

Paralel Rezonans Devrelerinde Basit ve Güvenilir Rezonans Frekansı Belirlemede Yeni Bir Yaklaşım

Halil Murat ÜNVER

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, 71450 Türkiye
Telefon: +90 (318) 357-4242; Fax: +90 (318) 357-2459, unver@kku.edu.tr

Abstract - Today, parallel resonance circuits have been used in many fields. In the circuit structures where the induction values change, to determine whether the worked frequency is below or above the resonance frequency requires to perform complex circuit designs. The problems, faced during the improvement of determination and response of these complex circuits, decrease the reliability of such approaches. Since the inductance follows non-linear lines, as it is seen especially in steel heating and melting, the high noise effects originated from the switching bring out several usage problems in steel heating and melting. In this study, what we try to do is to obtain a simple and reliable resonance frequency determining techniques for the 60 kW induction steel heating furnace designed beforehand. The aimed technique has been tested on the MATLAB model system and has been used on the experimental set up in the light of obtained results.

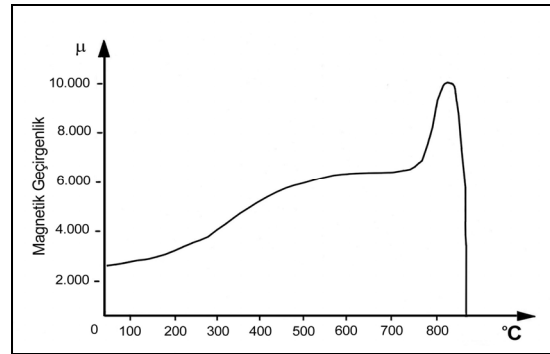
Index Terms—Induction Heating, Resonance, Control Techniques.

Özet - Paralel rezonans devreleri günümüzde bir çok alanda kullanılmaktadır. İndüktans değerinin değiştiği devre yapılarında, çalışılan frekansın, rezonans frekansının altında mı yoksa üstünde mi olduğunun belirlenmesi karmaşık devre tasarımlarının gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bu karmaşık devrelerin kararlılık ve cevap süresinin iyileştirilmesinde yaşanan sorunlar bu tür yaklaşımların güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Özellikle indüksiyonlu çelik ısıtma ve eritmede karşılaşıldığı gibi indüktansın non-linear değişim çizgileri izliyor olması, anahtarlamadan kaynaklanan gürültü etkilerinin yüksek olması bu alanda kullanım zorlukları çıkarmaktadır. Bu çalışmada tasarımı yapılan 60 kW indüksiyonlu çelik tav fırını için basit ve güvenilir bir rezonans frekansı belirleme tekniği üzerine çalışılmıştır. Düşünülen teknik, MATLAB’de modellenen sistem üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ışığında teknik gerçek deney düzeneği üzerinde kullanılmıştır.

Anahtar Sözcükler - İndüksiyon Fırını, Rezonans, Kontrol Teknikleri

I. GİRİŞ

Paralel rezonans devrelerinin geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bu alanlardan biri de indüksiyonlu çelik ısıtma fırınlarıdır. İndüksiyonlu çelik ısıtma fırınlarında indüktör içindeki malzemenin manyetik iletkenliğinin değişimi non-linear bir değişim göstermektedir. Bu durum Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Manyetik geçirgenliğin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Manyetik iletkenlik ve indüktans değeri arasındaki doğru orantı denklem (1)'de açıkça görülmektedir.

$$L = 1,25 \cdot \mu \cdot \frac{n^2}{l} \cdot A \cdot n_k \quad (1)$$

İndüktansın değişen değeri, devreye ilişkin rezonans frekansının da değişimine neden olmaktadır. Rezonans frekansı denklem (2) ile hesaplanabilir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

