

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ BESLEME KONTROLLÜ
REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih ŞEKEROĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ BESLEME KONTROLLÜ
REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fatih ŞEKEROĞLU
(504081012)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

ŞUBAT 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504081012 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fatih ŞEKEROĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GERİ BESLEME KONTROLLÜ REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Salman KURTULAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Derya A. KOCABAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **8 Şubat 2012**
Savunma Tarihi : **24 Şubat 2012**

Aileme ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana yol gösteren, zamanını ayıran, değerli görüşlerini benimle paylaşan hocam sayın Prof. Dr. Özcan Kalenderli'ye teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın her evresinde bana yardımcı olan Kadir Akın'a, Bahadır Taşkiran'a, Süreyya Şahin'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, bugünlere gelmemi sağlayan annem ve babama çalışmam süresince bana sabır gösterdikleri ve moral verdikleri için sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2012

Fatih Şekeroğlu
Kontrol Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİMLERİN ÜRETİLMESİ	3
2.1 Yüksek Gerilim Üretiminin Tarihçesi.....	4
2.2 Deney Transformatörleri İle Yüksek Alternatif Gerilim Üretimi.....	6
2.2.1 Tek katlı deney transformatörü ile yüksek alternatif gerilim üretimi.....	7
2.2.2 Kaskad bağlı deney transformatörü ile yüksek alternatif gerilim üretimi	8
3. REZONANS TRANSFORMATÖRÜ İLE YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİM ÜRETİMİ.....	13
3.1 Rezonans Teorisi.....	13
3.2 Endüktans Ayarlı Rezonans Transformatörleri.....	14
3.2.1 Seri rezonans transformatörü.....	15
3.2.2 Paralel rezonans transformatörü.....	21
3.3 Frekans Ayarlı Rezonans Transformatörleri.....	23
4. SERİ REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI	35
4.1 Amaç.....	35
4.2 Seri Rezonans Devre Şeması, Analizi ve Simülasyonu.....	36
4.3 Geribesleme kontrollü rezonans transformatörü tasarım çalışması.....	38
4.3.1 Ayarlı endüktans tasarımı.....	38
4.3.2 Akım okuma devresi tasarımı.....	39
4.3.3 Adım motor ve sürücü devresi tasarımı.....	43
4.3.3.1 Tek-faz uyartım (Bir fazlı tam adımlı sürüş).....	45
4.3.3.2 Karma uyartım (İki fazlı yarım adımlı sürüş).....	45
4.3.3.3 İki-faz uyartım (İki fazlı tam adımlı sürüş).....	46
5. SONUÇLAR	51
EKLER	53
EK A.	55
EK B.	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

kV	: Kilovolt
MV	: Megavolt
U_{rms}	: Etkin gerilim değeri
U_m	: Maksimum gerilim değeri
IEC	: International Electrotechnical Commission
VDE	: Verband der Elektrotechnik
ANSI	: American National Standards Institute
PLC	: Programmable Logic Controller
Q	: Kalite Faktörü
Hz	: Hertz
Z	: Empedans
X_L	: Endüktif reaktans
X_C	: Kapasitif reaktans

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Malzemeye göre $\tan \delta$ ve $Q_{YÜK}$ değerleri.....	18
Çizelge 3.2 : Deney sistemleri karşılaştırılması	23
Çizelge 3.3 : Yüksek gerilim kablosu saha deneyi sonuçları	31
Çizelge 4.1 : Transformatör yük değişimi deney sonuçları.	50
Çizelge 4.2 : Transformatör kalite faktörü deneyi sonuçları	51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Faraday diski	4
Şekil 2.2 : W. Stanley'ın endüksiyon bobini tasarımı	5
Şekil 2.3 : Kazan tipi 750 kV, 2100 kVA deney transformatörü	7
Şekil 2.4 : Tek katlı deney transformatör devreleri	8
Şekil 2.5 : 1500 kV, 1,2 A, 60 Hz, 4 katlı kaskad deney transformatörü	9
Şekil 2.6 : Üç katlı kaskad bağlı deney transformatörü	10
Şekil 2.7 : Kaskad bağlı deney transformatörleri deney düzeneği	10
Şekil 3.1 : Rezonans devresinin çıkış gerilimi - frekans eğrisi	14
Şekil 3.2 : Seri rezonans transformatörü	15
Şekil 3.3 : Bir transformatör, reaktör ve deney kapasitesinden oluşan devrenin eşdeğer devresi	16
Şekil 3.4 : Basitleştirilmiş eşdeğer devre	16
Şekil 3.5 : Sistemin kalite faktörüne kayıpların etkisi	19
Şekil 3.6 : Kaskad bağlı seri rezonans transformatörü	20
Şekil 3.7 : Seri rezonans transformatörü deney düzeni	20
Şekil 3.8 : Paralel rezonans transformatörünün genel yapısı	21
Şekil 3.9 : Ototransformatör yapılı paralel rezonans transformatörü	21
Şekil 3.10 : Alternatif gerilim deney devreleri genel yapısı	22
Şekil 3.11 : Kazan tipi paralel-seri rezonans transformatörü	23
Şekil 3.12 : Frekans ayarlı rezonans deney sistemi	24
Şekil 3.13 : Darbe genişlik modülasyonlu frekans çeviricisinin çıkış gerilimi	25
Şekil 3.14 : Rezonans sisteminin çıkış gerilim grafiği	25
Şekil 3.15 : $L = 40$ H sabit reaktörlü, frekans ayarlı rezonans transformatörü ile kablo deneyi frekans karakteristiği	27
Şekil 3.16 : Anahtarlı reaktörlü, frekans ayarlı rezonans transformatörü ile kablo deneyi frekans karakteristiği	28
Şekil 3.17 : Minimum ve maksimum frekans değerlerine bağlı deneyi yapılabilir kablo uzunluğu (kesikli çizgiler yapılan örneği göstermektedir)	28
Şekil 3.18 : Frekans ayarlı rezonans deney sistemi	29
Şekil 3.19 : 80 A, 254 kV frekans ayarlı rezonans deney sistemi kalite faktörü, akım-frekans grafiği	30
Şekil 3.20 : (a), (b) Saha deneyleri için taşınabilir frekans ayarlı rezonans deney sistemleri	32
Şekil 3.21 : Kontrol ve besleme ünitesi blok diyagramı	33
Şekil 4.1 : Ayarlanabilir endüktans benzetimi	35
Şekil 4.2 : Bir transformatör, reaktör ve deney kapasitesinden oluşan devrenin eşdeğer devresi	36
Şekil 4.3 : Rezonans transformatör simülasyon devresi	37
Şekil 4.4 : Rezonans transformatör numaralı devre çıkış gerilimi	38

Şekil 4.5 : Kuvvetlendirici devre girişi akım grafiği	40
Şekil 4.6 : Oluşturulan kuvvetlendirici devre şeması	40
Şekil 4.7 : Kuvvetlendirici devre çıkışı akım grafiği.....	41
Şekil 4.8 : Gerilim bölücü devre şeması	42
Şekil 4.9 : Karşılaştırmalı devre çıkış gerilimi	42
Şekil 4.10 : Gerilim karşılaştırmalı devre şeması	43
Şekil 4.11 : Tek fazlı uyarım	45
Şekil 4.12 : Karma uyarım	46
Şekil 4.13 : Adım motor sürücü devresi	47
Şekil 4.14 : İki-faz uyarım (İki fazlı tam adımli sürüş)	47

GERİ BESLEME KONTROLLÜ REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI

ÖZET

Dünya geliştikçe elektrik enerjisine olan gereksinim hızla artmaktadır. Üretilen elektrik enerjisinin ekonomik nedenler ve doğal kaynakların sınırlı olması sebebiyle tüketim merkezlerine en az kayıpla ulaştırılması gerekmektedir. Bu durum elektrik enerjisinin üretiminde, iletiminde ve dağıtımında yüksek gerilimlerin kullanılmasını gerekli hale getirmektedir.

Yüksek gerilim üretmek için birçok yöntem mevcuttur. Üretilen yüksek gerilimin doğru ya da alternatif gerilim olmasına ve kullanım amacına göre en uygun yöntem seçilmelidir. Yüksek gerilime, elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinin yanında yüksek gerilim altında çalışacak malzemeleri ve aygıtları denemek için de ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada yüksek alternatif gerilim üretim yöntemleri ele alınmış, özellikle kapasitif karakterli yapıları deneme süreçlerinde yüksek alternatif gerilim üretmek amacıyla kullanılan, yirminci yüzyılın ikinci yarısında geliştirilen, rezonans transformatör ile yüksek gerilim üretimi üzerinde durulmuş ve şebeke gerilimi alçaltıcı bir trafodan geçirilerek beslenen bir seri rezonans devresi ile oluşturulan rezonans transformatörün, giriş gerilimini kalite faktörü kadar kuvvetlendiren bir uygulaması yapılmıştır. Değişken endüktans elde edilerek endüktans ayarlı bir rezonans transformatör tasarlanmıştır. Özellikle kapasitif özellikli yüksek gerilim elemanlarının denenmesi gibi endüstriyel amaçlarla kullanılan, endüktans ayarlı rezonans transformatörlerinde rezonans anını yakalamak için endüktans el ile değiştirilmekte, herhangi bir kontrol uygulanmamaktadır. Bu uygulamada ise rezonansa otomatik olarak gelen, geri beslemeli kontrollü rezonans transformatör tasarlanmıştır. Devreden akım geri beslemesi alınmış ve rezonans anında akım en büyük değerini alacağından, mikroişlemci içinde koşturulan maksimizasyon algoritması ile rezonans anı belirlenmiştir.

Tasarlanan rezonans transformatörü endüktans ayarlı olduğundan değişken endüktans elde etmek üzere Henry mertebesinde endüktansa sahip bir bobin sarılmıştır. Endüktans, boş bir silindir etrafına bobin teli sarılarak elde edilmiştir. Tek kat sarımda elde edilen değer yeterli büyüklükte olmaması nedeniyle katmanlar arasına gerilim ve ısı dayanımlı bant konulmak suretiyle çok katlı sarım yapılmıştır. Toplamda 16 kat olmak üzere 870 m uzunluğunda 0,4 mm² kesit alanına sahip bobin teli sarılmıştır. Endüktans değişimi, içi boş silindirin içerisine manyetik geçirgenliği yüksek demir alaşımlı kütle sokularak sağlanmıştır. Bu kütle, dört kutuplu bir adım motor ile tahrik edilen, lineer kızak sistemi ile hareket ettirilmiştir. Akım maksimum değerini alana kadar demir kütle ileri ve geri yönde hareket ettirilerek endüktans değişimi sağlanmış ve rezonans noktası tespit edilmiştir. Adım motor, mikroişlemci yardımıyla sürülmüştür. Mikroişlemci dijital çıkışları, adım motorun her bir bobinine sıra ile enerji verecek şekilde programlanarak ileri hareket etmesi sağlanmıştır.

DESIGN OF FEEDBACK CONTROLLED RESONANT TRANSFORMER

SUMMARY

In today's developing world, the need for electrical energy is increasing rapidly. Due to our limited natural resources, electricity should have transferred with low losses to end users. To achieve this goal, high voltage must be used in distribution and transmission of electricity.

Today, one of the most widely used sources of alternative high voltage is transformers. Also there are many methods for producing high voltage that can be change due to purposes of applications.

High alternating voltages is required for high voltage laboratory experiments, alternative high-voltage experiments, and also for the majority of the circuits used in the production of direct and impulse voltages. In general, transformers used for this purpose have higher conversion rates and lower power than power transformers. These transformers are fed mainly on the network a regulator or synchronous generators.

Besides distribution, transmission and experimental purposes, high voltage can be used in order to test the capacitive materials and equipments that work under high voltage. Transformers are also can be used as single ply or a cascade connected in High-voltage test systems. For production of high alternating voltage to the level of several hundred kV, single high voltage transformer is the most economical way.

For the electricity more than 300 kV, transformers which are connected each other cascade is used instead. Cause, single transformer is not suitable in case of size and portability. Test transformers connected cascade, is used by the first time in 1915, W. Petersen, F. Dessauer and E. By Welter . Usually between two and four transformer connected each other. The most common usage is three-transformers performed the use of cascade connection. Basically, the high voltage side of the secondary windings connected in series cascade structure consisting of several transformers, low voltage side of the primary windings is fed through the its predecessor transformer excitation coil. The current that flows through the Low voltage and excitation coil of test transformers connected cascade, larger than high voltage winding. In the same way the output power is shared by multiples of the transformer.

This study is focused on production method of high alternative voltage by resonant transformers. Resonant transformers which were invented in the second half of twentieth century strengthen the input voltage by the rate of Q (quality factor). This transformer works on the principle of resonance.

Electrical resonance, the capacitive and inductive reactance in a circuit state of being equal to each other at a particular frequency. Basically, the current through the inductor creates a magnetic field through the feeding capacity, formed during the discharge current generates a magnetic field on the back of inductance and the resonant frequency of the circuit of capacitive and inductive reactances are

synchronized to each other. In this way, in a sense the electrical system at resonance frequency can be considered as a pendulum. Reactive power flow due to capacitive and inductive elements in the system to oscillate between the each other. So, reactive power is cancelled at resonance. Thus, power drawn from the source at resonance, is equal to the power expended in the circuit resistors.

DC is input to the transformer, which is converted to a high-frequency driving signal, essential for the resonant condition to occur in the device. The high-power resonant transformer is driven at relatively high frequencies, up to a hundred kilohertz, made possible by advances in solid state power transistors. This driving signal initiates the resonant effect in the primary and secondary coils of the transformer, converting the input to a high-voltage signal at a comparatively high frequency, present on the device's secondary coil.

The resonant transformer effect is an old technology renewed by the infusion of modern semiconductor technology. A novelty of resonant transformers is that the high voltage developed is a consequence of the resonant effect, rather than winding ratio of the coils. In fact, the early use of these devices was for the generation and transmission of radio. Once a high voltage is developed in the transformer, the output is pulled from the secondary coil by an output coil. The output is then converted into DC and then to any other utilization power by a novel rectifier arrangement.

A resonant transformer is one that operates at the resonant frequency of one or more of its coils. The resonant coil, usually the secondary, acts as an inductor, and is connected in series with a capacitor. If the primary coil is driven by a periodic source of alternating current, such as a square or sawtooth wave, each pulse of current helps to build up an oscillation in the secondary coil. Due to resonance, a very high voltage can develop across the secondary, until it is limited by some process such as electrical breakdown. These devices are therefore used to generate high alternating voltages. Tunable inductance and tunable frequency resonant transformers are available. Tunable inductance reactor modules for series resonant circuits are available between 250 and 1200 kV and test power between 1000 and 20000 kVA. Tunable frequency modules for series resonant circuits are available between 100 and 1600 kV and test power between 50 and 9000 kVA.

The high voltage experiments which are made with variable frequency resonant transformer as the experiments with the series resonant tuned transformer, follow some sequences. First the of the circuit resonance state, than output voltage value is made desired test voltage, and try to perform a particular operation will follow. Unlike serial resonant transformers, adjustment of voltage is provided with frequency change.

The inductance tuned resonant transformers, allow the production of a high voltage and make circuit resonance in constant frequency by means of variable inductance. There are two types of variable inductance resonant transformer according to position of the elements in circuit. One of them is series other one is parallel resonant transformer.

Series resonant transformers, regulators, transformers, for the variable inductance, one high voltage reactor and test material that connected in series to reactor occurs. Regulator provides the ability to change the voltage to connected transformer. The next part of the high voltage winding of the transformer circuit generates the high voltage side. The transformer which connects regulator and resonance circuit, is provide the galvanic isolation between the two sides at the same time.

Similar to the series resonant transformer, parallel resonant transformer is consisting of one regulator and transformer connected to regulator and test material. Unlike a serial resonance circuit, high voltage reactor and test material connected parallel to the circuit and each other.

Because, parallel resonant transformer's output voltage is more constant than serial resonance, it is used especially in the tests which include big currents such as large generator windings, corona loss experiments. In addition, an advantage of placement in parallel, while the circuit is not connected to the load, the system can be operated at full power. This is very advantageous for the system elements, the calibration and measurement of partial discharges.

An application of feedback controlled resonant transformer with serial resonance will be take place in last part of this study. Moving the iron back and forth with in the coil will change the inductance value with the help of a linear slide which consist of the stepper motor driven by microcontroller and gears. This circuit is supplied through mains voltage after a reduction transformer. Therefore, the 50 Hz must be the resonance frequency of the circuit.

At the resonant frequency, capacity and inductance act as a short circuit than the current which flows through the circuit is limited by only resistor. Current flowing through a resistor which connected in series to circuit will take the highest value at resonance frequency. This current is given as feedback to the controller and controller drives the iron mass to the position that inductance reach the required value for resonance frequency.

In the designed resonant transformer, circuit current is measured and given as a feedback to controller. As mentioned above, the current takes its maximum value at the moment of resonance. Increasing in resistance of circuit will result decrease the quality factor of resonant transformer. Thus, current measuring should be taken without increase the resistance of the circuit. To achieve this goal 1 Ohm resistor that is small enough to be neglected according to circuit resistance, is connected series to circuit. With help of this feedback voltage, controller is programmed to maximize the current flows through the circuit. Voltage wave forms are implemented in last part of this study and controller software is explained in attachments.

1. GİRİŞ

Elektrik mühendisliğinde ve uygulamalı fizikte çeşitli çalışmalar için yüksek gerilimler kullanılır. Örnek olarak, elektron mikroskoplarında ve X ışınlarının üretilmesinde 100 kV veya daha yüksek doğru gerilimlere gereksinim vardır. Nükleer fizikte parçacıkların hızlandırılmasında ve benzer alanlarda birkaç yüz kilovolt ve hatta megavolt mertebelerinde yüksek doğru gerilimler kullanılır. Megavolt mertebesindeki yüksek alternatif gerilimler ise, çok yüksek gerilimle (400 kV ve daha yüksek gerilimlerle) iletim yapılan şebeke donanımlarının deneylerinde kullanılır.

Günümüzde en çok kullanılan yüksek alternatif gerilim kaynağı transformatörlerdir. Transformatörler, yüksek gerilim deney sistemlerinde de tek katlı ya da kaskad bağlı olarak kullanılabilir. Ancak 300 kV üzerindeki gerilimler için transformatörler ekonomik olmaktan çıkmaktadır. Bunun yanında özellikle saha deneyleri için yüksek alternatif gerilim transformatörlerinin taşınabilir özellikleri de düşmektedir.

20. yüzyılın ikinci yarısında geliştirilen rezonans deney transformatörleri özellikle kapasitif karakteri baskın cihazların deneylerinde oldukça ekonomik çözümler sunmaktadır. Bunun yanında test sırasında meydana gelebilecek delinme ve kazalarda sistem rezonansından çıkacağı için gerilim seviyesi otomatik olarak düşeceğinden klasik transformatörlere göre daha güvenlidir [1]. Boyutlar ve taşınabilirlik bakımından saha deneylerine uygun olarak geliştirilen frekans ayarlı rezonans transformatörlerinin yanında konumuna göre seri veya paralel rezonans olarak çalışabilen, ayarlı endüktanslı rezonans transformatörleri de yüksek gerilim laboratuvarlarında kablo, anahtarlama elemanları gibi kapasitif donanımların deneylerinde tercih edilmektedir.

