



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİK TESİSLERİNDE PASİF
HARMONİK FİLTRELERİN
MODELLENMESİ VE
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Orhun DÖŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Mart-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Orhun DÖŞ tarafından hazırlanan “Elektrik Tesislerinde Pasif Harmonik Filtrelerin Modellenmesi Ve Gerçekleştirilmesi” adlı tez çalışması 29/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI

Üye

Doç. Dr. Muciz ÖZCAN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Orhun DÖŞ

Tarih: 29.03.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK TESİSLERİNDE PASİF HARMONİK FİLTRELERİN MODELLENMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Orhun DÖŞ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI

2019, 144 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Doç. Dr. Muciz ÖZCAN

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Akım ve gerilimdeki bu sinüzoidal formdan uzaklaşmalara harmonikler neden olmaktadır. Bu durum sonucunda elektrik enerjisinin kalitesi düşer ve elektrik tesislerinde hatalı çalışmalar başlar.

Bu çalışmada; elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrenmesinde kullanılan pasif filtrelerin yapıları ve uygulama şekilleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik sisteminin modeli MATLAB/SIMULINK programı ile oluşturulmuştur. Bu sisteme, pasif filtre çeşitleri uygulanarak bu filtrenin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiş, sonuçlar üzerinde yorumlar yapılarak tasarlanan sistem için en verimli filtre tipi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filtre Verimi, Harmonik, Matlab/Simulink, Nonlineer Yük, Pasif Filtre

ABSTRACT

MS THESIS

**MODELING AND REALIZATION OF PASSIVE HARMONIC FILTERS
IN POWER SYSTEM**

Orhun DÖŞ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI

2019, 144 Pages

Jury

Advisor Asst. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Assoc. Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

The current and voltage should be 50 Hz and very similar with the sine graph in power systems. The harmonics cause to disruption at the current and voltage forms. Because of this case the quality of the electrical energy decreases and the malfunctions begin.

In this study; the information has given about structures of passive filters that used in electrical systems where the harmonics have occurred. Then, a model of the electric system which includes harmonics has been simulated with MATLAB/SIMULINK. The types of passive filter have applied to this system. The effects of these filters have investigated. The most efficient type of filter has defined. Lastly the results have discussed in detail.

Keywords: Efficiency of the Filter, Harmonic, Matlab/Simulink, Nonlinear Load, Passive Filter

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu tezin oluşum sürecinde bana rehberlik eden, yardımını ve mesaisini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞCI hocama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca hayatım boyunca yanımda oldukları, verdikleri manevi destek ve gösterdikleri anlayıştan ötürü aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Orhun DÖŞ
KONYA-2019



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kalite.....	6
3.2. Güç Kalite Ölçütleri ve Standartları.....	6
3.3. Elektrik Tesislerinde Bulunan Harmonik Çeşitleri	8
3.4. Harmonik Bileşenlerin Bulunduğu Devrelerdeki Durum	10
3.5. Harmonik İçeren Yüklerin Modellemesi.....	10
3.6. Harmonik Kaynakları	12
3.7. Harmoniklerin Temel Zararlı Etkileri	14
3.8. Harmoniklerin ve Güç Kalitesi Problemlerinin Bedeli	14
3.9. Oluşmuş Harmonikleri Azaltma.....	16
3.10. Filtre Tasarım Kriterleri	17
3.11. Harmoniklerin Rezonans Etkisi.....	19
3.11.1. Seri Rezonans	19
3.11.2. Paralel Rezonans	20
4. DENEY VE BULGULAR.....	21
4.1. Pasif Filtreler	21
4.1.1. Paralel Pasif Filtreler	21

4.1.1.1. Tek Ayarlı (Bant Geçiren) Filtreler.....	22
4.1.1.2. Çift Ayarlı Filtreler.....	40
4.1.1.3. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler.....	46
4.1.1.3.1. Birinci Dereceden Y.G.S. Filtreler.....	49
4.1.1.3.2. İkinci Dereceden Y.G.S. Filtreler.....	61
4.1.1.3.3. Üçüncü Dereceden Y.G.S. Filtreler.....	74
4.1.1.3.4. C Tipi Y.G.S. Filtreler.....	87
4.1.2. Seri Pasif Filtreler.....	100
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	114
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	140
KAYNAKLAR.....	142
ÖZGEÇMİŞ.....	144



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V_{a0}	:Sıfır Sequence
V_{a1}	:Pozitif Sequence
V_{a2}	:Negatif Sequence
A_0	:Ortalama Değer Genlik
$i_{(t)}$:Harmonik Akım Ani Değeri
$v_{(t)}$:Harmonik Gerilim Ani Değeri
I_n	:n. Harmonik Akım Etkin Değeri
V_n	:n. Harmonik Gerilim Etkin Değeri
Im_n	:n. Harmonik Akım Tepe Değeri
Vm_n	:n. Harmonik Gerilim Tepe Değeri
R_n	:n. Harmonik Frekansın Direnci
X_L	:Endüktif Endüktans
X_C	:Kapasitif Endüktans
B_h	:Harmonik genligi
f_1	:Temel Frekans
f_2	:Harmonik Bileşenin Frekansları
f_r	:Rezonans Frekansı
n	:İndis Numarası
T	:Periyot
t	:Kullanılan Zaman Dilimi
w	:Açısal Frekans
$F_{(t)}$:Fourier Fonksiyonu

Kısaltmalar

AC	:Alternatif Akım
D	:Distorsiyon
DC	:Doğru Akım
DF	:Bozunum Faktörü
DGF	:Distorsiyon Güç Faktörü
FFT	:Hızlı Fourier Dönüşümü
HF	:Harmonik Faktörü
Hz	:Hertz
THD	:Toplam Harmonik Bozunumu
IEEE	:Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle ortaya çıkan elektrik enerjisine ihtiyaç duyan ürünlerde giderek artmaktadır. Bu durumda ülkelerin gelişmişlik düzeylerine göre ihtiyaç duydukları elektrik enerjisi miktarının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Ülkelerde bu enerji ihtiyacı problemini çözmek için yeni elektrik santralleri kurmaya çalışarak ortaya çıkan enerji eksikliğini kapatmaya çalışmaktadırlar. Bilindiği üzere elektrik enerjisinin en verimli kullanımı üretildiği yere en yakın bölgelerde gerçekleşmektedir. Çünkü tüketici, elektrik santraline ne kadar uzaktaysa elektriğin iletim ve dağıtım kayıpları da o ölçüde artmaktadır.

Elektrik üzerinde oluşan iletim ve dağıtım kayıplarından hariç birde önem vermemiz gereken elektrik şebekesine bağlı lineer olmayan yüklerin artmasıyla meydana gelen harmonikler vardır.

Harmonikler 50 Hz sinüzoidal frekanstaki alternatif akımın şeklini bozarak elektriğin kalitesini düşürmektedirler. Harmonikler sonucunda düşen elektrik kalitesi ise motorlarda gürültüye, iletişim sistemlerinde problemlere ve hassas elektronik elemanların görevlerini yerine getirememeleri sonucunda ortaya çıkan sistem bozulmaları gibi birçok zararlı durumun ortaya çıkmasına sebep olur.

Lineer olmayan yüklerin şebeke üzerinde yaptığı bozulmaları önlemek için elektrik üreticileri ve tüketicilerine bazı standartlara uyma, tepkin güç kompanzasyonu sağlama ve harmonik filtre kullanımı gibi zorunluluklar getirilmiştir.

Elektrik tesislerinde enerji kalitesi; enerjinin kesintisizliği, frekansın ve voltajın sabit olması, güç faktörünün 1'e yakın olması ve gerilimdeki harmonik yoğunluğunun standartlarda belirtilen seviyenin aşağısında olması gibi şartlara bağlıdır.

IEEE 1100 standardında enerji kalitesi, sistemde kullanılan ekipmanlara uygun bir şekilde hassas elektronik cihazlara topraklama yapılması ve uygun bir şekilde beslenmesi olarak belirtilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

S. Adak'ın yaptığı çalışmada harmonik distorsiyonun azaltılmasını hedeflemiş olup, üçüncü harmonikten oluşan harmonikli bir sisteme ters fazda aynı genlikte üçüncü harmonik enjektinde yöntemini kullanmıştır. Enerji sistemlerinde çokça kullanılan 3 fazlı tam dalga doğrultucunun oluşturduğu harmoniklerin giderilmesi, kullanılan bu yöntem ile sağlanmıştır. Konu ile ilgili sayısal uygulama gerçekleştirilerek çeşitli tetikleme açıları için toplam harmonik distorsiyonu değeri hem analitik hem de MATLAB programı ile elde edilmiştir.

M. Şahin, Y. Oğuz , H. Tuğcu yaptıkları çalışmada enerji sistemindeki harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin tespitini yaparak çözüm önerileri sunmayı amaçlamışlardır.

M. Bilge çalışmasında elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen, frekans ve sinüzoidal dalga biçiminin bozulma nedenleri ortaya koymuş ve harmonik analizörü ile harmonik ölçümü yapmıştır. Daha sonra tasarladığı pasif filtreyi devreye alarak tekrar bir harmonik ölçümü yapmıştır. Elde edilen akım ve gerilimin Toplam Harmonik Bozunum (THDI ve THDV) değerleri ile mevcut durumun MATLAB ta simülasyonunu yapmıştır.

J. Arrigila ve arkadaşları çalışmalarında enerji sistemindeki harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin tespitinin yapılmasıyla çözüm önerileri sunmayı amaçlamışlardır.

C. Kocatepe, M. Uzunoğlu ve R. Yumurtacı 2003 yılında yapmış oldukları çalışmaları kitap haline getirmişlerdir. Bu kitapta enerji kirliliğindeki parametrelerden biri olan harmoniklerin çok yönlü olarak tanınmasına yardımcı olmuşlardır. Bu konunun anlaşılması için örnekler vermişler ve bu örnekleri MATLAB programında analiz etmişlerdir.

S. Efe çalışmasında öncelikle harmoniklerle ilgili temel bilgiler vermiş nasıl ve neden oluştuklarını, elektrik enerji sistemi üzerindeki etkilerini ve filtreleme yöntemleri incelemiştir. Daha sonra örnek bir elektrik enerji tesisinin modelini MATLAB programında oluşturmuş, pasif filtrelerin etkisini incelemiştir.

M. Izhar ve arkadaşları çalışmalarında tek fazlı lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ikiz spektrumla analizine dayalı bir yöntemi ortaya koymuşlardır.

C. Gezeğin çalışmasında harmonikli yük bulunan tesislerde tepkin güç kompanzasyonu ve harmoniklerin süzülmesi için kullanılan yöntemleri ortaya koymuştur. MATLAB/Simulink programı kullanılarak çeşitli modellemeler yapmıştır. Bu model ile farklı melez sistemlerin anlık tepkin güç kuramı ile performansı incelemiştir.

M. Ertay ve arkadaşları çalışmalarında MATLAB ortamında endüstriyel bir sistemde lineer olmayan yükler sebebiyle meydana gelen harmonik bozulmalara karşın pasif filtre tasarımı ve uygulanması gerçekleştirmişlerdir. İlk önce sistemin harmonik özelliklerini incelenmişler, daha sonra tek ayarlı filtre tasarımı için gerekli eşitlikleri vermişlerdir. Son olarak belirli harmonik dereceleri için pasif filtre tasarımı yapmışlardır.

M. Silva çalışmasında altı darbeli AC/DC dalga doğrultucusunun ürettiği harmonikler için bir pasif filtre tasarım yöntemini incelemiş ve gerçekleştirmiştir. Bu incelemesini senkron bir jeneratörün doğrudan AC/DC doğrultucuya ve AC kaynak tarafından temsil edilen kısa devre eşleniğiyle seri olan voltaj kaynağına bağlandığı durum için yapmıştır. Bu uygulamayı tek ayarlı filtre, çift ayarlı filtre ve yüksek geçiren filtre için gerçekleştirmiştir.

S. Leszek ve F. Czarnecki çalışmalarında harmonik filtre tasarımı metodundaki bozulmaların bağlı olduğu sonuçları göstermişlerdir. Çalışmalarını altı darbeli AC/DC doğrultucuyla bağlantılı olan harmonik filtreyi beşinci, yedinci, on birinci ve on üçüncü sıralı harmoniklerle sınırlandırmışlardır.

M. Silva çalışmasında harmonik güç akış analizinde kümelenmiş harmonik yükleri ve lineer yükleri formüle etmeyi ve yeni bir modelleme metodu geliştirmeyi amaçlamıştır. Ayrıca Monte Carlo simülasyonlarını baz alarak olasılıksal analizler yapmıştır.

T. Dandan çalışmasında harmoniklerin analizi için fourier dönüşümlerini incelemiş, harmonikleri üreten kaynaklar ve oluşan harmoniklerin güç sisteminde etkisi ele alınmıştır. Rezonans olayı sonucu şebekenin akım ve gerilim değerlerinin değiştiği ve şebekenin bundan olumsuz etkilendiğini tespit etmiştir.

M. Demirtaş çalışmasında güç elektroniği devrelerinde ortaya çıkan harmonikleri incelemek için Fourier analizini kullanmıştır. Harmonik üreten kaynaklar hakkında bilgiler vermiştir. Düşük dereceli harmoniklerin yok edilmesi için anahtarlama tekniklerini açıklamış ve yüksek dereceli harmonikler için örnek bir filtre tasarlamıştır. Ayrıca harmoniklerin güç ölçümü ve diğer alıcılar üzerindeki etkilerini anlatmıştır.

İ. İlaslaner çalışmasında bir enerji nakil hattının simülasyonunu yapmıştır. Enerji kalitesi için gerekli uygulamaları hat üzerinde denemiş ve özellikle elektriksel bileşenler için kararlılık çalışmaları sağlanmıştır. Enerji kalitesi için karma bir filtre kullanmıştır. Bu filtreyi aktif ve pasif filtrelerden oluşturmuştur. Sonuç olarak harmonik bileşenlerde azalma sağlanmış ve enerji kalitesindeki artış gözlemlenerek örnek hat için raporlamıştır.

C. Filiz çalışmasında fourier analizi kullanılarak harmoniklerin matematiksel analizi, harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin sistem üzerine etkileri ve harmonik standartları ayrıntılı olarak incelemiştir. Harmoniklerin giderilmesi konusuna ise ana hatları ile değinilerek filtrelerden bahsetmiştir. Yaptığı araştırmalar sonucunda vardığı sonuçlar ve alınması gereken önlemler için önerilere de çalışmasında yer vermiştir.

A. Karaağaç çalışmasında orta gerilim dağıtım sistemlerindeki güç kalitesini etkileyen harmonikleri incelemiştir. Bu incelemeyi gerçekleştirmek için İzmir ilindeki sisteme bağlı bir fiderdan ölçümler almıştır. Dağıtım sisteminden alınan ölçüm değerleri MATLAB/Simulink programında analiz etmiştir. Güçlü motorlara sahip bir sistemdeki voltaj harmoniklerine karşı bir pasif filtre tasarlamıştır ve sonuçlarını MATLAB/Simulink programında incelemiştir. Sonuç olarak bir dağıtım hattındaki harmoniklerin ölçümünü gerilimde meydana gelen değişimleri bunların zararlarını ve IEEE standartlarına uygunluğunu ve harmonik problemlerin giderilmesini incelemiştir.

Ç. Başaran çalışmasında tek fazlı gerilim kaynaklı çeşitli invertörlerin çalışma prensipleriyle beraber invertör çıkışındaki sinyallerin harmonik analizlerini yaparak bu harmonikleri azaltmak veya elemine etmek için uygun aktif ve pasif filtrelerin seçiminin nasıl yapılacağı hakkında bilgi vermiştir. Bununla beraber, çeşitli gerilim kaynaklı invertörlerin normal (kare dalga sürme) ve PWM'li çalışma yöntemlerini irdelemiş PWM'li çalışma modu için aktif filtre tasarlamıştır. Her iki çalışma modu için invertör çıkışına LC pasif filtre de eklemiş ve harmoniklerin etkisini azaltmaya veya yok etmeye çalışmıştır.

H. Çalışkaner çalışmasında harmonikleri teorik ve pratik olarak incelemiş, harmonik etkilerini ve filtrelenmesini ele almıştır. Ayrıca harmonikler için gerekli analiz yöntemleri incelemiştir.

K. Tunçalp ve M. Sucu, 2006 yılında yaptıkları çalışmalarında elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan pasif filtrelerin ve filtreli kompanzasyon sistemlerinin (seri endüktans bağlanmış kompanzasyon sistemi) yapıları ve uygulama şekillerini araştırmışlar ve bazı pasif filtre tiplerini MATLAB/SIMULINK

programı aracılığıyla modellemişlerdir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik enerji sisteminin modelini MATLAB programı ile oluşturmuşlardır. Bu sisteme, pasif filtre ve filtreli kompanzasyon sistemi uygulamışlardır ve bu filtrenin sistem üzerinde oluşturduğu etkileri incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu filtreleme sonucunda en verimli pasif filtrelemenin Tek Ayarlı Pasif Filtreyle olduğunu gözlemlemişlerdir.

M. Yılmaz çalışmasında harmoniklerin oluşmasına sebep olan harmonik kaynakları üzerinde durmuş, bu kaynakların eşdeğer devreleri ve gerilim ile akımın zamanla değişim eğrileri ile harmonik spektrumları şekiller halinde vermiştir. Harmoniklerin yok edilebilmesi için kullanılacak filtrelerin tanımı, işlevleri ve türleri üzerinde durmuştur ve her bir türün detaylı incelemesini yapmıştır. Filtre tasarım eşitliklerini vererek elektrik sistem tasarımında harmonikleri yok edebilmek için uygulanabilecek basit bir analiz yapmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kalite

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ucuz ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Güç kalitesi kavramında amaç; sabit şebeke frekansında olan sabit ve sinüzoidal biçimli kullanıcı gerilimidir. Ancak bu tür elektrik enerjisi pratikte ancak bir takım çalışmalarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle sinüzoidal dalga seklinden sapmalar olabilmektedir. Tam sinüzoidalden sapma, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir. Buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerinin lineer olmaması gelir [1].

Kaliteli elektrik enerjisi;

- Şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruması ve gerilim dalga seklinin sinüs biçimde bulunmasıdır.
- Bu tanımın tersi olarak, gerilimin genliğinin değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, dalga seklinin sinüsten uzaklaşması, frekans değişimleri, üç faz dengesizlikleri enerji kalitesizliğidir.
- Enerji kalitesi çoğunlukla yük tarafından bozulur. V-I karakteristiği doğrusal olmayan yükler şebekeden sinüs olmayan akımlar çeker ve bu akımlar şebekede sinüs olmayan gerilim düşümleri oluşturarak besleme noktasındaki gerilimin dalga seklini bozar.
- Gerilim ve /veya akım dalga sekli sinüs biçimde değilse, bu dalgaya Fourier analizi uygulanarak harmonikler bulunur [2].

3.2. Güç Kalite Ölçütleri ve Standartları

Uluslararası IEC 519-1992'ye göre standartlar içinde kabul edilen harmonik bozulma değerleri, gerilim için %3, akım için %5 olarak belirlenmiştir. Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelebilir. Elektrik Güç kalitesinin bozulması ile ilgili belli başlı standartlar aşağıda belirtilmiştir.[3]

- IEC Norm 555-2, 555-3 International Electrotechnical Commission.
- IEC 1000-3-2, 1995 (EN 6100-3-3) 1995 Alçak gerilim dalgalanması sınırlarını belirler.