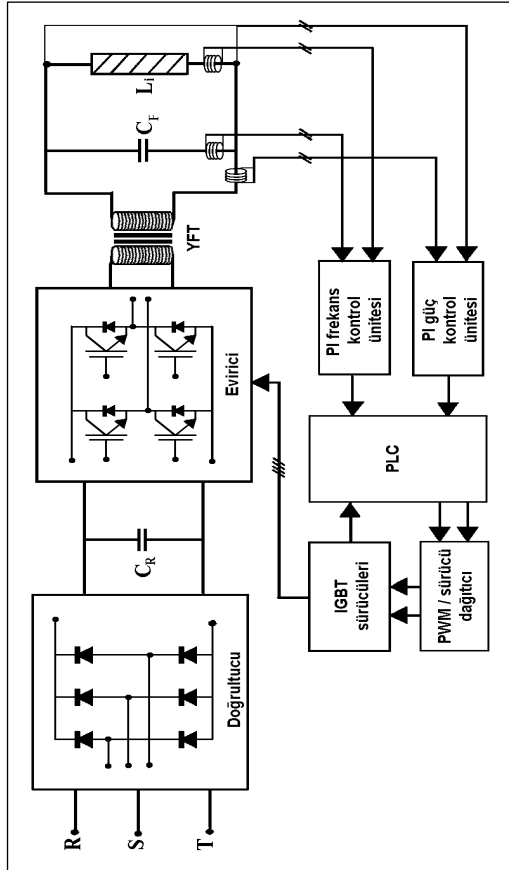
Rezonans frekansının kayması, devrenin reaktif güç çekmesine neden olmakta, aktif güç transferini düşürmektedir. Aktif güç transferinin azalması ise malzeme üzerinde hedeflenen sıcaklık değerine ulaşımı engellemektedir.

Bu tip sorunu çözmek amacıyla yapılan çalışmalarda genelde PLL (Phase Locked Loop) devreleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Ancak pratikte, bu devrelerin optimum noktada çalıştırma güçlükleri ve farklı koşullarda, özellikle anahtarlama devrelerinde ortaya çıkan operasyon sorunları daha basit ve güvenilir bir teknik geliştirme zorunluluğu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca geliştirilen bu yeni yaklaşım, özellikle yüksek güçlü anahtarlama devrelerinde meydana gelen güçlü bozucu etkiler altında sorunsuz çalışmayı sağlamalıdır.

II. YÖNTEM

A. Hedeflenen İndüksiyonlu Çelik Isıtma Fırını

Düşünülen ısıtma fırınının blok şeması Şekil 3.'te verilmiştir. Bu sistemde bir kontrolsüz doğrultucu, evirici, yüksek frekans transformatörü, ısıtıcı indüktör, rezonans kondansatörleri, frekans kontrol ünitesi, güç kontrol ünitesi, PLC, PWM sürücü, IGBT sürücülerinden oluşmaktadır. Bu sistemin sağlayacağı en önemli yenilik güç ünitesinin PLC ile sürülmesi olacaktır. Buradaki en önemli nokta ise çalışılan frekansın rezonans frekansından yüksek mi yoksa düşük mü olduğunun belirlenmesidir.



Şekil 3. Tasarlanan indüksiyonlu ısıtma sisteminin blok şeması

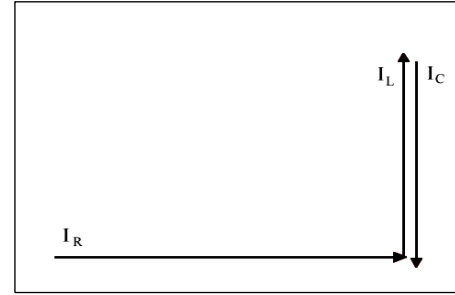
Sistemde kullanılması düşünülen, frekans kontrol ünitesi; indüktör ve kapasitör akımlarını izlemek suretiyle çalışma frekansıyla, rezonans frekansı arasında fark olup olmadığını belirlemeli, fark olması halinde periyodu düşürmek veya yükseltmek için PLC'ye interrupt darbeleri üretmelidir.