Bu amaçla geliştirilen rezonans transformatörlerinde endüktans değeri varyak benzeri yapılar yardımıyla el ile değiştirilerek sistem rezonans frekansına getirilmektedir [2]. Yükte herhangi bir değişiklik olması durumunda bu sistemler rezonansa el ile endüktans değeri değiştirilerek tekrar getirilmelidir. Bu çalışmada

tasarlanan rezonans transformatör ise kontrollü olup, kapasitif yükteki olası değişikliklere karşılık endüktans değerini değiştirerek sistemi rezonansta tutmaktadır.

2. YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİMLERİN ÜRETİLMESİ

Yüksek gerilim deney donanımı genel olarak:

- a) Araştırma laboratuvarlarında
- b) Rutin kontrol laboratuvarlarında kullanılır.

Araştırma laboratuvarları yapısal ve işlevsel olarak birbirinden farklılıklar gösterebilir. Genel amaçlı bir yüksek gerilim laboratuvarı her türden deney için donanım bulundurabilir [3].

Rutin kontroller, transformatörler, anahtarlama elemanları, izolatörler ve kablolar gibi donanımların denenmesi açısından önemlidir. Çoğunlukla fabrika ortamlarında yapılan bu tip deneyler, deneyi yapılan ürünün güvenilirliği ile verimi açısından belirleyici unsurdur. Yüksek gerilim donanımı, karşılaşılabileceği tüm durumlar karşısında yalıtkanın davranışını incelemek üzere kurulur. Çalışma koşullarının üzerinde donanımın güvenliğinin belirlenmesi ve çalışma sınırının ne çok yüksek ne de çok düşük olduğunun garantisini vermek için donanımın normal çalışma geriliminden daha yüksek gerilimlerde de deneyler yapılır.

Yüksek alternatif gerilimler, yüksek gerilim laboratuvarındaki deneyler, alternatif gerilim deneyleri ve yüksek doğru ve darbe gerilimlerin üretilmesinde kullanılan devrelerin çoğunluğu için gereklidir. Genel olarak bu amaçla kullanılan transformatörler güç transformatörlerine göre oldukça düşük güçlü ve daha büyük çevirme oranlı olurlar. Bu transformatörler çoğunlukla şebekeden bir regülatör veya senkron generatörler üzerinden beslenirler.

Yüksek alternatif gerilimde yapılan deneylerin çoğunda $u(t)$ alternatif geriliminin şekli sinüs biçiminden oldukça sapabilir. Burada gerilimin tepe değeri U_m ve etkin değeri U_{rms} özellikle önemlidir.

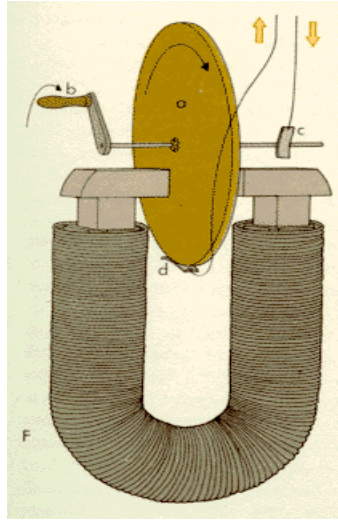
$$U_{rms} = \sqrt{\left[\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right]} \quad (1.1)$$

Yüksek gerilim deneylerinde, gerilim şekli belirli sınırlar içinde kaldığı durumlarda $U_m/\sqrt{2}$ değeri, deney gerilimi olarak tanımlanır. Tam sinüs biçimli bir alternatif gerilim için $U_{rms} = U_m/\sqrt{2}$ olur. $U_m / U_{rms} = \sqrt{2}$ değeri $\pm\%5$ sınırları içinde kalmalıdır [4].

Birkaç yüz kilovolt değerinin altındaki değerlerde alternatif gerilim üretiminde tek katlı deney transformatörü yeterli olabilir. Daha yüksek gerilime ihtiyaç duyulan deneylerde ise tek katlı transformatör, yalıtımı, taşınması gibi problemler nedeniyle ekonomik olmaktan çıkar. Bunun yerine kaskad bağlı transformatörler tercih edilir.

2.1 Yüksek Gerilim Üretiminin Tarihçesi

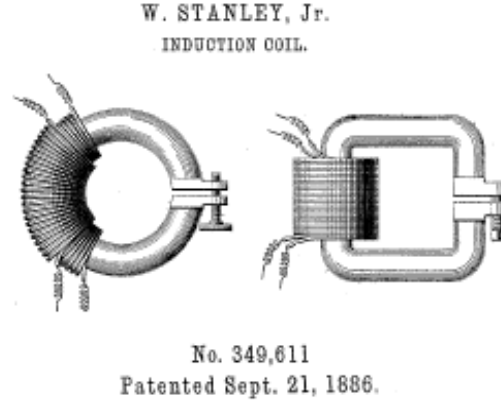
Yüksek alternatif gerilimlerin üretilmesinde senkron generatörlerle beraber günümüzün en çok kullanılan elektrik cihazlarından biri transformatörlerdir. İlk olarak 1831 yılında Michael Faraday tarafından elektromanyetik indüksiyonu göstermek amacıyla yapılan “Faraday Diski” (Şekil 2.1), yapısal olarak transformatörden çok en basit anlamda bir generatördür [5].



Şekil 2.1 : Faraday diski [5]

Faraday, kurduğu bu sistemi günümüzde kullanılan anlamda düşünememiştir. Daha sonra Faraday’ın bu fikri üzerinden yola çıkan Lucien Gaulard ve John Dixon Gibbs 1881 yılında “Secondary Generator” adını verdikleri cihazla pratik anlamda ilk güç transformatörünün temellerini atmışlardır. Ancak yapılan bu cihazda sargıların sarıldığı demir çekirdek aralık olduğundan çok verimli olamamıştır. Daha sonra cihazın patentini alan Westinghouse grubu, fikri William Stanley ile geliştirmiştir

(Şekil 2.2). Stanley, sargıları “e” şeklinde, uçları bağlı bir nüveye oturtarak manyetik akının yolunu tamamlamıştır. Endüksiyon bobini adını verdiği sistem daha verimli hale gelerek 1886 yılından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. 1889 yılında da Rus mühendis Mikhail Dolivo-Dobrovolsky de üç fazlı transformatörü geliştirmiştir [5].



Şekil 2.2 : W. Stanley’in endüksiyon bobini tasarımı [5].

Ondokuzuncu yüzyılın sonlarında gelişen elektrik sektörü, beraberinde birçok problemi de getirmiştir. Bu problemlerin en önemlisi ortada belirli bir standardın olmayışıdır. O zamana kadar sadece daha deneyimli danışmanlar aracılığı ile yürütülen imalat işlemleri, üreticilerin, özellikle sadece kendi bulunduğu çevre değil diğer bölgelere de satış yapma ve bunu ekonomik hale getirmek için fabrikasyona geçmek istemeleri ile belirli bir standarda oturtulmak zorunda kalmıştır. Bu nedenlerle yirminci yüzyılın başlarında Amerika ve Avrupa’da kurulan çeşitli standardizasyon kuruluşları (IEC, VDE, ANSI gibi) ile üretim belirli standartlara oturtulmaya çalışılmıştır [6].

Standartlaşma beraberinde üretilen cihazlar üzerinde deney zorunluluğunu getirmiştir. Bu nedenle dünyanın çeşitli yerlerinde yüksek gerilim laboratuvarları kurulmaya, yüksek gerilim deney donanımları üretilmeye başlanmıştır. 1923 yılında ilk 1 MV’lık alternatif gerilim deney donanımı Koh & Sterzel (bugünkü adı ile HIGHVOLT) tarafından yapılmıştır. Günümüzde en yüksek 3 MV’lar mertebesinde alternatif gerilim deney sistemleri bulunmaktadır [7].

Belirli standartlar ölçüsünde yapılan cihazların deneyleri için günümüzde pek çok yüksek gerilim laboratuvarı kurulmuştur. Bunlardan en önemlilerinden bazıları İtalya’daki CESI ve Hollanda’daki KEMA Laboratuvarlarıdır. Ülkemizde de İstanbul

Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı şu andaki haliyle 14 Temmuz 1978 tarihinden beri faaliyettedir.

2.2 Deney Transformatörleri İle Yüksek Alternatif Gerilim Üretimi

Elektrik enerjisinin yüksek gerilimlerde iletimi, bu gerilimlerin ölçümü, yüksek gerilim şebekelerindeki yüksek akımların ölçümü, kirlenmenin bu şebekelerdeki izolatörlere etkisi, korona ve koronanın sebep olduğu kayıplar ve bunun gibi yüksek gerilimlerle ilgili pek çok durum ayarlanabilir bir gerilim kaynağına ihtiyaç duyar. Transformatör, bu ayarlanabilir gerilim kaynağı ihtiyacı ile ortaya çıkmıştır. Deney transformatörleri ise deney amaçlı geliştirilmiş yüksek gerilim transformatörleridir.

Deney transformatörleri kısa süreli ya da sürekli yüksek alternatif gerilim kaynağı olarak tasarlanırlar. Çalışma frekansları genel olarak 50-60 Hz'dir ancak besleme frekansına göre daha yüksek frekanslarda da çalışabilmektedirler. Özellikle yüksek gerilim sargıları kısa devrelere ve yüksek gerilime karşı dayanıklı ve iyi yalıtılmıştır. Buna karşı deney transformatörleri genelde anma güçlerinden daha düşük güçlerde çalışırlar. Bunun en önemli nedeni sargılar arası ısınma ve buna bağlı elektriksel dayanımının azalmasıdır [8].

Deney transformatörleri düşük kısa devre gerilimine sahiptir ancak bu değer kısa devre deneylerine bağlı olarak çok düşük olmamalıdır. Bu nedenle transformatörler, kısa devre akımı, anma akımının 20 katı ile sınırlandırılacak şekilde tasarlanırlar. Çıkış gücü yüksek ve düşük kısa devre gerilimli transformatörler genelde kirli ortam deneylerinde kullanılırlar. Bu tip deneyler için daha çok paralel bağlı deney transformatörleri tercih edilir [8].

Deney transformatörleri soğutma olarak genelde yağlı ya da kuru (reçineli) olarak imal edilirler. Ancak çok büyük transformatörler seri kullanımda ek soğutma sistemlerine ihtiyaç duyabilirler.

Deney transformatörleri genelde iki ya da üç sargılı düzendedirler. İki sargılı düzende sadece uyarma ve yüksek gerilim sargısı bulunmaktadır. Uyarma sargısı, devrenin alçak gerilim tarafını oluşturur. Genelde tek katlı deney transformatörlerinin yapısı iki sargılı düzene göredir. Bir transformatörü diğerine bağlayan sargı yapısı olmadığı için bu tip transformatörlerle kaskad bağlantı yapılamaz. Üç sargılı düzende ise alçak gerilim, yüksek gerilim, uyarma olmak üzere

üç sargı bulunur. Bu tip transformatörlerde uyarma (kuplaj) sargısı yüksek gerilim sargısı düzeyinde bulunarak bir diğer transformatörle kaskad bağlantı olanağı sunar.

2.2.1 Tek katlı deney transformatörü ile yüksek alternatif gerilim üretimi

Tek katlı deney transformatörleri ile yüksek alternatif gerilim üretimi, deney gerilimi 300 kV ve altında ise ekonomik açıdan tercih edilen bir yöntemdir. 750 kV'a kadar kullanımı olmakla beraber bu tür transformatörlerin maliyeti gerilimle hızla artmaktadır (Şekil 2.3). Özel yapım olarak 300 kV üzerinde 3000 kV gerilim değerine kadar üretimleri mevcuttur [9].

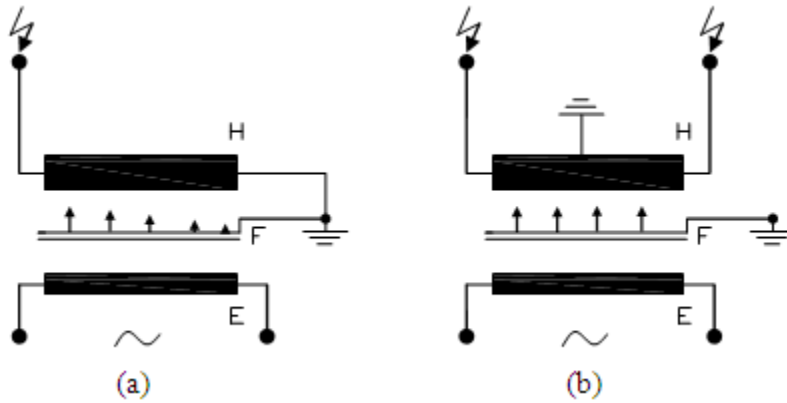


Şekil 2.3 : Kazan tipi 750 kV, 2100 kVA deney transformatörü [9]

Bu tip deney transformatörleri tasarım açısından tek fazlı güç transformatörlerine benzemektedir. Ancak yüksek gerilim sargıları daha iyi yalıtılmakla beraber daha küçük akımlarda çalışma için üretilirler. Eşdeğer empedans değerleri genellikle %5 civarındadır. Ayrıca çıkış gerilimi dalga şeklinin bozulmaması için transformatörün mıknatıslanma akımı düşük tutulur [10].

Yüksek alternatif gerilimlerin üretilmesinde kullanılan transformatörlerin yüksek gerilim sargısının bir ucu genellikle topraklıdır. Şekil 2.4, iki ana deney transformatör devresini göstermektedir. Şekildeki okların boyu, H yüksek gerilim sargısı ile E uyarma sargısı veya F demir çekirdek arasındaki yalıtımda elektriksel zorlanmanın genliği ile orantılıdır. Yalıtılmış yüksek gerilim sargısı gerektiğinde bir

bağlantı ucunda veya orta uça toplanabilir. Son durumda çıkış gerilimi toprağa göre simetrik olur [11].



Şekil 2.4 : Tek katlı deney transformatör devreleri

(a) Bir uçta YG çıkışı olan transformatör; (b) İki uçta YG çıkışı olan transformatör
E: Uyarma sargısı; H: Yüksek gerilim sargısı; F: Demir çekirdek [11].

Deney gerilimi 300 kV ve üstü olduğu durumlarda tek katlı deney transformatörleri, yalıtım güçlüğü ve maliyeti nedeniyle ekonomik olmaktan çıkar. Bununla beraber transformatörün taşınması açısından da problemler oluşur. Bu tip sorunları önlemek için kaskad bağlı deney transformatörleri kullanılır.

2.2.2 Kaskad bağlı deney transformatörü ile yüksek alternatif gerilim üretimi

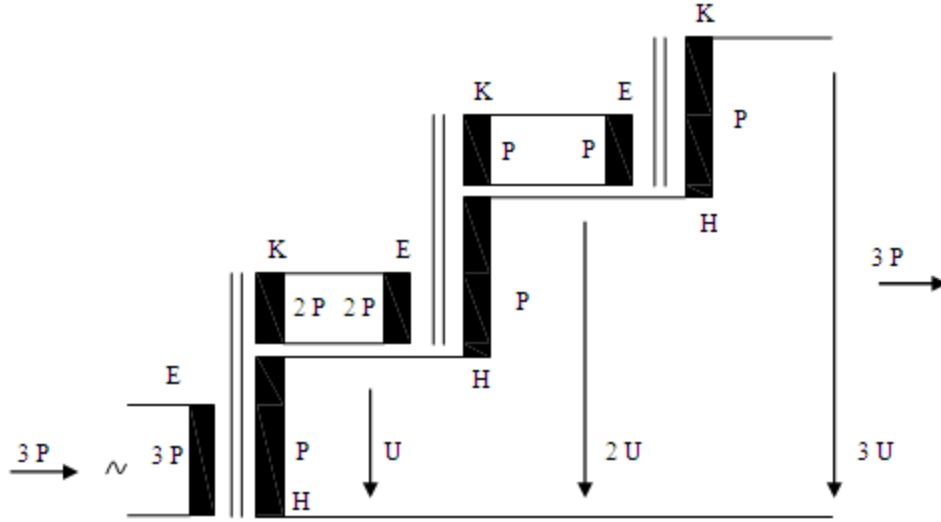
Kaskad bağlı deney transformatörleri, ilk olarak 1915 yılında W. Petersen, F. Dessauer ve E. Welter tarafından kullanılmıştır. Genelde iki ile dört kat arası kaskad bağlantı yapılmakla beraber en yaygın olanı üç katlı kullanımıdır (Şekil 2.5). Temel olarak yüksek gerilim tarafı yani sekonder sargıları, birbirine seri bağlı çeşitli transformatörlerden oluşan kaskad yapıda, alçak gerilim tarafı yani primer sargılar, kendinden önceki transformatörün uyarma sargısı üzerinden beslenir (Şekil 2.6). Kaskad bağlı deney transformatörlerinin alçak gerilim ve uyarma sargısından, yüksek gerilim sargısına göre daha büyük akım geçer. Aynı şekilde transformatörün katları, transformatörün çıkışından çekilen gücü katlı olarak paylaşırlar. Örneğin üç katlı bir deney transformatörünün çıkışından P gücü çekiliyorsa, ikinci kattan $2P$, üçüncü kattan ise $3P$ gücü çekilir.



Şekil 2.5 : 1500 kV, 1,2 A, 60 Hz, 4 katlı kaskad deney transformatörü [12]

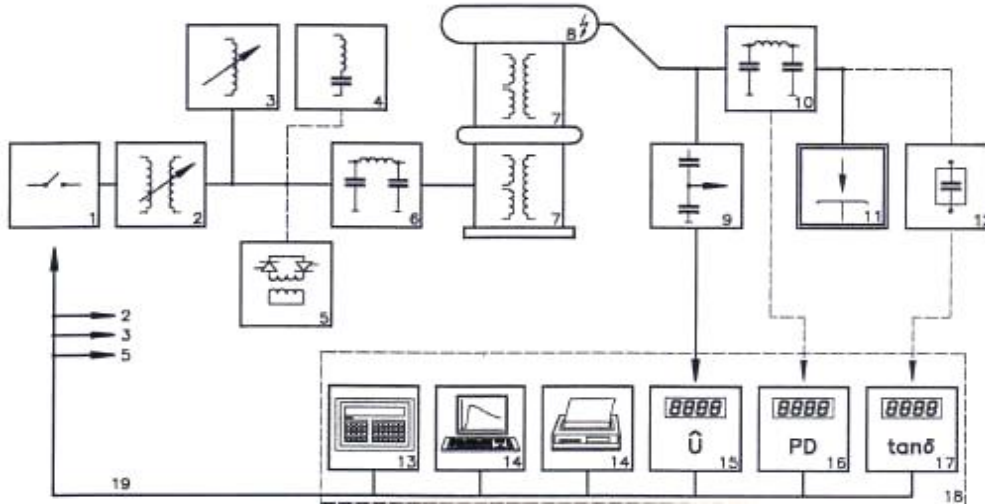
Şekil 2.7’de kaskad bağlı deney transformatörleri için genel yapıda bir deney düzeni gösterilmektedir. Sistemin ana bileşeni tek katlı ya da kaskad bağlı olan deney transformatörüdür (7). Elektrik alan dağılımının düzgünlüğü ve kısmi boşalmaların (korona) önlenmesi açısından yüksek gerilim elektrotlarının (8) iyi tasarlanması gereklidir. Transformatör anahtarlama-koruma donanımı (1) ve gerilim regülatörü (2) üzerinden beslenir. Eğer deney frekansı, transformatörün beslendiği şebeke frekansından farklı ise, sistemde regülatör olarak bir motor-generatör seti kullanılır. Kapasitif yük akımlarını önlemek için deney düzeneğinin alçak gerilim tarafına (özel durumlarda yüksek gerilim tarafına da) kompanzasyon reaktörleri (3) yerleştirilebilir.