- VDE 0838 Beyaz Eşya, VDE 0160 Çeviriciler, VDE 0712 Floresant.
- IEEE 519-1992 'Guide For Harmonics Control Ad reactive Compensation of Static Power Converters, ANSI/IEEE Std.519.
- TS 9882: Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar “Bölüm 2: Harmonikler”.
- EN 6100-3-2: Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Kısım 3. Sınırlar, Bölüm 2: Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A' den küçük cihazlar).
- IEC 1000-3-4: Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Kısım 3. Sınırlar, Bölüm 4: Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A' den büyük cihazlar).
- IEC 1000-2-2: Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Kısım 2: Düşük frekanslı iletken dağıtımları ve düşük gerilim sistemleri işaretlemelerde uyumluluk seviyeleri. [3]

Çizelge 3.1. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC-61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri [4]

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	>21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	>12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
>29	k				

$$(k=0.2+12.5/n)$$

Çizelge 3.2. IEEE'nin Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Değerleri [4]

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THDv (Toplam Harmonik Distorsiyonu %)
Vn<69kV	3.0	5.0
69<Vn<161kV	1.5	2.5
Vn>161kV	1.0	1.5

3.3. Elektrik Tesislerinde Bulunan Harmonik Çeşitleri

Elektrik tesislerinde çeşitli derecelerde ve miktarlarda harmonikler meydana gelmektedir. Harmoniklerin çeşitli derecelerde ve miktarlarda meydana gelmesinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bunları yükün cinsi, çalışma gerilimi, yüklenme akımları, güç transformatörlerinin bağlantı grupları ve benzeri nedenler etkilemektedir. [5]

Elektrik tesislerinde genellikle tek dereceli harmonikler görülmektedir. En yaygın harmonikler 3.,5. ve 7. dereceden harmoniklerdir. Fourier serisine göre harmonik analizi yapıldığında, harmoniklerin derecesi arttıkça etkileri azalmaktadır. [5]

Tek fazlı yüklerin ağırlıkta olduğu tesislerde 3. harmonikler baskındır. Üç fazlı sistemlerde üretilen 3. harmonikler arasında 120 derece faz farkı bulunmaz. Bu yüzden yıldız bağlı güç transformatörlerinde yıldız noktasında 3. harmonik akımları sıfırlanmaz. Aralarında faz farkı bulunmayan 3. harmonik akımları sıfır noktasında sıfırlanmadığı için, bu noktada 3. harmonik akım değeri 3 katına çıkar. Eğer nötr noktası topraklı ise harmonik akımları toprağa akar, topraklı değilse bu akımlar nötr noktasında birikerek fazlar arasında dengesizliğe yol açar. [5]

Üçüncü harmonik akımlarının arasında 120 derece faz farkının bulunmadığı aşağıdaki denklemlerde görülmektedir:

$$I_{h3.R} = I_{h3.R_{max}} \cdot \cos\omega t \quad (3.1)$$

$$I_{h3.S} = I_{h3.S_{max}} \cdot \cos(3\omega t + 3x2\pi/3) \quad (3.2)$$

$$I_{h3.T} = I_{h3.T_{max}} \cdot \cos(3\omega t + 3x4\pi/3) \quad (3.3)$$

Bağıntılarından da anlaşıldığı üzere 3 ve 3'ün katı harmonikler arasında faz farkı bulunmamaktadır.

Üç fazlı yüklerin ağırlıkta olduğu tesislerde ise genellikle 5. ve 7. dereceden harmonikler baskındır. Bu harmonikler nötr noktasında sıfırlanmalarından dolayı, nötr iletkenine baskı yapmazlar. Yapılan ölçümlerde ve simülasyonlarda üç fazlı yüklerin ağırlıkta olduğu tesislerde 5. ve 7. dereceden olan harmoniklerin baskın olduğu tespit edilmiştir. [5]

Şebekelerde genellikle Üçgen/Yıldız bağlı trafolar kullanıldığından, enerji nakil hatlarında 5.ve 7. dereceden harmonikler baskındır. Çünkü 3. harmonik akımlarına üçgen sargılarda kapalı çevrim oluşturulur. Bu kapalı çevrim sayesinde, 3. harmonik akımları üçgen sargılarda dolaşır ve OG şebekesine geçemez.

AG şebekelerinde ise değişik dereceden harmonikleri görmek mümkündür. Bunlar 3, 5, 7, 9 ve 11 gibi sıralanabilir. Bu harmoniklerin baskınlığı kullanılan yükün özelliğine göre ve tesisin rezonans frekansına göre değişmektedir. [5]

Bunlara ek olarak, güç transformatörleri mıknatıslanma akımından dolayı harmonik üretmektedir. Güç transformatörlerinde harmoniklerin en yüksek olduğu an, boşa çalışmalarının yüksek olduğu andır. Çünkü boşa çalışmada çekilen akım azalır. Böylece mıknatıslanma akımının oranı artar. Transformatörün geriliminin artmasıyla nüvesi doyuma ulaşır. Nüvenin doyuma ulaşması harmonik oranlarını artırır. [5]

Tüm harmonik filtreleme modellerinde harmonik bozukluğun asıl azaltılması gereken büyük kısmı 3. harmonik frekans tarafından üretilen harmoniklerdir. Genellikle 3. harmonik bir fazlı lineer olmayan yükler tarafından meydana getirilir. Üçüncü harmonik nötr iletkeni üzerinde faz iletkeni üzerindeki akımdan daha fazla değerde akım oluşmasına neden olur. Deşarj lambaları, flüoresan lambalar, cıva buharlı ve sodyum buharlı, lambalarda üçüncü harmonik bileşen üretirler. Deşarj lambaları, bilgisayarlar ve kesintisiz güç kaynakları gibi lineer olmayan yüklerin şebekede kullanılmalarının artması ve üçüncü harmonik bileşenin bu yükler tarafından üretilmesi sebebiyle şebekede ve diğer ekipmanlarda problemler meydana gelir. Yine bu bağlamda ofis ekipmanları, bilgisayarlar ve kesintisiz güç kaynakları gibi lineer olmayan yükler şebekede 3. harmonik bileşenin oluşmasına sebep olur. [6]

Harmonik akımları, harmonik kaynağından, en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedansıdır. Kondansatörlerin

reaktansı X_c sistemde harmoniklerin bulunması durumunda değeri $\frac{X_c}{n}$ olacağından akım

değeri oldukça artar, bundan dolayı, harmoniklerden güç sistemlerinde en çok kondansatörler etkilenir. lineer olmayan yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüzoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar sinüzoidal olmayan dalga olarak adlandırılır.[6]

Şebekede en fazla etkisi görülen harmonikler sırası ile 150 Hz frekanslı üçüncü harmonik, 250 Hz frekanslı beşinci harmonik ve 350 Hz frekanslı yedinci harmoniktir. Üçüncü harmonik bileşen genellikle bir fazlı lineer olmayan yükler tarafından üretilir. 5. ve 7. harmonik bileşenler ise üç fazlı lineer olmayan yükler tarafından üretilir. [6]

3.4. Harmonik Bileşenlerin Bulunduğu Devrelerdeki Durum

Harmonik bileşen içeren devreler için şu sonuçlar verilebilir:

Sinüzoidal beslemeli doğrusal olmayan devrelerde güç katsayısını tam olarak bir değerine çıkarılması için sadece güç kompanzasyonunun yapılması yeterli değildir. Bağlanan filtreler ile güç katsayısı belirli bir aralıkta değişmektedir. Bunun nedeni ise akım harmoniklerinin sebep olduğu bozulmuş gücünün etkili olmasıdır. Güç katsayısının (GK) 1 yapılabilmesi için, akım harmonikleri süzülerek güç kompanzasyonu yapılmalıdır.[7]

Sinüzoidal olmayan büyüklükleri içeren devrelerde koşut bağlanan filtre değerinin artmasıyla güç katsayısı değeri aynı şekilde artmamaktadır. Güç katsayısı belirli bir değere kadar artış gösterip daha sonra filtre eklenmesine rağmen azalma göstermektedir. Bu olay bize bir takım uygulamalarda ne kadar gereksiz filtre kullanıldığını göstermektedir.[7]

Güç kompanzasyonu yapılacak devrelerin karakteri (harmonik içerip içermediği) göz önüne alınmadığında bu gibi devrelerde en iyi olacak biçimde ve tam anlamıyla güç kompanzasyonunun yapılamayacağı söylenebilir.[7]

Yapılacak güç kompanzasyonunun ekonomik olması için, mutlaka en uygun filtre değeri hesaplanmalı ve filtre değeri ile güç katsayısının değişimi grafiksel olarak izlenmelidir. Ayrıca kompanzasyon ile birlikte toplam harmonik bozulmasının değerini de incelemek faydalı olacaktır [7].

3.5. Harmonik İçeren Yüklerin Modellemesi

Elektrik enerjisi tüketen yükler, genellikle yüklere ait aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) bağıntıları kullanılarak ifade edilirler. Lineer yükler için temel bileşen frekansındaki eşdeğer empedans değeri P ve Q değerleriyle hesaplanabilir fakat harmonik frekanslarında, bazı durumlarda kestirilen reaktif güçler ihmal edilebilir düzeyde olmasına rağmen ek bilgiler olmadan P ve Q değerleri doğrudan kullanılamaz. Değerlendirme sırasında yükün lineer olmayan bileşeni doğru olarak ele alınabilirse, yükün lineer bileşeni bir RLC devresiyle kolayca modellenebilir. Bununla beraber bazı model parametreleri için ayrıntılı bilgi toplamak çoğunlukla karmaşık işlemler gerektirir.[8] Alçak gerilim tesislerindeki yükler temel olarak rezistif, endüktif ve lineer olmayan olmak üzere üç ayrı tiptedir. Evsel, ticari ve endüstriyel kullanıma ait yük tipleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir. [9]

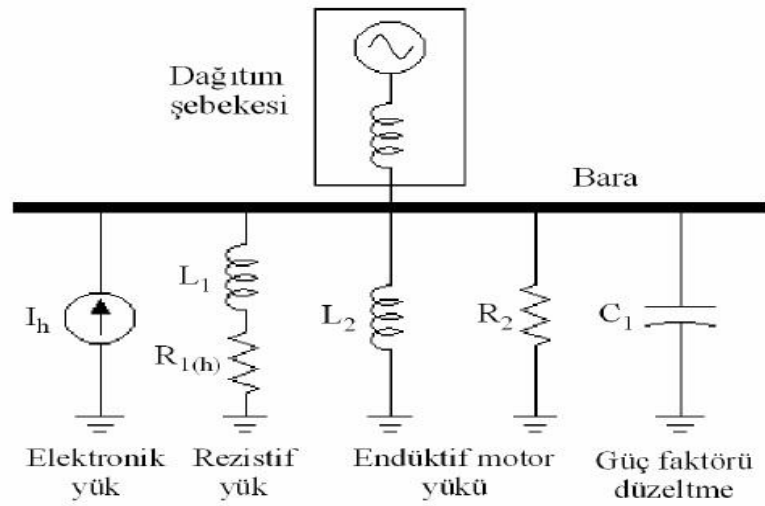
Çizelge 3.3. Yük Tipleri [9]

Tür	Yük Tipi	Elektriksel Karakteristik
Evsel	Akkor Lambalar Küçük Motorlar Kompakt Floresan Lamba Bilgisayarlar Elektronik Eşyalar	Rezistif Endüktif Nonlineer Nonlineer Nonlineer
Ticari	Rezistif Isıtıcılar Klimalar Çamaşır Makineleri Motor Sürücüleri	Rezistif Endüktif Endüktif Nonlineer
Küçük Endüstriyel Tesisler	Pompa ve Fanlar Kompresörler Ark Ocakları	Endüktif Endüktif Nonlineer

Çizelge 3.3.'de verilen lineer olmayan yükler, yüksek oranda harmonik üreten yüklerdir. Bundan dolayı sabit bir R , L veya C karakteristiği göstermezler. Bu yükler lineer olmayan karakteristiğe sahip oldukları için empedanslardan oluşan eşdeğer bir devre modeli ile gösterilemezler. Bu tür yüklerin harmonik empedansların üzerindeki etkilerinin yok denecek kadar az olması nedeniyle empedansları ihmal edilir ve açık devre kabul edilir. [9]

Anahtarlama güç kaynağı içeren PC, yazıcı, data projektör, monitör, tarayıcı, faks, taşınabilir bilgisayar vb. ofis donanımlarının ve elektronik balastlı floresan aydınlatma donanımlarının akım dalga biçimleri ağırlıklı olarak tek harmonikleri içerir. En baskın harmonikler 3 ve 3'ün katı harmoniklerdir. Bunun yanında 5. ve 7. harmoniklerin genlikleri de oldukça yüksektir ve akım THD değerleri genellikle %140'ın üzerindedir. [10]

Bu tür lineer olmayan karakteristikteki donanım, genlik ve açı parametreleri bilinen paralel akım kaynakları (akım enjeksiyon modeli) ile modellenebilir.[11] Alçak gerilim şebekelerinde bulunan yüklerin harmonik incelemeleri için gösterimi Şekil 3.1.'de verilmiştir.



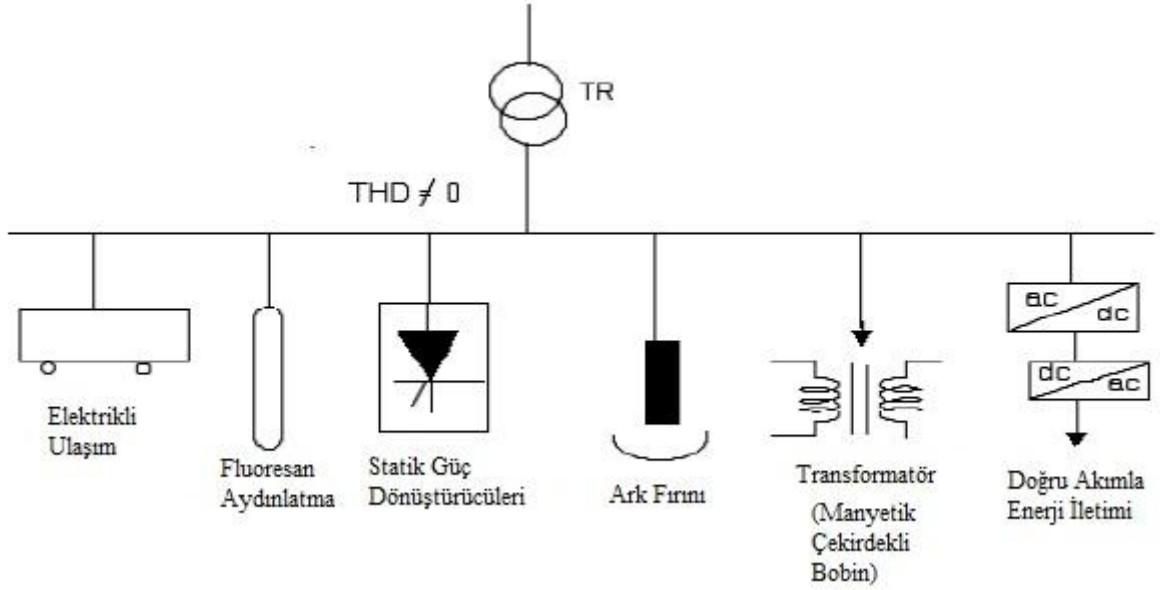
Şekil 3.1. Alçak Gerilim Şebeke Yükleri

3.6. Harmonik Kaynakları

Bilindiği gibi elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonikleri meydana getiren elemanlar genel olarak şu şekilde verilebilir: [12]

- Konverterler,
- Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar,
- Jeneratörler,
- Motorlar,
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Kaynak makineleri,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüler,
- Statik VAr kompanzatorleri,
- Yüksek gerilim ile enerji iletim (HVDC) sistemleri,
- Elektrikli ulaşım sistemleri.

Şüphesiz enerji sisteminde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzlukların giderilmesi bakımından tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir.[12]



Şekil 3.2. Ticari Yükler [4]

Ticari yükler; ısıtma, havalandırma, iklimlendirme yükleri, asansör motorları, tek fazlı anahtarlamalı güç kaynağıyla beslenen hassas elektronik cihazlar gibi yüksek verimlilikle çalışan cihazlar özellikle elektronik balastlı floresan lambalardır. Şekil 3.2.'deki lineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları aydınlatma elemanlarıyla donatılmış ofisler, büyük mağazalar, hastaneler, büyük bilgi işlem merkezleri olarak sıralanabilir.[4] Diğer bir deyişle ticari yükler, birçok küçük harmonik kaynaktan oluşur. Birbirinden farklı bu harmoniklerin çeşitliliğine bağlı olarak harmonik bileşenler birbirlerini destekleyebilir ya da birbirlerini sönmüleyebilir. Genellikle ticari tesislerde güç faktörü düzeltme kapasitörleri kullanılmadığından, sistemin empedansı sistem transformatörü ve hat empedansına bağlıdır. Bu yüzden sistemin gerilim distorsiyonu; harmonik frekansla değişen sistem empedansı ile, akımın çarpımından elde edilebilir.[13]

3.7. Harmoniklerin Temel Zararlı Etkileri

- Kondansatör gruplarının yalıtkanlıklarının bozulmasına veya kondansatörün aşırı yükten dolayı kötü çalışmasına [12]
- Taşıyıcı güç sistemleri ve dalga kontrolünde parazite, yük kontrolü, ölçme uzaktan anahtarlama yapan sistemlerin kötü çalışmasına
- Asenkron ve senkron makinelerde aşırı ısınmaya ve bundan dolayı kayıplara, Rezonans nedeniyle sistemde aşırı gerilim ve aşırı akımlara
- Sistemde oluşturduğu aşırı gerilimden dolayı, kullanılan iletkenlerin yalıtkanlıklarının bozulmasına
- İletişim sistemlerinde parazite
- Endüksiyon prensibine göre çalışan Ölçü aletlerinde hatalara
- İşaret parazitlerine ve rölelerin kötü çalışmasına (özellikle mikroişlemci kontrollü sistemlerin kötü çalışmasına)
- Yaygın olarak kullanılan motor denetleyicilerinde ve güç istasyonu uyarım sistemlerinde parazite
- Asenkron ve senkron makinelerde mekaniksel titreşime
- Sıfır gerilim geçişine veya tetikleme dayanan ateşleme devrelerinin kararsız çalışmasına neden olur.
- Motorlar ve diğer aparatlarda fazladan ses
- Kompanzasyon kapasitörleri ve kablo kapasitansının varlığı, bozulmaya sebep olan yükten uzak bir noktada bile, şebekede gerilim artışlarına neden olan seri ve paralel rezonanslara yol açabilmektedir.

Harmonik gerilim kapsamını tavsiye edilen düzeylerde tutmak için günümüzde kullanılan ana çözümler;

- Yüksek darbeli doğrultma (filtre, konvertörler v.s.) kullanımı
- Özel frekanslara ayarlanan ya da bant-geçiren tipi pasif filtreler
- Aktif filtre ve koşullandırıcılar.[12]

3.8. Harmoniklerin ve Güç Kalitesi Problemlerinin Bedeli

Copper Development Assosination'a göre Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde, elektrik enerjisi kalite problemlerinin endüstride ve ticari alanlarda yaptığı zararların yılda 10 milyar € olduğu tahmin edilmektedir ve problemlerin ortadan kaldırılması için yapılan harcamalar bu rakamın %5'i civarındadır. [17]

Eurelectric'in araştırmasında harmoniklerin dnyadaki yıllık zararı birkaç yz milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir. [18]

IBM'in son yıllarda Amerika'da yapmış olduğu bir araştırma, güç kalitesi problemlerinin faturasının 15 milyar \$ olduğunu ve bu zararın her firma başına tahminen 79.000 Dolar olduğunu göstermektedir.[19]

EPRI'nin araştırmasında, güç kalitesi problemlerinin faturasının Amerika'da yılda 400 milyar \$ (1994), US Department of Energy'ye göre yılda 150 milyar \$ (1995), Fortune Magazine' e göre yılda 10 milyar \$ (1998) olduğu belirtilmiştir.[20]

Fransa'da bir cam fabrikasında düşük güç kalitesinden dolayı iki transformatörün art arda arızalanmasıyla üç günlük üretim kaybıyla beraber 600.000 € maddi zarar olmuştur.

Bir bankada nötr hattının aşırı ısınmasından dolayı çıkan yangınla 1 milyon Euro maddi kayıp olmuştur.[19]

Bir jeneratör firması tarafından yapılan orta ölçekli ölçümlerde yük talebinin 5 ve 30 MVA arasında değiştiği 12 noktada gerilim dalgalanmaları ölçülmüş ve on aylık bir dönemde 858 adet gerilim dalgalanması tespit edilmiştir. Bunlardan 42'sinde kesinti ve finansal kayıplar meydana gelmiştir. Söz konusu 12 noktada eski teknolojiler kullanılarak katma değeri düşük imalat işleri yapılıyor olmasına rağmen finansal kayıplar 600 000 Euro (ortalama olarak bir olayda 14 300 € veya her bir noktada 50 000 €) toplam değere kadar yükselmiş, tek bir noktadaki en yüksek kayıp 165 000 € olmuştur. Dolayısıyla, katma değeri yüksek ürünlerin imal edildiği veya yarı iletken sanayisi gibi çok aşamalı işlemler içeren imalatların yapıldığı işletmelerde kayıpların çok daha yüksek olacağı açıktır. Çizelge 3.5.'de hesaplanan bu değerlerin yüksek teknolojide yüksek maliyetli alanlara uygulanarak hesaplanmış değerler verilmiştir.[18]

Çizelge 3.5. Copper Development Assosiation'ın Gerilim Dalgalanması Finansal Kayıp Araştırması [18]

Sanayi	Her Bir Olaydaki Finansal Kayıp
Yarı İletken Üretimi	3.800.000 €
Finans Sektörü	6.000.000 € / Bir saatte
Bilgi İşlem Merkezi	750.000 €
Telekomünikasyon	30.000 € / Bir Dakikada
Çelik Tesisleri	350.000 €
Cam Sanayi	250.000 €

3.9. Oluşmuş Harmonikleri Azaltma

Elektrik sisteminde harmonikleri tamamen bastırmanın veya en azından etkilerini azaltmanın en etkin yolu filtre kullanmaktır [21].

