

SIVI GIDALARIN İNDÜKSİYON İLE ISITILMASINDA HOMOJEN SICAKLIK PROFİLİ SAĞLAYAN YENİ BİR GÜÇ KONTROL YÖNTEMİ

Yeliz TEZCAN, Mutlu BOZTEPE

Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir
yltzcncn@gmail.com, mutlu.boztepe@gmail.com

ÖZET

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımının homojen olmaması durumu temel bir sorundur. Örneğin ısıtılan bir boru da sıcaklık uçlarda en düşük iken merkeze doğru yükselmektedir. Bu soruna çözüm olarak indüksiyon bobinini çok sayıda eş parçaya bölüp, ayrı ayrı güç kontrolü yaparak sıcaklığın daha düzgün dağılması sağlanabilir. Ancak bu durumda bobinler arası manyetik kuplaj, bağımsız güç kontrolünü çok zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada aralarında manyetik kuplaj bulunan indüksiyon bobinlerinde bağımsız güç kontrolü yapmak için yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu amaçla 4 eş parçadan oluşan bir indüksiyon su ısıtma sistemi seçilerek sonlu elemanlar ile analiz yapılmış, elde edilen sonuçlar daha sonra analitik ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin sıvı gıdaların homojen bir biçimde indüksiyon yöntemiyle kontrollü ısıtılması için uygun olduğu görülmüştür.

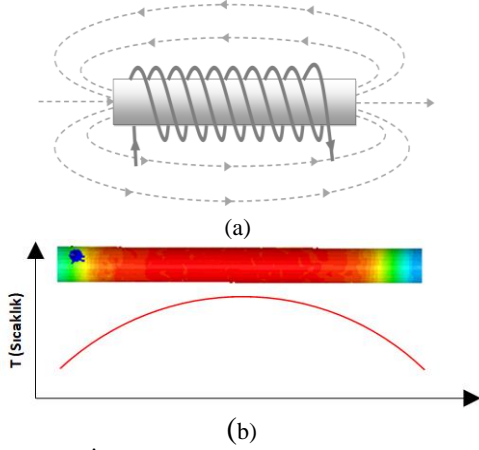
Anahtar kelimeler: indüksiyon ısıtma, kuplaj katsayısı, bölgesel kontrol

1. GİRİŞ

1831'de elektromanyetik indüksiyonun Michael Faraday tarafından keşfinden sonra, indüksiyon ısıtma sistemi, transformatör, jeneratör ve diğer manyetik tasarımlar gibi birçok uygulamada geniş bir biçimde kullanılmıştır. Son yıllarda gıda endüstrisinde ısıtma amacıyla kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Günümüz ısıtma yöntemleri incelendiğinde, sıvı gıdaların istenilen sıcaklığa ulaşmasını sağlamak amacıyla genellikle ısı iletimi (heat conduction) ve ısı taşınımı (heat convection) prensiplerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu tür sistemlerde, ısıtılan parçanın yüzeylerinde oluşan ısı kayıpları ve ürünün merkez noktasının belirlenen sıcaklığa gelmesi için gereken süre içerisinde gıda üzerinde ortaya çıkabilecek olan yüksek ısı ve sıcaklığın gıdaya zarar vermesi gibi istenmeyen durumlar meydana

gelebilmektedir [1]. İndüksiyon ısıtma sisteminde ise diğer sistemlerle karşılaştırıldığında malzemelerin temasız, hızlı ve yüksek verimli ısıtılmasını sağladığı için, sanayide kullanım alanlarını arttırmaktadır [2].

