

Ev Tipi Endüksiyon Isıtmalı Ocaklarda Tencere Tipinden Bağımsız Olarak Maksimum Güç Aktarımının Sağlanması

Independent From Cookware Ferromagnetic Characteristics Transferring Maximum Power Each Cookware On Domestic Induction Cooktops

Sercan Sinirlioğlu¹, İsmail Aksoy²

Elektrik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
sercansinirlioglu@hotmail.com

Elektrik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
iaksoy@yildiz.edu.tr

Özet

Bu makalede, ev tipi endüksiyon ocaklarda son kullanıcılar tarafından kullanılan, farklı ferromanyetik karakteristiğe sahip endüksiyon uyumlu tencerelerin her birine, güvenli bir şekilde maksimum gücün aktarılabilmesini sağlayan bir kontrol yöntemine yer verilmiştir. Ev tipi endüksiyon ocaklarda görülen en büyük problem, yük olarak tanımlanan tencerelerin çok farklı karakteristiklerde olması ve rezonans devresinin kullanıcı tarafından tamamlanmasıdır. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen sorunu çözmek adına farklı materyallerden üretilmiş ve ferromanyetik karakteristikleri birbirinden farklı beş tencere tipi seçilmiştir. Tencereler referans bir bobin ile hem enerjili hem de LCR metre ile analiz edilmiştir. Güç elektroniği devresinin matematiksel modeli de çıkarılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre, elektriksel parametreler kontrol edilerek geliştirilen bir yöntem ile her tencere için güvenli, minimum çalışma frekansı belirlenmiştir. Sonuç olarak mevcut durum ile yeni yöntem uygulanmış durum karşılaştırıldığında tencerelere aktarılan güçlerin yeni yöntemle artırıldığı ve her tencere için maksimum seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Abstract

In this paper, a control method for each of induction compatible cookwares which have different ferromagnetic characteristics, maximum power that can be transferred safely on the domestic induction cooktops using by end users is presented. The major problem for domestic induction cooktops is cookwares defined as load are various and end users complete the resonant circuit. Five of different ferromagnetic characteristic cookwares are chosen to solve this issue. These cookwares are analyzed with reference coil both with LCR meter and operational status with power mode. Also, mathematical model of power electronic circuit is shown. According to analysis results, minimum safe operating frequency is determined by a method which developed controlling the electrical parameters, for each cookwares. As a result, it is determined that the power transferred to the cookwares is increased and it reaches its

maximum point for each cookwares with the help of the new method when it is compared with the current situation.

1. Giriş

Elektromanyetik endüksiyon teknolojinin doğuşu 1831 yılına dayanmaktadır. Bu tarihte Michael Faraday tarafından bulunmuştur. Transformatörlerde, birincil ve ikinci sargıları arasında hiçbir elektriksel bağlantı yoktur. Micheal Faraday, birincil devresinde meydana gelen akım değişimi ile ikincil devresinde bir gerilim endüklenebileceği prensibini ortaya koyarak modern endüksiyon ile ısıtmanın kurucusu olmuştur. Buna göre metalik bir kütle sabit bir manyetik alan içerisinde hareket ettirilirse veya değişen bir manyetik alan içinde bırakılırsa, üzerinde akımlar endüklenir. Endüklenen bu akım ile metal kütlenin direnci sonucunda oluşan kayıp enerji metali ısıtır [5].

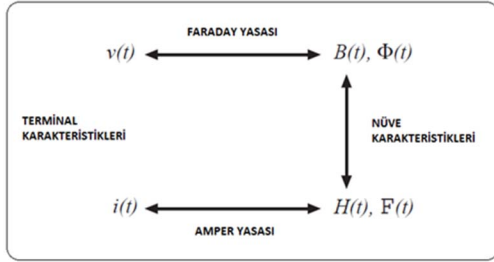
Endüksiyon ocakta, yüksek frekanslı sinüs biçimli akımla beslenen bobin bir değişken manyetik alan oluşturur. Değişen manyetik alan içinde kalan tencere alt yüzeyinde girdap biçiminde akım endüklenir. Akım belirli bir girme derinliğinde akar. Deri etkisinin belirlediği direnç ile oluşan ısı kayıp tencereyi ısıtır [6].