Filtreleme; ana sinyaldeki zayıflama %40 olduğunda filtre hesaplanarak takılmalıdır. Filtre modelleri aktif filtre, pasif filtre ve karma filtre olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.[21]

Pasif filtreleme, pasif bileşenleri (endüktans, kondansatör, direnç) kullanarak, genliği düşürülecek olan frekanslara düşük empedanslı bir by-pass bağlamayı gerektirir. Farklı bileşenleri ortadan kaldırmak için birbirine paralel bağlı pasif filtreler gerekebilir. Çalışma mantığı; paralel kol olarak tasarlanan pasif filtre düzeneği, tasarlandığı derecenin değerinde seri rezonans oluşturup harmonik akımını sisteme zarar vermeden toprağa aktarabilen düzenek olarak bilinir. Harmonik filtreleri boyutlandırırken önem gösterilmelidir. Aksi halde kötü tasarlanmış pasif filtrelerde rezonansa yol açabilir.[21]

Aktif filtreleme, yük tarafından tüketilen harmoniklerin analiz edilmesiyle yükün yaydığı harmonikleri nötr hale getirmekten ve aynı harmonik akımını veya gerilimini uygun fazla yeniden eski durumuna getirmekten ibarettir. Temel olarak çalışma mantığı; aktif filtre devreye bağladığı noktadaki akımı veya gerilimi ölçer, içeriğindeki güç elektroniği devresi ile tespit ettiği harmoniğin tam ters işaretlisini kendi tetikleme devresi ile üreterek sisteme enjekte eder. Karma Filtre, hibrit filtre olarak bilinen bu yöntemde, gerekli reaktif gücü sağlayan hakim harmonik (örneğin 5.) sırası için bir aktif filtre ve bir pasif filtre setinden ibarettir.[21] Bu çalışmada pasif filtre tiplerinin uygulanmasında ki amaç; pasif filtrelerin sabit güç ihtiyacı duyan sistemler için filtreyi oluşturan elemanların makul fiyatlı olması ve böylece ortaya ekonomik ve verimli bir filtrelemenin çıkmasıdır. Aktif filtrelerin ise daha çok sistemin değişken bir güce ihtiyaç duyduğu durumlarda kullanılması planlanır.

Çizelge 3.6. Filtre Tiplerinin Karşılaştırılması [21]

Filtre	Çalışma Prensibi	Özellikleri
Pasif	Ortadan kaldırılacak her bir harmonik frekansı için ayarlanan by-pass seri AG devresi.	Harmonik akımında limit yok. Reaktif gücün dengelenmesi. Bir veya daha fazla harmonik sırasının ortadan kaldırılması (genellikle 5,7,11). Dengelenen bir veya iki sıra için bir filtre. Tesisat değişiminde harmoniklerin artma riski. Dış kirlenmeden kaynaklanan aşırı yük riski. Tesisat filtresi.

Aktif	Yükün oluşturduğu tüm harmonikleri iptal eden sinyalin üretilmesi.	Özellikle makineli filtrelemeye uygun (bölgesel) çözüm. Geniş bir frekans bandında filtreleme (harmonik sırası 2 ila 25'in ortadan kalkması). Kendi kendine ayarlanma. Tesisat değişikliğinin hiçbir etkisi yoktur ve genliklerin sınırlandırılmasında etkin. Yük ve harmonik spektrumunda tüm ayarlamalara uyum sağlar.
Hibrit	Paralel aktif filtreden ve seri pasif filtre grubundan oluşan bir filtre türüdür.	Pasif ve aktif filtreleme çözümlerinin avantajlarını sunmaktadır ve geniş bir güç ve performans yelpazesini içermektedir. Geniş bir frekans bandı üzerinden filtreleme (2 ila 25 numaralı harmoniklerin ortadan kaldırılması).

3.10. Filtre Tasarım Kriterleri

Bir filtrenin kullanılma nedenlerinin başında dalga şeklinin bozulması nedeniyle meydana gelen bozulmaların yok edilmesi gelmektedir fakat bunlardan daha önemli olan neden teknik ve ekonomik bakımdan filtre kullanma gerekliliğidir. Ülkemizde birçok işletmede yaşanan harmonik etkilerin oluşturduğu sorunlar teknik gerekliliği ortaya koymaktadır. Mali bakımdan değerlendirme ise halen harmonik standartların ülkemizde oluşturulmamış olması ve maliyet konusunda kayıp analizlerinin yapılamaması nedeniyle halen göz ardı edilmektedir.[4]

Tasarımda mali bakımdan değerlendirme yapılırken, tek ayarlı filtrelerde kullanılacak kapasitenin değerinin büyük olacağı göz önüne alınmalıdır. Harmonik değeri büyüdükçe, tek ayarlı filtre yerine bu harmoniklerin tümü üzerinde etkili olan bir filtre kullanılması ekonomik açıdan daha uygun olacaktır. Küçük değerli (3., 5., 7.) harmoniklerin daha etkin olması nedeni ile bu harmoniklerin her birinin süzme işlemi mutlaka tek bir filtre ile yapılması gereklidir. [4]

Harmonik filtreleri her tesis için ayrı ayrı boyutlandırılmalıdır. Bu amaçla bir tasarımcının aşağıdaki bilgiler ihtiyacı vardır: [9]

- Sorun yaratan yükün meydana getirdiği harmonik akımların frekans ve genlikleri
- Çevredeki yükler ile güç sisteminin eşdeğer devresinde göz önüne alınacak en etkili harmoniğe kadar devrenin empedans değişimi

- Şebekenin çeşitli noktalarındaki ve işletmelerin besleme noktasında izin verilen harmonik bozulmanın derecesi
- Tesiste bulunan ve planlanan güç kondansatörleri,
- Diğer kaynakların sebep olduğu harmonik bozulmanın derecesi
- Tasarım yapılacak filtrenin çalışacağı gerilim, frekans ve sıcaklık değerleri
- Filtrenin, harmonik oluşturan yüklere en yakın noktada konumlandırılması

Filtrelerin tasarlanmasındaki temel yaklaşım şu şekilde özetlenebilir: [22]

- Filtre edilecek harmonik akımlarının büyüklükleri saptanır.
- Temel frekansta reaktif güç gereksinimini ve harmonik akımlarının anma değerlerini esas alan bir kondansatör anma değeri saptanır. Bunun için var olan bir kondansatör ünitesi de yeterli olabilir.
- İstenen ayarı sağlayacak endüktans değeri saptanır. Bu endüktansın anma değeri, hem temel akım bileşenini hem de filtredeki harmonik akımlarını esas almalıdır.
- Kondansatör ve endüktans değerlerindeki toleransların etkisini de içeren filtre cevabı kontrol edilir. Ayarlanabilme esnekliği, filtre büyüklüğünün artırılması veya seri direnç etkilenmesiyle artırılabilir.
- Sürekli halde temel ve harmonik frekanslarında, kondansatör üzerindeki gerilim tepe değerleri kontrol edilir.
- Sistemle filtre arasındaki ters etkileşimler kontrol edilir. [22]

3.11. Harmoniklerin Rezonans Etkisi

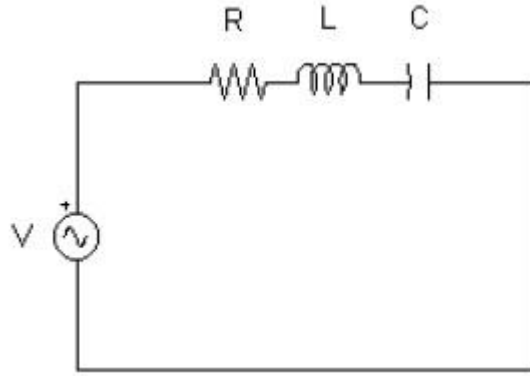
Bir elektrik devresinde, endüktif reaktans ile kapasitif reaktans değerlerinin eşit olması durumunda, rezonans durumu meydana gelir. Güç sistemlerinde rezonans durumu, devreden aşırı akım veya aşırı gerilim değerlerinin oluşmasına neden olur. Elektrik devrelerinde iki tür rezonans durumuyla karşılaşılır:

1. Seri Rezonans
2. Paralel Rezonans

Aşağıdaki açıklamalarda devrenin ideal bir şebeke kaynağından beslendiği öngörülmüştür.[23]

3.11.1 Seri Rezonans

Seri rezonans durumunda devre empedansı düşüktür ve devreye düşük genlikli bir gerilim uygulansa bile devreden yüksek genlikli rezonans akımları akacaktır.



Şekil 3.10. Seri RLC Devresi. [23]

Şekil 3.10'da verilen devrenin empedansı (3.7) deki gibi ifade edilir:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L + X_C) \quad (3.7)$$

Kaynak gerilimine ait açısal frekans ω olmak üzere devrede rezonans durumu meydana geldiğinde,

$$X_L = X_C \Rightarrow \frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (3.8)$$

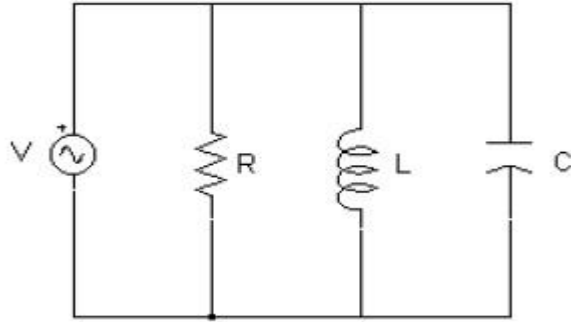
olur ve bu durumda rezonans frekansı (3.9) deki gibi ifade edilir:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f}{\omega\sqrt{LC}} = f \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.9)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olduğu için devre empedansı $Z=R$ olur. Rezonans durumunda empedans minimum iken akım maksimum değer alır. Seri rezonansa büyük değerler alan kondansatör ve endüktans gerilimi birbirine eşit ve zıt yönlü olduklarından toplamları sıfır olur. Bu nedenle, seri rezonansa gerilim rezonansı denir.[23]

3.11.2 Paralel Rezonans

Paralel rezonans durumunda, empedans maksimum değerini alır ve bu nedenle özellikle harmoniklerin mevcut olması durumunda devreden düşük genlikli bir akım geçse bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli rezonans gerilimleri meydana gelir.[24]



Şekil 3.11. Paralel RLC Devresi. [24]

Şekil 3.11.'de verilen devrenin empedansı şu şekilde ifade edilir:

$$Z = \frac{-j.R.X_L.X_C}{R.(X_L - X_C) - j.X_L.X_C} \quad (3.10)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olacağından rezonans frekansı şöyle ifade edilir:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.11)$$

Rezonans durumunda akım değeri büyük değerler alır. Empedans ve kondansatör üzerinden geçen akım değeri birbirine eşit olup, toplamları sıfırdır. Bu nedenle paralel rezonansa akım rezonansı denir.[23]

Burada;

R_n : n. harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω),

X_{Ln} : n . harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω),

X_{Cn} : n. harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitanstır (Ω).

4. DENEY VE BUGULAR

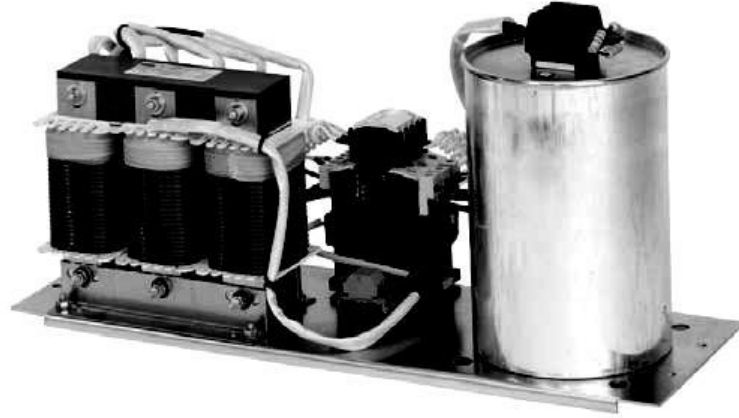
Bu çalışmada; elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan pasif filtrelerin yapıları ve uygulama şekilleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik sisteminin modeli MATLAB/SIMULINK programı ile oluşturulacak ve harmonik içeren bu sisteme, pasif filtre çeşitleri ayrı ayrı uygulanarak bu filtrelerin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler incelenecektir. Ardından sonuçlar üzerinde yorumlar yapılacak ve tasarlanan sistem için en verimli filtre tipi belirlenecektir.

4.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler harmoniklerin kontrol edilebilmesi için endüktif, kapasitif ve rezistif elemanlardan oluşmaktadır. Bu tip filtreler yaygın olarak kullanılan ve diğer harmonik çözümlerine nazaran daha ucuzdur.

4.1.1. Paralel Pasif Filtreler

Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonansa gelecek L, C değerleri hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Şekil 4.1.'de tipik bir pasif filtre görülmektedir.[13]



Şekil 4.1. Tipik bir pasif filtre.[13]

Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin yani genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulmalı, genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır. [25]

Pasif filtreler sistemde tehlikeli problemlere neden olabilmekte ve tasarlanmadan önce sistemin özellikleri ve bu elemanlara sistemin tepkisi iyi bilinmelidir. Şekil 4.2.'de iyi kontrol edilmeyen bir sistemde oluşan rezonans sonucu kapasitif elemanların tahribatı gösterilmektedir. [26]



Şekil 4.2. İyi kontrol edilmeyen bir sistemde oluşan rezonans sonucu kapasitif elemanların tahribatı. [26]

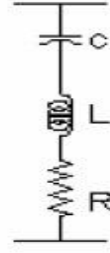
4 farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır:

- Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler
- Çift ayarlı filtreler
- Otomatik ayarlı filtreler
- Yüksek geçiren sönümlü filtreler

4.1.1.1 Tek Ayarlı (Bant Geçiren) Filtreler: Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar. Tek ayarlı filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelir. Tek ayarlı filtre örneği Şekil 4.3.'de görülmektedir.[25]

Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı,

$$Z = Z_T = R + j(X_L - X_C) = R + j(2\pi \cdot fn \cdot L - \frac{1}{2\pi \cdot fn \cdot C}) \quad (4.1)$$



Şekil 4.3. Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre

şeklinde. Bu filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı (ayarlandığı harmonik frekansındaki empedansı),

$$Z_{T0} = R \quad (4.2)$$

olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik toprağa akar.

Burada;

Z_T : Temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedansı (Ω)

R: Tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direnci (Ω)

X_L : Tek ayarlı filtrenin endüktif reaktansı (Ω)

X_C : Tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktansı (Ω)

F_n : n. harmonikteki frekans (Hz)

L: Tek ayarlı filtrenin endüktansı (H)

C: Tek ayarlı filtrenin kapasitansı (F)

Z_{T0} : Tek ayarlı filtrenin istenen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedans (Ω)

f_0 : Tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekansı, yani rezonans frekansıdır (Hz)

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığı için bu filtrelerde $X_L = X_C$ şartı aranmaktadır. Bu X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir. Tek ayarlı filtreler sisteme uygulandığında filtredeki kapasite, sistemin temel frekansı ve ayarlanan harmonik frekansın dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi göstereceğinden filtre hesaplanırken, filterde kullanılacak kapasite değeri sistemin

kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak değerde belirlenmeli ve daha sonra bu değerle rezonansa gelecek endüktans değeri hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmelidir. [25]

Öncelikle sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Bunu için,

$$Q = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4.3)$$

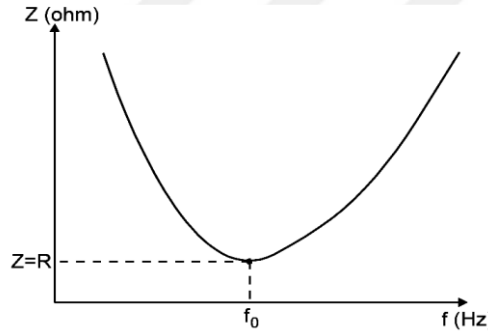
Burada;

Q: Sistemin istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmesi için sisteme bağlanması gereken kondansatörün gücü (Var)

P: Sistemin toplam aktif gücü (W)

$\tan Q_1$: Sistemin kompanzasyon yapılmadan önceki güç açısının tanjantı

$\tan Q_2$: Sistemde kompanzasyon uygulandıktan sonraki elde edilmek istenen güç açısının tanjantıdır.



Şekil 4.4. Tek ayarlı paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi. [25]

Hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra,

$$X_c = \frac{U^2}{Q} \quad (4.4)$$

formülünden sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı belirlenmelidir.

Burada;

X_c : Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri (Ω)

U: Sistemin çalışma gerilimidir (V)

Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer; sistemdeki etkin harmonik mertebelerine göre ayrı ayrı ayarlanan tek ayarlı filtrele, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır. Daha sonra her filtre kademesi için bilinen X_c değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme eklenmelidir. [25]

Bu durumda kapasite hesabı;

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} \quad (4.5)$$

İle hesaplanmalı ve yapılacak her bir tek ayarlı harmonik filtre kolu sayısına eşit olarak bölünmelidir. [25]

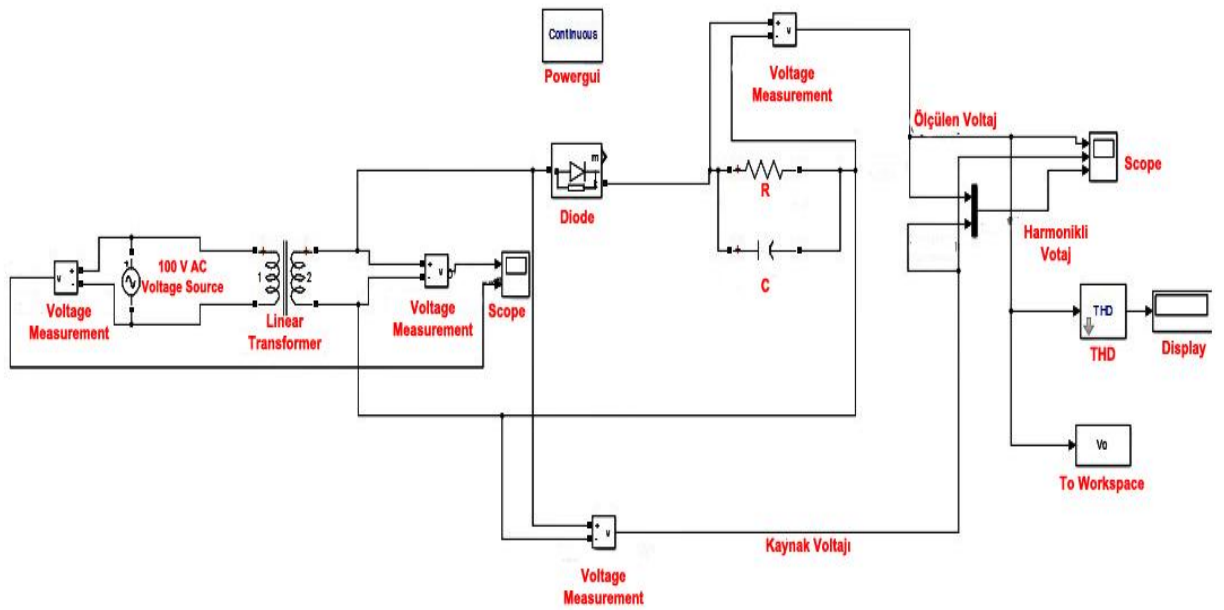
İndüktör boyutunun hesabı ise aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir;

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f n^2 \cdot C_n} \quad (4.6)$$

Son olarak devreye tek ayarlı filtrenin iç direncini oluşturacak küçük (100Ω) bir direnç değeri eklenmelidir.

