect. Vol. 3, No. 3, pp. 303 – 309, 1988.
- [6] <http://www.ameritherm.com>.
- [7] <http://www.plustherm.ch>.
- [8] Lin, F. J., Duan, R. Y., and Yu, J. C., An Ultrasonic Motor Drive Using a Current Source Parallel Resonant Inverter with Energy Feedback, IEEE Trans. On Power Elect. Vol. 14, No. 1, pp. 31 – 42, 1999.