Endüksiyon ile ısıtma başlangıçta metal eritme işlemlerinde uygulanmaya başlamıştır. 70'li yıllarda ev tipi endüksiyon ocağın temelleri atılmış ve 80'li yılların sonundan itibaren özellikle Uzakdoğu'da yaygınlaşmaya başlamıştır. Son 10 yılda ise güç elektroniği ve malzeme biliminin ilerlemesi ile ev tipi endüksiyon ocaklar hızla yaygınlaşmıştır. Günümüzde Avrupa ve Uzakdoğu pazarında endüksiyon ocaklar büyük bir yer kaplamaktadır. Yapılan araştırmalara göre ise önümüzdeki yıllarda satışları daha da artacaktır.

Endüksiyon ocaklar, diğer ısıtma yöntemleri ile kıyaslandığında verimlilik, hızlı ısıtma, güvenlik ve hassas güç kontrolü gibi özelliklerinden dolayı tercih sebebidir. Enerji verimliliğinin arttığı günümüzde endüksiyon ocaklarının önemi de artmaktadır.

2. Endüksiyonlu Isıtma Sistemleri

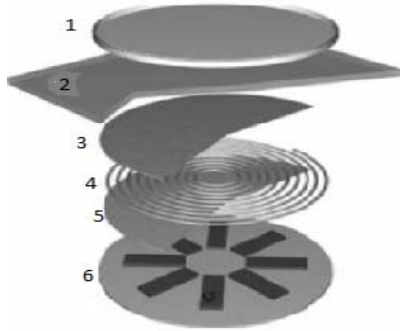
Endüksiyon bobinine yüksek frekanslı bir alternatif akım uygulandığında, bobin akımı ile aynı frekansta, zamanla değişen bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan bobinin içerisine konan metal cisimde girdap akımlarını indükler. Girdap akımlarının frekansı bobin akımı ile aynıdır; fakat akım yönü terstir. Bu akımlar metal parça üzerinde ısı (Joule) kayıplarını (I^2R) oluşturur [7].



Şekil 1: Temel elektrik ve manyetik birimler arasındaki ilişki [1]

2.1. Çalışma Prensibi

Tasarımı iyi bir endüksiyon ocak verimli ve maliyeti en aza indirgenmiş olmalıdır. Endüksiyon ocakların kullanımını yaygınlaştırmak için en önemli etkenler; yüksek güç, hızlı ısıtma, güvenlik ve verimli ısıtmadır. Endüksiyon ocaklarındaki bobin ve tencere yapısı aşağıda gösterilmiştir. Manyetik özelliğe sahip malzemeden yapılmış tencere (1) yük olarak kullanılır. Cam yüzey (2) hava aralığını oluşturur. Mika (3) yüksek gerilim ve sıcaklık yalıtımı sağlar. Bobin sargılar (4) ve manyetik devre içinde akıyı taşıyan ferit nüveler (5) ve alüminyum (6) endüksiyon ocaklardaki yapıyı oluşturmaktadır [2].

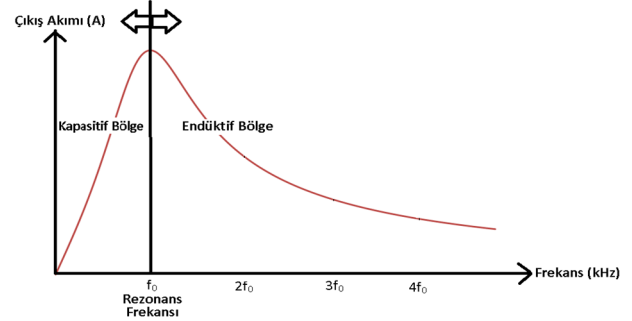


Şekil 2: Ev Tipi Endüksiyon Bobin Yapısı [3]