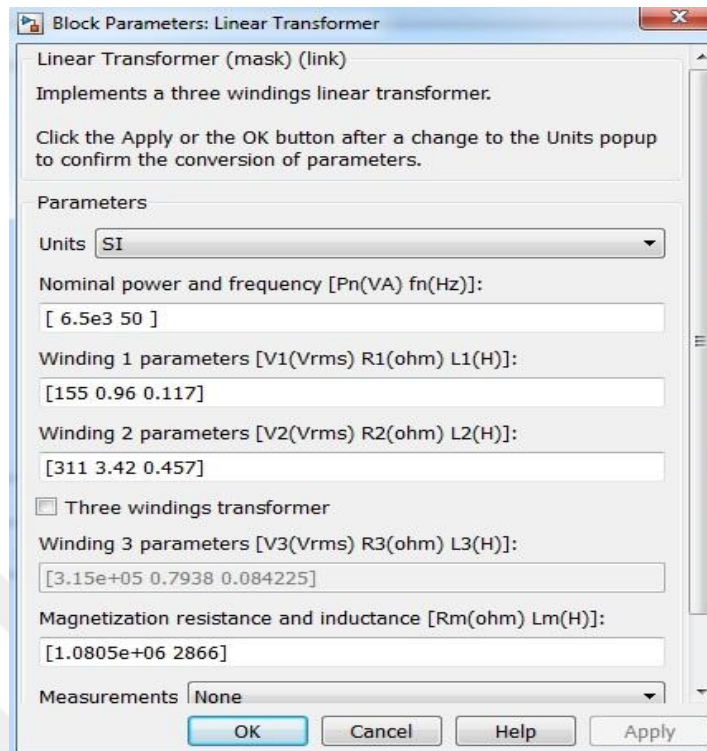
Lineer olmayan yük kısmında ise R=100Ω ve C=1uF dir.

Örnek olarak tasarlanan harmonikli kaynak Matlab/Simulink programında Şekil 4.5.'de ki gibi modellenmiştir. Bu modelleme üzerine sırasıyla tüm pasif filtre tipleri yerleştirilecek ve aralarından FFT (Hızlı Fourier Yöntemi) kullanılarak bu devrenin ürettiği harmonik seviyeleri belirlenecektir. Bu yöntem izlenilerek en verimli harmonik sönümlenmeyi gerçekleştirecek pasif filtre tipi belirlenecektir.



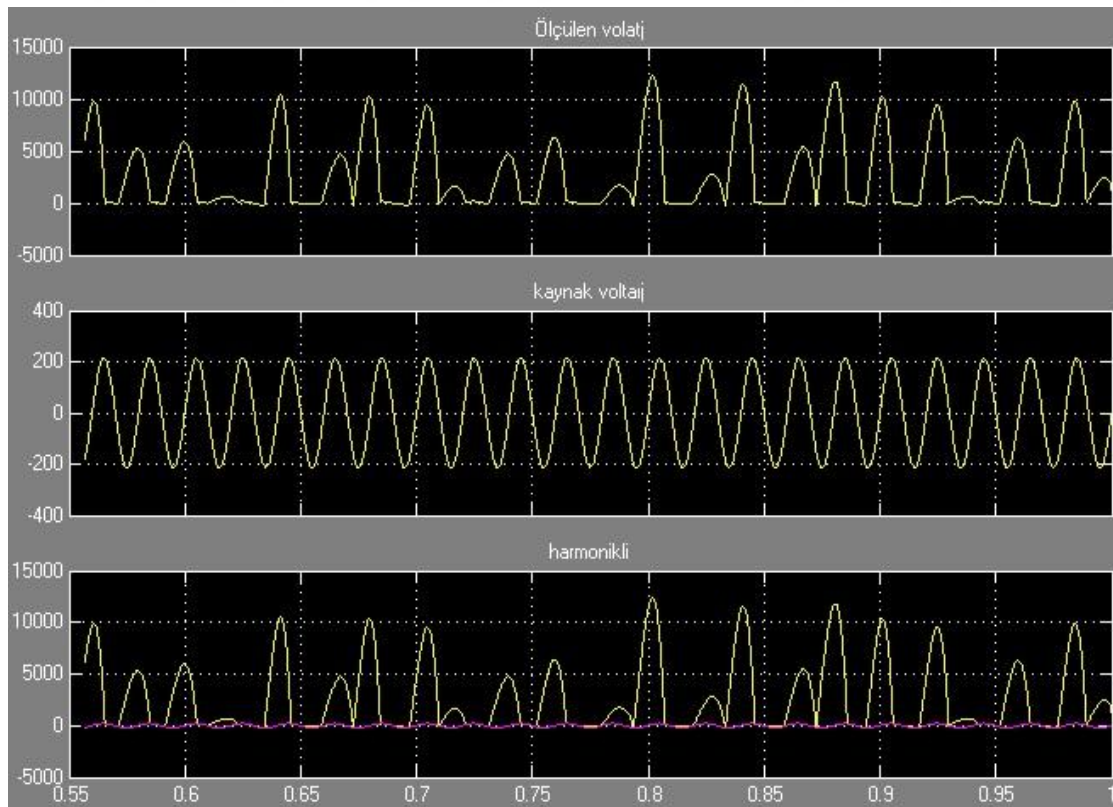
Şekil 4.5. Harmonikli Kaynağın Modellemesi.

Bu modellemede transformatörün değerleri ise aşağıdaki gibidir;



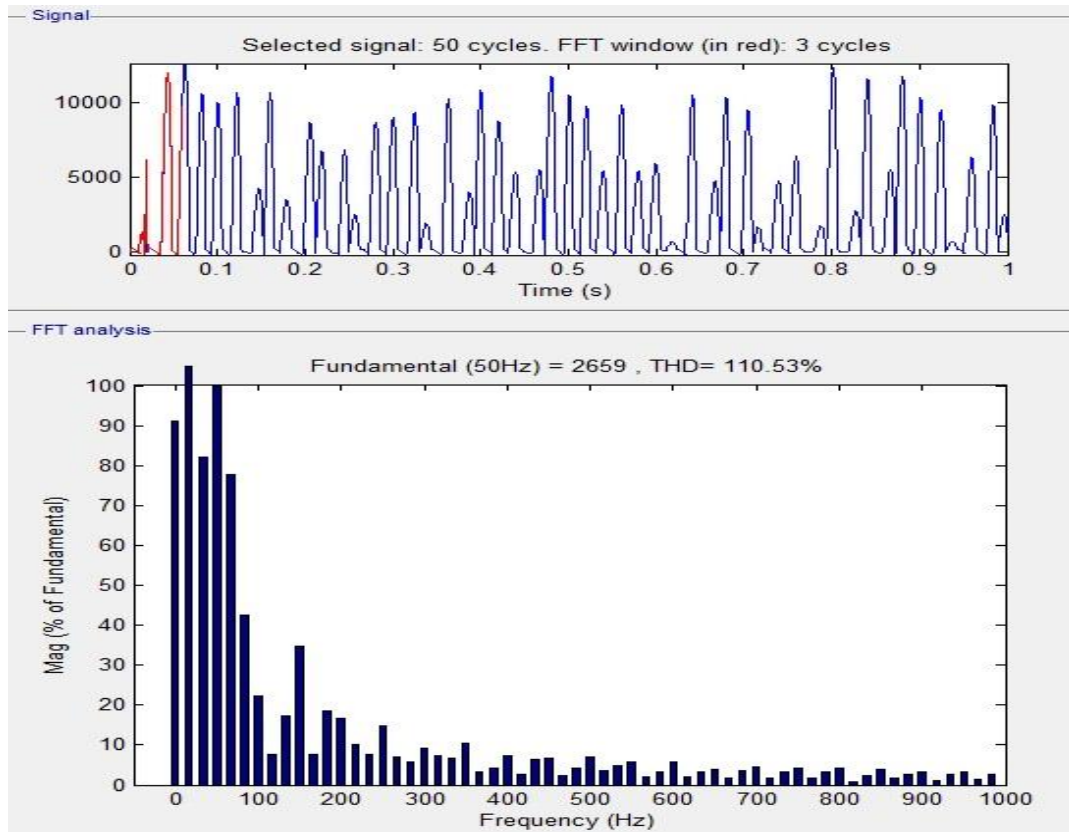
Şekil 4.6. Transformatöre Ait Parametreler

Bu modellemenin ardından modelleme üzerinde hızlı fourier yöntemiyle (FFT) harmonik analizi yapılmıştır. Bu analize göre ortaya çıkan sinyaller aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.7. Sinyal Analizi Sonuçları.

Bu devrenin FFT analizi sonucu ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.8. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli devre üzerinde yapılan FFT analizi sonucunda en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62, 5. harmonik frekanstaki bozulma %14.63, 7. harmonik frekanstaki bozulma %10.31, 9. harmonik frekanstaki bozulma %6.83, 11. harmonik frekanstaki bozulma ise %5.84 olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden anlaşılacağı üzere harmonik bozulma seviyeleri uluslararası harmonik standartlarında voltaj harmonikleri için belirtilen %3'lük seviyenin oldukça üstündedir. Oldukça yüksek olan bu harmonik bozulmaları harmonikli bu devrenin üzerine sırasıyla tüm pasif filtre tiplerini eklenecek ve uluslararası harmonik standartları seviyelerine indirgenmeye çalışılacaktır. Bu işleme ilk olarak tek ayarlı pasif filtre eklenerek aşağıdaki gibi başlanacaktır.

Tasarlanacak harmonik filtreler için sistemin kompanzasyon gücü 10MVAR seçilmesi yeterli görüldü. Buna göre diğer hesaplamalar aşağıdaki gibidir:

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.7)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 0.00065F \quad (4.8)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1.10^{-4}F \quad (4.9)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1.10^{-4})} = 11,25.10^{-3} H \quad (4.10)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1.10^{-4})} = 4,05.10^{-3} H \quad (4.11)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1.10^{-4})} = 2,06.10^{-3} H \quad (4.12)$$

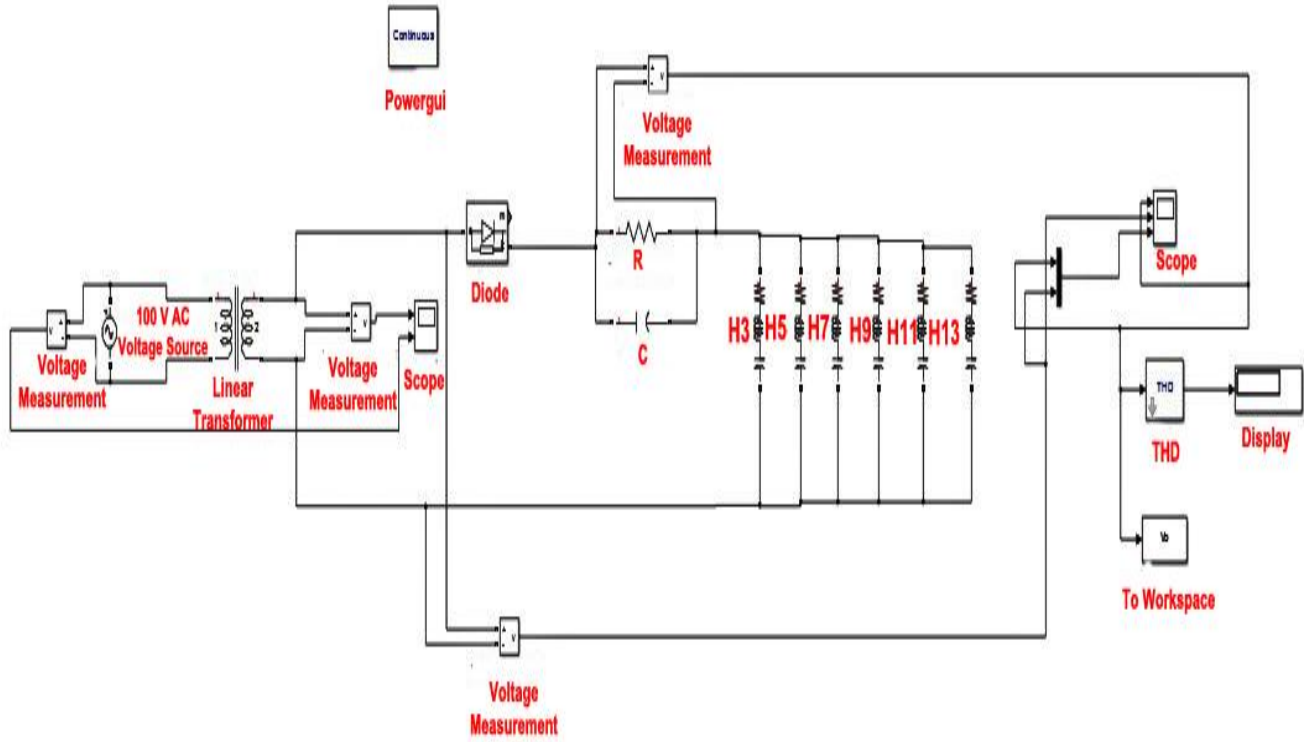
$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1.10^{-3})} = 1,25.10^{-3} H \quad (4.13)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f11)^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1.10^{-3})} = 8,37.10^{-4} H \quad (4.14)$$

$$L_{13} = \frac{1}{4.\pi^2.(f13)^2.(C_{13})} = \frac{1}{4.\pi^2.650^2.(1.10^{-3})} = 5,99.10^{-4} H \quad (4.15)$$

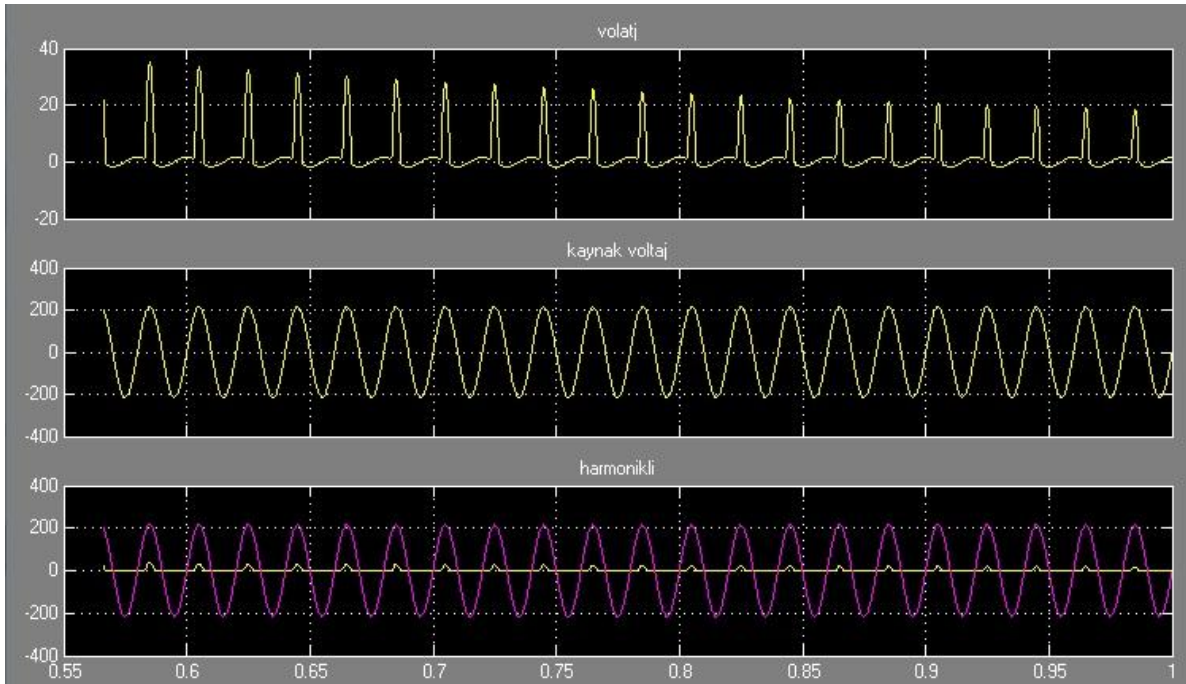
Bu sistem için birbirine paralel altı koldan oluşan tek ayarlı filtrede direnç değerinin $R=100\Omega$ alınması yeterli görülmüştür. Bu küçük direnç değeri filtrenin iç direncini oluşturacaktır.

Tüm harmonik frekanslar için tek ayarlı harmonik filtrelerin sisteme eklenmiş hali aşağıdaki modellemeye gösterilmektedir;



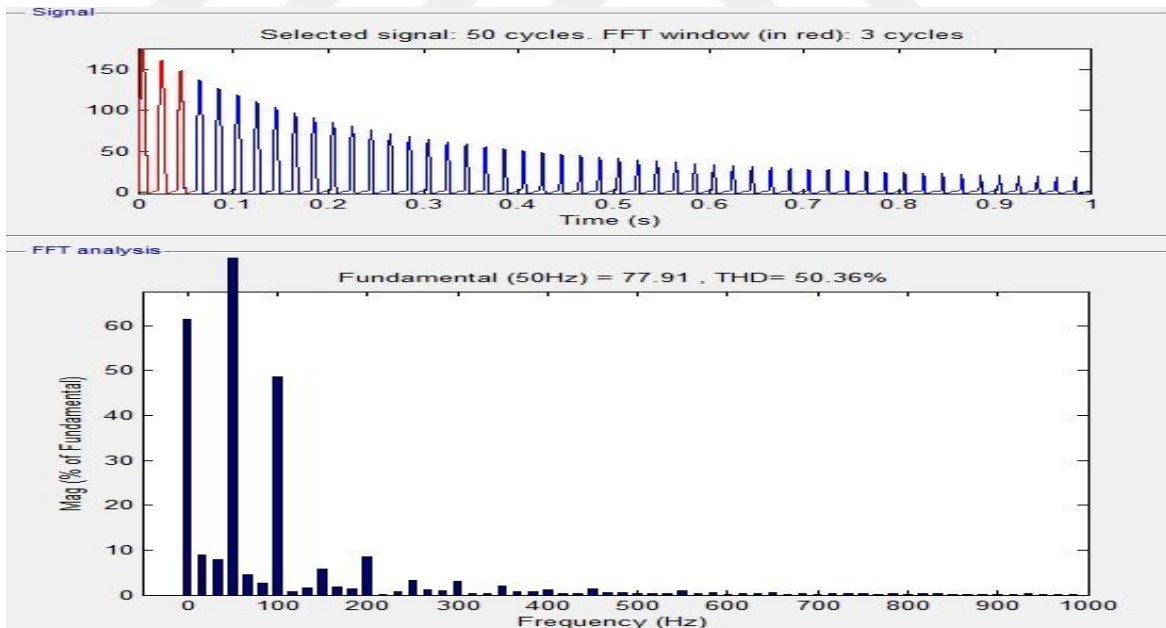
Şekil 4.9. Harmonikli Devreye 6 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Tek ayarlı harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.10. Sinyal Analizi Sonuçları.