Temel olarak gıdaların ısıtılması sistemi Şekil-1'de görüldüğü gibi içinden sıvı gıdanın geçtiği bir metal boru ve onu ısıtan bir sargıdan oluşmaktadır. Bobinden yüksek frekanslı bir akım akıtıldığında, bu akım iş parçası üzerinde yüksek frekanslı bir manyetik alan yaratır. Bu manyetik alanın iş parçası üzerinde indüklediği gerilimler de iş parçası içinde Eddy akımları oluşturur ve böylece ortaya çıkan Joule ısı kayıpları iş parçasını ısıtır. Bu şekilde elektriksel bir enerjiden, manyetik alan ve Eddy akımının sonucu olarak ısı enerjisi elde edilmektedir [3]. Şekil 1(a)'daki gibi silindirik yapıda olan bir iş parçası indüksiyon



Şekil 1. İndüksiyon ısıtma sistemi (a) manyetik alan dağılımı modeli (b) sıcaklık profili

yöntemiyle ısıtıldığında her noktası eşit miktarda ısıya maruz kalmadığından sıcaklığın iş parçası üzerinde homojen olmadığı, Şekil 1(b)'de görüldüğü gibi kenarlardan ortaya doğru gidildikçe sıcaklığın yükseldiği görülmektedir. Bu temel sorun hassas sıcaklık kontrolü ve homojen sıcaklık dağılımı istenen uygulamalarda çözülmesi gereken bir durumdur.

Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, çoklu bobin grupları oluşturularak bobin merkezindeki manyetik alan yoğunluğu azaltılmaya çalışılmıştır. Fakat bobin gruplarının artırılmasıyla bobinler arası manyetik kuplaj nedeniyle, bobinler arası etkileşim sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu etkileşim sonucu oluşan sirkülasyon akımları hem verimi düşürmekte, hem de güç kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Bu doğrultuda, bobinler arası manyetik etkileşimi azaltmak amacıyla iki bobin ve tek iş parçası sistemi üzerinden [5]'te yapılan çalışmada, bobin grupları farklı rezonans frekanslarda çalıştırılmıştır. Böylelikle bobin gruplarının çalışma bölgeleri belli frekans bantlarına ayrılarak kuplajın etkisi azaltılmış ve bağımsız kontrol imkânı elde edilebilmiştir. Ancak bu yöntemde aynı çalışma geriliminde bobinlerin güçleri

aynı olmamaktadır, çünkü ısıtma gücü frekansa bağlı olduğundan, frekansı yüksek olan sargının akımı küçüldüğünden, gücü de diğerine göre daha düşük olmaktadır. Bu güç farklılığını dengelemek için ise görev oranı (duty ratio) değiştirilmiştir. Fakat sistemde bobin sayısının artırılmasıyla birlikte, frekans bandı limitleri daralmakta, ayrıca merkezdeki bobin gruplarındaki manyetik etkileşim, kenardaki gruplara göre daha fazla olacağından sirkülasyon akımlarına etkili bir çözüm sunamamaktadır. Öte yandan görev oranının değiştirilmesi sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) koşullarını da bozabilmekte ve dolayısıyla anahtarlama kayıpları ortaya çıkmaktadır.

[6] ve [7]'de yapılan çalışmalarda, sıcaklık dağılımını eşitlemek amacıyla tek bir iş parçası üzerinden çoklu bobin grupları oluşturulmuştur. Bobin grupları arası manyetik etkileşimi azaltmak amacıyla bobin akımlarında faz kontrolü yapılarak, bu etki en aza indirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca buck dc-dc dönüştürücü devresi ile akım genliği ayarlanarak güç kontrolü de sağlanmıştır. Ancak bu yöntemde bobin akımlarının fazlarının ayrı ayrı ölçülmesi ve birbirine eşit olacak şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu durum karmaşıklığı artırmakta, sistem parametrelerinin bilinmesini gerektirmekte ve gerekli görev oranının hesaplanması nispeten zor olmaktadır.

Bu çalışmada bobinlerin güçlerinin ayrı ayrı kontrol edilebildiği yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, tek bir iş parçası üzerine, dört tane bobin grubunun olduğu bir sistem üzerinde analiz edilmiş her bir bobin grubu için ayrı bir evirici devresi üzerinden kontrol sağlanmıştır. Bobinler ve sürücülerin parametreleri birbirleriyle aynıdır ve dolayısıyla aynı rezonans frekansında

çalıştırılmaktadır. Önerilen kontrol sistemi ile buck dönüştürücü gibi ilave devreler kullanmadan bobinler arası kuplajın etkisini azaltmak ve bobinlerin gücünü ayrı ayrı kontrol etmek amaçlanmıştır.