2.2. Endüksiyon ocaklarda güvenli çalışma bölgesi

Ev tipi endüksiyon ocaklarda tencereye aktarılan gücün kontrol edilebilmesi amacıyla R, L ve C den oluşan rezonans devresinin oluşturduğu rezonans frekansının üstünde güvenli bölgede (endüktif bölgede) çalışmak; anahtarlama kayıplarının az olması, duyulabilir ses olmaması sistemin kontrolü açısından daha anlamlı bulunmaktadır. 17 kHz'in altında frekanslarda insan kulağını rahatsız eden duyulabilir ses eşiği olduğundan bu frekansın altına çalışılması istenmez. Endüktif bölgede

rezonans frekansına doğru gidildikçe aktarılan güç artar. Güvenli çalışma bölgesinde kalmak adına tam rezonans noktasında çalışma yerine rezonansa en yakın bölgede çalışmak tercih edilir. Kapasitif çalışma bölgesine geçilmesi durumunda akımlar yükselir ve kayıplar artar. Bu nedenle tasarımlar endüktif çalışma bölgesinde yapılır.

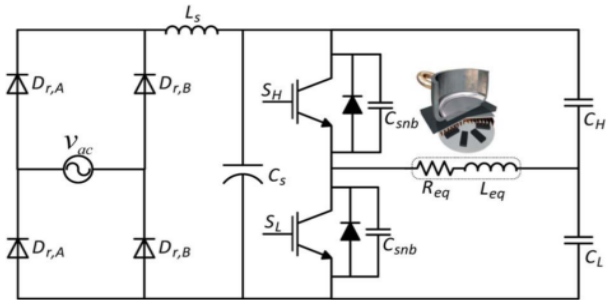


Şekil 3: Rezonans frekansına bağlı güç-frekans eğrisi [10]

3. Yarım Köprü Seri Rezonans Evirici Yapısı

Endüksiyon ocaklarda yarım köprü seri rezonans evirici (bkz. Şekil 4) başarım, karmaşıklık ve maliyet dengesi açısından en çok kullanılan topolojidir [8].

Seri rezonans devresi Reş ve Leş olarak modellenen bobin-tencere ikilisi ile $C_r = C_H + C_L$ olan rezonans kapasitesinden oluşmaktadır. Bu topolojide giriş gerilimi rezonans devresine uygulandığında sırasıyla üst anahtar S_H iletime geçer, sonrasında alt anahtar S_L 'nin iletime geçmesiyle rezonans devresi sürekli olarak beslenir. Rezonans devresine uygulanan efektif gerilim kare dalgadır. Çıkış gücü ve anahtarlama koşulları, anahtarlama frekansı ile belirlenir. Rezonans üstü çalışmada anahtarın kapalı olması durumunda sert anahtarlama yapılırken anahtarın açık olması durumunda ise sıfır gerilimde anahtarlama (SGA) yapılır. Sönümlenme kapasiteleri C_{snub} çoğunlukla anahtar kapalıyken anahtarlama kayıplarını azaltmak için kullanılır [9].



Şekil 4: Yarım Köprü seri rezonans evirici devre topolojisi [4]

3.1. Yarım köprü seri rezonans evirici devresinin elektriksel modelinin çıkarılması

Bobin direnci ve diğer dirençlerin etkisi ile her enerji aktarımında belirli bir miktar enerji kaybolur. Dolayısı ile depolanan enerji tamamen sabit kalmaz. Sistemin rezonans frekansı ise enerji aktarım çevrimi içinde yer alan kondansatör

(C_{res}) ve bobin endüktansı (L_{res}) tarafından $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ile belirlenir.

Seri RLC devresinin s - tanım bölgesinde analizini yaparsak:

$$V_s = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + V_c(t) \quad (1)$$

$$V_s = RC \frac{dV_c}{dt} + LC \frac{d^2V_c}{dt^2} + V_c \quad (2)$$

$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{LC} = \frac{V_s}{LC} \quad (3)$$

$$\text{Sönümlenme katsayısı: } \alpha = R/2L \quad (4)$$

$$\text{Açısal rezonans frekansı: } \omega_o = 1/\sqrt{LC} \quad (5)$$

$$\text{Sönümlü açısal rezonans frekansı: } \omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2} \quad (6)$$

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_o^2 = \omega_o^2 V_s \quad (7)$$

$\omega_o > \alpha$ olduğundan denklemin çözümü karmaşık köklüdür.