Deney cisminin uçlarındaki gerilimin sinüzoidal şeklini korumak için transformatörün alçak gerilim tarafına harmonik filtreleri (4) yerleştirilir [14].



Şekil 2.6 : Üç katlı kaskad bağlı deney transformatörü [13]

H: yüksek gerilim sargısı; E: uyarma veya besleme sargısı K: kuplaj (tersiyer) sargısı



Şekil 2.7 : Kaskad bağlı deney transformatörleri deney düzeneği [14]

- (1) Anahtarlama-koruma donanımı; (2) Gerilim regülatörü;
- (3) Alçak gerilim kompanzasyon reaktörü; (4) Filtre;
- (5) Ani durdurma ünitesi; (6) Alçak gerilim alçak geçiren filtre;
- (7) Kaskad bağlı transformatör grubu; (8) Yüksek gerilim elektrodu;
- (9) Gerilim bölücü; (10) Kuplaj kondansatörü ve filtre grubu;
- (11) Deney cismi; (12) Basınçlı gazlı kondansatör; (13) Kontrol ünitesi;
- (14) Bilgisayar ve yazıcı; (15) Tepe değer voltmetresi;

(16) Kısmi boşalma ölçüm cihazı; (17) $\tan \delta$ ölçüm cihazı;

(18) Kontrol ve ölçme otomasyonu;

(19) Kontrol ünitesi için bara sistemi (PROFIBUS)

Deney cisminde (11) korona ölçümleri yapılacaksa gerilim bölücü (9) ile beraber yüksek gerilim filtresi ve kuplaj kondansatörü (10) kullanılmaktadır. Ayrıca kayıp faktörü ve kapasite ölçümlerinde basınçlı gazlı kondansatör (12) kullanılmaktadır. Cismde delinme durumunda oluşabilecek yüksek gerilimlerde, ani durdurma ünitesi (5) devreye girerek bu gerilimler sınırlandırılır (10). Kontrol ünitesi (13) PLC'ler ve bunlara bağlı programlardan oluşur. Bara sistemi (19) ile regülatör, anahtarlama ünitesi gibi donanımlara bağlanabilir (10).

3. REZONANS TRANSFORMATÖRÜ İLE YÜKSEK ALTERNATİF GERİLİM ÜRETİMİ

Önceki bölümlerde anlatılan deney transformatörleri, deney sırasında bağlı oldukları kaynaktan anma güç almak için tasarlanmışlardır. Ancak bu tip transformatörlerin kullanıldığı deneylerde karşılaşılan olumsuzluklarından biri de çıkış geriliminde oluşan harmoniklerdir. Transformatörün manyetik karakterinden oluşan bu durum, filtrelenmediği takdirde bu tip deney aygıtlarının bazı deneyler için kullanılamaz duruma gelmesine neden olur.

Alternatif gerilim deney sistemlerinde denenen cihazların karakterine bağlı olarak deneylerinin yapılması, deney sonuçlarının doğruluğu açısından önem taşır. Denenen cihazlar genelde ohmik ve kapasitif karakter taşırlar. Ancak her cihazda bu durum değişiklik gösterir. Kapasite yanında yüksek direnç özelliği taşıyan cihazların deneylerinde, deney gerilimine bağlı olarak, tek katlı ya da kaskad bağlı deney transformatörleri tercih edilmelidir. Aynı şekilde değişken dirençli (kirlili, nemli) cihazların deneylerinde de küçük kısa devre gerilimine sahip deney transformatörleri tercih edilmelidir [15].

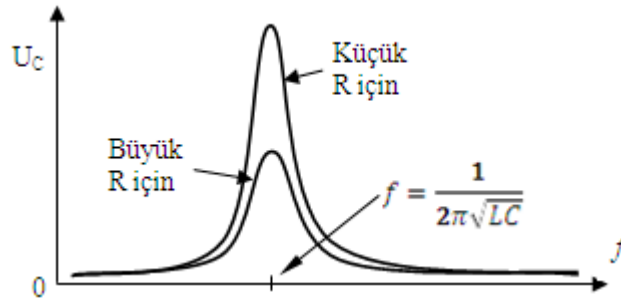
Denenen cihazda kapasitif karakter, ohmik karaktere oranla ön plana çıkmaya başladığında normal deney transformatörlerine göre rezonans transformatörleri büyük avantajlar sağlarlar.

3.1 Rezonans Teorisi

Elektriksel rezonans, belirli bir frekansta devre içindeki kapasitif ve endüktif reaktansların birbirine eşit olma durumudur. Temel olarak, üzerinden geçen akımla manyetik alan oluşturan endüktans üzerinden beslenen kapasite, boşalma sırasında oluşturduğu akımla tekrar endüktans üzerinde bir manyetik alan meydana getirir ve devredeki kapasitif ve endüktif reaktanslar rezonans frekansında birbirine eşitlenir. Bu şekilde rezonanstaki sistem bir anlamda elektriksel bir sarkaç olarak düşünülebilir. Reaktif güç akışı kapasitif ve endüktif elemanlar arasında salınım

yaptığı için sistem bağlı olduğu kaynaktan reaktif güç çekmez. Böylece rezonansda kaynaktan çekilen güç devredeki dirençlerde harcanan güce eşit olur.

Temel çalışma ilkesi rezonans teorisi üzerine kurulan rezonans transformatörleri, özellikle kapasitif karakterdeki elektriksel cihazların (kablo, transformatör, generatör, gaz yalıtımlı anahtarlama malzemeleri, vs) deneylerinde tercih edilmektedir. Rezonans transformatörlerinin deneylerde sağladığı en büyük avantajı düşük güç ihtiyacıdır. Burada kalite faktörü (Q) kavramı ortaya çıkmaktadır. Q sabiti sistemde rezonans durumunda deney cisminde oluşan gerilimin çarpım katsayısıdır. [15]. Daha da genellenirse, Q, deney gerilimi ile besleme gerilimi arasındaki orandır [16].



Şekil 3.1 : Rezonans devresinin çıkış gerilimi - frekans eğrisi [17]

Şekil 3.1’de görülen eğride, çıkış geriliminin frekansa bağlı değişimi gözlenmektedir. Devre rezonansda iken, eğri en yüksek değeri, dolayısı ile de gerilim en yüksek değerini alır. Çıkış gerilimi kalite faktörü (Q) ile orantılı olduğundan, Q değeri arttıkça, eğrinin şekli de keskinleşmektedir. Devre içerisindeki dirençler ise gerilim düşümü yarattıklarından, özellikle rezonans devreleri için değerleri ne kadar küçük olursa çıkış gerilimi de o derecede büyük olur [17].

Rezonans transformatörleri ile sabit frekanslı (50-60 Hz) yüksek alternatif gerilimler elde edilebileceği gibi değişken frekanslı (20-300 Hz) yüksek alternatif gerilimler elde etmek de mümkündür. Bunun için endüktans ayarlı ve frekans ayarlı olmak üzere iki tip rezonans transformatörü bulunmaktadır.

3.2 Endüktans Ayarlı Rezonans Transformatörleri

Endüktans ayarlı rezonans transformatörleri, devrede bulunan ayarlı yüksek gerilim reaktörü aracılığı ile, devrenin sabit frekansta (50-60 Hz) rezonansa girmesi ile yüksek alternatif gerilim üretimini sağlarlar.

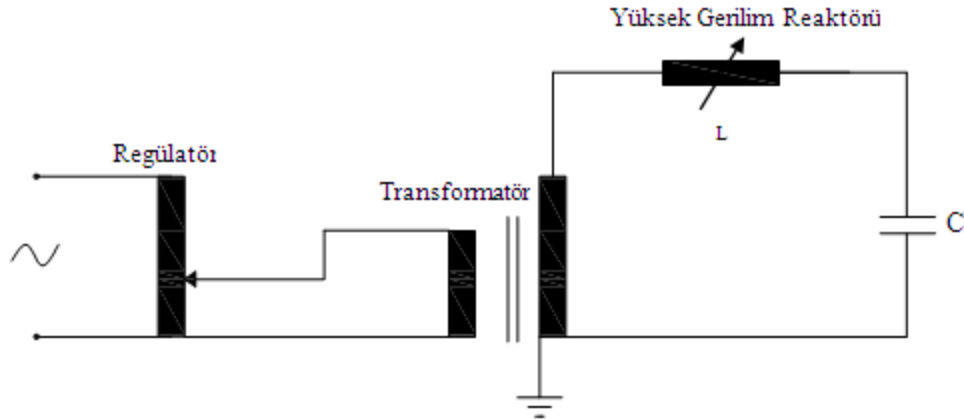
Tarihsel olarak, elektrik mühendisleri bu tip gerilim ayarlı devreleri zayıf akım mühendisliğinin ortaya çıktığı 1935-1945 yılları arasında incelemeye başlamışlardır. Bununla beraber 1940 yılında İngiltere’de toplanan Ferranti Firması mühendisleri ile Norveç Standard Telefon og Kabelfabrik mühendislerinin 600 kV, 2400 kVA’lık bir seri rezonans deney donanımının uygulamadaki ilk örneğini 1950 yılında tamamladıkları görülmektedir [3].

Kablo üretim sanayi, başlangıçtan beri rezonans sistemleri ile ilgilenmektedirler. Çünkü bu tip sistemler uzun kablolar gibi büyük kapasitif yüklerde güç katsayısı düzeltilmesi yaparak, uygulamada daha pratik ve ekonomik olmaktadır.

Devredeki elemanların konumuna göre oluşturulmuş seri ve paralel olmak üzere iki tip rezonans transformatörü bulunmaktadır.

3.2.1 Seri rezonans transformatörü

Seri rezonans transformatörünün genel yapısı şu şekildedir (Şekil 3.2);



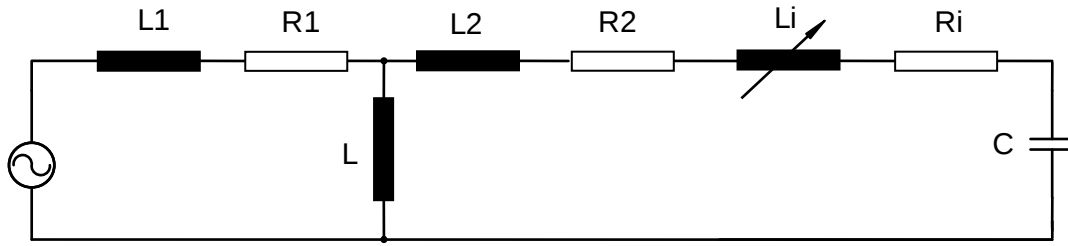
Şekil 3.2 : Seri rezonans transformatörü [4]

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, seri rezonans transformatörleri regülatör, transformatör, ayarlı endüktans değeri için bir yüksek gerilim reaktörü ve ona seri bağlı deney cisminin (C) oluşur. Regülatör bağlı olduğu transformatöre gerilimi değiştirme olanağı sağlar. Transformatörün yüksek gerilim sargısından sonraki kısmı devrenin yüksek gerilim tarafını oluşturur. Regülatör ile rezonans devresini birbirine bağlayan transformatör, aynı zamanda iki taraf arasında galvanik yalıtım da sağlamış olur [4].

Devre üzerinde görülen kapasitif yük (C), sistemdeki deney cismini, gerilim bölücü, kaçak kapasiteleri ve eğer kullanılıyorsa filtre içindeki kapasitelerin

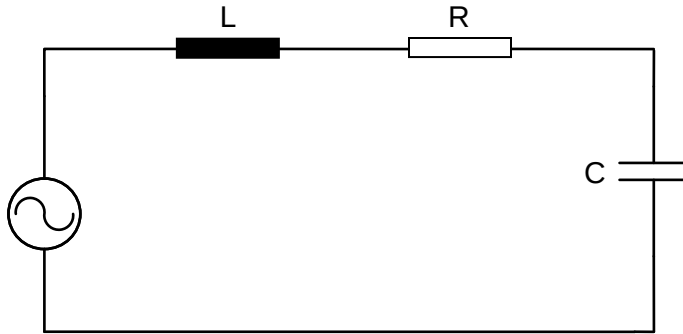
bütününü temsil eder. Seri rezonans transformatöründe, rezonans konumunun oluşabilmesi için devreye seri bağlı bir kapasitif grup olmak zorundadır.

Bir cisim denenirken, yüksek gerilim reaktörü ayarlanarak sistemin endüktif reaktansı cismin kapasitif reaktansına eşitlenerek rezonans konumu elde edilir. Yüksek gerilim reaktörünün endüktansı, içindeki sargıların bağlı bulunduğu demir çekirdekteki hava aralığının ayarlanması ile değiştirilir. Bu şekilde sistemde sabit frekanslı seri rezonans sağlanır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Bir transformatör, reaktör ve deney kapasitesinden oluşan devrenin eşdeğer devresi

L, transformatörün şönt reaktansını göstermektedir. Genellikle bu değer, L_1 ve L_2 'ye oranla oldukça büyük olup, ihmal edilir. Buradan $L = L_1 + L_2 + L_i$ ve $R = R_1 + R_2 + R_i$ alındığında Şekil 3.4 elde edilir;



Şekil 3.4 : Basitleştirilmiş eşdeğer devre

Rezonans durumunda;

$$X_L = X_C \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (3.1)$$

Buradan rezonans frekansı;

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Rastgele oluşan rezonans, aniden uygulanması istenen gerilim değerinin 20-50 katı gibi bir değer alması sonucu tehlikeli olabilir. Bu durum en çok düşük gerilimli büyük akımlı, yani büyük kapasitif yüklerde özellikle kablo deneylerinde patlamalara yol açabilir. Seri rezonans devreleri ile rezonans durumu önceden ayarlanarak, istenmeyen rezonans önlenmiş olur [3].

Endüktans ayarlı rezonans devrelerinde bu değer sabit olup, şebeke frekansı olan 50 ya da 60 Hz'e eşittir. Devrede, U giriş geriliminde, deney cismi üzerindeki gerilim;

$$U_C = X_C \times I = X_C \times \frac{U}{Z} = X_C \times \frac{U}{R + j(X_L - X_C)} \quad (3.3)$$

Z , devrenin toplam empedansını; R , devre üzerindeki toplam seri direnci göstermektedir. Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olacağı için;

$$U_C = \frac{X_C}{R} \times U = \frac{1/\omega C}{R} \times U = \frac{1}{\omega CR} \times U \quad (3.4)$$

elde edilir. Eşitlikteki $\frac{1}{\omega CR}$ değeri sistemin Q değerini (kalite faktörünü) oluşturur. Buradan;

$$U_C = Q \times U \quad (3.5)$$

$$\frac{U_C}{U} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{\omega L}{R} = Q \quad (3.6)$$

yazılabilir. Rezonans konumunda sistemdeki endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olduğu için, devreden geçen akım;

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.7)$$

olur. Devre üzerinde sadece direnç olduğu için sistemde beslemeden çekilen güç faktörü $\cos \varphi = 1$ olur. Çıkış gücü ile giriş gücü arasında şu bağıntı elde edilir;

$$S_o = I \times U_C = Q \times I \times U = Q \times P_o \quad (3.8)$$

Genelde düşük kayıplı, kapasitif deney cisimlerin (kablo, gaz yalıtımlı anahtarlama elemanları, geçit izolatörleri) deneylerinde Q katsayısı 50-80 değerleri arasındadır. Q kalite faktörü, deneyi yapılacak olan cisme göre belirlenir. Örnek olarak, ohmik karakteri baskın ya da nem, kir gibi cismin direncinde değişiklik olmasına neden olan

faktörlerin etkili olduğu cisimlerde yapılan deneylerde Q katsayısı 10-20 gibi düşük değerlere düşer. Bu durumda gerilimi yükseltmek için kullanılan transformatör, deney geriliminin çoğunu kendi başına sağladığı için rezonans devresinin de kullanımı pek bir anlam ifade etmeyebilir. Bu gibi değişken dirençli ya da baskın ohmik karakterdeki cihazların deneylerinde tek katlı ya da kaskad bağlı deney transformatörleri daha verimli olmaktadır [4].

Deney cisimleri ile bunların dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) ve $Q_{YÜK}$ arasındaki ilişki şu şekildedir;

Çizelge 3.1: Malzemeye göre $\tan \delta$ ve $Q_{YÜK}$ değerleri [18]

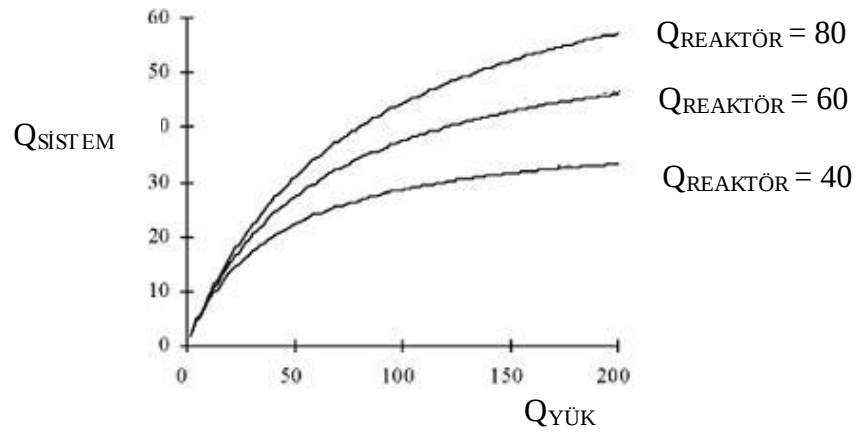
Deney Cismi	$\tan \delta$	$Q_{YÜK}$
SF6 Yalıtımlı Şalt Malzemeleri	< 0.0001	$> 10,000$
XLPE Kablo	< 0.001	$> 1,000$
EPR Kablo	~ 0.005	~ 200
PVC Kablo	~ 0.05	~ 20
Kompanzasyon Kondansatörleri	< 0.01	> 100
Generatörler	0.1	10

Teoride kayıpsız bir kapasite olarak ifade edilen deney cismi, uygulamada bir direnç ile kapasiteden oluşmaktadır. Kayıpsız kapasitede 90^0 olan akım ile gerilim arasındaki faz farkı, uygulamada cisimdeki kayıp direnç ile cisim üzerinden geçen akım ile gerilimin arasındaki faz farkının 90^0 'den daha küçük olmasına neden olur. Faz açısını 90^0 'ye tamamlayan açığa δ , bu açının tanjantına da $\tan \delta$ dielektrik kayıp faktörü adı verilir. Bu katsayı, cisimlerin ohmik karakterlerinin yanı sıra kalite faktörlerinde de önemli rol oynar [19].