Isıtılan çeliğin sıcaklığa bağlı olarak yükselen direnç değeri, sistem tarafından transfer edilen aktif güç değerini düşürmektedir. Dolayısıyla iş parçasına transfer edilen gücün sabit tutulabilmesi için gerilimin yükseltilmesi yani duty cycle'ın artırılması gerekmektedir. Bunun için gerilim ve aktif akımın örneklenmesi, örneklerin bir analog çarpıcı ile çarpıldıktan sonra bir referans değerle karşılaştırılması, gerekli güç ayar interrupt darbelerini üretmek için yeterli olacaktır. Bu işi gerçekleştirmek için özel bir güç kontrol ünitesi tasarlanmıştır.

B. Paralel Rezonans Devreleri

Paralel rezonans devrelerinin temel özelliği; rezonans frekansında indüktör ve kapasitör akımlarının eşit olmasıdır. Bu durum Şekil 3'de verilen faz diyagramında gösterilmiştir.

Dolayısıyla indüktör ve kapasitör akımlarının eşit olması durumunda sistemin rezonans frekansında çalıştığı ifade edilebilir.



Şekil 3. Paralel rezonans devresine ilişkin akımların fazörel gösterimi

Üzerinde çalışılan orta frekanslı (1 kHz – 10 kHz) indüksiyonlu çelik ısıtma fırınının indüktörü iş parçası soğukken $67.8 \mu\text{H}$, kapasitörü ise $28.82 \mu\text{F}$ 'tır. Bu durumda denklem (2) rezonans frekansı 3600 Hz'tir. İndüktansın değişmediği varsayılarak çeşitli frekans değerlerine karşılık indüktör ve kapasitör akımları 380 V için hesaplanmış, elde edilen değerler Tablo 1'de verilmiştir. Bu tablodan elde edilen grafik ise Şekil 4.'te verilmiştir.

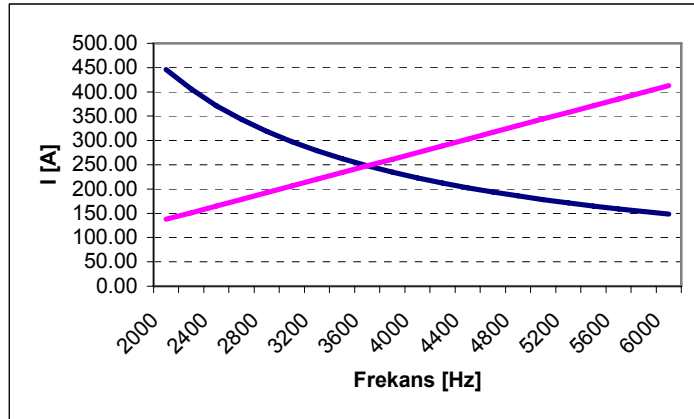
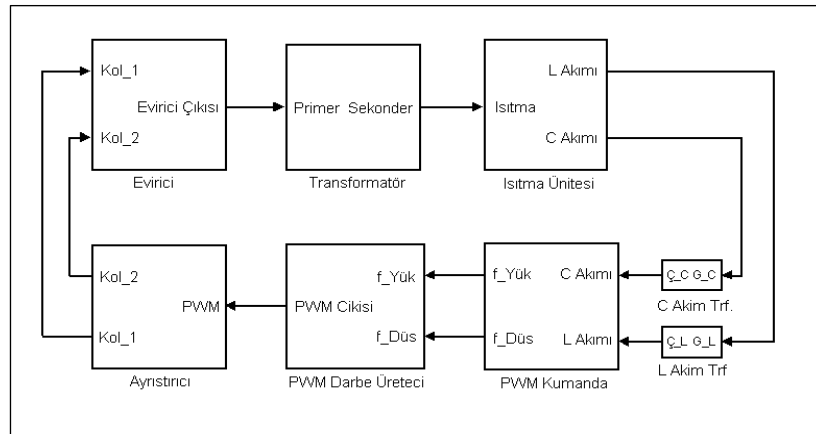
Şekil 4.'teki eğride görüldüğü gibi rezonans frekansının altındaki frekanslarda indüktör akımı kondansatör akımından daha yüksektir, rezonans frekansının üstündeki frekans değerlerinde ise kondansatör akımı indüktör akımından daha yüksektir.