Bu durumda çözüm:

$$V_c = e^{-\alpha t} \cdot (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) + V_s \quad (8)$$

$$V_c(0) = V_{c0}$$

$$V_c = (V_{c0} - V_s) \cdot e^{-\alpha t} \cdot (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) + V_s$$

$$V_c = (V_{c0} - V_s) \cdot \frac{\omega_o}{\omega_d} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(\omega_d t - \varphi) + V_s \quad (9)$$

$$i(t) = C \frac{dV_c}{dt} \quad (10)$$

$$i(t) = \frac{1}{\omega_d L} \cdot (V_{c0} - V_s) \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_d t \quad (11)$$

$$i(t) = \frac{1}{\omega_d L} \cdot V_{cmax} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_d t \quad (12)$$

Bobin akımının denklemi yukarıda verilmiştir.

3.2. Yeni kontrol yöntemi ile kontrol edilecek parametrelerin analizi

Belirtilen yarım köprü seri rezonans evirici devresindeki anahtarlama elemanlarının orta noktasını v gerilimi olarak kabul edersek, v gerilimini aşağıdaki gibi ifade edilebiliriz.

$$v = \begin{cases} V_s & \text{for } 0 < \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{for } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

Yukarıdaki ifade Fourier serisi olarak ifade edilebilir.

$$v = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1-(-1)^n}{2n} \sin(n\omega t) \quad (13)$$

$$v = V_s \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \omega t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

$$v_{s1} = V_m \sin \omega t \quad (\text{Temel Bileşen})$$

$$V_m = \frac{2V_s}{\pi} \cong 0,637V_s \quad (14)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \cong 0,45V_s \quad (15)$$

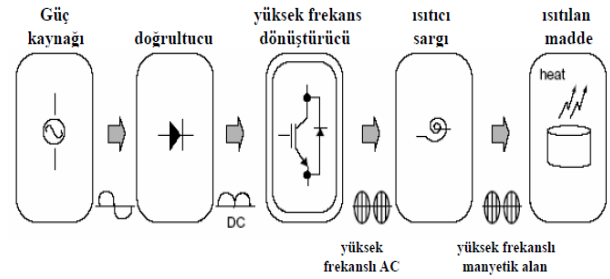
Çalışma frekansı f , sistemin rezonans frekansı olan f_o 'a yakınsa, rezonans devresinin empedansı, daha yüksek harmonikler için çok yüksek olduğundan, akım temel bileşene eşit ve sinüsoidal akar.

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (16)$$

$$I_{max} = \frac{V_m}{Z} = \frac{2V_s}{\pi Z} = \frac{2V_s \cos \varphi}{\pi R} \quad (17)$$

Bobin üzerinden akan akımın rms değeri:

$$I_{res} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin(\omega t - \varphi))^2 d\omega t} \quad (18)$$



Şekil 5: Endüksiyon ocak güç çevrimi

Şekil 5'de gösterilen güç çevrimi incelendiğinde, şebeke gerilimi köprü doğrualtıcı ile doğrualtılır. Daha sonra yarım köprü rezonans evirici ile bobin üzerinde sinüsoidal akım üretilir. V_s ifadesinin şebeke geriliminin maksimum değeri olduğu yerde (şebeke gerilimi 230V_{AC} ise tepe gerilimi V_s ise 325V'tur) gerilimin etkin değeri $V_s/\sqrt{2}$ olarak alınır. Bu durumda şebekenin bir periyodu boyunca bobin akımının rms değeri.