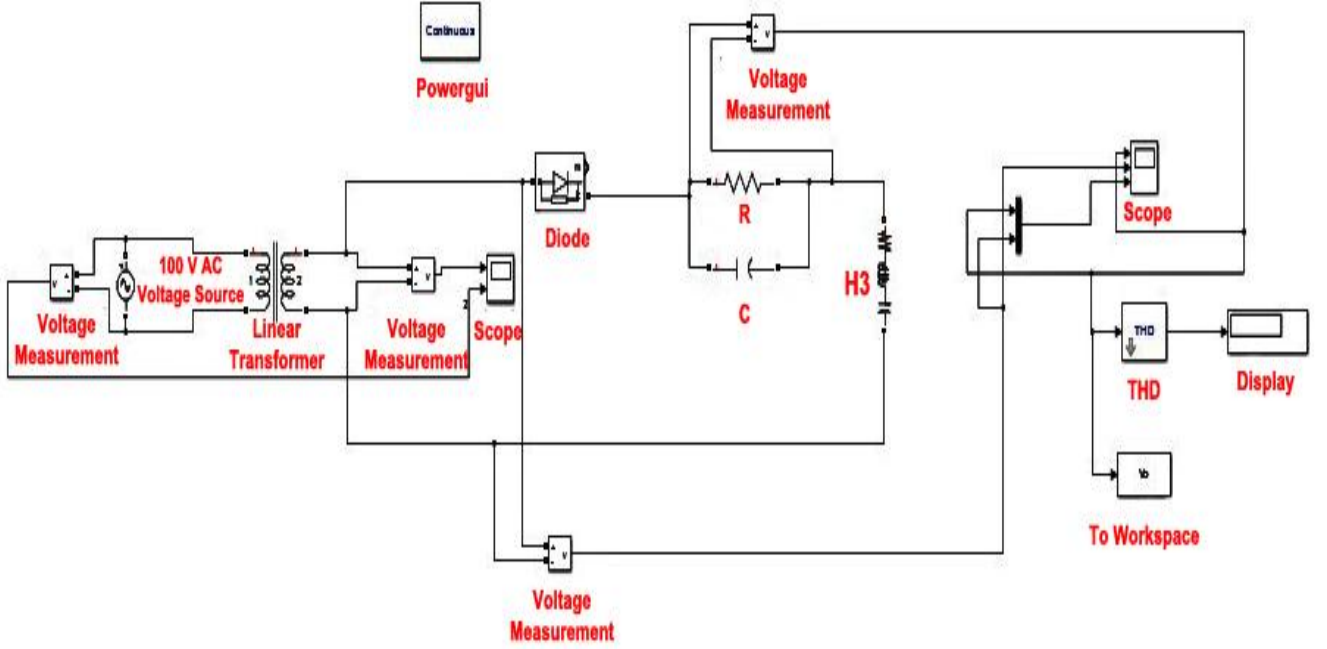
Sistemin incelediğimiz harmonik frekaslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.11. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme 6 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekansındaki bozulma %34.62'den %5.80'e, 5. harmonik frekansındaki bozulma ise %14.63'den %3.23'e indirgenmiştir. Diğer frekanslardaki bozulmalarda uluslararası voltaj harmoniği sınırı olan %3'ün altına indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H3'e göre bir adet tek ayarlı filtre eklenmesi durumunda ortaya çıkacak veriler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.12. Harmonikli Devreye 1 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi

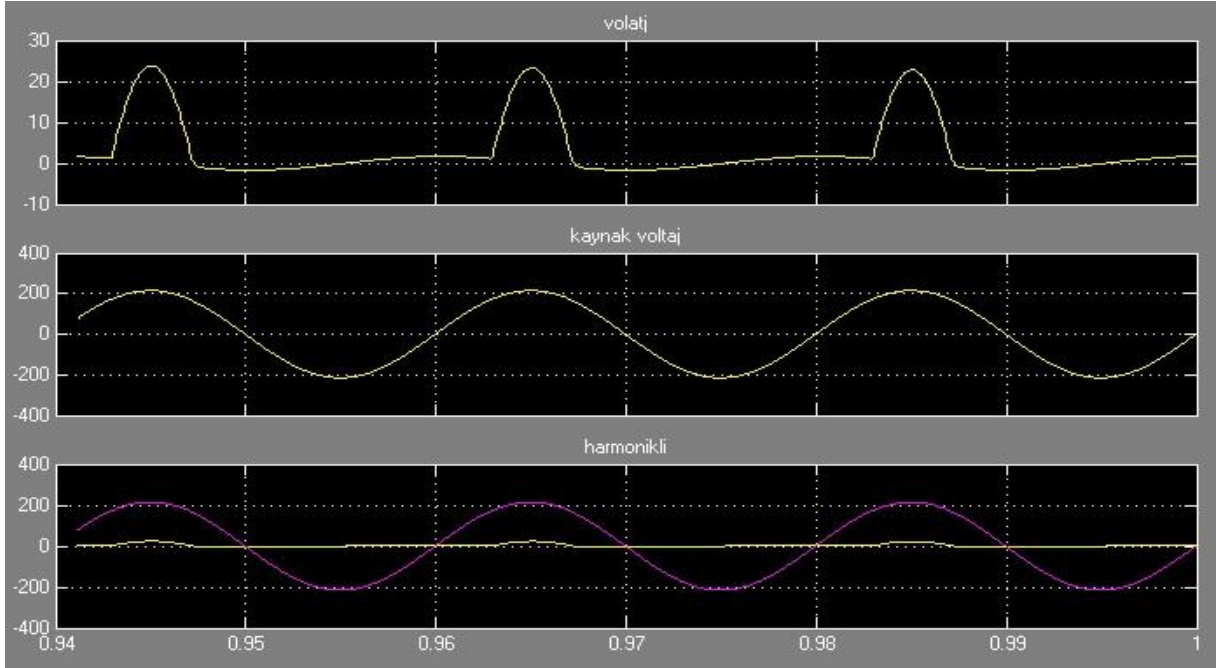
$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.16)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 0.00065F \quad (4.17)$$

$$C = C_3 = 6,5 \cdot 10^{-4} F \quad (4.18)$$

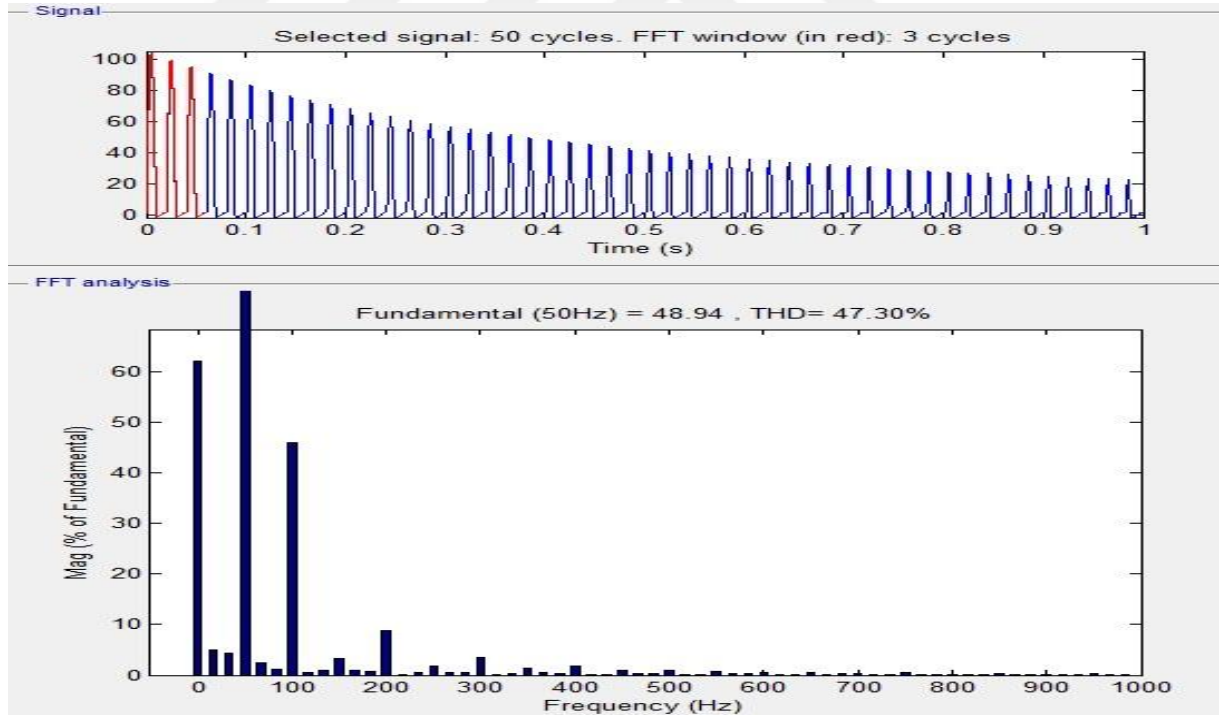
$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (6,5 \cdot 10^{-4})} = 1,7 \cdot 10^{-3} H \quad (4.19)$$

Bu durumda oluşan voltaj sinyali aşağıdaki gibi olacaktır;



Şekil 4.13. Sinyal Analizi Sonuçları.

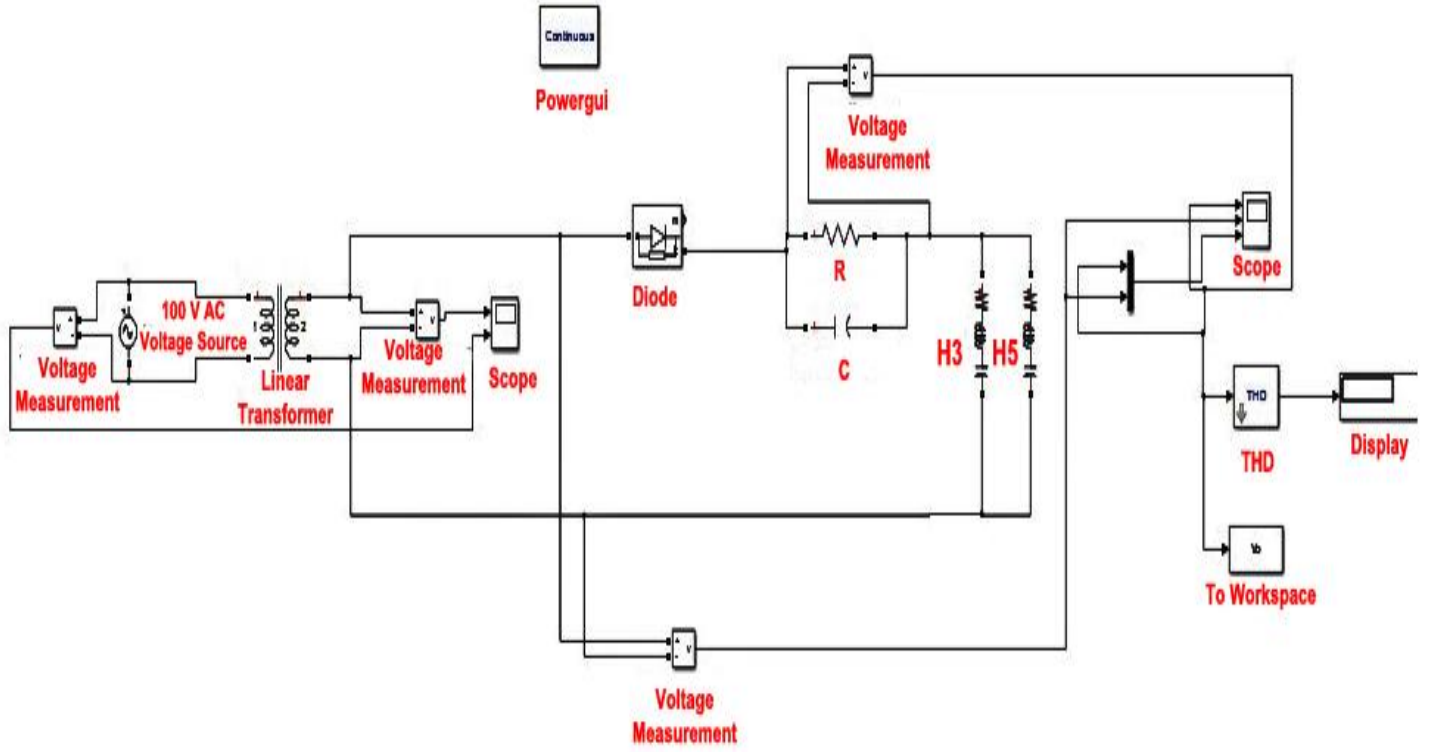
Gerçekleştirilen FFT ye göre harmonik analizi aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.14. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 'e göre 1 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.26'ya, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %1.90'a indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek iki harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 ve H_5 'e göre iki adet tek ayarlı filtre eklenmesi durumunda ortaya çıkacak veriler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.15. Harmonikli Devreye 2 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.20)$$

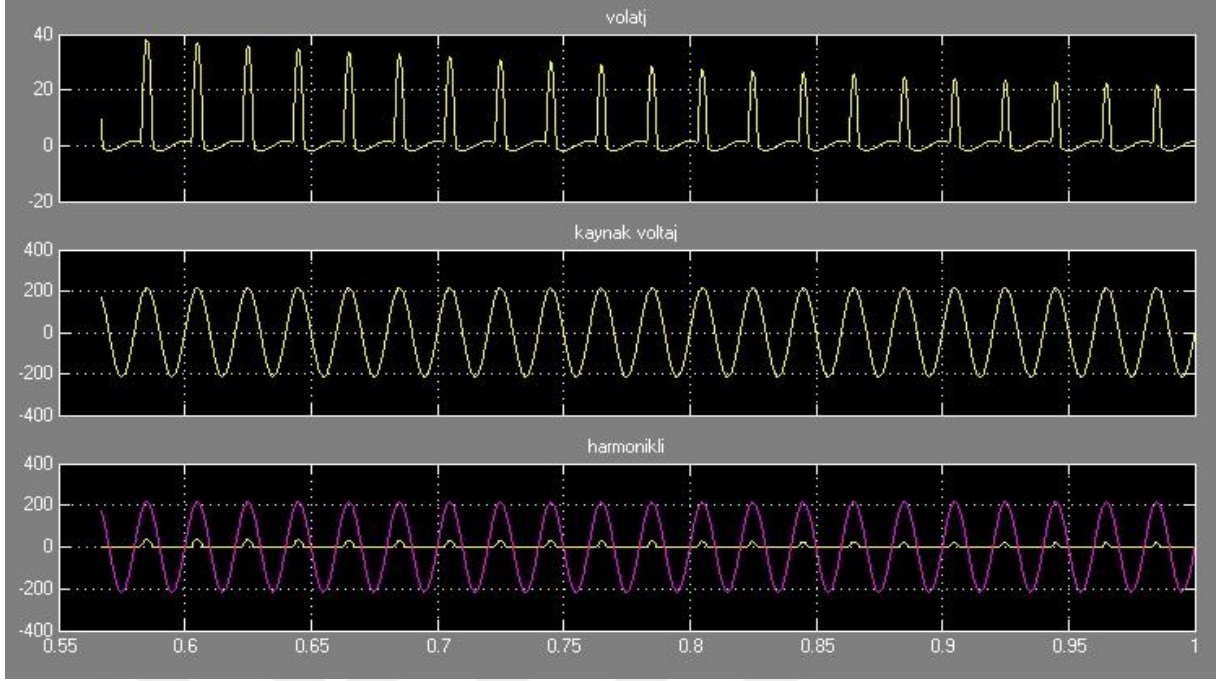
$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 0,00065F \quad (4.21)$$

$$C_3 = C_5 = 3,25 \cdot 10^{-4} F \quad (4.22)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 3,4 \cdot 10^{-3} H \quad (4.23)$$

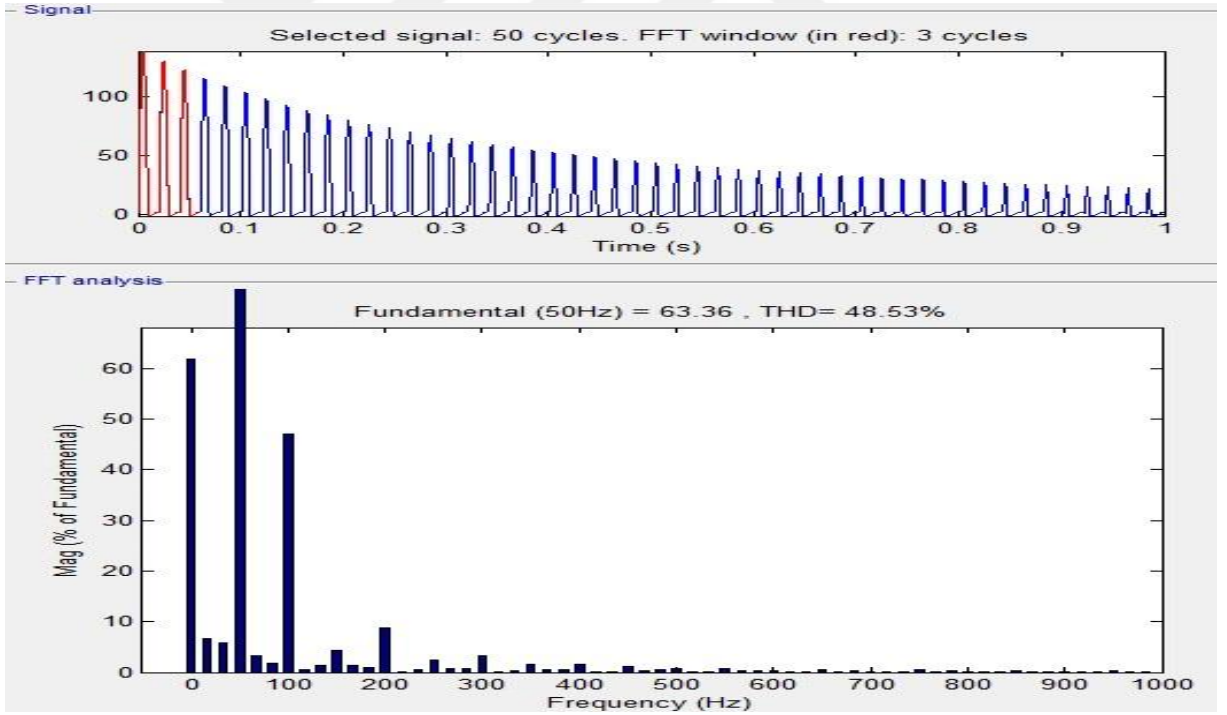
$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 1,2 \cdot 10^{-3} H \quad (4.24)$$

Bu durumda oluşan voltaj sinyali aşağıdaki gibi olacaktır;



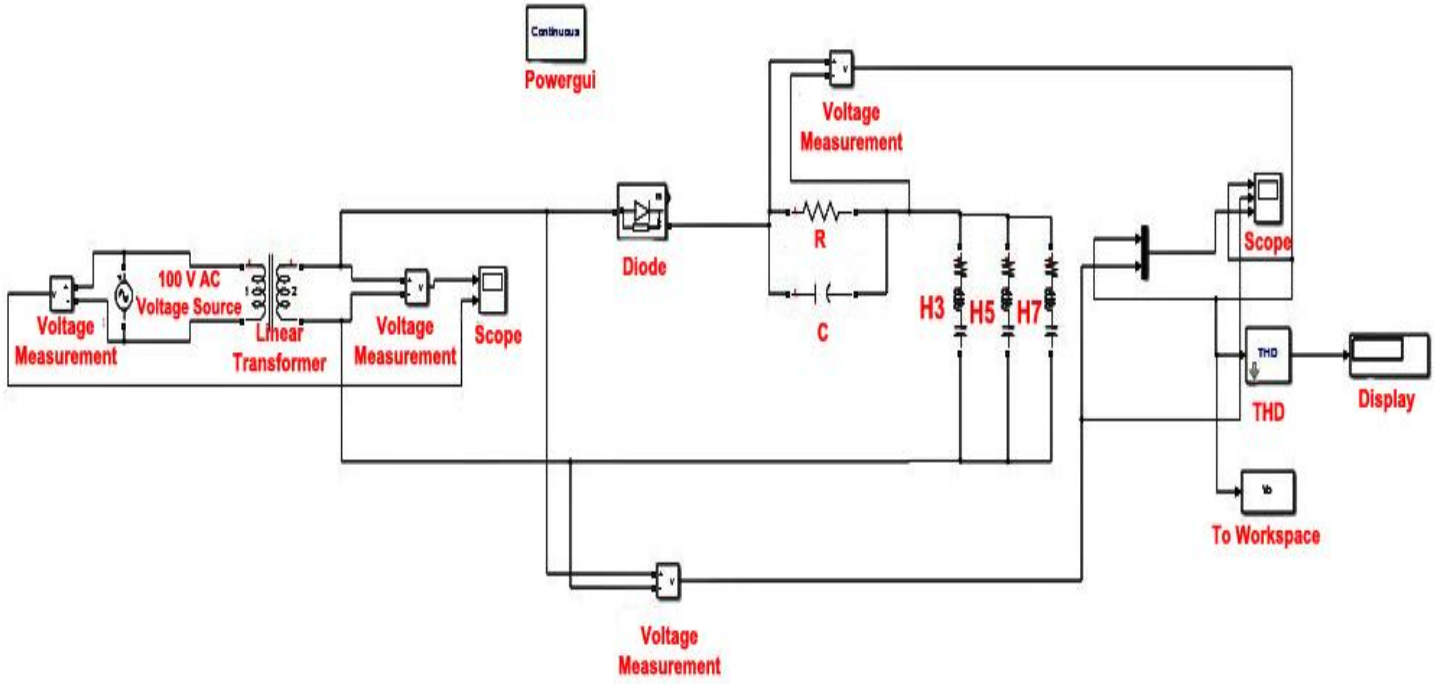
Şekil 4.16. Sinyal Analizi Sonuçları.