C. MATLAB® Simulink Simülasyonu

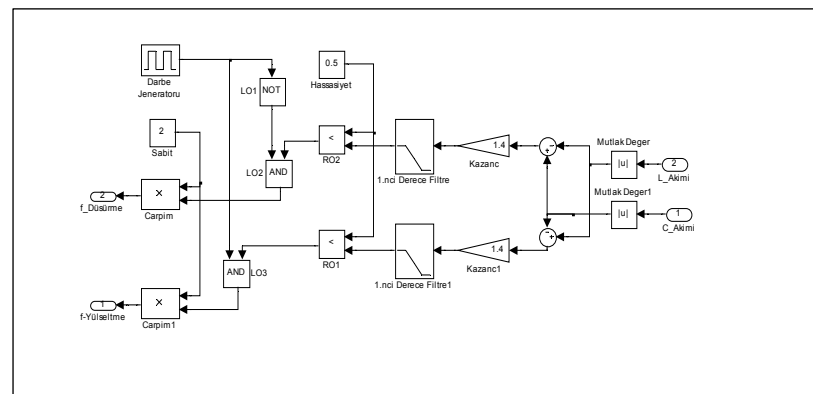
Kol akımların eşitliği ilkesinden yola çıkılarak gelenen noktada, düşünülen yaklaşımın tasarlanan indüksiyonlu çelik ısıtma fırınında uygulanabilirliğini sınamak için MATLAB simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için tasarlanan indüksiyonlu çelik tav fırınının ve frekans belirleme devresinin matematiksel modeli MATLAB ® Simulink'de kurulmuştur. Isıtma sisteminin genel modeli Şekil 5'te, frekans kontrol ünitesi blok diyagramı Şekil 6'de verilmiştir.

Oluşturulan modelde indüktans değerinin değişimi lineer azalan bir fonksiyon olarak tanımlanmış ve rezonanstaki yüksek, düşük ve aynı olmak üzere çeşitli başlangıç frekansları için denemeler yapılmıştır. Bütün bu durumları kapsayan yüksek frekanslı başlangıca ilişkin sonuç eğrileri Şekil 7.'de verilmiştir.

Frekans	IL	IC
2000	446.01	137.62
2200	405.46	151.38
2400	371.67	165.15
2600	343.08	178.91
2800	318.58	192.67
3000	297.34	206.43
3200	278.76	220.20
3400	262.36	233.96
3600	247.78	247.72
3800	234.74	261.48
4000	223.00	275.24
4200	212.38	289.01
4400	202.73	302.77
4600	193.92	316.53
4800	185.84	330.29
5000	178.40	344.06
5200	171.54	357.82
5400	165.19	371.58
5600	159.29	385.34
5800	153.80	399.10
6000	148.67	412.87

Şekil 4. I_L – I_C akım değişimi

Şekil 5. MATLAB® Simulink programında gerçekleştirilen simülasyon modelinin blok şeması



Şekil 6. Frekans kontrol ünitesi MATLAB® Simulink modeli

Her ne kadar PLC programında başlangıç frekansı olarak sistemin rezonans frekansı (f_0) tanımlanacaksa da her koşulun denenmesi açısından yüksek frekanslı başlangıç uygun görülmüştür. Şekilde görüldüğü gibi kondansatör akımının, indüktör akımından yüksek olması nedeniyle kontrol devresi PLC için frekans düşürme darbeleri üretmiştir. Rezonans frekansına ulaşıldığında darbe üretimine son verilmiştir. İndüktans değişimine bağlı olarak ortaya çıkan indüktör akımındaki artış akımlar arasında izin verilen değeri aştığında, buna bağlı olarak kontrol devresi frekans yükseltme darbeleri üreterek çalışma frekansının yükselmesini sağlamış, böylelikle kapasitör akımı artarak indüktör akımındaki artışı takip etmiş (izlemiş) ve sistem rezonansa kalmıştır. Modeldeki frekans değişimi, en alta bulunan eğride görülmektedir.