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos \varphi}{\pi R \sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin(\omega t - \varphi))^2 d\omega t} \quad (19)$$

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos \varphi}{\pi R \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2}} \quad (20)$$

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos \varphi}{\pi R} \quad (21)$$

$$I_{res} = \frac{I_{max}}{2} \quad (22)$$

Şebekenin bir periyodu boyunca bobinden akan akımın rms değeri bobin akımının maksimum değerinin yarısı kadardır. Sistemi kayıpsız kabul edip giriş ve çıkış gücünün eşitliğinden yola çıkarak sistem rezonans frekansında çalıştığında şebekeden çekilen akımın rms değeri ile bobin akımı maksimum değeri arasındaki ilişki;

$$P_{in} = P_{out} \quad (23)$$

$$I_{rms} \cdot \frac{V_s}{\sqrt{2}} = \frac{I_{max}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{4,443} \quad (25)$$

Yukarıdaki bilgiler özetlenecek olursa bobin akımının maksimum değeri şebekeden çekilen akımın rms değerinin 4,44 katı, bobin akımı rms değerinin ise 2 katıdır. Bu bilgiler ışığında sistemde çalıştırılacak olan tencerelerin minimum rezonans frekansları bu oranı kontrol ederek belirlenebilmesi konusunda büyük önem teşkil etmektedir.

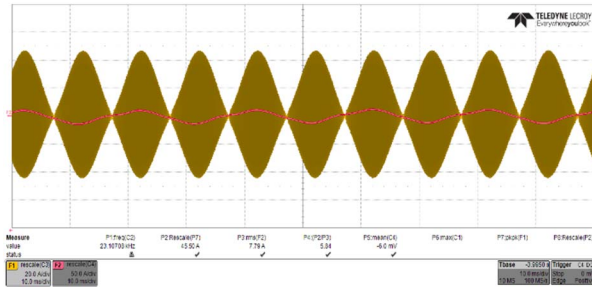
4. Maksimum Güç Yöntemi

Ev tipi endüksiyon ocaklarda en büyük problem yük olarak tanımlanan tencerenin çok çeşitli olması ve rezonans devresinin ürünleri kullanan kullanıcı tarafından tamamlanmasıdır. Bu durum sistemin rezonans frekansının, kullanıcının kullandığı her tencere için farklı olmasına sebep olur. Bu sebeple endüksiyon ocak tasarımcıları belirli tencereleri referans alarak tasarımı yaparlar. Fakat kullanıcının, referans alınan tencerelerden daha düşük bir sistem rezonans frekansı oluşturacak ferromanyetik karakteristikte bir tencere kullanması durumuna karşı, tasarımcı sistem çalışma rezonans frekansı için bir alt limit belirler ve bu rezonans frekansı altında rezonans frekansına sahip tencerelere daha az güç aktarmak zorunda kalır. Bu durumu aşmak adına yukarıdaki formüller ile ispatlanan akımlar oranının, sistemin rezonans noktasında tüm tencereler için sabit olması teorisi kullanılarak geliştirilen kontrol yöntemi yardımıyla, her tencere için sistemin güvenli çalışabileceği minimum frekans bulunabilecektir. Böylece her tencereye güvenli bir şekilde maksimum güç aktarılacaktır.

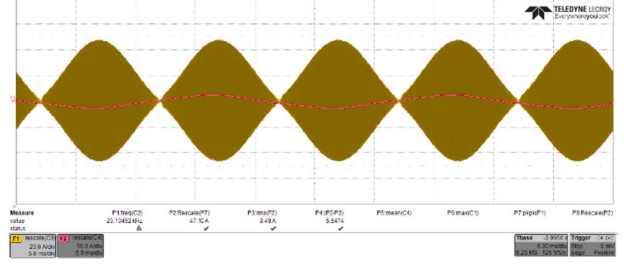
5. Deneysel Sonuçlar

5.1. Mevcut sistem ölçüm sonuçları

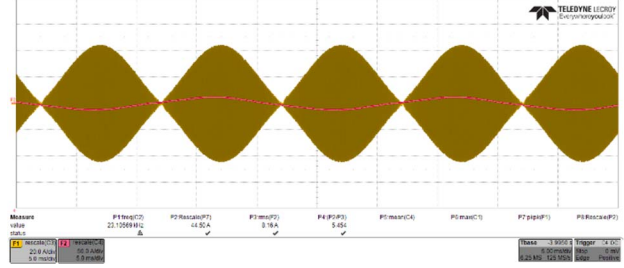
Sisteme yeni yöntem adapte edilmeden ölçümler seçtiğimiz 5 tencere içinde ayrı ayrı alınmıştır. Her tencere için sistem çalıştırılırken osiloskop yardımıyla bobin akımı ve şebekeden çekilen akımın dalga şekilleri alınmıştır. Sistemin çalıştırıldığı frekans osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Alınan görüntülerde çalışma frekansı, kontrol edilen akımlar oranı gibi bilgiler de bulunmaktadır. Ayrıca her bir durum için çekilen güçler, güç analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Genel karşılaştırmalı tablo ve yorumlar sonuçlar bölümünde verilmiştir.