Gerçekleştirilen FFT ye göre harmonik analizi aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.17. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 'e göre 2 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %4.26'ya, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.44'e indirgenmiştir. Sisteme sadece en yüksek üç harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre üç adet tek ayarlı filtre eklenmesi durumunda ortaya çıkacak veriler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.18. Harmonikli Devreye 3 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.25)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 0.00065F \quad (4.26)$$

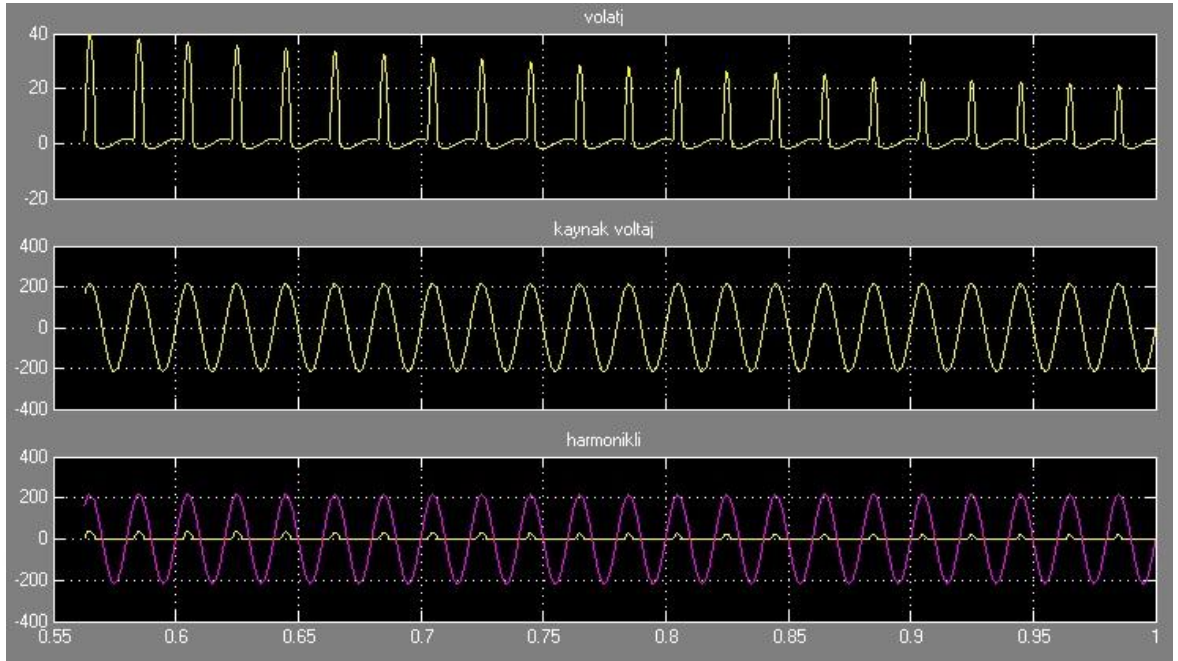
$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,16 \cdot 10^{-4} F \quad (4.27)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 5,21 \cdot 10^{-3} H \quad (4.28)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 1,87 \cdot 10^{-3} H \quad (4.29)$$

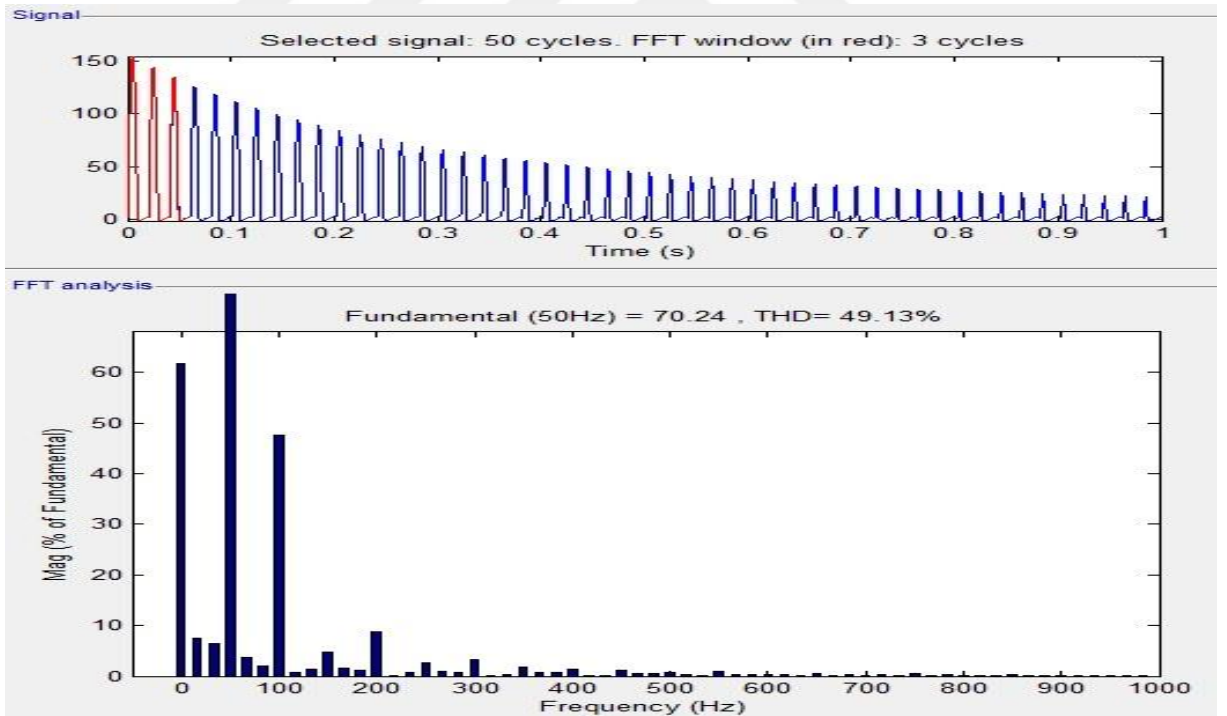
$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 9,57 \cdot 10^{-4} H \quad (4.30)$$

Bu durumda oluşan voltaj sinyali aşağıdaki gibi olacaktır;



Şekil 4.19. Sinyal Analizi Sonuçları.

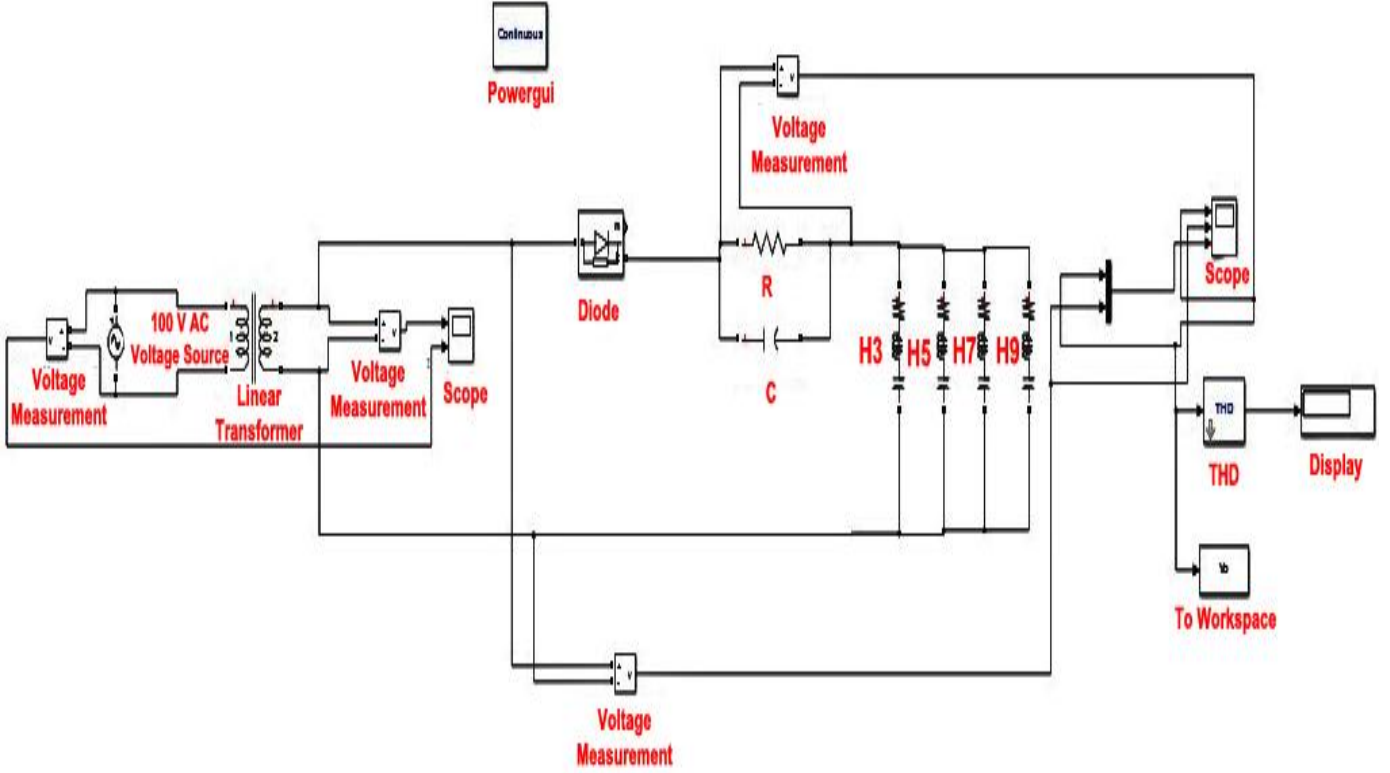
Gerçekleştirilen FFT ye göre harmonik analizi aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.20. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre 3 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %4.76'ya, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.71'e indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek dört harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre dört adet tek ayarlı filtre eklenmesi durumunda ortaya çıkacak veriler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.21. Harmonikli Devreye 4 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84 \Omega \quad (4.31)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 0.00065 F \quad (4.32)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = 1,6 \cdot 10^{-4} F \quad (4.33)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 7,03 \cdot 10^{-3} H \quad (4.34)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 2,53 \cdot 10^{-3} H \quad (4.35)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 1,29 \cdot 10^{-3} H \quad (4.36)$$

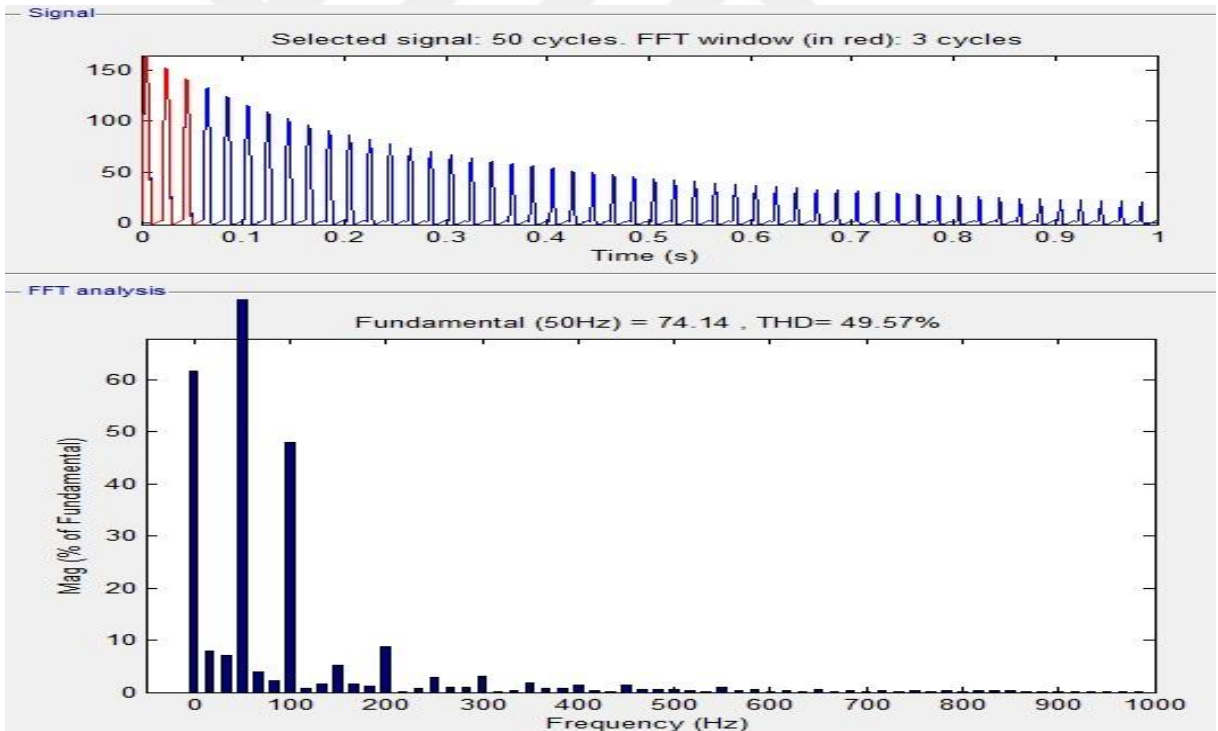
$$L_9 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_9)^2 \cdot (C_9)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 450^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 7,81 \cdot 10^{-4} H \quad (4.37)$$

Bu durumda oluşan voltaj sinyali aşağıdaki gibi olacaktır;



Şekil 4.22. Sinyal Analizi Sonuçları.

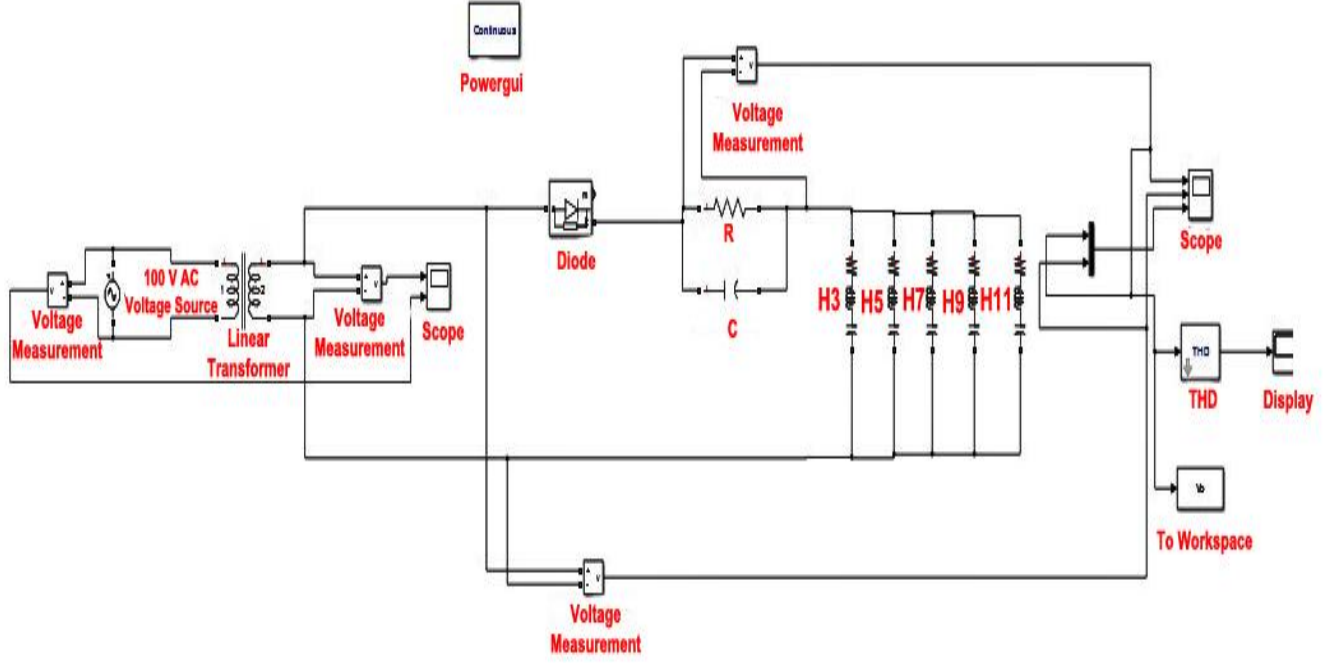
Gerçekleştirilen FFT ye göre harmonik analizi aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.23. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre 4 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.13'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.90'a indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek beş harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre beş adet tek ayarlı filtre eklenmesi durumunda ortaya çıkacak veriler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.24. Harmonikli Devreye 5 Adet Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.38)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 0.00065F \quad (4.39)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1,3 \cdot 10^{-4}F \quad (4.40)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 8,66 \cdot 10^{-3}H \quad (4.41)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 3,11 \cdot 10^{-3}H \quad (4.42)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 1,59 \cdot 10^{-3}H \quad (4.43)$$

$$L_9 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f9)^2 \cdot (C_9)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 450^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-3})} = 9,62 \cdot 10^{-4}H \quad (4.44)$$

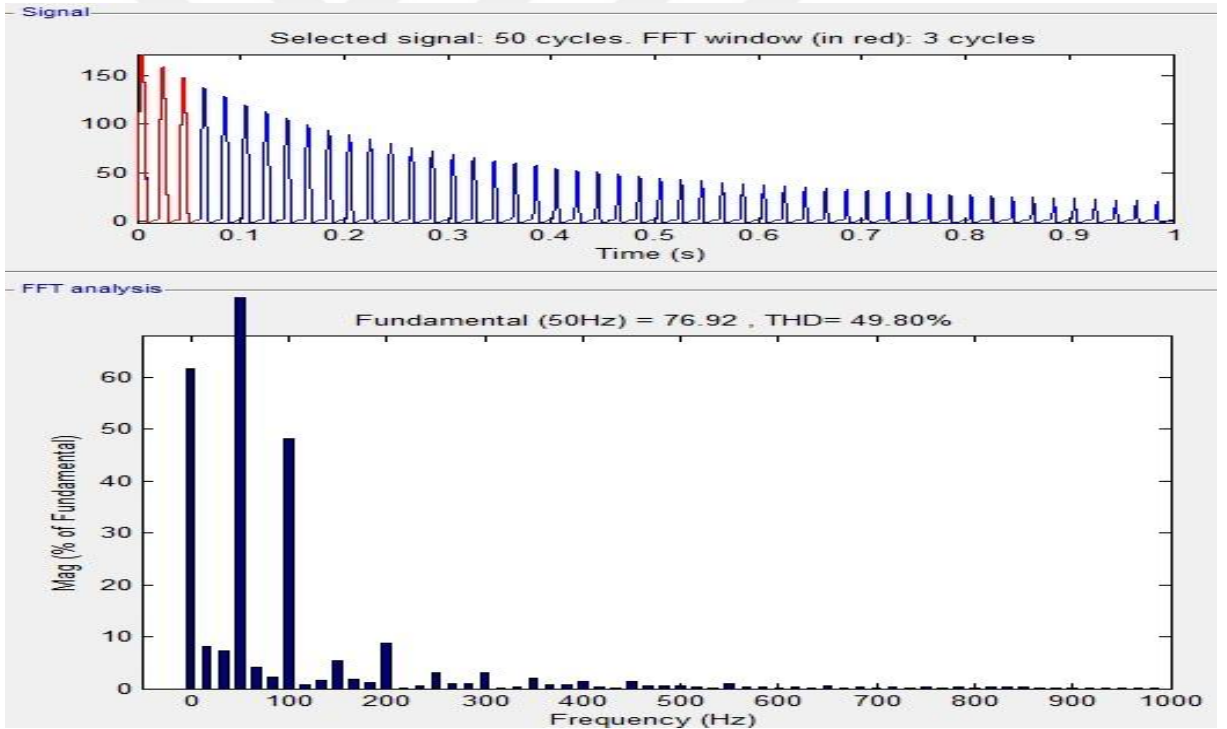
$$L_{11} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f11)^2 \cdot (C_{11})} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 550^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-3})} = 6,44 \cdot 10^{-4}H \quad (4.45)$$

Bu durumda oluşan voltaj sinyali aşağıdaki gibi olacaktır;



Şekil 4.25. Sinyal Analizi Sonuçları.

Gerçekleştirilen FFT ye göre harmonik analizi aşağıdaki gibidir;

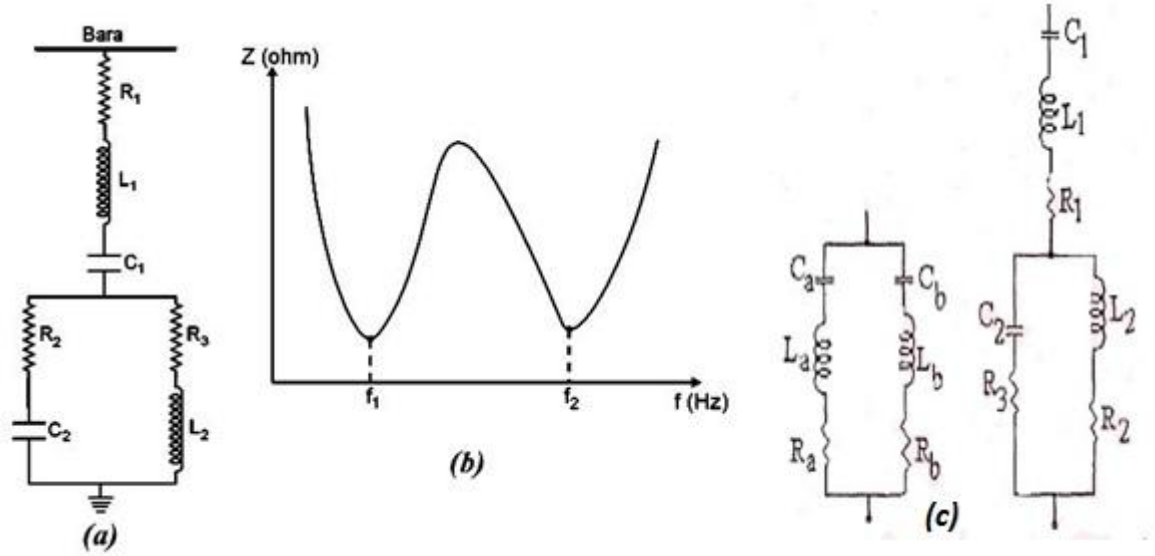


Şekil 4.26. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre 5 adet tek ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.32'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.99'a indirgenmiştir.