Devre üzerinde sadece deney cisminin değil, regülatör, transformatör ve ayarlı reaktörün de kayıpları sistemin kalite faktörü üzerinde etkilidir. Dielektrik kayıp katsayısı düşük cisimlerin kalite faktörü yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere oldukça yüksektir. Ancak yükün Q değeri devredeki reaktörün Q değeri ile sınırlıdır. Genelde kalite faktörü 40 ile 80 arasında tasarlanan ayarlı yüksek gerilim reaktörleri, sistemin de Q değerini belirlerler. Buradan şu bağıntı ortaya çıkmaktadır;

$$Q_{SİSTEM} = \frac{Q_{REAKTÖR}}{1 + \frac{Q_{REAKTÖR}}{Q_{YÜK}}} \quad (3.9)$$

Şekil 3.5'te yük ve reaktör kalite faktörlerinin sistemin kalite faktörüne etkisi gösterilmektedir. Uygulamada, seri rezonans transformatörleri ile yapılan deneyler, ayarlı yüksek gerilim reaktörünün endüktif reaktansının (X_L) ayarlanıp sistemin kapasitif reaktansına (X_C) eşitlenmesi ile rezonans konumuna getirilmesi ile başlar.



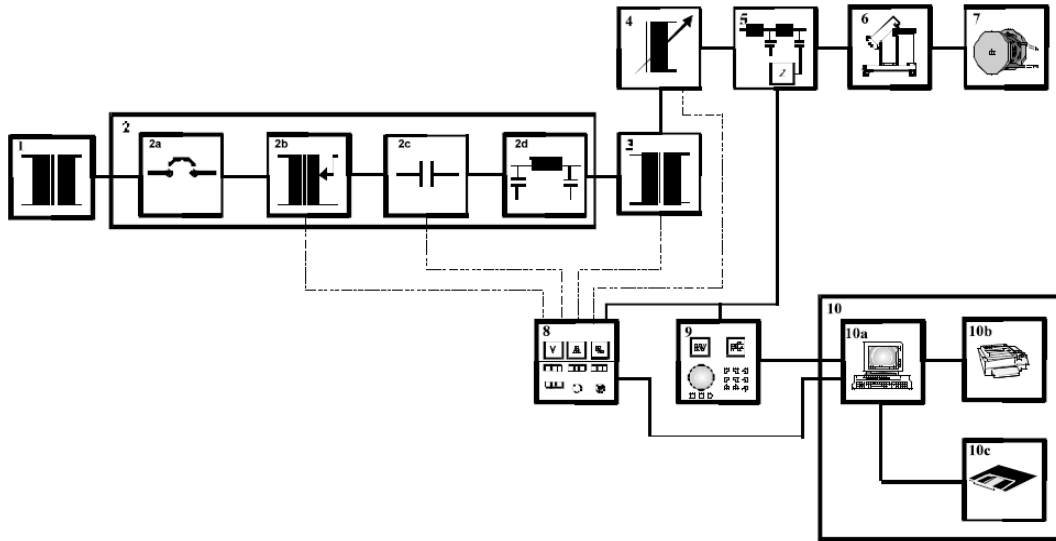
Şekil 3.5 : Sistemin kalite faktörüne kayıpların etkisi [18]

Genelde düşük gerilimde elde edilen bu konum, daha sonra regülatöre bağlı transformatör ile gerilim seviyesinin istenen değere, deney gerilimine getirilerek deneyin, normal deney transformatörü ile yapılan deneyler gibi devam etmesini sağlar. Deney esnasında, deney cisminde delinme meydana gelirse, devre rezonanstan çıkar ve deney cisminin uçlarında rezonanstan kaynaklanan yüksek gerilim ortadan kalkar. Ancak, deney cisminin uçlarında transformatörden kaynaklanan gerilim vardır.

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, seri rezonans transformatörleri kaskad bağlanarak çıkış geriliminde 2000 kV'a kadar istenen değer elde edilebilir.



Şekil 3.6 : Kaskad bağlı seri rezonans transformatörü [15]



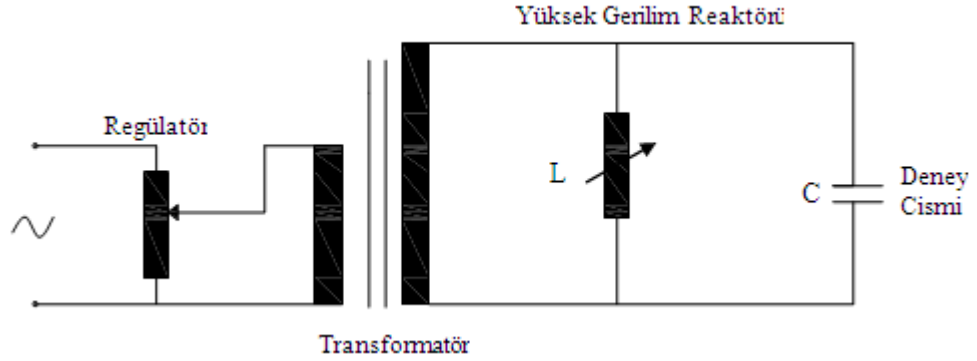
Şekil 3.7 : Seri rezonans transformatörü deney düzeni [18]

- 1: Yalıtım Transformatörü; 2: Güç Besleme Bölümü; 2a: Kesici;
 2b: Gerilim Regülatörü; 2c: Kontaktör; 2d: Filtre; 3: Transformatör;
 4: Ayarlı Yüksek Gerilim Reaktörü
 5: Yüksek Gerilim Filtresi (Kısmi Boşalma Ölçümleri için)/ Gerilim Bölücü;
 6: Kablo Başlığı; 7: Deney Cismi; 8: Kontrol Paneli;
 9: Kısmi Boşalma Ölçü Aleti; 10: Bilgisayar Kontrolü;
 10a: Bilgisayar; 10b: Yazıcı; 10c: Disk Sürücü

Şekil 3.7’de görülen deney düzeni, seri rezonans transformatörü ile yapılan tipik bir kablo deneyinin düzenidir. Şekilde temel olarak gösterilen donanımlar yerine yapılan deneye göre farklı elemanlar yerleştirilebilir [18].

3.2.2 Paralel rezonans transformatörü

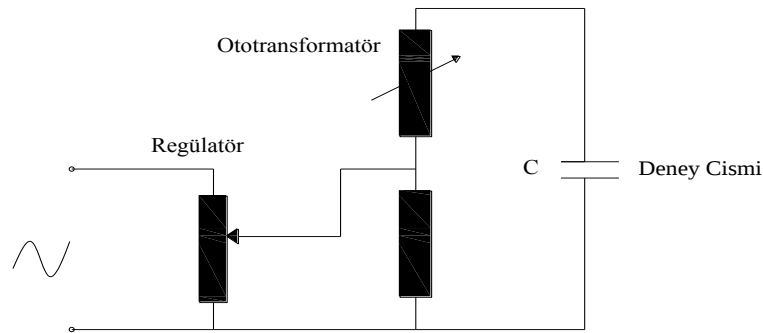
Paralel rezonans transformatörünün yapısı şu şekildedir (Şekil 3.8);



Şekil 3.8 : Paralel rezonans transformatörünün genel yapısı [4]

Seri rezonans transformatörüne benzer şekilde, paralel rezonans transformatörü bir regülatör ve ona bağlı transformatör ile ayarlı yüksek gerilim reaktörü ve deney cisminden oluşmaktadır. Seri rezonanstaki farklı olarak, devre üzerinde yüksek gerilim reaktörü ve deney cismi, birbirlerine ve devreye paralel bağlanmaktadır.

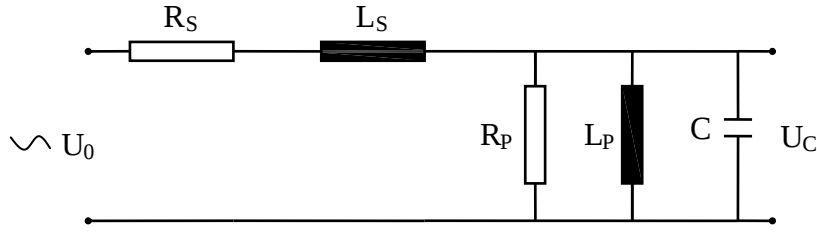
Uygulamalarda, devre üzerindeki transformatör ve ayarlı reaktör genelde bir ototransformatör olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.9). Böylece sistem daha pratik ve kullanışlı hale gelmektedir [4].



Şekil 3.9 : Ototransformatör yapılı paralel rezonans transformatörü [4]

Rezonans konumu, aynı seri rezonans devresindeki gibi yüksek gerilim reaktörü ayarlanarak sistemin endüktif reaktansı cismin kapasitif reaktansına eşitlenir. Reaktörün endüktansı, sargısı içindeki demir çekirdeğin hava aralığı değiştirilerek

ayarlanır. Alternatif gerilim deney devreleri genel olarak Şekil 3.10’de olduğu gibi gösterilebilir;



Şekil 3.10 : Alternatif gerilim deney devreleri genel yapısı [4]

Buradan cisim üzerindeki gerilim U_C ;

$$U_C = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_P} + \frac{L_S}{L_P} - \omega^2 L_S C + j\omega \frac{L_S}{R_P} + j\omega R_S C + \frac{R_S}{j\omega L_P}} \times U_0 \quad (3.10)$$

Yukarıda açıklanan şekli paralel rezonans transformatörüne uygularsak, rezonans konumunda;

$$X_{L_P} = X_C \quad \omega L_P = \frac{1}{\omega C} \quad (3.11)$$

$$U_C = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_P} + j\omega \frac{L_S}{R_P}} \times U_0 \quad Q = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_P} + j\omega \frac{L_S}{R_P}} \quad (3.12)$$

Paralel rezonans transformatörü, çıkış gerilimi seri rezonansa göre daha sabit olduğu için genelde büyük güçlü, yüksek akımlı deneylerde; büyük generatör sargıları, korona kayıplı cihazların deneylerinde tercih edilir. Ayrıca paralel yerleşimin bir avantajı olarak, devreye yük bağlı değil iken, sistem tam güçte çalıştırılabilir. Bu da sistemdeki elemanların kalibrasyonu ve kısmi boşalmalarının ölçümü açısından oldukça avantajlıdır [15].

Şekil 3.11’de görülen kazan tipi rezonans transformatörü hem seri hem de paralel rezonans konumunda çalıştırılabilir. Bu tiplerde, yüksek gerilim reaktörü, büyük kapasiteli cisimlerin düşük gerilimdeki deneylerinde ayarlanabilmek için bir ya da birkaç çıkış ucu ile beraber üretilmektedir. Genelde 350-400 kV gerilim değerleri için ekonomik olduğu diğer kaskad bağlı rezonans transformatörlerine oranla tercih edilmektedir [15].



Şekil 3.11 : Kazan tipi paralel-seri rezonans transformatörü [15]

Yüksek gerilim üretiminde şimdiye kadar incelenen sistemler genel anlamda bir laboratuvar ortamında kullanılabilen deney sistemleridir. Bunları genel olarak karşılaştırmak istersek, sonuçlar Çizelge 3.2’ deki gibi elde edilir.

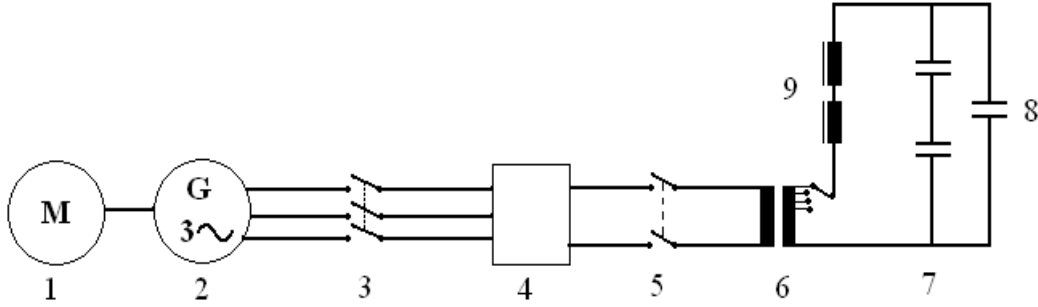
Çizelge 3.2: Deney sistemleri karşılaştırılması [18]

Yüksek Gerilim Deney Transformatörü	Seri Rezonans Transformatörü	Paralel Rezonans Transformatörü
Yüksek giriş gücü ihtiyacı	Giriş gücü ihtiyacı, deney gücünün yaklaşık %2-5'i	Giriş gücü ihtiyacı, deney gücünün yaklaşık %2-5'i
Filtrelenmediği takdirde, çıkış gerilimi dalga şeklinde bozulma (hamonikler)	İhmal edilebilir hamonik düzeyi	Giriş gerilimindeki hamonik, çıkış geriliminde de görülür
Yüksek hata akımı dayanımı	Yapısal akım sınırlandırma	Yüksek hata akımı dayanımı
Delinme sonrası aşırı gerilimler problem olabilir	Delinme sonrası sistem rezonanstan çıktığı için, cismin uçlarında aşırı gerilim oluşmaz.	Delinme sonrası aşırı gerilimler problem olabilir
Her karakteristikteki cisim için kullanılabilirlik	Rezonans oluşumu için kapasitif cisim deneylerinde kullanılabilir	Kapasitif cisimlerin yanında, daha baskın ohmik karakteristikteki cisimlerin deneylerinde kullanılabilirlik
Aşırı yükleme dayanımı yüksek	Aşırı yükleme yapılamaz	Aşırı yükleme dayanımı yüksek

3.3 Frekans Ayarlı Rezonans Transformatörleri

Şimdiye kadar incelenen rezonans transformatörleri, genelde laboratuvar deneylerinde kullanılan, yapısal olarak büyük, taşınmaya elverişli olmayan sistemlerdir. Ancak 1970’li yılların sonunda gaz yalıtımlı anahtarlama elemanlarının (GIS) saha

içerisinde denenebilmesi amacıyla geliştirilen frekans ayarlı rezonans transformatörleri, günümüzde özellikle yüksek ve orta gerilim yeraltı kablolarının saha deneylerinde en çok tercih edilen alternatif gerilim kaynağı haline gelmiştir [20]. Sistemin genel yapısı Şekil 3.12’de görülmektedir.

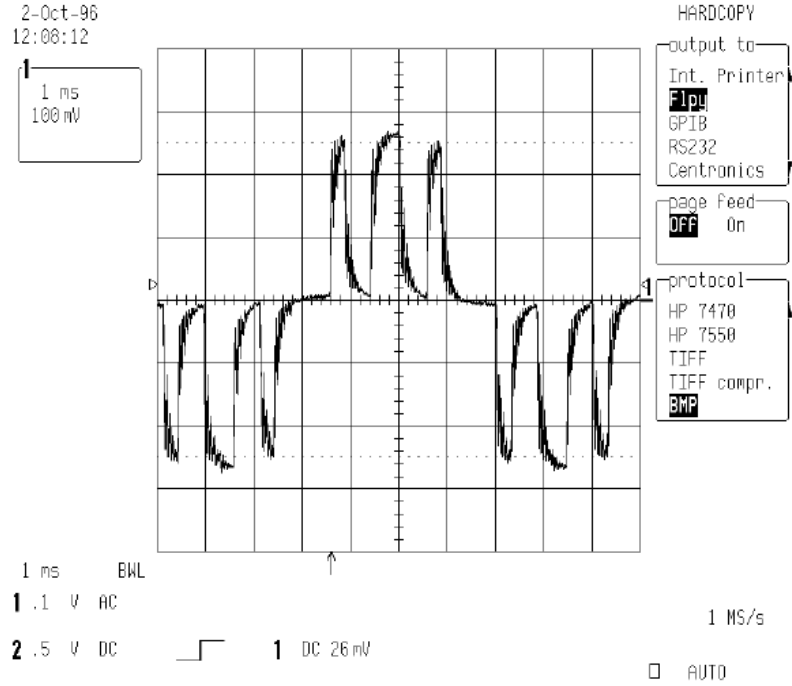


Şekil 3.12 : Frekans ayarlı rezonans deney sistemi [21]

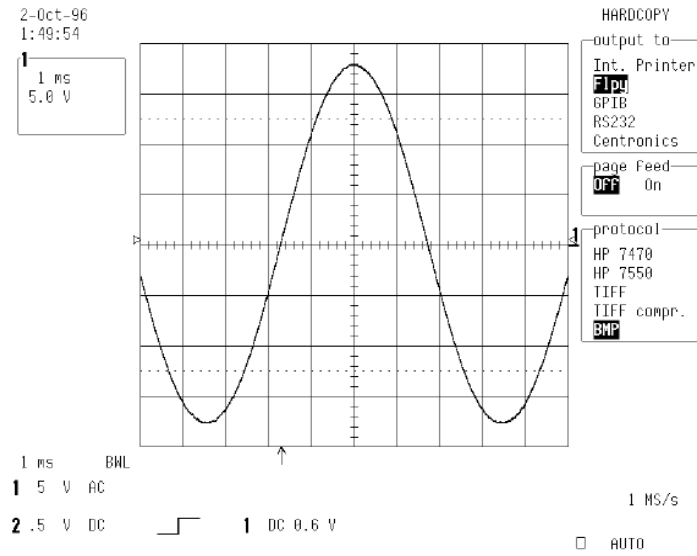
- 1: Motor; 2: Generatör; 3: Kesici;
- 4: PWM Frekans Çevirici;
- 5: Kontaktör;
- 6: Transformatör;
- 7: Kuplaj-Ölçme Kapasiteleri;
- 8: Deney Cismi;

Bir motor-generatör ile beslenen sistemde, kesicilerden sonra bağlanan PWM (darbe genişlik modülasyonlu) frekans çevirici ile frekans ayarı ve dolayısı ile gerilim ayarı yapılır [20]. Sinüzoidal olmayan gerilim dalga şekli ile çıkış geriliminde yarattığı tek dezavantaj, çıkış gerilimi üzerinde yarattığı harmoniklerdir.

IEC 60060-1 ve IEC 60060-2 standartlarına göre $\pm 5\%$ olması gereken $U_m / U_{rms} = \sqrt{2}$ değeri, sistemin şekilde görülen haliyle bu değer üzerine çıkabilmektedir. Ancak frekans çevirici ile transformatör arasına yerleştirilen filtre ile bu değer $\pm 1\%$ civarında tutulabilmektedir [21].



Şekil 3.13 : Darbe genişlik modülasyonlu frekans çeviricisinin çıkış gerilimi [21]



Şekil 3.14 : Rezonans sisteminin çıkış gerilim grafiği [21]

Frekans çeviriciden sonra transformatöre bağlanan sistem, seri rezonans transformatörü gibi çalışır. Rezonans konumunda $X_L = X_C$ olduğundan $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ eşitliği yazılabilir. Buradan rezonans frekansı;

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.13)$$

olarak elde edilir.