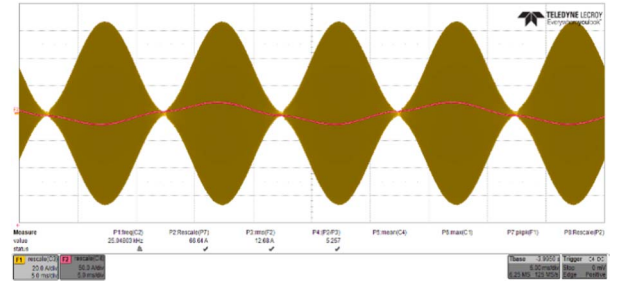
Şekil 6: A marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri



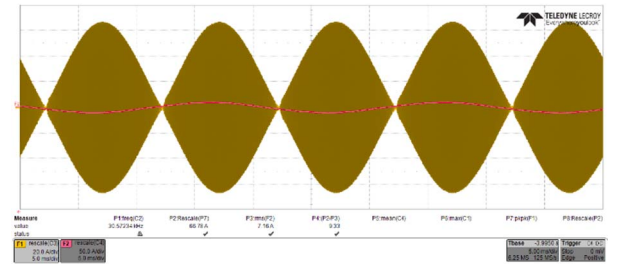
Şekil 7: B marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri



Şekil 8: C marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri

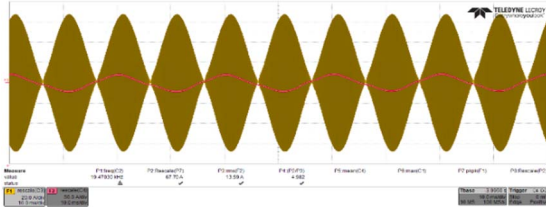


Şekil 9: D marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri

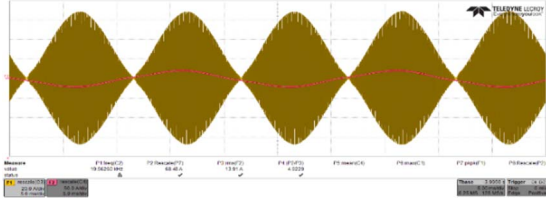


Şekil 10: E marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri

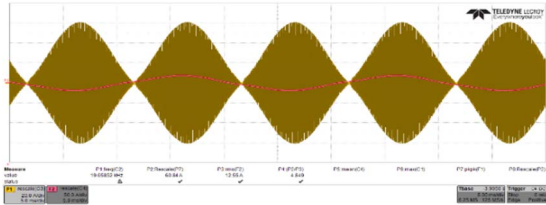
5.2. Yeni yöntem uygulanarak alınmış ölçüm sonuçları



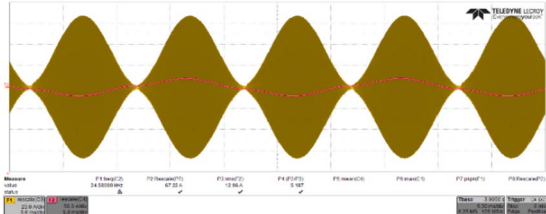
Şekil 11: A marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri



Şekil 12: B marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri



Şekil 13: C marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri



Şekil 14: D marka tencere için sistemin bobin akımı (sarı) ile şebekeden çekilen akım (kırmızı) dalga şekilleri