4.1.1.2. Çift Ayarlı Filtreler

Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniği elimine edebilir. Çift ayarlı filtre Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi Şekil 4.27.'de verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki çift ayarlı filtrenin iki farklı rezonans noktası vardır (iki adet tek ayarlı filtrenin birleşiminden meydana gelmesinden dolayı). Üç ve dört ayarlı filtrelerde tasarlamak mümkündür, ancak bunlar ayar zorluklarından dolayı kullanılmazlar. [25]



Şekil 4.27. (a) Çift Ayarlı Filtre , (b) Çift Ayarlı Filtrenin Frekans-Empedans İlişkisi , (c) Çift Ayarlı Filtre Elemanları [25]

Çift ayarlı filtre bileşenleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki gibidir:

$$C_1 = C_a + C_b \quad (4.46)$$

$$C_2 = \frac{C_a \cdot C_b \cdot (C_a + C_b) \cdot (L_a + L_b)^2}{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)} \quad (4.47)$$

$$L_1 = \frac{L_a \cdot L_b}{L_a + L_b} \quad (4.48)$$

$$L_2 = \frac{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 \cdot (L_a + L_b)} \quad (4.49)$$

H_3 ve H_5 için tasarlanmış olan tek ayarlı filtrelerin çift ayarlı filtrelere dönüştürülmesi aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.1. Tasarlanmış Olan H_3 ve H_5 İçin Tek Ayarlı Filtre Değerleri.

	R	L	C
H_3	100Ω	11,25mH	0,1mF
H_5	100Ω	4,05mH	0,1mF

$$C_1 = C_a + C_b = 0,1 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,2 \cdot 10^{-3} F \quad (4.50)$$

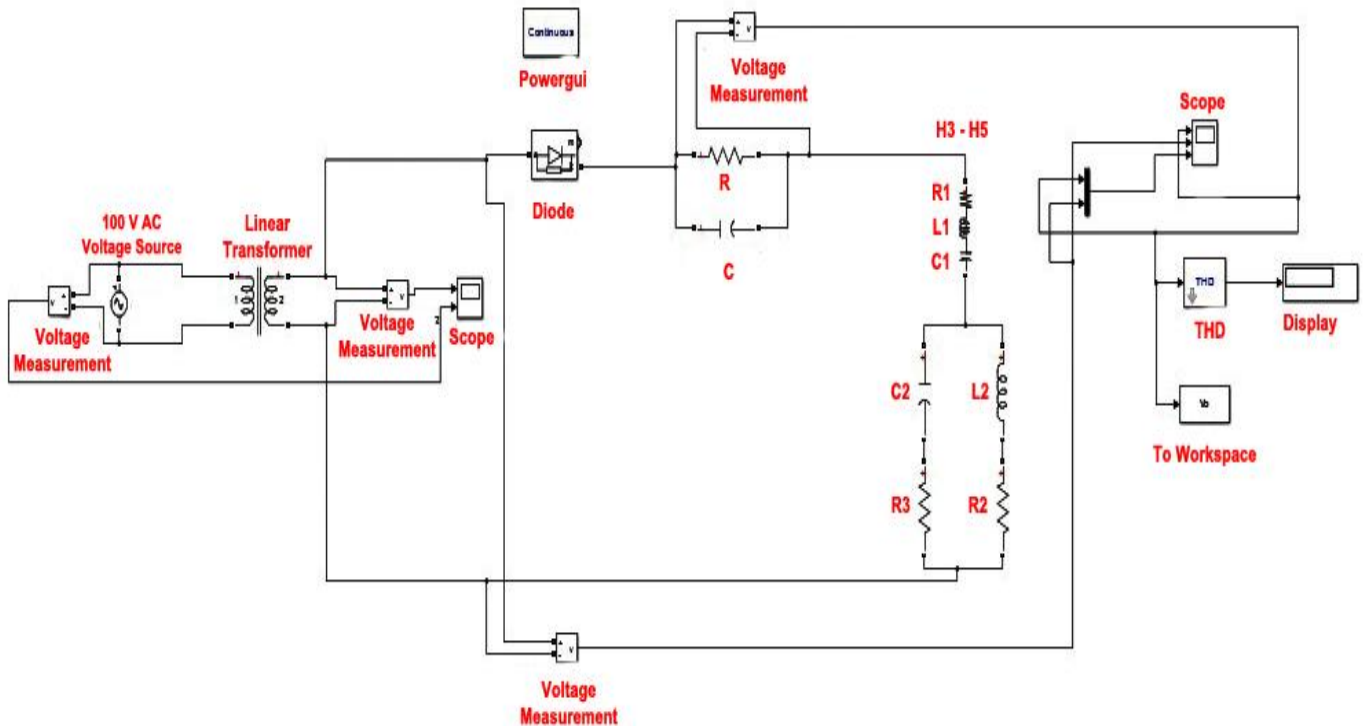
$$C_2 = \frac{C_a \cdot C_b \cdot (C_a + C_b) \cdot (L_a + L_b)^2}{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)} = \frac{(10^{-8}) \cdot (2 \cdot 10^{-4}) \cdot (15,3 \cdot 10^{-3})^2}{(11,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} - 4,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4})} = 650,25 \cdot 10^{-12} F \quad (4.51)$$

$$L_1 = \frac{L_a \cdot L_b}{L_a + L_b} = \frac{11,25 \cdot 10^{-3} \cdot 4,05 \cdot 10^{-3}}{11,25 \cdot 10^{-3} + 4,05 \cdot 10^{-3}} = 2,97 \cdot 10^{-3} H \quad (4.52)$$

$$L_2 = \frac{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 \cdot (L_a + L_b)} = \frac{(11,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} - 4,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4})^2}{(2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (15,3 \cdot 10^{-3})} = 0,847 \cdot 10^{-3} H \quad (4.53)$$

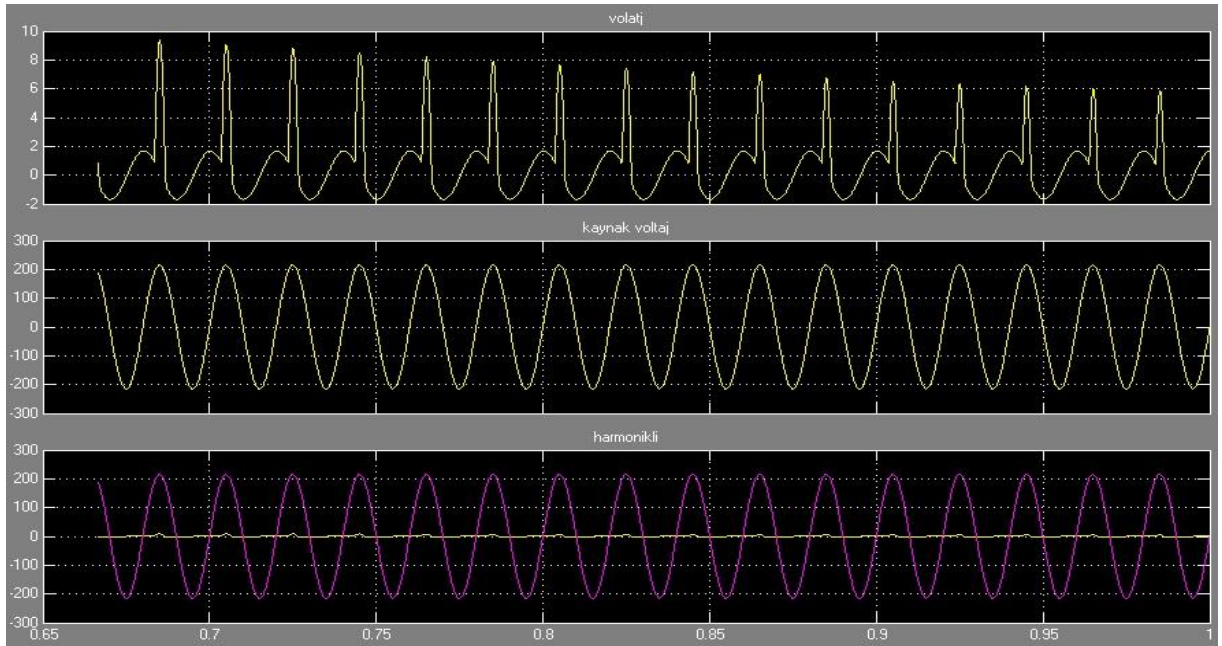
$$R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega \quad (4.54)$$

Hesaplanan bu değerleri sonucunda Matlab/Simulink programında modellenen çift ayarlı filtre aşağıdaki gibidir;



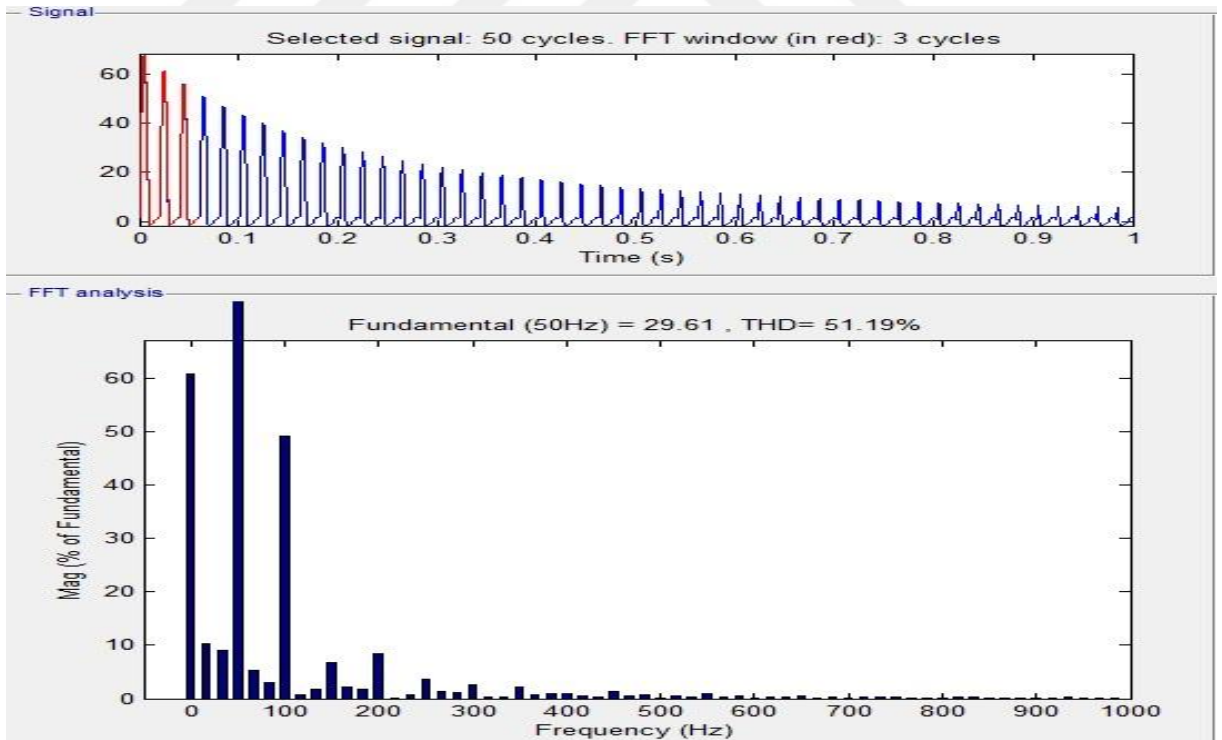
Şekil 4.28. Harmonikli Devreye H_3 ve H_5 İçin Çift Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Çift ayarlı harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.29. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.30. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için çift ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekansındaki bozulma

%34.62'den %6.74'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.65'e indirgenmiştir.

H_7 ve H_9 için tasarlanmış olan tek ayarlı filtrelerin çift ayarlı filtrelere dönüştürülmesi aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.2. Tasarlanmış Olan H_7 ve H_9 İçin Tek Ayarlı Filtre Değerleri.

	R	L	C
H_7	100Ω	2,06mH	0,1mF
H_9	100Ω	1,25mH	0,1mF

$$C_1 = C_a + C_b = 0,1 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,2 \cdot 10^{-3} F \quad (4.55)$$

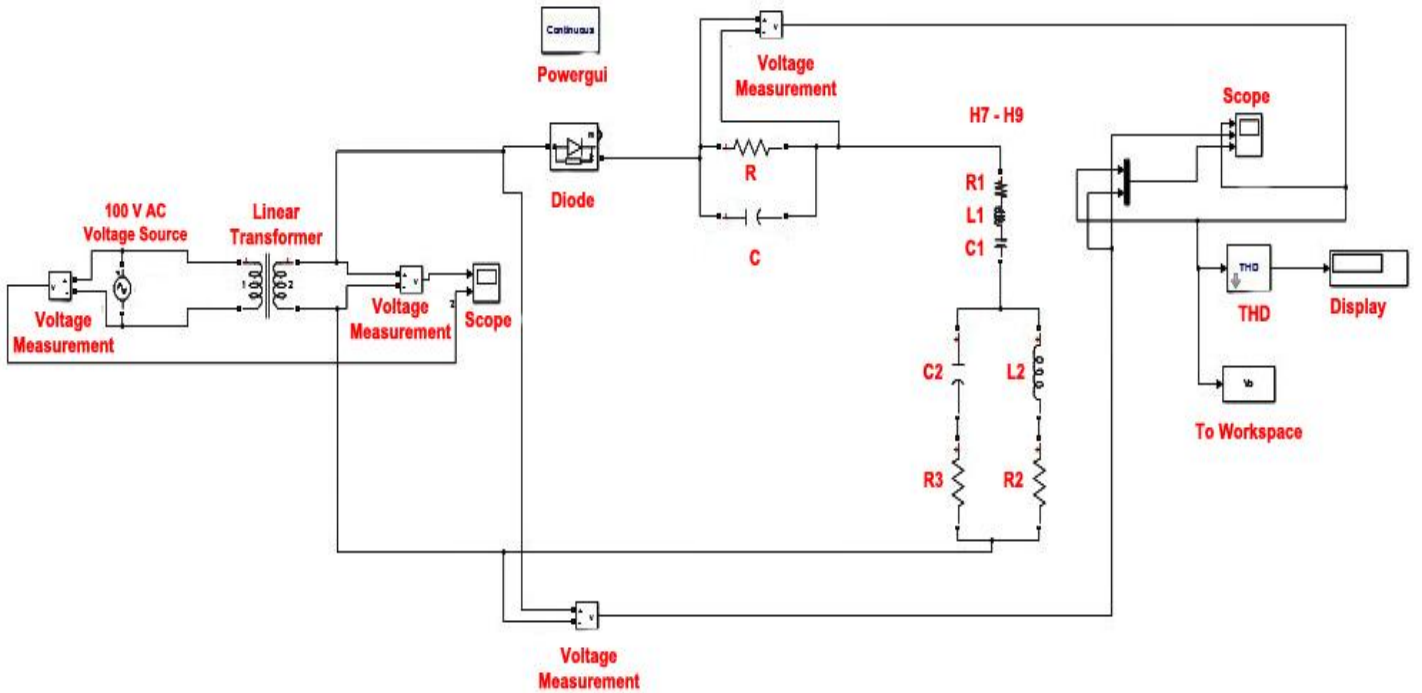
$$C_2 = \frac{C_a \cdot C_b \cdot (C_a + C_b) \cdot (L_a + L_b)^2}{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)} = \frac{(10^{-8}) \cdot (2 \cdot 10^{-4}) \cdot (3,31 \cdot 10^{-3})^2}{(2,06 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4})} = 270,5 \cdot 10^{-12} F \quad (4.56)$$

$$L_1 = \frac{L_a \cdot L_b}{L_a + L_b} = \frac{2,06 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{2,06 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 10^{-3}} = 0,777 \cdot 10^{-3} H \quad (4.57)$$

$$L_2 = \frac{(L_a \cdot C_a - L_b \cdot C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 \cdot (L_a + L_b)} = \frac{(2,06 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4})^2}{(2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (3,31 \cdot 10^{-3})} = 0,061 \cdot 10^{-3} H \quad (4.58)$$

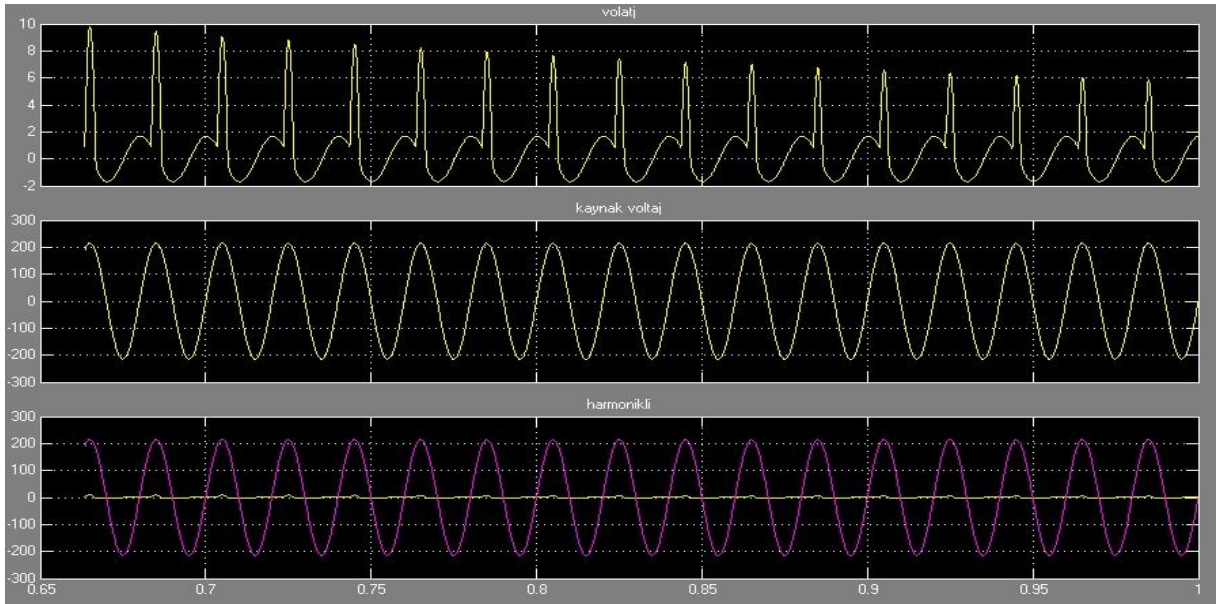
$$R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega \quad (4.59)$$

Hesaplanan bu değerleri sonucunda Matlab/Simulink programında modellenen çift ayarlı filtre aşağıdaki gibidir.