Sabit endüktans değerli yüksek gerilim reaktörü ile sistemin endüktansı değişmediği için, frekans ayarı sistemin kapasitesine göre yapılır. Yani frekans ayarlı rezonans transformatörlerinin frekans aralığı, deney cisminin kapasitesi ile orantılıdır.

$$\frac{C_{MAX}}{C_{MIN}} = \left(\frac{f_{MAX}}{f_{MIN}} \right)^2 \quad (3.15)$$

Buradan belirli bir kapasiteye sahip cisim için minimum deney transformatörü gücü;

$$P_{MAX} = 2\pi f_{MIN} \cdot C_{MAX} \cdot U_C^2 \text{ (kVA)} \quad (3.15)$$

Aynı şekilde;

$$C_{MIN} = \frac{1}{(2\pi f_{MAX})^2 \times L} \quad (3.16)$$

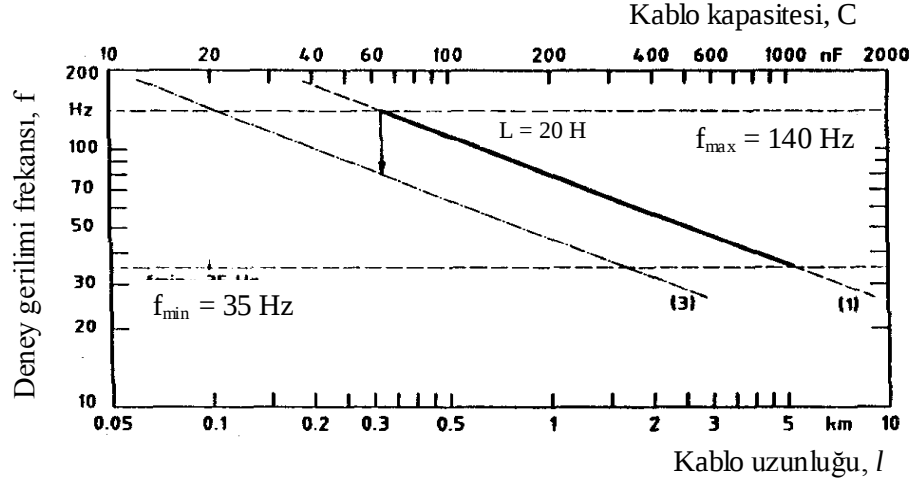
$$L = \frac{1}{(2\pi f_{MIN})^2 \cdot C_{MAX}} \quad (3.17)$$

elde edilir. İdeal durumda maksimum frekansa sisteme hiç yük bağlı olmadığı zaman ulaşılır. Ancak uygulamada sisteme zaten gerilim bölücü, kuplaj kondansatörü gibi kapasitif cisimler bağlı olduğundan, bunlar da bir bakıma temel yük kabul edildiği için, yukarıdaki bağıntı bunlar için bir tasarım ölçütüdür.

Dar frekans aralığındaki deneylerde, maksimum frekans düşük, deney cisminin kapasitesi büyük olduğunda taşınabilir sistem ekonomik olmaktan çıkar. Bu durumu önlemek için frekans, özellikle düşük kapasiteli cisimler için, yüksek tutulmalıdır. Aynı şekilde, deneylerde gaz yalıtımlı donanımlarda (GIS) temel yük ayarlanırken, saha içi kablo deneylerinde sorunu gidermek için bir örnek üzerinden gidilebilir [20].

110 kV XLPE kablunun maksimum 5 km ($C_{max} = 1 \mu F$ olacak şekilde alınırsa) uzunluğuna kadar 160 kV, $f_{min} = 35$ Hz ve $f_{max} = 71$ Hz aralığında deneyleri yapılacaktır. Bu frekans aralığında sistemin varolan $L = 40$ H'lik sabit endüktansı yeterli olmayacaktır. Çünkü, C_{max} ve f_{min} değerlerine göre belirlenen $L \approx 20$ H, $P_{max} = 5630$ kVA ve minimum deney kapasitesi $C_{min} = 0.251 \mu F$ (yaklaşık olarak 1,25

km'lik uzunluğa eşittir ki ölçülebilir en düşük kapasite için uzun bir değerdir), $f_{\min} = 35$ Hz ve $f_{\max} = 71$ Hz frekans aralığında ölçümler için uygun değildir.



Şekil 3.15 : $L = 40$ H sabit reaktörlü, frekans ayarlı rezonans transformatörü ile kablo deneyi frekans karakteristiği [22]

Bu nedenle kullanılacak olan reaktör, çift sargılı sarıların her biri $L = 40$ H ve paralel bağlanacak 5 km'lik kablolar için 20 H, seri bağlanacak $C_{\min} = 0,250 \mu F$, altı değerler için 80 H olacak şekilde tasarlanır. Frekans ayarlı deney sistemi ile istenen frekans değerleri arasında minimum 300 m (yaklaşık $0,062 \mu F$) uzunluğunda kablolarda deneyler yapılabilir. Hatta aynı durum üç fazlı kablunun fazları paralel bağlanıp gerçekleştirildiğinde, deneyi yapılabilen kablo uzunluğu 100 m'ye kadar düşmektedir.

Ayarlanabilir, anahtarlı bir reaktörle alınan verim, özellikle dar frekans aralıkları için, yüksek iken bu tip bir reaktör sabit endüktanslı bir reaktöre göre daha büyük, ağır ve daha pahalı olmaktadır.

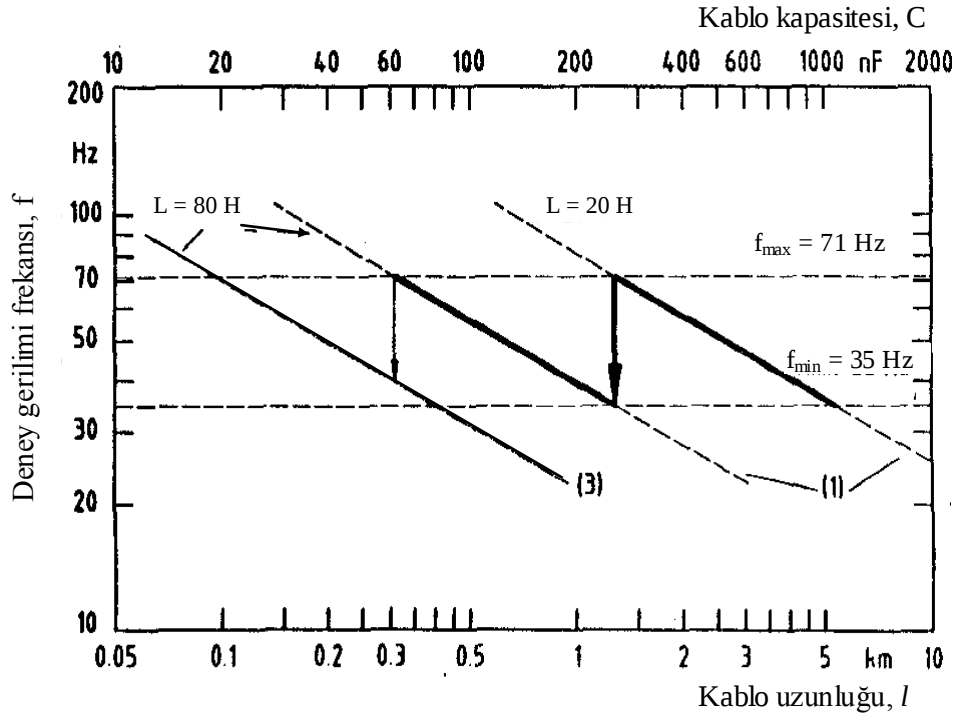
(1): Tek faz (C); (3): Kablunun 3 fazının birbirine paralel bağlı durumu ($C_3 = 3.C$)

$$\alpha = \frac{f_{MAX}}{f_{MIN}} \quad (3.18)$$

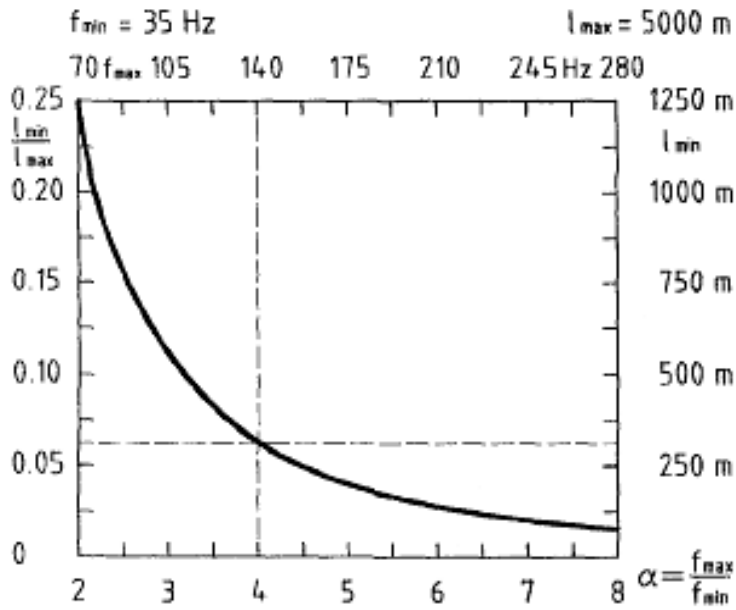
alınırsa,

$$\frac{C_{MIN}}{C_{MAX}} = \frac{1}{\alpha^2} \quad (3.19)$$

elde edilir. Böylece büyük α değerlerinde $f \leq f_{MAX}$ için daha kısa kablo deneyleri yapılabilir.



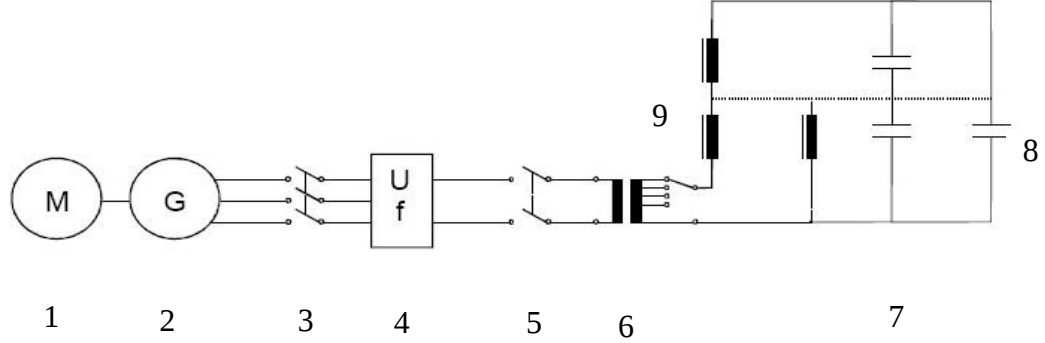
Şekil 3.16 : Anahtarlı reaktörlü, frekans ayarlı rezonans transformatörü ile kablo deneyi frekans karakteristiği [22]



Şekil 3.17 : Minimum ve maksimum frekans değerlerine bağlı deneyi yapılabilir kablo uzunluğu (kesikli çizgiler yapılan örneği göstermektedir) [22].

Yukarıda anlatılan örnek kısaca genellenirse, ayarlanabilir frekans aralığı hem deneyinin yapılacağı cisme hem de sistemin ekonomikliğine bağlıdır. Deneyin yapılacağı cismin kapasitesi ve deney gerilimine bağlı olarak sisteme ikinci bir yüksek gerilim reaktörü bağlanabilir. Özellikle sahada denenen 10 km'den uzun

kablolar için yaklaşık 150 kV gerilim seviyesine kadar reaktörler paralel bağlanırken daha yüksek gerilim seviyelerinde, yaklaşık 440 kV'a kadar, reaktörler seri bağlanmaktadır [23].



Şekil 3.18 : Frekans ayarlı rezonans deney sistemi [23]

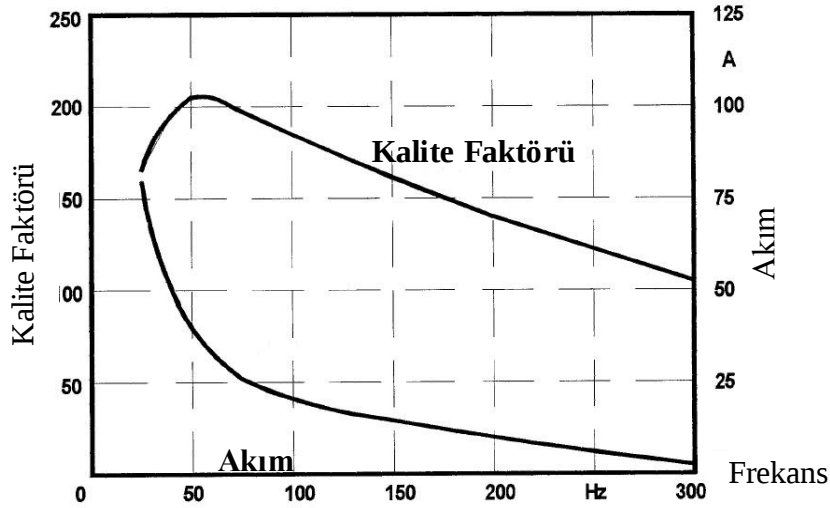
- 1: Motor; 2: Generatör; 3: Kesici; 4: PWM Frekans Çevirici;
 5: Kontaktör; 6: Transformatör; 7: Kuplaj-Ölçme Kapasiteleri;
 8: Deney Cismi; 9: Yüksek Gerilim Reaktörleri (Seri-Paralel)

Seri rezonans transformatöründe olduğu gibi, Q kalite faktörü deney cisminin gerilimi ile transformatörün sekonder gerilimi arasındaki orandır. Aynı zamanda deney devresi üzerindeki tüm ohmik kayıpları da karşılayan besleme gücü ile deney gücü arasındaki oran anlamına da gelmektedir.

$$Q = \frac{1}{\omega CR} \quad (3.20)$$

Saha deneylerinde, özellikle kablo deneylerinde kullanılan frekans ayarlı rezonans deney sisteminde Q değeri XLPE kablolar için 100-150, kağıt yalıtımlı kablolar için ise 50-90 değerleri arasında elde edilmektedir [15].

Şekil 3.19'da görüldüğü üzere, yapılan deneylerde 30-300 Hz frekans aralığında Q değeri 100 değerine eşit olmaktadır. Diğer rezonans deney sistemleri ile karşılaştırıldığında frekans ayarlı sistemler ile oldukça verimli Q değerleri elde edilmektedir [24].



Şekil 3.19 : 80 A, 254 kV frekans ayarlı rezonans deney sistemi kalite faktörü, akım-frekans grafiği [24]

Frekans ayarlı rezonans transformatörleri ile yapılan yüksek gerilim deneyleri, seri rezonans ayarlı transformatörler ile yapılan deneylerde olduğu gibi, önce devrenin rezonans durumuna getirilmesi, çıkış gerilimin istenen deney gerilimi değerine getirilmesi ve belirli bir çalışma içinde deneyin gerçekleştirilmesi sırasını izler. Seri rezonans transformatörlerinden farklı olarak, gerilim ayarı frekans değişimi ile sağlanır.

Frekans ayarlı rezonans transformatörlerinin diğer rezonans transformatörlerine göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir;

- Üç fazlı besleme olanağı,
- Yüksek gerilim reaktörü ayarlı olmadığından basit mekanik yapı,
- Yüke bağlı aralıkta frekans seçimi (20-300 Hz),
- Yüksek kalite faktörü (70-120),
- Daha düşük besleme gücü ihtiyacı,
- Ayarlı reaktörlü rezonans transformatörlerine (yaklaşık 5-10 kg/kVA arası) ve deney transformatörlerine (10 kg/kVA'dan daha fazla) oranla daha düşük ağırlık/güç oranı (yaklaşık 1,5-3 kg/kVA) [20]

Yüksek Q değerlerinin yanı sıra, frekans ayarlı rezonans deney sistemlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri ağırlık-güç (kg/kVA) oranıdır. Özellikle kompakt, saha deneylerine uygun yapıda üretilen bu sistemlerde taşınabilirlik önem kazanır. Deney cisminin kapasitesi frekans aralığını belirlerken, frekans aralığı da deney gerilimi ile sistemin boyutunu belirler. Düşük frekanslı çalışmada sistemdeki

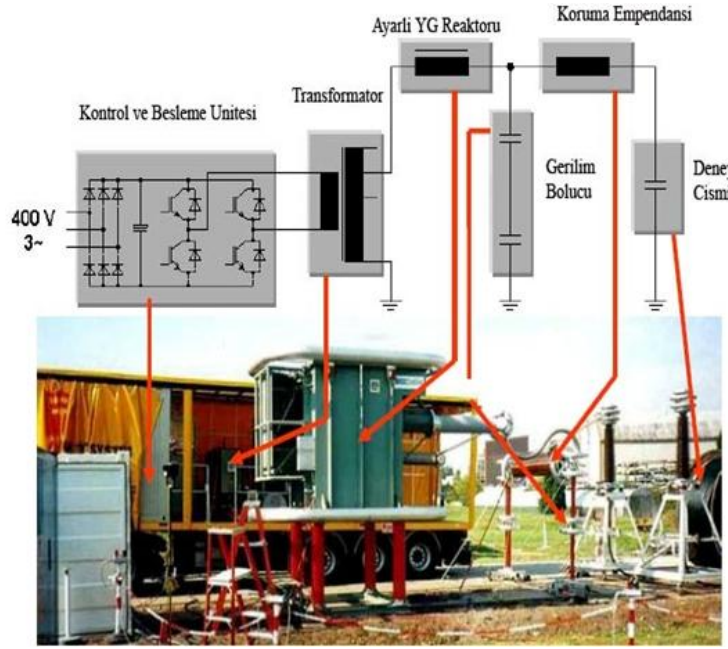
transformatör, reaktör gibi demir çekirdek temelli devreler doymaya gidebilir. Bunu önlemek için büyütülen çekirdek kesitleri, sistemin taşınabilirliği açısından büyük sorun oluşturur.

Çizelge 3.3'te görüldüğü üzere, minimum deney frekansı 30 Hz alındıktan sonra ağırlık/güç oranında 1,9'dan 0,9'a, 20-25 Hz aralığında alındığında ise 0,8 kg/kVA değerine inmektedir. Ancak daha düşük frekans değerlerinde sistem ekonomik ve taşınabilir olmaktan çıkar [24].