Bu makalenin içeriği şu şekilde organize edilmiştir. Sonraki bölümde induksiyon ısıtma sistemlerini matematiksel modeli verilmektedir. 3.bölümde önerilen kontrol yönteminin detayları açıklanmaktadır. 4. bölümde benzetim sonuçları verilmekte ve son bölümde ise sonuçlar sunulmaktadır.

2. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ MATEMATİKSEL MODELİ

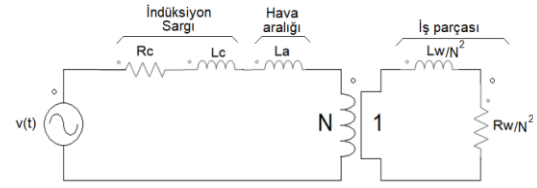
İndüksiyon ısıtma sistemi, Şekil-2'de gösterildiği gibi, iş parçasının tek sarımlı bir bobin olarak temsil edildiği basit bir transformatör olarak modellenenebilir. Burada R_c ve L_c induksiyon sargısının direnci ve endüktansı, R_w ve L_w ise iş parçasının direnci ve endüktansı olmaktadır. L_a ise hava aralığından dolayı meydana gelen endüktans değeridir. Sonraki analizlerde kullanılan tüm eşdeğer devre modellerinin temeli bu yaklaşım oluşturmaktadır [4].

Eşdeğer devrede bütün dirençler ve endüktanslar birleştirilir ise Şekil-3'teki sadeleştirilmiş eşdeğer devre elde edilebilir [8]. Burada R_1 ve L_1 şu şekildedir;

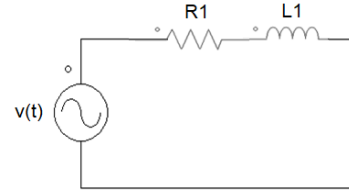
$$R_1 = R_w + R_c \quad (1)$$

$$L_1 = L_w + L_c + L_a \quad (2)$$

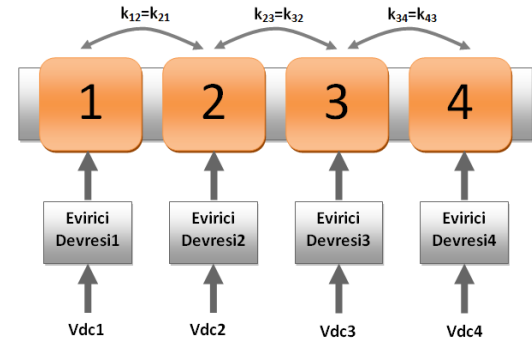
Aynı iş parçasına bağlı birden fazla bobin olması durumunda sargılar arasında kuplaj olduğundan dolayı eşdeğer devrenin buna göre geliştirilmesi gerekir. Çoklu bobin analiz çalışması için hazırlanan örnek



Şekil2. İndüksiyon ısıtma transformatör modeli



Şekil3.İndüksiyon ısıtma sistemi eşdeğer modeli



Şekil 4. Dörtlü bobin genel sistem yapısı

sistemin yapısı Şekil-4'deki gibidir. Analizler bu örnek sistem üzerinden yapılmıştır. Örnek sistemde yapısal olarak birbirine eş dört tane bobin grubu oluşturulmuştur. Her bir bobin grubu ayrı bir invertör devresi tarafından kontrol edilmektedir. Sistemde sadece yanyana bobinler arasındaki kuplaj etkisi dikkate alınmış, diğer kuplajlar düşük olması nedeniyle göz ardı edilmiştir. Yani, $k_{13}=k_{24}=k_{14}=0$ alınmıştır. Sistemde tekli iş parçası üzerine konumlandırılmış dört bobin, oluşturdukları manyetik alan etkileriyle, iş parçası üzerinde girdap akımları oluşturmaktadır. Bu nedenle bobin grubu manyetik alanın etkisiyle tek bir iş parçası üzerinden diğer bobin grubunun bulunduğu alana da etki ederek karşılıklı bir direnç değeri oluşturmaktadır. Bu da sistemin ısıtma gücüne etki etmektedir [9]. Dolayısıyla

kuplaj etkisiyle oluşan karşılıklı resistans ve endüktans değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [4].