C. Deneysel Uygulamalar

Yapılan simülasyonlar sonucunda, geliştirilen yaklaşımın basit olduğu kadar güvenilir olduğu da görülmüştür. Bu yaklaşım fiziksel olarak, deney düzeneğine uygulanmıştır. Şekil 8'de fiziksel sisteme ait güç ve kontrol ünitelerinin görüntüleri verilmiştir.

Deneyde kullanılmak üzere seçilen boru malzeme üzerinde yapılan hesaplamalarda, görülmüştür ki; endüktansın, malzeme soğuk haldeki değeri $67.8 \mu\text{H}$ iken malzeme ısıdıktan sonraki değeri $63.17 \mu\text{H}$ 'ye kadar düşmekte R direnci ise $16.3 \mu\Omega$ 'dan $13 \text{m}\Omega$ 'a kadar çıkmaktadır. 3 kHz civarında kalabilmek için $28.82 \mu\text{F}$ güç kondansatörü bağlanmıştır. Bu halde başlangıç rezonans frekansı denklem (2)'den;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{67.8 \cdot 10^{-6} \cdot 28.82 \cdot 10^{-6}}} = 3600 \text{ Hz} \quad (3)$$

olarak elde edilmektedir (Malzeme tam ısıdığına ise rezonans frekansı 3730 Hz olmaktadır).

Şekil 9'da denklem (3)'den edilen frekansta sistemin güç ve frekans kontrolü yapılmadığı haldeki şebeke ve ısıtma birimindeki gerilim-akım eğrileri görülmektedir.

Rezonans frekansında başlangıç yapılmasına rağmen manyetik iletkenliğin düşmesi ile indüktif çalışma bölgesine girilmiş dolayısıyla çekilen aktif güç düşmüştür normal durumda 25 sn'de $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşması gereken malzeme sıcaklığı 160 sn'de ancak $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıkabilmiştir.

Frekans kontrol ünitesi çalıştırılarak, çelik boru ısıtılmıştır. Sisteme ilişkin $\text{Cos } \phi=0.99$, $\text{PF}=0.79$ olarak ölçülmüştür. Çelik boru tavında güç;

$$P_{cb} = U.I.PF = 4004 \times 55.5 \times 0.79 = 17555538 \approx 17.6 \text{ kW} \quad (4)$$

olarak elde edilmiştir.

Frekans analizi için yüksek frekans transformatörünün birincil tarafından bir, ikincil tarafından iki görüntü alınmıştır. Bunlar sırasıyla Şekil 10.a, Şekil 10.b ve Şekil 10.c olarak verilmiştir.

Şekil 10.a'da verilen birincil taraftaki güç görüntüsünde gücün 18.6 kW , $\text{Cos}\phi=0.99$ ve $\text{PF}=0.79$ değerinin olduğu görülmektedir. Düşey eksenler karşılaştırıldığında gerilim ve akım eğrileri arasında faz farkı olmadığı görülmektedir. Sistemin anlık rezonans frekansı 3.73 kHz 'dir.

Şekil 10.b'de verilen 18.6 kW için, ikincil tarafın frekans/gerilim/akım görüntüsünde yine 3.73 kHz 'de $\sim 330\text{V}$ ve $\sim 54 \text{ A}$ akım okunmaktadır. Düşey eksenler incelendiğinde yine sistemin rezonans frekansında olduğu görülmektedir. Buradaki güç;

$$P_i = U.I.PF = 3298 \times 59.9 \times 0.79 = 156065 \approx 15.6 \text{ kW} \quad (5)$$

olarak görülmektedir.

Birincil tarafla ikincil taraf arasındaki 3 kW 'lık güç farkı arada bulunan yüksek frekans transformatöründen kaynaklanmaktadır. Şekil 10.c'de ise sistemin gücünün 55 kW 'a ayarlandığı haldeki ikincil taraf frekans/gerilim/akım görüntüsü verilmiştir. İkincil tarafa iletilen güç kayıpları çıktıktan sonra 44.5 kW olmaktadır.