Çizelge 3.3: Yüksek gerilim kablosu saha deneyi sonuçları [24]

No.	Yıl	Ülke	Anma Gerilimi (kV)	Anma Akımı (A)	Deney Gücü (50 Hz'e göre) (MVA)	Frekans Aralığı (Hz)	Sistemin Güç/Ağırlık Oranı (kg/kVA)
1	1992	İsviçre	250	37	23	20-160	-
2	1993	G. Afrika	132	122	16	50-100	-
3	1996	Almanya	160	40	8	35-71	1,9
4	1996	İsviçre	220/440 ¹	66/133 ²	24/48	30-300	0,9 ³
5	1998	Almanya	150/300 ⁴	90/180 ⁵	22,3/44,3	30-300	0,97
7	1998	Almanya	254/400 ⁴	80/160 ⁵	31,4/62,8	25-300	0,8
9	1998	Almanya	160/320 ¹	50/100 ²	26,5	30-200	1,1
10	1999	Almanya	230	83	34	25-300	0,8
11	2000	Almanya	160/320 ¹	50/100 ²	26,5	30-300	1,1
12	2000	Almanya	220	78/156 ²	32/64	25-300	0,85
13	2000	Almanya	230	83	34	20-300	0,8
14	2000	Almanya	160/320 ¹	50/100 ²	26,5	30-300	1,1

1) Seri bağlı 2 reaktör; 2) Paralel bağlı 2 reaktör; 3) Sadece reaktör ağırlığı hesaba katılmış; 4) Seri bağlı 2 sistem; 5) Paralel bağlı 2 sistem



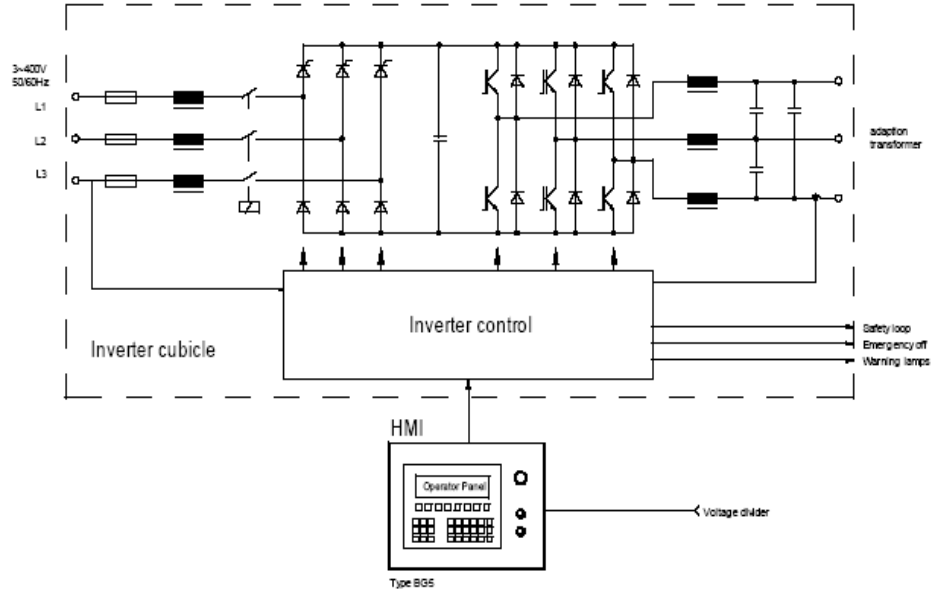
(a)



(b)

Şekil 3.20 : (a), (b) Saha deneyleri için taşınabilir frekans ayarlı rezonans deney sistemleri [25]

Şekil 3.21’de görülen kontrol ve besleme ünitesi, frekans ayarlı rezonans sistemlerinin kalbini oluşturur. Bu üniteler frekansın ayarlanabilmesi için gerekli olan güç elektroniği ve kontrol modüllerini içerir. Elektronik modüller birleştirilerek kompakt bir ünite oluşturulabilir. Ölçümler, bir bilgisayarın seri portu vasıtası ile sayısal ortama aktarılabilir. Üç faz besleme gerilimini darbe genişlik modülasyonunu ile kare dalga şeklindeki gerilime dönüştürmek için üç fazlı frekans çeviricisi kullanılır. Çıkış geriliminin etkin değeri frekans çeviricisinin darbe genişlik ayarı ile istenen değere getirilir [20].

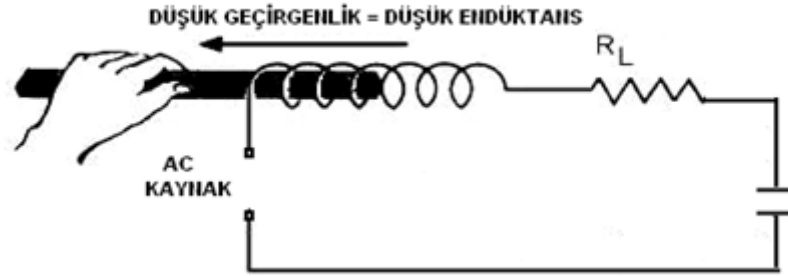


Şekil 3.21 : Kontrol ve besleme ünitesi blok diyagramı [22]

4. SERİ REZONANS TRANSFORMATÖR TASARIMI

4.1 Amaç

Bu çalışmada uygulaması yapılacak olan devre Şekil 4.1’de görülen ilkeye göre değişken endüktans değerine sahip bir seri rezonans devresidir. Burada bobinin içerisine manyetik geçirgenlik katsayısı havaninkinden daha büyük olan demir kütle (nüve, çekirdek) sokulup çıkarılarak bobinin endüktif değeri artırılıp azaltılacaktır.



Şekil 4.1 : Ayarlanabilir endüktans benzetimi [26]

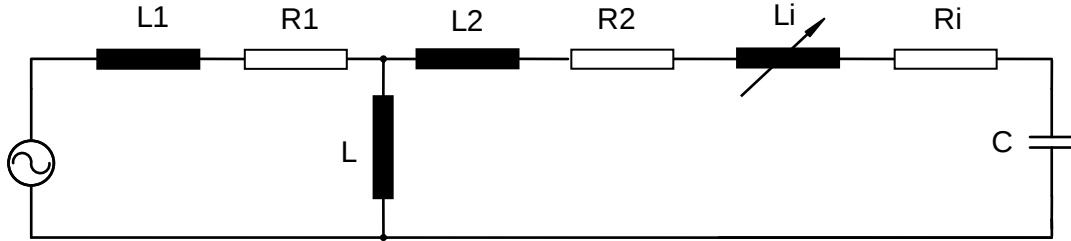
Mikrokontrolör yardımıyla sürülecek bir adım motoru ve dişliden oluşturulan doğrusal kızak sistemi sayesinde demir kütle hareket ettirilecektir. Bu devre, şebeke gerilimi düşürücü bir trafodan geçirilerek sürülecektir. Dolayısıyla devrenin rezonans frekansı şebeke gerilimi olan 50 Hz olmalıdır.

Devre rezonansta iken kapasite ve endüktans kısa devre gibi davranacak ve sadece direnç devreden akan akımı sınırlayacaktır. Seri bağlı direnç üzerinden akan akım rezonans frekansında en yüksek değerini alacaktır. Bu akım geri besleme olarak kontrolöre verilecek ve böylece kontrolör silisyum alaşımlı demir kütleyi rezonans frekansı için gerekli endüktans değerini oluşturabilecek konuma götürecektir.

Devrenin çıkış gerilimi rezonans durumunda transformatörün ikincil sargı geriliminin 40-80 kat fazlası olabilmektedir. Devrede kapasite değeri değiştirildiğinde rezonans bozulacak, gerilim yeniden normale dönecektir. Bu durum rezonans durumunda devreden akan akımın azalmasına neden olacak ve kontrolör demir çekirdeği hareket ettirmek suretiyle devreyi yeniden rezonans frekansına getirecektir.

4.2 Seri Rezonans Devre Şeması, Analizi ve Simülasyonu

Şekil 4.2’de transformatör ile beslenen seri rezonans transformatörün eşdeğer devresi görülmektedir. Bu eşdeğer devrenin çözümü yapılarak çıkış geriliminin rezonans frekansında iyileştirme faktörü olarak kadar daha yüksek olduğu gösterilecektir.



Şekil 4.2 : Bir transformatör, reaktör ve deney kapasitesinden oluşan devrenin eşdeğer devresi

Burada L1 ve R1 trafonun birincil sargısının endüktans ve direnç değerini, L2 ve R2 ikincil sargının endüktans ve direncini, Li devredeki değişken endüktansı, Ri devrenin direncini simgelemektedir. L ise şönt endüktansı olup L1 ve L2’ye kıyasla çok büyük olduğundan ihmal edilebilir. Devre trafonun ikincil kısmından besleneceğinden buradan itibaren denklemler yazılırsa;

Rezonans durumunda kapasitif ve endüktif reaktans eşit olacağından:

$$X_L = X_C \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.2)$$

Rezonans frekansı (4.2) olarak elde edilir. Z devrenin toplam empedansı, R, devre üzerindeki toplam seri direnç olmak üzere çıkış gerilimini hesaplamak için kapasite uçlarındaki gerilim;

$$U_C = X_C \times I = X_C \times \frac{U}{Z} = X_C \times \frac{U}{R + j(X_L - X_C)} \quad (4.3)$$

olarak yazılabilir. Rezoanns durumunda $X_L = X_C$ olduğundan

$$U_C = \frac{X_C}{R} \times U = \frac{1/\omega C}{R} \times U = \frac{1}{\omega CR} \times U \quad (4.4)$$

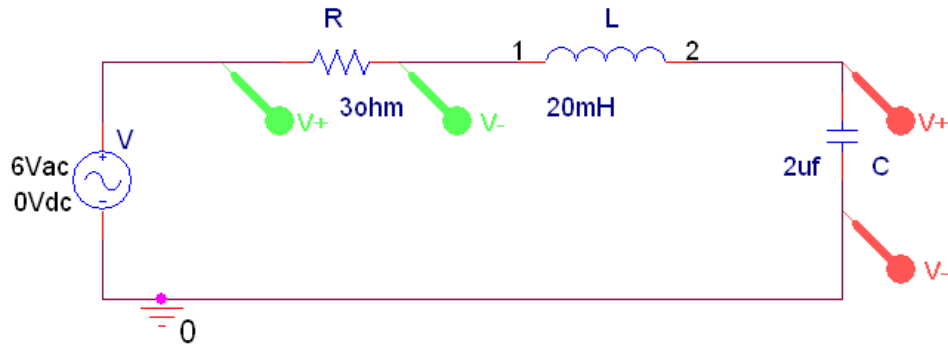
elde edilir. Burada $\frac{1}{\omega CR}$ değeri sistemin Q değerini (kalite faktörü) oluşturur. Buradan;

$$U_c = Q \times U \quad (4.5)$$

$$\frac{U_c}{U} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{\omega L}{R} = Q \quad (4.6)$$

ifadeleri yazılabilir.

Yukarıda analizi yapılan seri rezonans devresinin çalışma prensibini görmek için Pspice programı kullanılarak yapılan simülasyonlar aşağıda verilmiştir. Burada devreye belirli değerlerde kapasite, endüktans ve direnç bağlanacak ve kaynak gerilimi değişken frekanslarda verilerek rezonans frekansında çıkış gerilimindeki değişim gözlemlenecektir. Ayrıca devreye akım sınırlaması yapmak amacıyla konulan seri direncin değerlerindeki değişimin rezonans anında çıkış gerilimini nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. İlk olarak 3 ohm direnç, 20 mH endüktans ve 2 uF kapasite değerleri için hesap yapılmıştır.



Şekil 4.3 : Rezonans transformatör simülasyon devresi

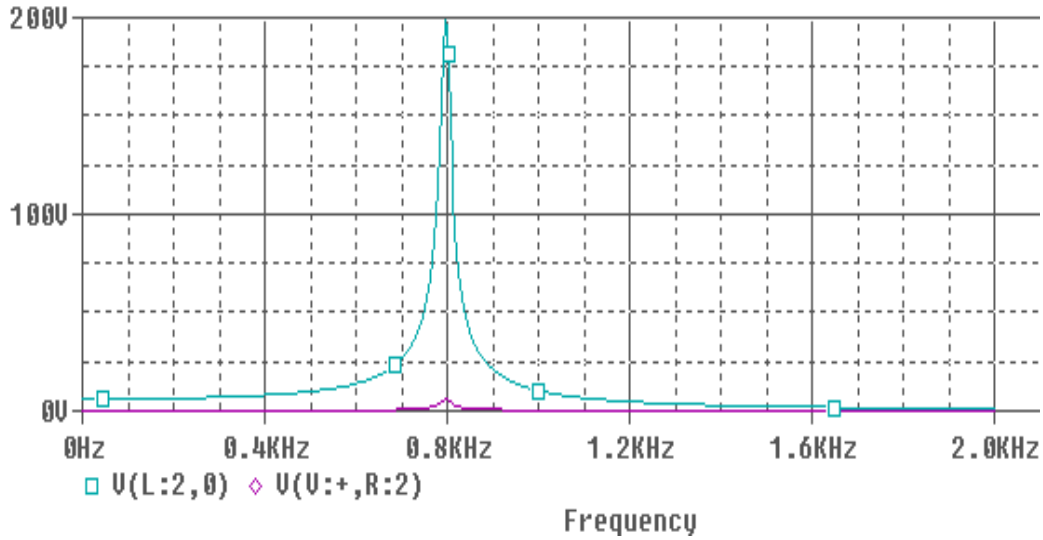
Analiz programında 6V kaynak geriliminin frekansı değiştirilerek devreye uygulandığında devrenin 794 Hz'de maksimum gerilime ulaşarak rezonansa girdiği görülmektedir. Rezonans anındaki tepe gerilim değeri 198.6 V olarak okunmuştur. Bu eleman değerlerine göre devrenin çözümü yapılırsa;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.7)$$

rezonans frekansı olduğundan

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{20 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-6}}}$$

yazılarak $f_r = 795$ Hz olarak hesaplanır. Aşağıda görüldüğü gibi simülasyon sonucu okunan değere çok yakın bir değerde devre rezonans durumuna gelmiştir.



Şekil 4.4 : Rezonans transformatör numaralı devre çıkış gerilimi

Ayrıca oluşturulan devre için kalite faktörünü hesaplayalım.

$$Q = \frac{1}{\omega CR} \text{ olduğundan,}$$

$$Q = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3} \Rightarrow 33,4$$

olarak hesaplanır. Simülasyon sonucu rezonans anında kapasite gerilimi 198,6 V olarak okunmuştu. Giriş gerilimi 6 V olduğuna göre kalite faktörü;

$$Q = \frac{198,6}{6} \Rightarrow 33,2$$

olarak hesaplanır.

4.3 Geribesleme kontrollü rezonans transformatörü tasarım çalışması

4.3.1 Ayarlı endüktans tasarımı

Devrede bozulan rezonans, ayarlı endüktans yardımıyla yeniden sağlanacaktır. Ancak bu ayar, endüktans değişiminin mümkün kılacağı kapasitif yükler için geçerli olacaktır. Kullanılacak olan endüktans 0,4 mm² kesit alanına sahip bobin teli

kullanılarak sarılmıştır. Bir tur sarım yapıldığında elde edilen endüktans değeri çok küçük olduğundan ara katlara ısı ve gerilim dayanımlı yalıtım bandı koymak suretiyle çok katlı sarım yapılmıştır. Hazırlanan, adım motoru ile tahrik edilen lineer kızak sistemi kullanılarak demir nüve, bobinin içine tam olarak sokulduğunda 3,37 H endüktans değeri elde edilmiştir.

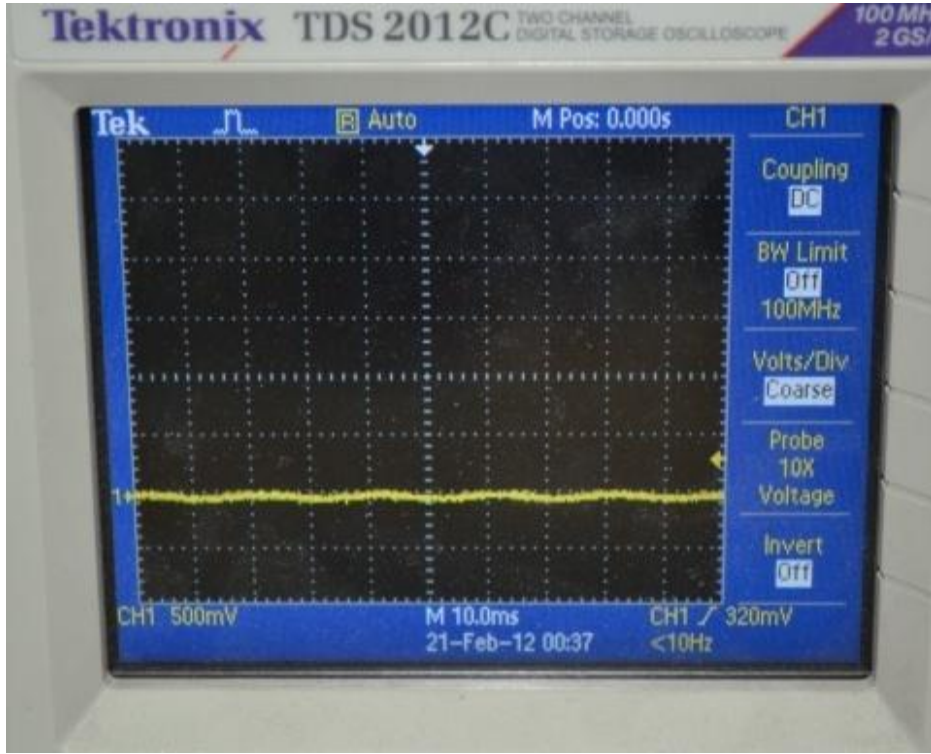
$$Q = \frac{\omega L}{R} \text{ olduğundan sarılan endüktansın direnç değeri rezonans transformatörün}$$

kalite faktörü açısından önem arz etmektedir. Sarımda kullanılan bobin telinin kesit alanının $0,1256 \text{ mm}^2$, uzunluğunun 866 m ve bakırın öz direncinin $1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ olduğu gözönüne alınarak, $R = \rho l / S$ denkleminde yerine yazılarak endüktansın direnci 118,6 Ω olarak hesaplanmıştır. Avometre ile okunan değer 120,3 Ω olarak görülmüştür. Bu sapmanın bakırın saf olmayışından, sarım sayısının yaklaşık değer olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

4.3.2 Akım okuma devresi tasarımı

Gerçeklenecek rezonans transformatör devresinde akım geri beslemesi alınarak kontrolöre verilecektir. Açıktır ki akımın maksimum değerine ulaştığı nokta rezonans anı olacaktır. Devre direncinin artması rezonans transformatörünün kalite faktörünü düşüreceğinden, akım okunurken devre direncinin artmamasına dikkat edilmesi gerekir. Bunun için ilk önce devreye hiç fiziksel temas kurmadan akım okunmak istenmiş, ancak devreden akan akımlar mA seviyesinde olduğundan bu seviyede akımları okumak mümkün olmamıştır. Bu nedenle devreye seri olarak, devrenin direnci yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olan 1 Ohm değerinde bir direnç bağlanarak bu direncin üzerindeki gerilim okunmuş ve akım değeri buradan mikrokontrolöre verilmiştir.