$$R_{mn} = kr_{mn} \sqrt{R_m R_n} \quad (3)$$

$$L_{mn} = k_{mn} \sqrt{L_m L_n} \quad (4)$$

Burada k_{mn} ve kr_{mn} efektif kuplaj katsayılarıdır, m ve n bobin numaralarını göstermektedir. Kuplajın etkisi dikkate alınarak her bir bobin için Şekil-3'teki rezistif eleman değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R_1 = R_{11} + R_{12} \quad (5)$$

$$R_2 = R_{22} + R_{21} + R_{23} \quad (6)$$

$$R_3 = R_{33} + R_{32} + R_{34} \quad (7)$$

$$R_4 = R_{44} + R_{43} \quad (8)$$

Görüldüğü gibi bobin gruplarının eşdeğer direnç değerleri R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 , kendi öz direnç değerleri ile R_{12} , R_{23} ve R_{34} vb. etkileşimde oldukları bobinlerle olan karşılıklı eşdeğer direnç değeri toplamından oluşmaktadır. Benzer şekilde bobin gruplarının eşdeğer endüktans değerleri de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$L_1 = L_{11} + L_{12} \quad (9)$$

$$L_2 = L_{22} + L_{21} + L_{23} \quad (10)$$

$$L_3 = L_{33} + L_{32} + L_{34} \quad (11)$$

$$L_4 = L_{44} + L_{43} \quad (12)$$

Görüldüğü üzere ortadaki bobin gruplarında hem eşdeğer direnç hem de endüktans değeri daha yüksek çıkmaktadır.

2.2. Güç analizi

İndüksiyon bobinlerini sürmek için bir yarım-köprü DA-AA dönüştürücü kullanıldığı kabul edilmiştir. Bobinlere

seri bir kondansatör bağlanarak rezonans devresi oluşturulduğundan harmonikler tank devresi tarafından filtrelenir ve ısıtma etkisi ihmal edilebilir. Dolayısıyla evirici çıkış gerilimi olarak çıkış geriliminin temel harmonik bileşeni kullanılabilir (13). V_{dc} , DA bara gerilimi ve D_n ilgili bobini süren yarım-köprü devesinin görev oranı olmak üzere, her bir eviricinin çıkışındaki AA gerilimi, Fourier serisinin ilk terimi ile şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_n = \frac{2V_{dc}}{\pi} \sin(\pi D_n) \quad (13)$$

Buna göre oluşturulan eşdeğer devre modeli Şekil-5'deki gibidir. Eşdeğer devrede karşılıklı rezistans (R_{12} , R_{23} , R_{34}) ve karşılıklı endüktans (L_{12} , L_{23} , L_{34}) değerleri de belirtilmektedir. Bu model üzerinden yapılan analizler sonucu, bobin gruplarının ısıtma gücü R_w ve R_{mn} dirençlerinin toplam gücü olarak aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilirler [10].

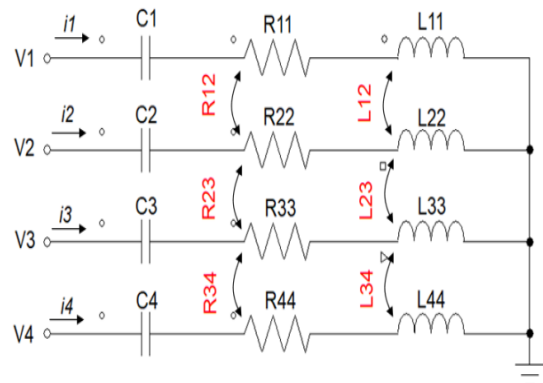
$$Q_1 = R_{w1} I_1^2 + R_{12} I_1 I_2 \quad (13)$$