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

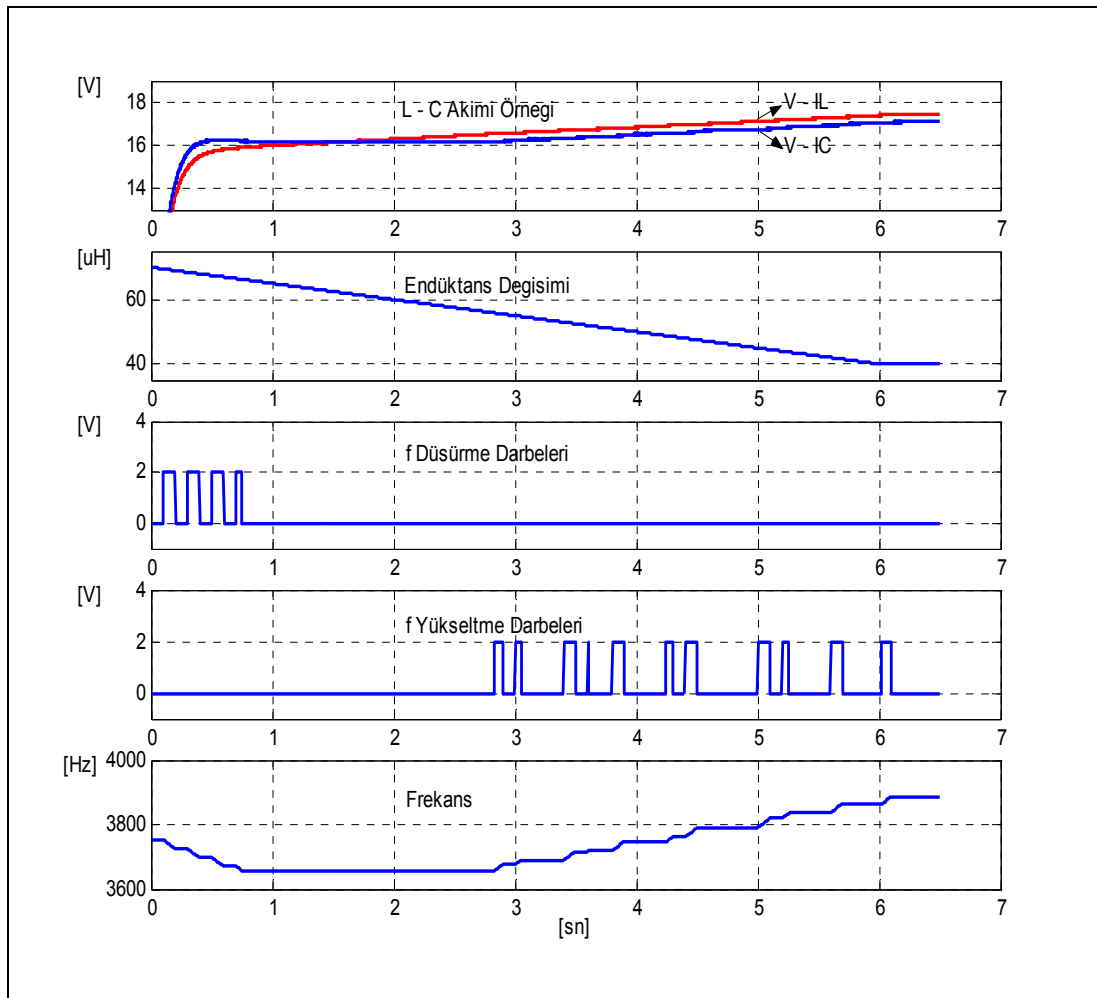
Düşünülen rezonans frekansı belirleme yaklaşımı öncelikle MATLAB® Simulink üzerinde modellenmiş, doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. Test aşamasında yaklaşım arzu edildiği şekilde performans göstermiştir. Daha sonra yaklaşım, fiziksel olarak tasarlanan devreye uygulanmıştır. Yaklaşım, İndüksiyonlu çelik tav fırını üzerinde de başarılı olmuştur.