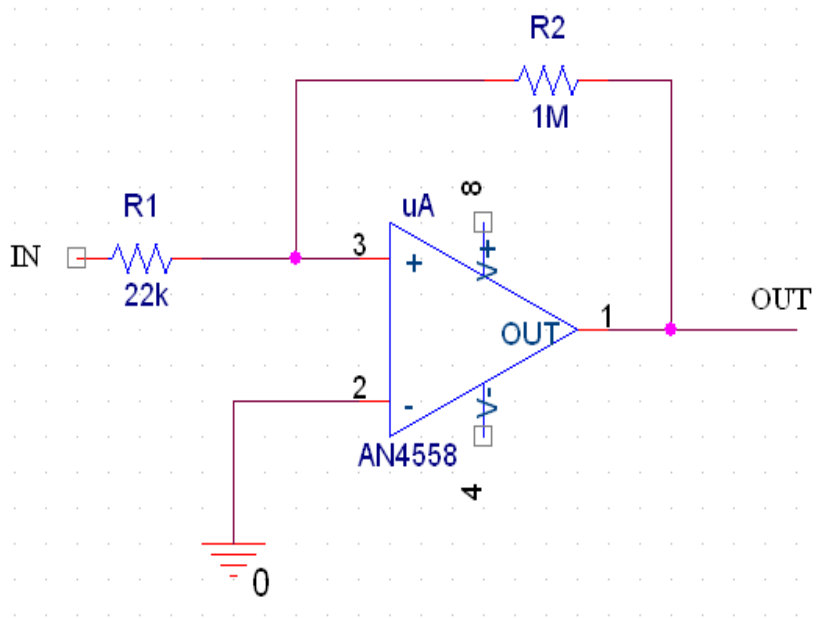
Devre ilk oluşturulduğunda osiloskop yardımıyla direnç üzerindeki gerilim okunmuş ancak bu gerilimin gürültü seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu gerilim Şekil 4.5’de görüldüğü şekilde osiloskop yardımıyla gözlemlenmiştir. Bunun üzerine bu gerilim bir işlemsel kuvvetlendirici yardımıyla kuvvetlendirilerek okunmuştur.



Şekil 4.5 : Kuvvetlendirici devre girişi akım grafiği

Akımı kuvvetlendirmek için tasarlanan devre şeması Şekil 4.6’da görülmektedir.

Kuvvetlendirici çıkışında elde edilen gerilim Şekil 4.7’deki gibidir.

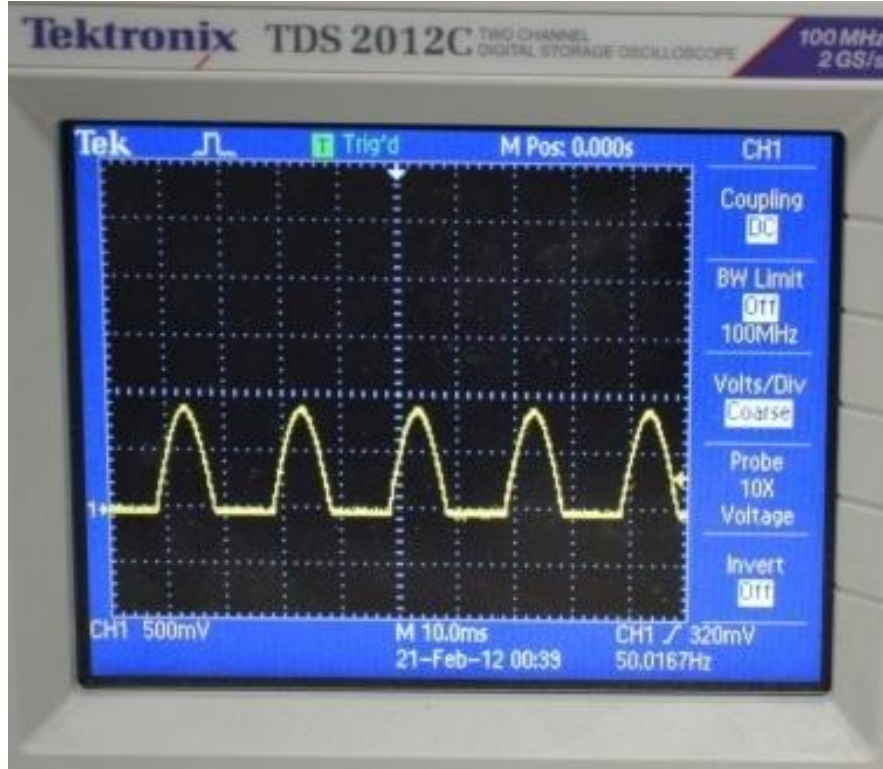


Şekil 4.6 : Oluşturulan kuvvetlendirici devre şeması.

Bu devre oluşturulurken işlemsel kuvvetlendirici satürasyon (doyma) gerilimine ulaşmayacak şekilde mümkün olan en büyük kazanç seçilmek istenmiştir. Bu kazanç

değeri potansiyometre ile ayarlanarak 45 olarak bulunmuştur. Bu kazancı elde etmek için devre 22 kOhm ve 1 MOhm değerinde dirençler kullanılarak oluşturulmuştur.

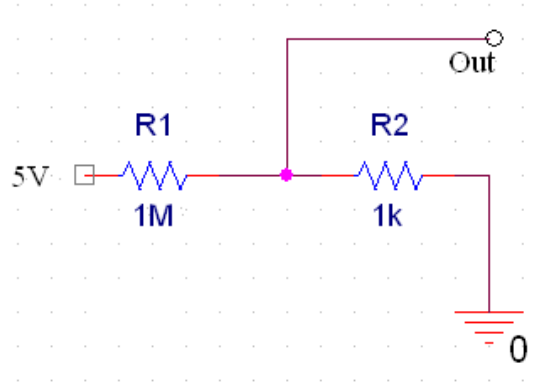
Şekil 4.7’de görüldüğü üzere akım okumak için bağlanan direnç üzerindeki gerilim 1-3 V arasında değişecek şekilde kuvvetlendirilmiştir. İşlemsel kuvvetlendirici 0-5 V beslendiği için gerilim yarım dalga şeklinde elde edilmiştir. Bu gerilim işaretinin tepe noktasındaki değerler okunarak akım değeri elde edilmiş olacaktır.



Şekil 4.7 : Kuvvetlendirici devre çıkışı akım grafiği

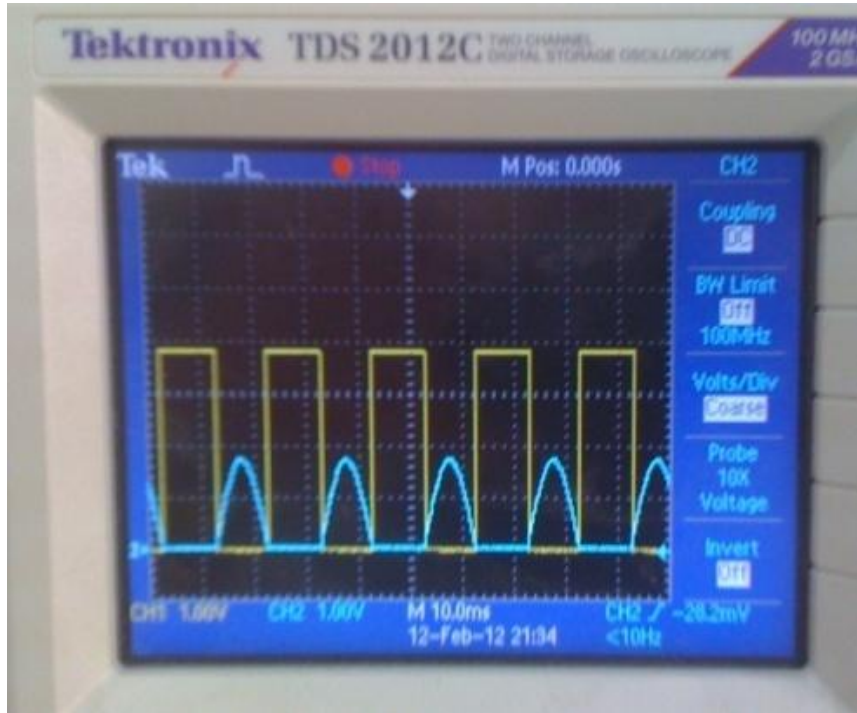
Mikroişlemci analog sayısal çevirici birimi bu işareti devamlı okuyarak ve okuduğu değerleri karşılaştırarak gerilimin tepe değerini yakalayabilir. İlk olarak bu yöntem uygulanmıştır. Ancak bu mikroişlemciyi yormakta ve akımın tepe değerini her zaman farklı noktalarda yakalamaktadır. Bu da devrenin kontrolünde problemlere yol açmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için bir karşılaştırıcı devre yardımıyla akımın çıkış anını yakalamak ve bu andan itibaren tepe değere ulaşmasının aldığı süre kadar bekledikten sonra tek okuma yapmak suretiyle akım değerinin okunmasına karar verilmiştir. Bu amaçla oluşturulan gerilim bölücü devre şeması Şekil 4.8’de verilmiştir.

Elde edilen gerilimin çıkış anını yakalamak için sıfır değerine mümkün olduğunca yakın bir gerilim elde edilmelidir. Bu değerin sıfıra çok yakın olması farklı akım seviyelerinde oluşabilecek okuma zamanı hatalarını düşük kılacaktır.



Şekil 4.8 : Gerilim bölücü devre şeması

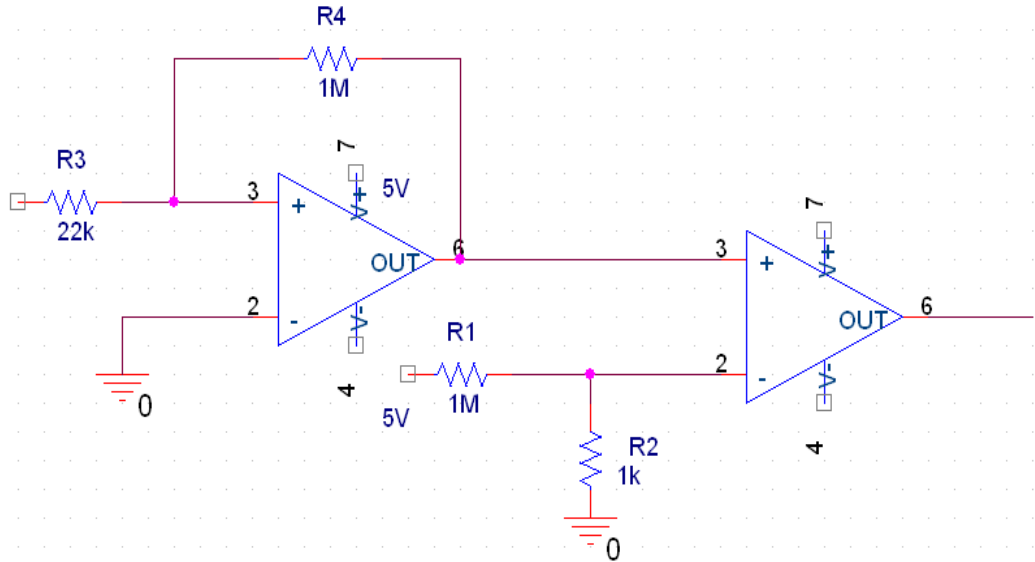
Gerilim bölücüde 100 Ohm ve 2,7 Ohm değerlerinde dirençler kullanılarak 0,15 V mertebesinde bir gerilim elde edilmiştir. İşlemsel kuvvetlendirici kullanılarak oluşturulan karşılaştırıcı devre şeması Şekil 4.10'da verilmiştir. Karşılaştırıcı devrenin çıkış gerilimi ile akım okuma devresi çıkış gerilimi osiloskop ile incelendiğinde istenilen çıkışların elde edilmiş olduğu görülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Karşılaştırıcı devre çıkış gerilimi

Bu devre yardımıyla elde edilen gerilim, mikroişlemcide analog sinyali okumada kullanılacaktır. Karşılaştırıcı çıkışında oluşturulan kare dalga gerilimin çıkış kenarı ile bir zamanlayıcı tetiklenecektir. Bu zamanlayıcının süresi akım değerinin maksimum değerine ulaşması için gereken süredir. Bu süre osiloskop çıkışından da anlaşılacağı üzere yaklaşık 5 ms olması beklenir. Bu değeri tam olarak belirlemek için mikroışkemci programlamak için kullanılan Tekopie firmasına ait kart üzerindeki tuşlar kullanılmıştır. Bu tuşlar mikroişlemci sayısal girişleri olarak tanımlanmış ve her basıldığında zamanlayıcı süresinin artırılıp azalmasını sağlayacak şekilde programlanmışlardır. Yine kart üzerinde bulunan led ekranda zamanlayıcının süresi görülecek şekilde program yazılmıştır. Bu şekilde süre artırılıp azaltılarak akımın en büyük değerini aldığı süre ekrandan okunarak yazılımın içinde sabitlenmiştir.

İlk olarak karşılaştırıcının düşüş anından itibaren zamanlayıcı saydırılarak tepe değeri okunmaya çalışılmış ve bu süre 4,1 ms olarak bulunmuştur. Ancak mikroişlemciyi daha az yormak için karşılaştırıcı çıkış geriliminin çıkan kenarı ile zamanlayıcı saydırılmış ve 10 ms üzerinde bir zaman sonra durması sağlanmıştır. Bu durumda akım okuma performansının daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10 : Gerilim karşılaştırıcı devre şeması

4.3.3 Adım motor ve sürücü devresi tasarımı

Adım motorlar (step motorları), girişlerine uygulanan darbe dizilerine karşılık analog dönme hareketi yapabilen elektromagnetik elemanlardır. Bu özellikleri nedeniyle “dijital makine” olarak da tanınan adım motorları, dijital sistemlerde kullanılırken

büyük kolaylıklar sağlarlar. Adım motorları, adından da anlaşılacağı gibi belirli adımlarla hareket ederek rotorun açısal konumunu değiştirirler. Bu adımlar, motor sargılarına uygun sinyaller gönderilerek kontrol edilir. Herhangi bir uyarımda, rotorun yapacağı hareketin ne kadar olacağı, motorun adım açısına bağlıdır. Motora uygulanacak sinyallerin frekansı değiştirilerek motorun hızı da kontrol edilebilir. Adım motorların dönüş yönü ise, uygulanan sinyallerin sırası değiştirilerek, saat ibresi yönünde veya saat ibresinin tersi yönünde olabilir. Adım motorların bu kadar çok kullanım alanı bulmasının nedeni bu motorların bazı avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajların başlıcaları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Adım motorlar dijital giriş işaretlerine cevap verirler, bu nedenle mikroişlemci veya bilgisayarlarla kontrol için ideal elemanlardır.

- Adım motorların hangi yöne döneceği, devir sayısı, dönüş hızı gibi değerlerin mikroişlemci veya bilgisayar yardımı ile kontrol edilebilmesi, her an bu motorların dönüş yönü, hızı ve konumunun bilinebilmesini sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı adım motorlar ile çok hassas konum kontrolü yapılabilir.

- Adım motorların dijital girişlere cevap vermesi, geri beslemeye ihtiyaç duyulmaksızın açık çevrim çalıştırılabilmesini sağlamaktadır. Yani açık çevrim çalıştırılan bir adım motoru ile hız, ivme ve konum kontrolü daha basit ve daha az maliyetle gerçekleştirilebilir. Böylece alışılmış kararsızlık problemlerinin de önüne geçilmiş olur.

- Adım motorlar, giriş işaretlerinin frekansına bağlı olarak çok geniş bir hız aralığında sürülebilirler.

- Adım motorlar, herhangi bir hasara yol açmadan defalarca durdurulup çalıştırılabilirler. Sürerken aniden durdurma ya da aniden ters yönde sürme isteğine karşı mükemmel cevap verebilirler.

- Aşırı yüklenmeden hasar görmezler, oldukça dayanıklıdır.

- Her yeni adımla artan (birikmeli - kümülatif) konum hataları yoktur.

- Mekanik yapısı basit olduğundan bakım gerektirmezler.

Bu çalışmada hassas bir konum kontrolüne olanak tanınması, mikroişlemci ile sürülmeye elverişli olması ve açık çevrim çalıştırılabilmesi gibi özellikleri nedeniyle

adım motoru tercih edilmiştir. Adım motoru sürmenin birden fazla yolu vardır. Uygulamaya göre seçim yapılmalıdır.

4.3.3.1 Tek-faz uyarıtım (Bir fazlı tam adımlı sürüş)

Motor sargılarının sadece birinin uyarıldığı uyarıtım cinsine tek-faz uyarıtımı adı verilir. Şekil 4.11'de 4-fazlı adım motoru için tek-faz uyarıtım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. Bu uyarıtım yönteminde rotor her bir uyarıtım sinyali için tam adımlık bir hareket yapmaktadır. Uyarıtım dönüş yönüne bağlı olarak sıra ile yapılır.



Şekil 4.11 : Tek fazlı uyarıtım

4.3.3.2 Karma uyarıtım (İki fazlı yarım adımlı sürüş)

Bu uyarıtım yönteminde tek-faz uyarıtımı ile iki-faz uyarıtımı ard arda uygulanır. Burada rotor her bir uyarıtım sinyali için yarım adımlık bir hareket yapmaktadır. Şekil 4.12'de fazların uyarıtım sırası görülmektedir. Bu uyarıtım yönteminde adım açısı yarıya düştüğünden adım sayısı iki katına çıkmaktadır.

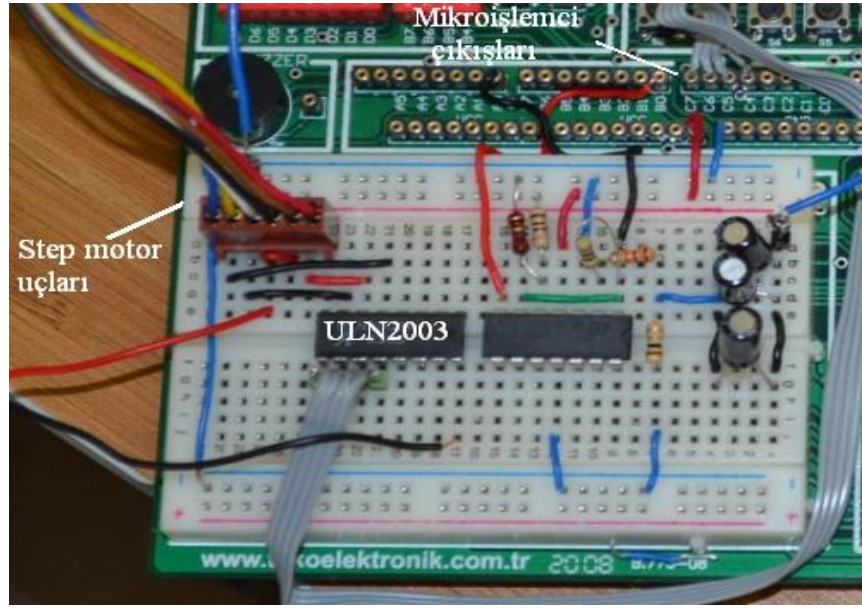
Step	Bobin 4	Bobin 3	Bobin 2	Bobin 1	
a.1	on	off	off	off	
b.1	on	on	off	off	
a.2	off	on	off	off	
b.2	off	on	on	off	
a.3	off	off	on	off	
b.3	off	off	on	on	
a.4	off	off	off	on	
b.4	on	off	off	on	

Şekil 4.12 : Karma uyartım.