$$Q_2 = R_{w2} I_2^2 + R_{12} I_1 I_2 + R_{23} I_2 I_3 \quad (14)$$

$$Q_3 = R_{w3} I_3^2 + R_{23} I_2 I_3 + R_{34} I_3 I_4 \quad (15)$$

$$Q_4 = R_{w4} I_4^2 + R_{34} I_3 I_4 \quad (16)$$

Bu denklemlerden de görüldüğü üzere, aynı yapısal özelliklere sahip bobin



Şekil 5. Dörtlü bobin eşdeğer devre modeli

grupları için, merkezdeki ve uçtaki bobin grupları farklı ısıtma gücüne sahiptir.

3. ÖNERİLEN KONTROL YÖNTEMİ

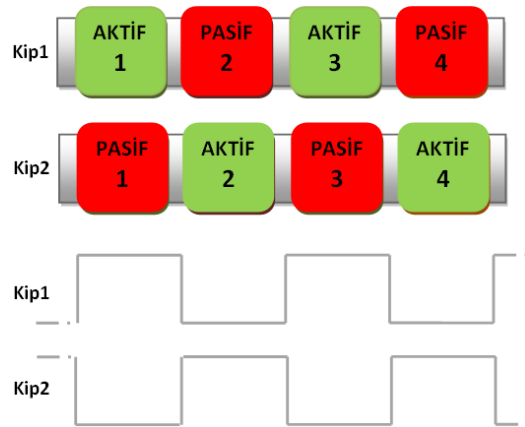
Yapılan çeşitli analizler ve benzetimler sonucunda, sıcaklık dağılımının iş parçası üzerinde düzenli olabilmesi için bobinlerde ayrı ayrı güç kontrolü yapılması gerektiği ve bunun için de manyetik kuplajın az olmasının avantaj olduğu görülmüştür. Bu sonuç ışığında yanyana olan bobinler farklı zamanlarda aktif edilerek kuplajın etkisi en aza indirilmiştir. Böylelikle ilgili bobinin aktif olduğu zaman diliminde, ona büyük oranda manyetik etki yaratacak olan bobin grupları (yani en yakınındaki bobinler) kapalı olduğundan çalışması diğer sargılardan en az etkilenmektedir. İlgili blok diyagram Şekil-6'daki gibidir. Buna göre öncelikle bir çalışma periyodu belirlendikten sonra, bu süre ikiye bölünerek Kip-1 ve Kip-2 adında iki çalışma bölgesi elde edilmiştir. Kip-1 ve Kip-2 sürelerinin toplamı sabit tutulabilir veya değiştirilebilir. Bu çalışmada birbirine eşit alınmışlardır. Kip-1'de 1 ve 3 nolu bobinler aktif iken, Kip-2'de 2 ve 4 nolu bobinler aktiftir. Bobinlerin aktif olduğu süre içerisinde görev oranları değiştirilerek güç kontrolü yapılabilmesi mümkündür.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

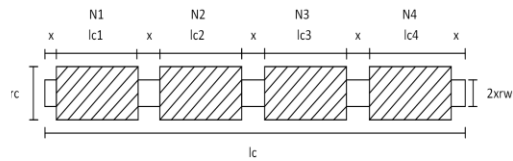
Analiz edilen sistemin parametreleri Tablo-1.1 'de, sistemin yapısı ise Şekil-7'de verilmiştir. Tasarlanan dörtlü bobin sistemi için temel sorun bobinler arası kuplajın etkisidir. Bu etkiyi gözlemlemek için ilk önce bütün bobin gerilimlerinin ($V_1=V_2=V_3=V_4$) birbirine eşit olması durumu incelenmiştir. Buna göre her bir bobinin sağladığı ısıtma gücü bobinler arasındaki kuplaj oranına göre Şekil-8'deki gibi elde edilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere kuplaj katsayısının artmasıyla birlikte bobinlerdeki ısıtma gücü ve buna bağlı