Deneyde kullanılmak üzere seçilen $45 \text{ mm}\phi$ çapındaki boru malzeme üzerinde denklem (1) ile yapılan hesaplamalarda, ısıtıcı indüktör endüktansının değeri, malzeme soğuk halde iken, $67.8 \mu\text{H}$ olduğu ve malzeme ısıdıktan sonra ise $63.17 \mu\text{H}$ 'ye kadar düştüğü, R direncinin ise $16.3 \mu\Omega$ 'dan $13 \text{m}\Omega$ 'a kadar çıktığı görülmüştür. Tatbik edilecek gerilimin 3 kHz civarında olması için $28.82 \mu\text{F}$ güç kondansatörü bağlanmıştır. Bu halde başlangıç rezonans frekansı $f_0 = 3600 \text{ Hz}$ olarak hesaplanmıştır.

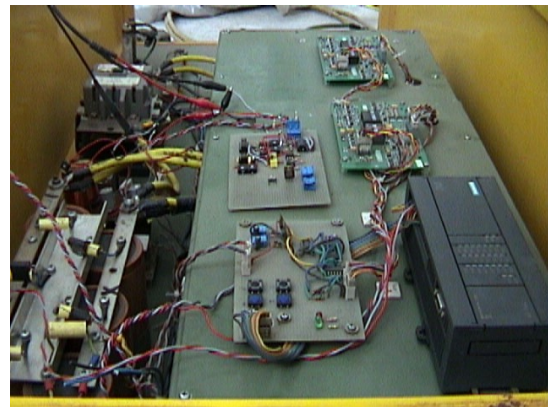
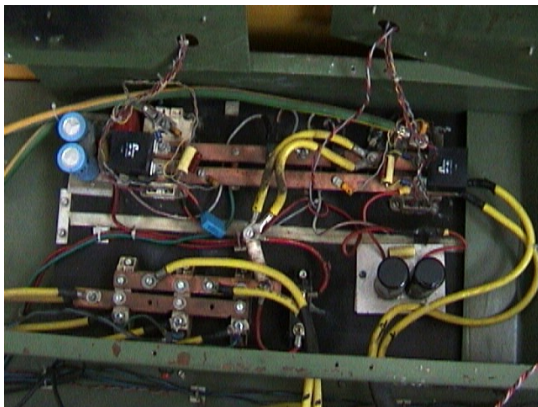
Kontrol ünitesi çalıştırılmadan yapılan güç denemelerinde sistem 3600 Hz başlangıç frekansı ile çalıştırılmıştır. Malzeme sıcaklığı 160 sn'de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkmıştır.

Kontrol ünitesi çalıştırılarak, yapılan denemelerde, ısıtma başlangıcında sistem hesaplandığı gibi 3600 Hz 'de rezonansı bulmuş, ısınma tamamlandığında ise çalışma ve rezonans frekansı 3730 Hz olmuştur. Malzeme sıcaklığı 25 sn'de $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkmıştır. Bu esnada 17.6 kW güç çekilmiştir. Şekil 11.'de deneme sırasında ısıtılmış iş parçasının görüntüsü yer almaktadır.