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı materyallerden üretilmiş ve ferromanyetik karakteristikleri birbirinden farklı beş tencere tipi incelendi. Tencereler referans bir bobin ile uygulamalı olarak test edildi. Bölüm 3.2’de formüllerle ispatlanan ve 4,43 olarak hesaplanan akımlar oranına en yakın güvenli nokta seçildi ve kontrol bu değere göre sağlandı. Tüm tencerelerin bu oranla kontrol edilmesi durumu için geliştirilen bir yöntem ile her tencere için minimum güvenli çalışma frekansı belirlendi. Böylece güç değerleri her tencere için maksimum noktasına ulaştırıldı. Bu durum Tablo 1 incelendiğinde görülebilmektedir. Tencerelere aktarılan güçler Tablo 1’de görüldüğü üzere bu oranın sağlandığı frekansta, mevcut duruma göre artmıştır. E tipi

tencere direnç değeri düşük alüminyum alaşımlı bir ferromanyetik karakteristik gösteren tencere olduğundan bu tencereye aktarılan güç, akım limitinden dolayı arttırılamamıştır.

Tablo 1: Genel karşılaştırma tablosu

Şebeke Gerilimi: 230 VAC RMS	Mevcut Durumda Alınan Ölçümler				
	Sistemin Çalışma Frekansı (kHz)	Bobin Akımının Tepe Değeri (A)	Şebekeden Çekilen Akımın RMS Değeri (A)	Kontrol Edilen Akımlar Oranı	Şebekeden Çekilen Güç (W)
A Tenceresi	23	45,5	7,79	5,84	1791,7
B Tenceresi	23	47,1	8,49	5,54	1952,7
C Tenceresi	23	44,5	8,16	5,45	1876,8
D Tenceresi	25	66,64	12,68	5,25	2916,4
E Tenceresi	30,5	66,78	7,16	9,33	1646,8
Şebeke Gerilimi: 230 VAC RMS	Algoritma Uygulanarak Alınan Ölçümler				
	Sistemin Çalışma Frekansı (kHz)	Bobin Akımının Tepe Değeri (A)	Şebekeden Çekilen Akımın RMS Değeri (A)	Kontrol Edilen Akımlar Oranı	Şebekeden Çekilen Güç (W)
A Tenceresi	19,4	67,7	13,59	4,982	3125,7
B Tenceresi	19,56	68,48	13,91	4,92	3199,3
C Tenceresi	19,65	60,84	12,55	4,84	2886,5
D Tenceresi	24,58	67,22	12,96	5,187	2980,8
E Tenceresi	30,5	66,78	7,16	9,33	1646,8

7. Kaynaklar

- [1] Erickson, R. W. (2002). Fundamentals of Power Electronics Fundamentals of Power Electronics
- [2] Acero J., Alonso R., Barragán L.A., Carretero C., Lucía O., I., 2007: Domestic Induction Heating Impedance Modeling Including Windings, Load and Ferrites
- [3] Cerri, G., Kovyryalov, S., Mariani Primiani, V. ve Russo, P. (2009). Rigorous Electromagnetic Analysis of Domestic Induction Heating Appliances. *PIERS Online*, 5(5), 491–495.
- [4] Saudi, M., Puyal, D., Anton, D. ve Mediano, A. (2011). Domestic induction cooking with a new loads multiplexing topology using mechanical switches. *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 233–238.
- [5] Valery, I., Don, L. ve Raymond, C. (2002). Handbook of Induction Heating: Manufacturing Engineering and Materials Processing.
- [6] Moreland, W. (1973). The induction range: Its performance and its development problems. *IEEE, Transactions on Industry Applications*, (1).
- [7] Peters, P. H. (1974). The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation A Portable Cool-Surface Induction Cooking Appliance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-10(6), 814–822.
- [8] Omori, H., Yamashita, H., Nakaoka, M. ve Maruhashi, T. (1985). A novel type induction-heating single-ended resonant inverter using new bipolar Darlington-Transistor. *1985 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 590–599.
- [9] Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A. ve Burdío, J. M. (2014). Efficient and Cost-Effective ZCS Direct Ac-Ac Resonant Converter for Induction Heating, *61(5)*, 2546–2555.
- [10] Kazimierczuk, M. K., Czarkowski D., (2011): *Resonant Power Converters*, (2nd ed.) IEEE, A John Wiley & Sons, Inc., Publication.