Table1.1 Sistem parametreleri

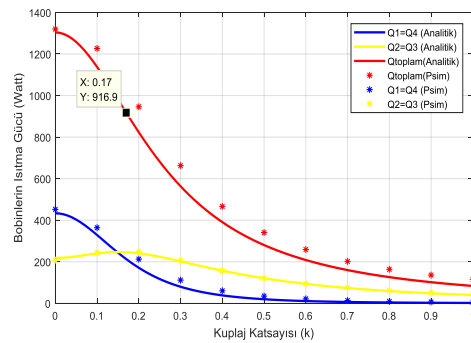
Giriş gerilimi ($V_1=V_2=V_3=V_4$)	60V
Sarım sayısı ($N_1=N_2=N_3=N_4$)	36
Görev oranı ($D_1=D_2=D_3=D_4$)	0.5
Rezonans frekansı ($fr_1=fr_2=fr_3=fr_4$)	6.67kHz
Karşılıklı indüktans kuplaj katsayısı ($k_1=k_2=k_3=k_4$)	0.17
Karşılıklı direnç kuplaj katsayısı ($kr_1=kr_2=kr_3=kr_4$)	0.55
Bobin uzunlukları ($lc_1=lc_2=lc_3=lc_4$)	12.5cm
rw	2.4cm
rc	5.5cm
x	$\cong 0$



Şekil 6. Kontrol metodu blok diyagramı



Şekil 7. Sistemin yapısı



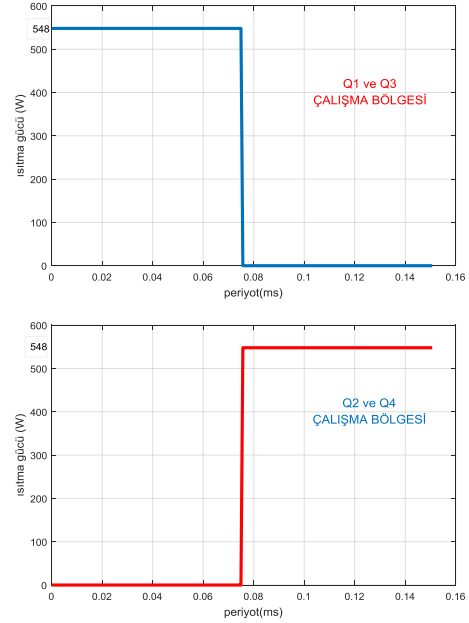
Şekil 8. Bobinlerin ısıtma gücünün kuplaj katsayısına göre değişimi

olarak toplam güç değeri azalmaktadır. Başka bir deyişle, sistemden daha yüksek güç değeri elde edilebilecek iken, bobinler arası manyetik etkileşim sonucu bu değerin azaldığı gözlenmektedir. Aynı eşdeğer devre modeli PSIM yazılımı kullanılarak da analiz edilmiş ve birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Şekil-8'de görülen sonuçlara göre PSIM ile yapılan analizlere temel harmonik yaklaşımı olmadığı için harmoniklerin yarattığı güç nedeniyle biraz daha yüksek güç değerleri elde edildiği görülmektedir.

Laboratuvarda gerçekleştirilen 4'lü indüksiyon bobin sistemi prototipi üzerinde yapılan ölçümlerde yan yana olan bobinler arasındaki kuplaj katsayısı 0.17 olarak ölçülmüştür. Buna göre Şekil-8'e göre elde edilebilecek toplam güç değerinin 917 W ($Q_1=Q_4=212W$, $Q_2=Q_3=246W$) olduğu görülmektedir.

Eğer aynı sistem önerilen kontrol yöntemi ile kontrol edilir ise bobin grupları için ısıtma gücü değerleri bir periyot için Şekil-9'daki gibi olmaktadır. Grafikten de görüldüğü üzere periyodun ilk yarısında birinci ve üçüncü bobin grupları aktif iken, diğer yarısında ikinci ve dördüncü bobin grupları aktif yapılmaktadır. Buna bağlı her bir bobin grubundan ortalama 274 W değerinde güç elde edilmiştir. Sonuç olarak toplam güç değeri çok az artmakta ve 1096 W olmaktadır.