4.3.3.3 İki-faz uyartım (İki fazlı tam adımlı sürüş)

Motor sargılarının ikisinin sıra ile aynı anda uyartıldığı uyartım cinsine iki-faz uyartımı adı verilir. Şekil 4.14’de 4-fazlı adım motoru için iki-faz uyartım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. İki faz uyartımında rotorun geçici durum tepkisi tek-faz uyartımlıya göre daha hızlıdır. Fakat burada güç kaynağından çekilen güç iki katına çıkmaktadır.

Yapılan uygulamada da iki fazlı tam adımlı sürüş yöntemi kullanılmıştır. Bunun temel nedeni hem hızlı tepki vermesi hem de bu yöntemde momentin daha fazla olmasıdır. Tek fazlı sürüme göre bu yöntemde lineer kızak sisteminin tepkisinin daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Adım motoru sürmek için kurulan devre Şekil 4.13’de görülmektedir.



Şekil 4.13 : Adım motor sürücü devresi

Motoru sürmek için ULN2003 A entegresi kullanılmıştır. Bu entegre içinde 7 adet Darlington tranzistör bulundurmaktadır. Bu entegrenin girişleri mikroişlemci sayısal çıkışlarından tam adım sürüş yöntemine göre enerjilenmiş ve çıkışlardan direk motor sargıları sürülmüştür.

Step	Bobin 4	Bobin 3	Bobin 2	Bobin 1	
b.1	on	on	off	off	
b.2	off	on	on	off	
b.3	off	off	on	on	
b.4	on	off	off	on	

Şekil 4.14 : İki-faz uyarıtım (İki fazlı tam adımlı sürüş)

Tasarlanan rezonans transformatörün çalışmasını gözlemlemek üzere testler yapılmıştır. Çizelge 4.1’ de çeşitli yük değerleri bağlanması durumunda lcd ekrandan okunan adım motorun konum bilgileri görülmektedir. Bu konum bilgileri bize yük değişimine karşı değişken endüktansın tepkisini anlatmaktadır.

Çizelge 4.1: Transformatör yük değişimi deney sonuçları

Kapasite değeri (μF)	Adım motor konumu(%)
2	100
3	62,5
4	48
4,7	45
5,7	38
6,7	30
7,7	24
9,4	19
10,4	14
11,4	11
12,4	7
13,4	3

Bu değerler osiloskop ile kontrol edilmiş ve ilgili yüklerin rezonans anı oldukları görülmüştür. Buradan akım maksimizasyonu yapan kontrol algoritmasının doğru çalıştığı anlaşılmıştır. Bu değerler elde edilirken $3\mu\text{F}$ kapasite değerinin değişken endüktansın rezonansa getirebildiği en büyük yük değeri olduğu görülmüştür. Aynı şekilde değişken endüktansın rezonansa getirebildiği maksimum yük değeri ise $13,4\mu\text{F}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler rezonans frekans hesap formülünde 50 Hz için yerine yazılarak, elde edilen endüktans değerinin 0,75H ile 3,3H arasında değiştiği görülmüştür. Avometre kullanılarak okunan en küçük ve en büyük endüktans değerleri ise 0,4H ve 3,3H olmuştur.

Elde edilen rezonans transformatörün kalite faktörünü incelemek için değişik büyüklükte yükler bağlanarak rezonansa gelmesi sağlanmış ve yük gerilimleri Çizelge 4.2’de olduğu gibi elde edilmiştir. Bu çizelgede yer alan değerler incelendiğinde kazanç değerinin teorik olarak hesaplanan değerden düşük olduğu görülmektedir. Daha önce açıklandığı üzere rezonans devresinde direnç değeri ne kadar az olursa kazanç o kadar fazla olmaktadır.

Çizelge 4.2: Transformatör kalite faktörü deney sonuçları

Besleme gerilimi (V)	Kapasite değeri (μ F)	Yük gerilimi (V)	Beklenen Kalite faktörü	Kalite faktörü
6,3	3	11,75	8,84	1,865
6,3	4	11,79	6,63	1,871
6,3	9,4	11,16	2,82	1,771
6,3	10,4	10,66	2,55	1,692
6,3	12,4	9,75	2,13	1,547

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada rezonans ilkesine çalışan ve giriş gerilimini kuvvetlendiren rezonans transformatör analizi ve tasarımı yapılarak çalışma ilkesi gösterilmiştir.

Rezonans ilkesine göre yüksek gerilim üreten transformatörlerin frekans ayarlı ve endüktans ayarlı tipleri mevcuttur. Halihazırda saha deneylerinde kullanılan rezonans transformatörler rezonansın bozulması durumunda el ile tekrar rezonansa getirilmektedir. Bu çalışmada bu tür sistemlerin rezonans bozulduğunda otomatik olarak rezonansa gelmesini sağlayacak örnek bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır. Elde edilen transformatörün kalite faktörü beklenenden düşük olmuştur. Bunun kapasite iç dirençlerinden kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Rezonans anını yakalayabilmek için oldukça küçük endüktans değişimleri sağlayabilecek bir kontrol gerekir. Bu da ancak demir nüvenin hassas konum kontrolü ile mümkün olur. Hassas konum kontrolü gerektiren uygulamalarda genelde servo motorlar ve sürücüler kullanılır. Servo motorlarda hız ve konum kontrolü geri beslemeli olarak oldukça hassas biçimde yapılabilmektedir. Ancak bu pahalı bir çözümdür. Bunun yerine daha ucuz bir yol olduğundan ve mikroişlemci ile sürülmeye en elverişli motorlardan olduğundan bu uygulamada adım motor tercih edilmiştir. Adım motorda enkoder yer almadığından geri besleme olarak konum ya da hız bilgisi mevcut değildir. Endüktans değişimi kontrolünü, kapalı çevrim kontrol ile hassas bir şekilde yapabilmek için devreden akan akım geri besleme olarak alınmıştır.

Bu uygulama daha büyük çapta ve kalın bobin teli ile sarılarak elde edilecek endüktansla gerçekleştirilerek daha yüksek kalite faktörleri elde edilebilir. Ancak bu durumda değişken endüktans elde edebilmek için daha ağır ve büyük bir kütleyi tahrik edebilecek bir mekanik sistem oluşturulmalıdır. Bunun yanında akım geri beslemesi almak yerine demir çekirdeğin konum bilgisi doğrusal cetvel benzeri bir yapı kullanılarak geri besleme olarak alınıp yük değerini rezonansa getirecek endüktans değeri hesaplanabilir. Ancak endüktans değerinin demir çekirdek

konumuna göre doğrusal olmadığı unutulmamalıdır. Bu durumda endüktansın demir çekirdek konumuna bağlı olarak sistem modeli çıkartılıp konuma bağlı oluşacak endüktans değeri yüksek doğrulukla saptanabilir.

EKLER

EK A : Mikroişlemci ana kontrol algoritması

EK B : Lcd ekran sürme fonksiyonu yazılımı

EK A.

```
#include<pic.h>
#include"delay.h"
#include"lcd.h"

__CONFIG(0x3F71);

unsigned char bekleme = 250, flag1 = 0, flag2 = 0;
int analog = 0, ham_analog[20], step, analog_1, max, band=7, count;
unsigned int olcum_gecikme = 61406;
unsigned char c1 = 0, i, cc, kontrol_start = 0, yon = 1, c2 = 0, c3 = 0;

void main(void){

    TRISA = 0xFF; //
    TRISB = 0xFF; // PORTLAR
    TRISC = 0x00; // INPUT OUTPUT
    TRISE = 0x00; // OLARAK
    TRISD = 0x00; // AYARLANIYOR

    ADCON0 = 0b01000001; // PINLERIN DIJITAL ANALOG
    ADCON1 = 0b10001110; // KONFIGURASYONU

    lcd_init(); // AKIM VE STEP
    lcd_gotoxy(1,1); // DEGERINI
    lcd_yaz("Gecikme:"); // LCD DE GOSTERMEK
    lcd_gotoxy(2,1); // ICIN TANIMLANAN
    lcd_yaz("Analog:"); // FONKSIYON

    INTF = 0; // AKIM OKUMAK ICIN EXTERNAL INTERRUPT AYARLARI
    INTEDG = 0; // DUSEN KENAR ILE BASLA(KARSILASTIRICI CIKISI)
    INTE = 1; // INTERRUPT ENABLE

    TMR1L = olcum_gecikme; // INTERRUPT TA
    TMR1H = olcum_gecikme>>8; // AKIM OKUMA ICIN
    TMR1IF = 0; // SAYACAK
    T1CON = 0x00; // TIMER
    TMR1ON = 1; // AYARLARI
    TMR1IE = 1; //

    GIE = 1; // ASENKRON MASTER ILETISIM
    PEIE = 1; // AYAR BITLERI

    PORTC = 0b00110011; // PORT C I/O KONFIGURASYONU
    kontrol_start = 1;
    yon = 1;
    while(1){

        if(RB4 == 1 || RB5 == 1){ //AKIM OLCME GECIKMESI TESPITI
            ICIN
```

```

        olcum_gecikme ++;           // YAPILAN AYARLAR RB5 BIR KEZ
ARTIR
        lcd_gotoxy(1,9);           //RB4 E BASILI IKEN DEVAMLI ARTIR
        lcd_uint(65536-olcum_gecikme,10000); // DEGERI LCD YE YAZ
        while(RB5 == 1);
    }

    if(RB6 == 1 || RB7 == 1){
        olcum_gecikme --;
        lcd_gotoxy(1,9);
        lcd_uint(65536-olcum_gecikme,10000);
        while(RB7 == 1);
    }

    if(c1 == 3){
        analog = 0;
        for(i=0;i<c1;i++){
            analog += ham_analog[i]; //OKUNAN 3 DEGERI TOPLA
        }
        analog /= c1; //OKUNAN 3 DEGERIN ORTALAMASINI AL
        lcd_gotoxy(2,8); // LCD YE YAZ
        lcd_uint(analog,1000); //AKIM DEGERINI LCD YE YAZ
        c1 = 0; //KAC KEZ OKUNDUGUNU SAYAN BITI
SIFIRLA

        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_yaz("Step : ");
        lcd_int(step,10000);

        if ((max-analog)>band || (analog-max)>band ){
            kontrol_start=1;
            c2 = 0; //C2 YI SIFIRLA
        }

        c3++;

        if(analog<max && analog_1<max){ //IKI DEGER DE MAX DAN
KUCUKSE YON DEGISTIR
            yon ^= 1; //YON DEGISTIR
            c2++; //YON DEGISTIRMEYI SAY
            c3 = 0; //YON DEGISTIRMEDEDEN ATILAN ADIM SAYISINI
SIFIRLA
            if(c2>4) kontrol_start = 0; // YON DEGISTIRME 4
TEN BUYUK ISE DURDUR
            max = analog;
        }

        if(c3>10) c2 = 0; // YON DEGISTIRMEDEDEN ILERLERKEN
YAPILAN ATILAN ADIM SAYILARINI SAKLAMAMASI ICIN C2 YI SIL

        if(analog>max) max = analog; //MAX A OKUNAN DEGERI AT
EGER DAHA BUYUKSE

        analog_1=analog;
    }

```

```

    }
}

void interrupt kesme(){          //CIKAN KENAR ILE OLCME TIMER I BASLAT
    if(INTF){                    //
        TMR1L = olcum_gecikme;
        TMR1H = olcum_gecikme>>8;
        TMR1ON = 1;
        INTF = 0;

    }
    if(TMR1IF){                 //TIMER1 INTERRUPT I GELDI SINYALI ILE
        // TMR1L = olcum_gecikme;
        // TMR1H = olcum_gecikme>>8;
        TMR1ON = 0;             //ZAMANLAYICIYI DURDUR
        GIE = 0;                 //INTERRUPTLARI KAPAT
        GO = 1;                  //ANALOG DEGERI OKU
        while(GO == 1);          //OKUMA ISLEMI BITENE KADAR BEKLE
        ham_analog[c1]=ADRESH * 256 + ADRESL;    //ANALOG DEGERI YAZ
        c1++;                    //KAC DEFA DEGER OKUNDU

        if(kontrol_start == 1 && yon == 1 && step<350 ){
//ILERI HAREKET ICIN SARTLAR
            cc = PORTC;
            PORTC = (cc>>1) + (cc<<7);
            step++;
        }
        if(kontrol_start == 1 && yon == 0 && step>0 ){ //GERI
HAREKET ICIN SARTLAR
            cc = PORTC;
            PORTC = (cc<<1) + (cc>>7);
            step--;
        }

        TMR1IF = 0;             //TIMER INTERRUPT FLAG I TEMIZLE
        GIE = 1;                 // INTERRUPT I AC

    }
}

```

EK B.

```
#include <pic.h>
#include "lcd.h" // lcd.h dosyasi tanimlanip, deger aliniyor
#include "delay.h" // Gecikme fonksiyonu tanimlanyor

void lcd_busy(void)
{
    DelayUs(10);
}

void lcd_komut(unsigned char c) // Komut girme fonksiyonu
{
    rw = 0; // LCD'ye yazma yapilacak
    rs = 0; // LCD'ye komut girilecek
    e = 1; // DGen kenar tetikleme oldugu E 1
    lcd_port = c; // Yüksek de ikili bitler giriliyor
    e = 0; // E, 0 yapiliyor
    lcd_busy(); //Belirli süre bekleniyor
}

void veri_yolla(unsigned char c)
{
    rw = 0;
    rs = 1; // Komut yolladan tek fark, RS'nin 1 olmasi
    e = 1;
    lcd_port = c;
    e = 0;
    lcd_busy();
}

void lcd_clear(void) // LCD siliniyor
{
    lcd_komut(0x1);
    DelayMs(2);
}

void lcd_yaz(const char * s) // LCD'ye string ifade giriliyor
{
    lcd_busy();
    while(*s)
        veri_yolla(*s++);
}

void lcd_gotoxy(unsigned char x,unsigned char y) //LCD'nin belli
//bsine gidiliyor
{
    if(x==1)
        lcd_komut(0x80+((y-1)%16));
    else
        lcd_komut(0xC0+((y-1)%16));
}

void lcd_init() // LCD ilk yükleme ayarlari yapiliyor
```

```

{
rs = 0;
e = 0;
rw = 0;
DelayMs(15);
lcd_komut(0x02);
DelayMs(2);
lcd_komut(CiftSatir8Bit);
lcd_komut(SagaYaz);
lcd_komut(ImlecGizle);
lcd_clear();
lcd_komut(BirinciSatir);
}

void lcd_int(int sayi,int devider){
    char hane;
    if(sayi<0){
        veri_yolla('-');
        sayi = 0-sayi;
    }else{
        veri_yolla('+');
    }
    while(devider>0){
        hane = sayi/devider;
        sayi = sayi-hane*devider;
        veri_yolla('0' + hane);
        devider /= 10;
    }
}

void lcd_uint(unsigned int sayi, unsigned int devider){
    char hane;
    while(devider>0){
        hane = sayi/devider;
        sayi = sayi-hane*devider;
        veri_yolla('0' + hane);
        devider /= 10;
    }
}

```


KAYNAKLAR

- [1] **E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuff. (2000)** High Voltage Engineering Fundamentals, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Woburn, s. 40-48.
- [2] **P. Bodger, W. Enright,** A Resoannt Transformer For High Voltage Testing Of Generator Stators. Alındığı tarih:12.09.2011
http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/1636/1/12591053_C46.pdf
- [3] **E. Kuffel, M. Abdullah. (1986)** Çev: M. Özkaya, T. Tüfekçi, N. Ergan, Yüksek Gerilim Tekniği, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- [4] **N. H. Cavallius. (1986)** High Voltage Laboratory Planning, Emil Haefely & Co.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer> Alındığı tarih: 5.05.2011
- [6] **M. Frary.** ‘The world of electricity: 1820-1904’, IEC 2006. Alındığı tarih: 08.06.2011 http://www.iec.ch/100years/articles/world_of_electricity.htm
- [7] <http://www.highvolt.de/hect/datasheets/0-1-4.pdf> Alındığı tarih: 14.03.2011
- [8] Test Transformers, MWB Messwandler BAU AG, Katalog.
- [9] AC Test Systems, Tank Type Transformers, Haefely HV Tests, 2003.
- [10] **M. S. Naidu, V. Kamaraju. (1996)** High Voltage Engineering, McGraw-Hill, New York.
- [11] **D. Kind. (1992)** Çev: A. Rumeli, Yüksek Gerilim Deney Tekniğine Giriş: Elektrik Mühendisleri için ders kitabı, ODTÜ, Ankara.
- [12] AC Test Systems, Cylinder-Type Transformers, Haefely HV Tests, 2003.
- [13] **M. Özkaya. (1988)** Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 2, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- [14] AC Voltage Test Systems with Transformers, Type WP, Highvolt Prüftechnik Dresden GmbH.
- [15] http://www.phenixtech.com/P2a-RTS_VI.asp Alındığı tarih: 22.12.2011

- [16] **A. Jenni, M. Pasquier, R. Gleyvod, P. Thommen. (1991)** Testing of High Voltage Power Cables with Series Resonant Systems and Water Terminations, 7th ISH Dresden, paper 53.2
- [17] <http://www.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/> Alındığı tarih: 13.10.2011
- [18] <http://www.hipotronics.com/hvtest/resonant/hvtest19.htm> Alındığı tarih: 13.10.2011
- [19] **Ö. Kalenderli, A. Özdemir. (1990)** Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri, İTÜ, İstanbul.
- [20] **W. Hauschild. (1997)** Frequency-Tuned Resonant Test Systems for HV On-Site Testing of XLPE Cables and SF₆, Insulated Apparatures, HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, Dresden. Alındığı tarih: 15.10.2011
<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel3/4866/13439/00616654.pdf?arnumber=616654>
- [21] **P. Mohaupt, M. Gamlin, R. Gleyvod, J. Kraus, G. Voigt**, High Voltage Testing Using Series Resonance with Variable Frequency, Haefely HV Test. Alındığı tarih: 20.10.2011 <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-85.pdf>
- [22] **W. Hauschild. (1997)** Frequency-Tuned Resonant Test Systems for HV On-Site Testing of XLPE Cables and SF₆, Insulated Apparatures, HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, Dresden.
- [23] **P. Schikarski, M. Gamlin, J. Rickmann, P. Peeters, P. v.d. Nieuwendijk, R. Koning. (1999)** Two Years of Experience with a Mobile Resonant Test System for Testing of Installed Medium- and High Voltage Power Cables, Haefely HV Tests. Alındığı tarih: 20.10.2011 <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-89.pdf>
- [24] **W. Schufft, W. Hauschild. (2000)**, Resonant Test Systems with Variable Frequency for On-site Testing and Diagnostics of Cables. Alındığı tarih: 11.12.2011 http://www.ldic.ch/publications/papers/02-Schufft-Wolfgang-Resonant_Test.pdf
- [25] <http://www.kinectrics.com/Library/TP%20-%20RTS%20FinalBNEW.pdf> Alındığı tarih: 5.01.2012
- [26] http://tpub.com/content/neets/14180/css/14180_133.htm Alındığı tarih: 5.01.2012

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Fatih ŞEKEROĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 1985

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği
Bölümü