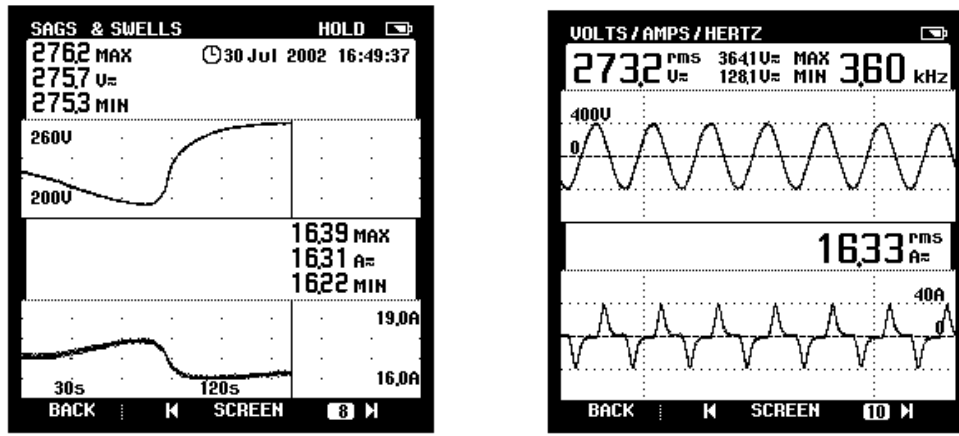
Yapılan bu çalışmada, paralel rezonans devrelerinde kol akımlarının değerlendirilerek çalışma frekansı ve rezonans frekansı arasındaki farkın kolaylıkla tespit edilebileceği ve sistemin rezonans frekansında tutulabileceği görülmüştür.



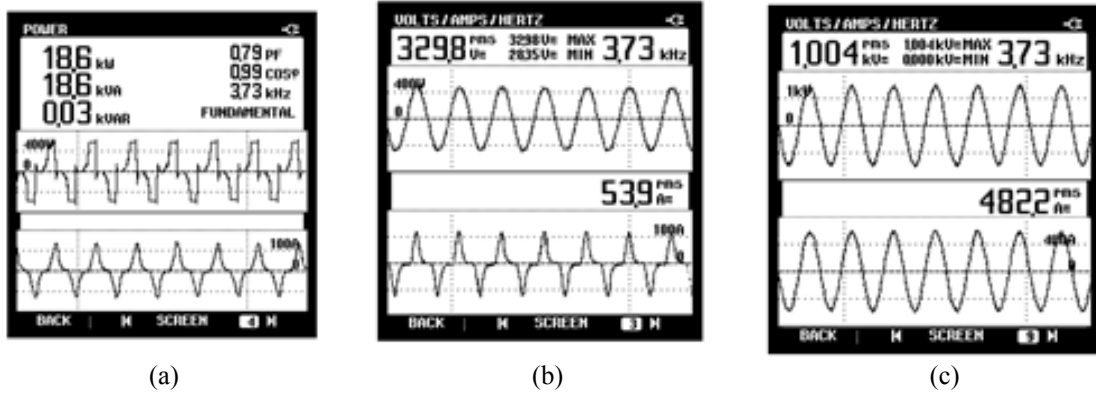
Şekil 7. Simulink Programında Gerçekleştirilen, 'Rezonanstan Yüksek Frekansla Başlangıç' Simülasyonunda Elde Edilen, İndüktans Değişimine Bağlı Olarak Üretilen Kontrol Darbeleri Ve Frekans Değişimi Eğrileri



Şekil 8. Güç ve kontrol üniteleri



Şekil 9. Kontrolsüz çalışma durumunda ikincil tarafın V-I (a) etkin değer değişimi (b) dalga şekilleri



Şekil 10. YFT'nin (a) birincil taraf güç görüntüsü (b) ikincil taraf gerilim-akım görüntüsü (c) tam güçte ikincil taraf gerilim-akım görüntüsü



Şekil 11. Isıtma indüktörü ve ısınmış boru kesitli iş parçası

V. REFERENCES

- [1] H. M. Unver, "İndüksiyonlu Çelik Tav Fırınlarında Güç Ünitelerinin PLC ile Denetimi", Doktora Tezi, Ocak 2004, Kırıkkale
- [2] İleri Teknolojiler Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Ankara, 18-20 Ağustos 2003, p.416-424
- [3] Tzou Y. and Jung S., "Adaptive Repetitive Control of PWM Inverters for Very Low THD AC-Voltage Regulation with Unknown Loads", IEEE Transactions on Power Electronics, 14(5), Sep 1999
- [4] Kwon Y, Yoo S, Hyun D, Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy, Applied Power Electronics Conference And Exposition, 14-18 Mar 1999; 1:575 -581,