Sistemde bobinlerin aktif ve pasif olduğu zaman dilimleri değiştirilerek bobin güç değerleri kontrol edilebilir. Böylece homojen veya farklı bir zarfa sahip sıcaklık dağılımları elde edilebilir. Bu yöntemde bobinlerin açma/kapama hızları iş parçasının ısıl zaman sabitinden çok daha yüksek bir frekansta gerçekleştirildiğinden iş parçasının sıcaklığındaki dalgalanmanın çok küçük olması beklenmektedir.



Şekil 9. Bobinlerin ısıtma gücünün bölgesel değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İndüksiyon ısıtma sisteminde bobinlerin etkisi altındaki iş parçalarında ısı etkisi iş parçasının tümüne eşit dağılmamakta ve bunun sonucu olarak sıcaklık dağılımı homojen olarak gerçekleşmemektedir. Bu çalışmada indüksiyon sargısını 4 parçaya bölen ve her bir sargının gücünü ayrı ayrı kontrol ederek homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmeye çalışan yeni bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde sargılar arasındaki manyetik kuplajın etkisi en aza indirilerek, sargılar üzerinde bağımsız güç kontrolü sağlanmıştır. Eğer istenirse eşit olmayan ve farklı bir zarfa sahip sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi de mümkündür. Ayrıca yapısal olarak farklı bobin grupları modellenerek, yani farklı sarım önerileri ile de önerilen kontrol stratejisine ek olarak mekaniksel iyileştirmeler de sisteme eklenebilir. Sonuç olarak sıvı gıdalar için homojen sıcaklık dağılımına sahip bir indüksiyon ısıtma sistemi ortaya konmuş ve analitik hesaplamalar ve simülasyonlar ile çalışması incelenmiştir. Sonraki çalışma

olarak sistemin deneysel olarak kurularak sonuçların doğrulamasının yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Orhan Kaya ve Filiz İçier, " İndüksiyon ve Ohmik Isıtma İşlemlerinin Gıdalara Uygulanabilirliğinin Karşılaştırılması", Akademik Gıda 17(1) (2019) 111-120.
- [2] Masakazu Adachi and Hironobu Yonemori, "Considerations of configurations on induction heating type indirect heating system", 2014 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10 HTC), Chennai, India, 29 January 2015, 88-93 pp.
- [3] Juthathip Haema, and Rattanakom Phudungthin, "Full bridge resonant inverter for blade induction heating application", CPESE 2018, Nagoya, Japan, 391-395pp.
- [4] Segura, G.M, "Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating", Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya Departament D'Enginyeria Elèctrica, Barcelona, 2012, 226p.
- [5] Y. Tezcan, M. Boztepe, "Independent Power Control in Dual Coil Induction Heating System for Liquid Foods", International Symposium on Industrial Electronics INDEL 2018, Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina, 1-3 November 2018
- [6] Hideaki Fujita, Naoki Uchida, and Kazuhiro Ozaki, "A New Zone-Control Induction Heating System Using Multiple Inverter Units Applicable Under Mutual Magnetic Coupling Conditions", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 26, No. 7, July 2011.
- [7] Ha Pham Ngoc, Hideaki Fujita, Kazuhiro Ozaki, and Naoki Uchida, "Dynamic Analysis and Control for Resonant Currents in a Zone-Control Induction Heating System", IEEE Transactions on Power Electronics, March 2013, 1297- 1307pp.
- [8] G. M. Segura, "Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating", Doctoral Thesis, Barcelona, June 2012.
- [9] Y. Yanamoto, T. Sasayama, N. Takahashi, N. Uchida, T. Ao, K. Kawanaka, and N. Matsunaka, " Examination on Equivalent Resistance and Coupling Coefficient of Zone-Control Induction Heating by Finite Element Method", Proc. Compumag. 2013.
- [10] Ha Pham Ngoc, Hideaki Fujita, Kazuhiro Ozaki, and Naoki Uchida, " Phase Angle Control of High-Frequency Resonant Currents in a Multiple Inverter System for Zone-Control Induction Heating", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 26, No. 11, November 2011.