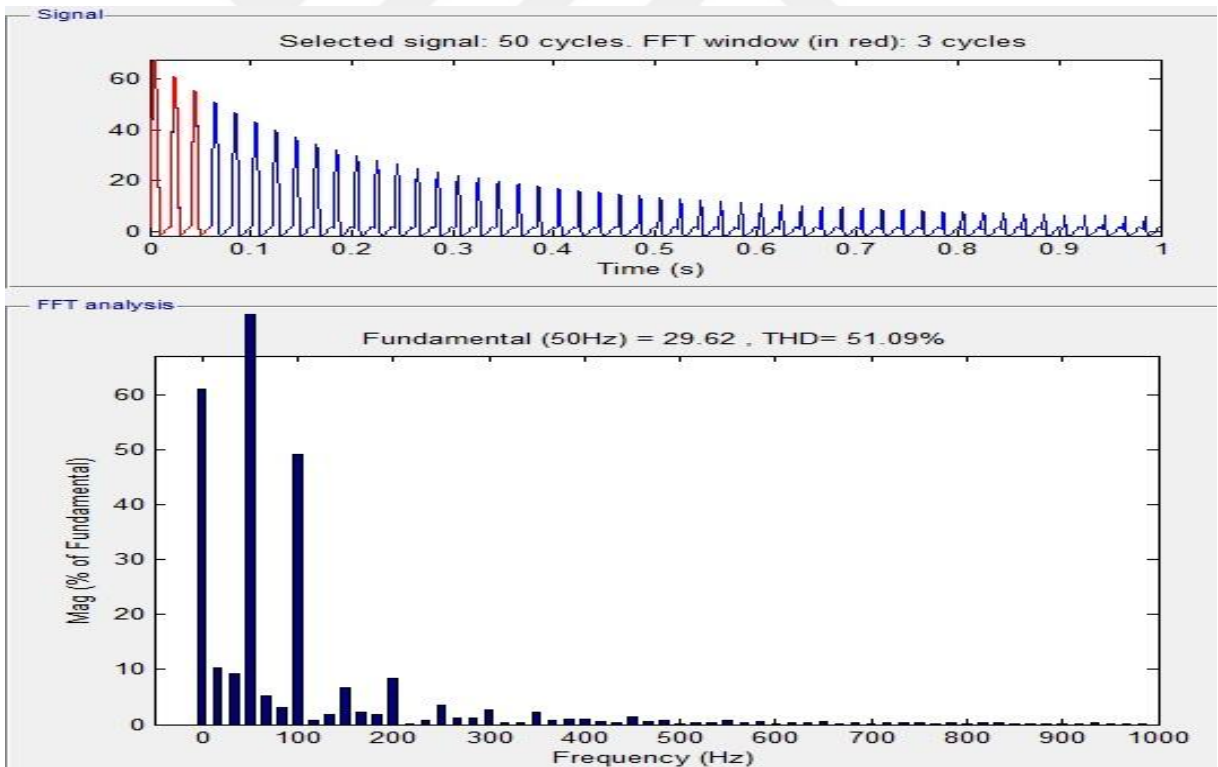
Şekil 4.31. Harmonikli Devreye H_7 ve H_9 İçin Çift Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Çift ayarlı harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.32. Sinyal Analizi Sonuçları.

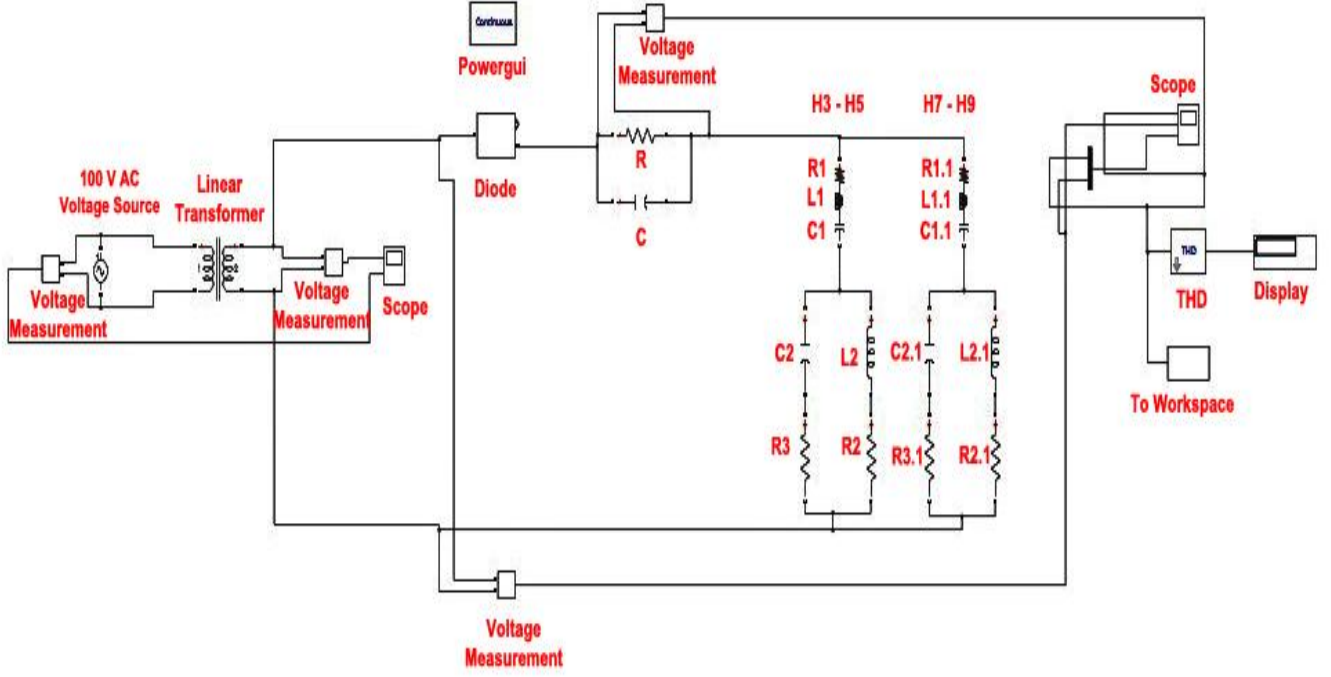
Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.33. FFT Analizi Sonuçları.

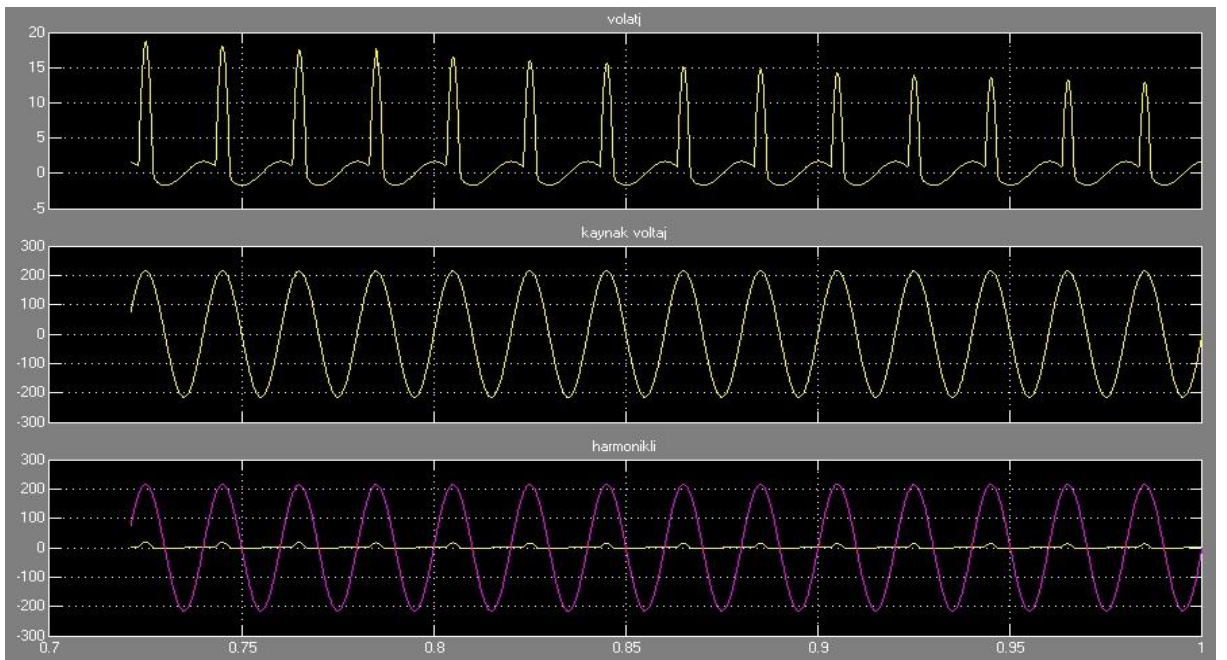
Harmonikli sisteme H_7 ve H_9 için çift ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.66'ya, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.61'e indirgenmiştir.

Şimdi ise harmonik içeren devreye aynı anda H_3, H_5 ve H_7, H_9 için tasarlanmış olan iki adet çift ayarlı filtrenin yerleştirilmiştir ve ardından alınan sonuçlar aşağıdaki gibidir;



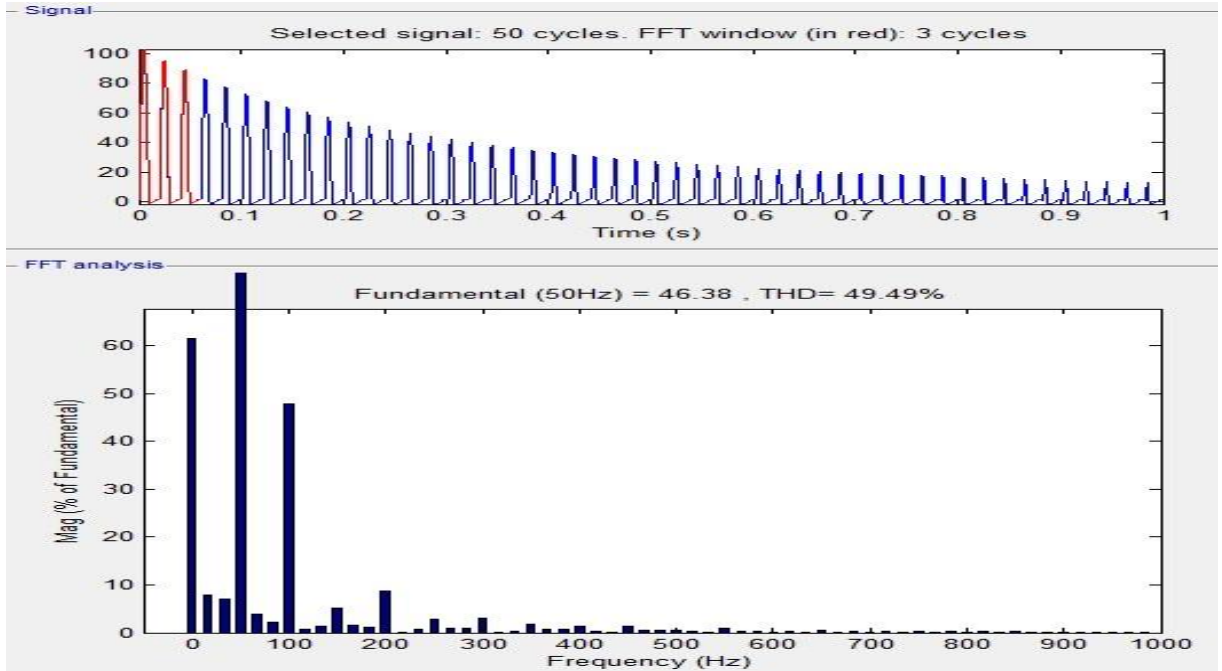
Şekil 4.34. Harmonikli Devreye H_3, H_5 ve H_7, H_9 İçin Çift Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Çift ayarlı harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.35. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.36. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 , H_9 için 2 adet çift ayarlı pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekandaki bozulma %34.62'den %5.11'e, 5. harmonik frekandaki bozulma ise %14.63'den %2.88'e indirgenmiştir.

4.1.1.3. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Yüksek geçiren filtreler, belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans gösteren filtrelerdir. Bu filtrelerin tek ayarlı filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Tek ayarlı filtreler yüksek genlik değerine sahip düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerken, yüksek geçiren filtreler genlik değeri düşük yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler. 4 farklı çeşit yüksek geçiren filtre mevcuttur, bunların birbirlerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. [25]

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; büyük bir kondansatör gücü gerektirdiğinden ve temel frekansta aşırı bir kayba sebep olduğundan tercih edilmezler. İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; en iyi filtreleme performansına sahip olan filtredir. Fakat üçüncü dereceden filtre ile karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir. [25]

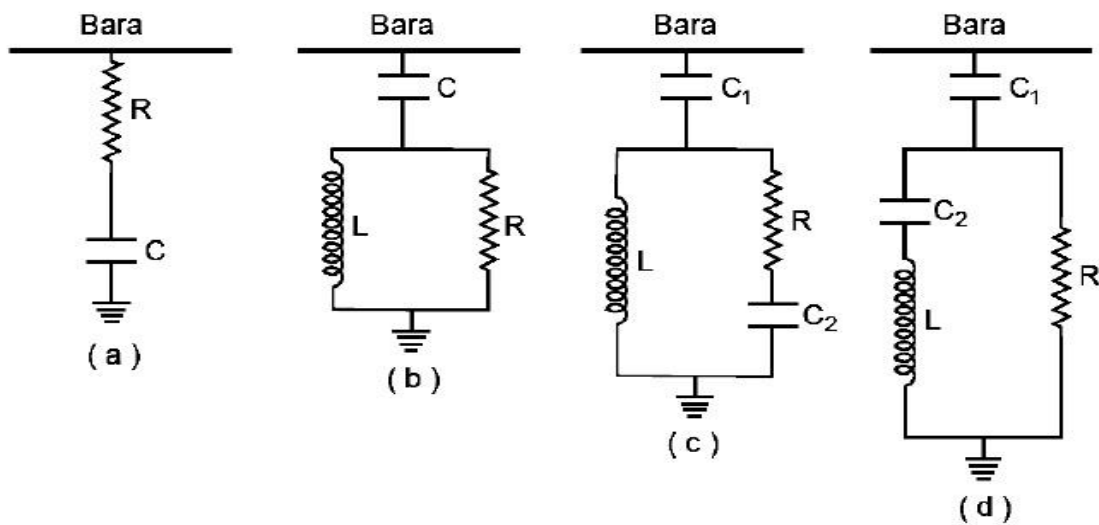
Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; ikinci dereceye göre en büyük avantajı, C_2 kondansatöründen dolayı temel frekansta empedansının artmasına karşılık bu frekansta kayıpları önemli ölçüde azaltılmış olmasıdır. [25]

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre; bu filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü derecen filtrelerin filtreleme performansı arasındadır. Temel avantajı, C_2 ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Bu tip filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır. [25]

Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişiminden etkilenmediği gibi, frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır. Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın ,geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar. Yüksek geçiren filtreler çeşitli mertebeler için tasarlanırlar. Örneğin; ikinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre temelde endüktansına paralel bir direnç eklenmiş bant geçiren bir filtredir. [25]

Farklı direnç değerleri için farklı filtre cevapları elde edilir. İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada bant geçiren bir filtreden daha etkilidir. Ayrıca filtre, bant geçiren filtre için ayarlanan frekans değerine duyarlı değildir. [25]

Düşük mertebeli harmonikler için yüksek geçiren filtreleri kullanmak ekonomik değildir. Ayrıca direnç değeri artacağından kayıplar artar.



Şekil 4.37. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler; (a) Birinci Dereceden, (b) İkinci Dereceden, (c) Üçüncü Dereceden, (d) C Tipi [25]

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde elemanların seçimi tek ayarlı filtrelerdeki gibi yapılır. Ancak, yüksek geçiren sönümlü filtrelerdeki direnç değerini hesaplayabilmek için kalite faktörü adında bir eşitliğin tanımlanması gerekmektedir. [25]

Bu eşitlik,

$$K = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (4.60)$$

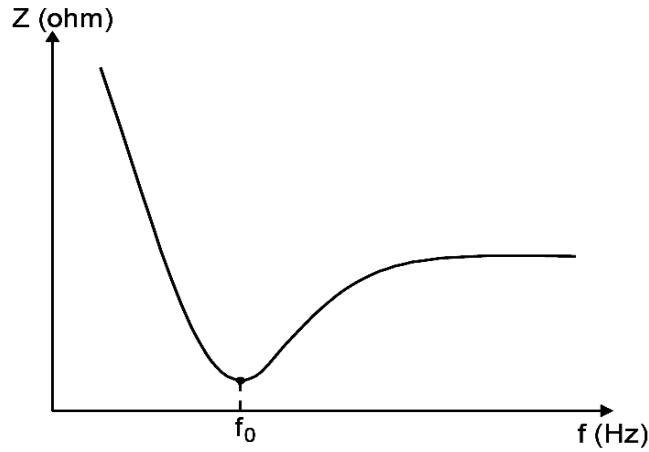
Şeklindedir. Burada;

K: Kalite faktörü (0,5 ile 2 arasında sabit bir katsayı),

R: Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılacak direnç değeri (Ω),

X_L : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan endüktif reaktans değeri (Ω),

X_C : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan kapasitif reaktans değeridir (Ω).



Şekil 4.38. Yüksek Geçiren Sönümlü Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi.[25]

Yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil 4.38’de verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki filtre belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans göstererek yüksek mertebeli harmoniklerin sistemden uzaklaşmasını sağlamaktadır. [25]

Hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra,

$$X_C = \frac{U^2}{Q} \quad (4.61)$$

formülünden sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı belirlenmelidir.

Burada;

X_C : Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri (Ω)

U: Sistemin çalışma gerilimidir (V)

Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer; sistemdeki etkin harmonik mertebelerine göre ayrı ayrı ayarlanan yüksek geçiren sönümlü filtrelelere, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır. Daha sonra her filtre kademesi için bilinen X_C değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme monte edilmelidir. Bu durumda kapasite hesabı;

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_n = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} \quad (4.62)$$

İle hesaplanmalı ve yapılacak her bir yüksek geçiren sönümlü harmonik filtre kolu sayısına eşit olarak bölünmelidir. [25]

İndiktör boyutunun hesabı ise aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir;

$$L = \frac{1}{4.\pi^2.f.n^2.C_n} \quad (4.63)$$

4.1.1.3.1. Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.64)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4.84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.65)$$

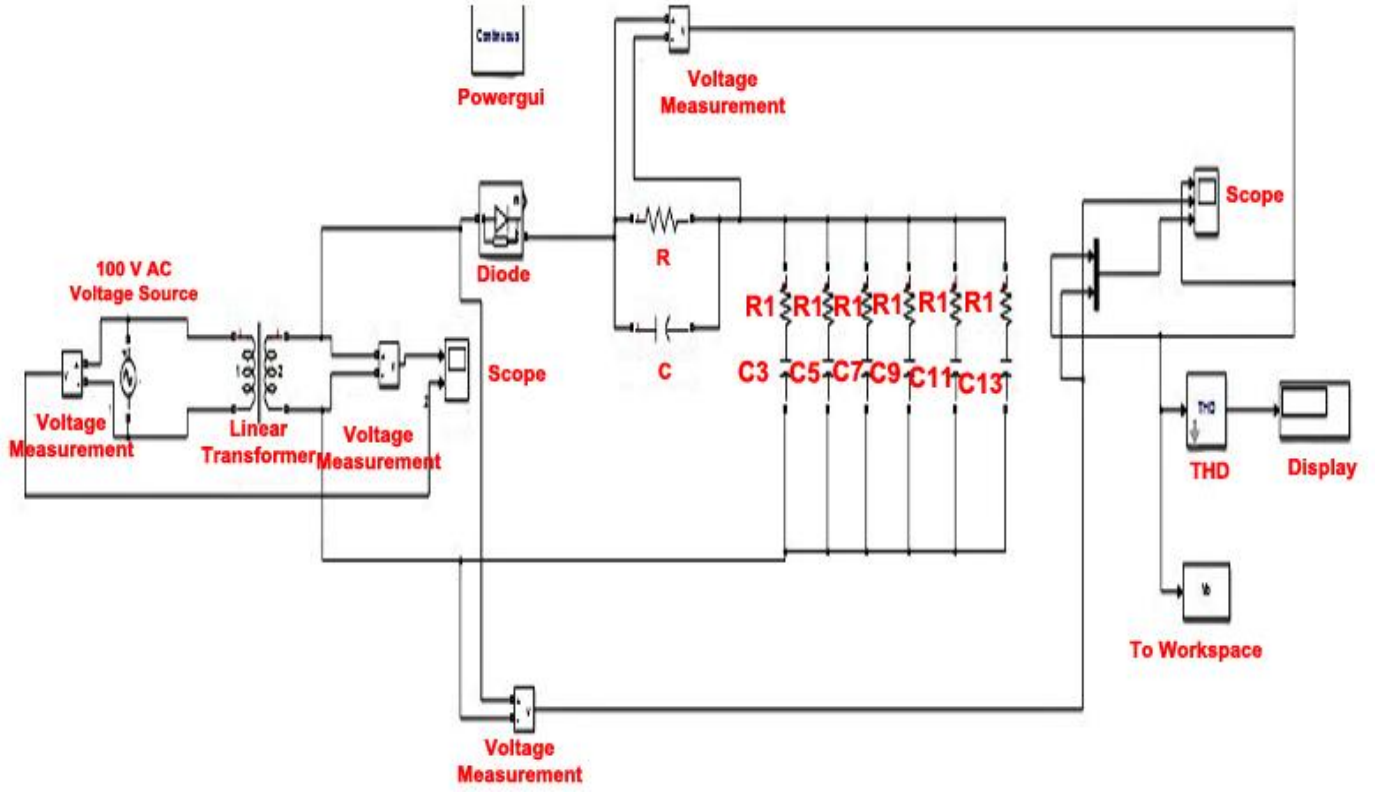
$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1,09.10^{-4} F \quad (4.66)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.67)$$

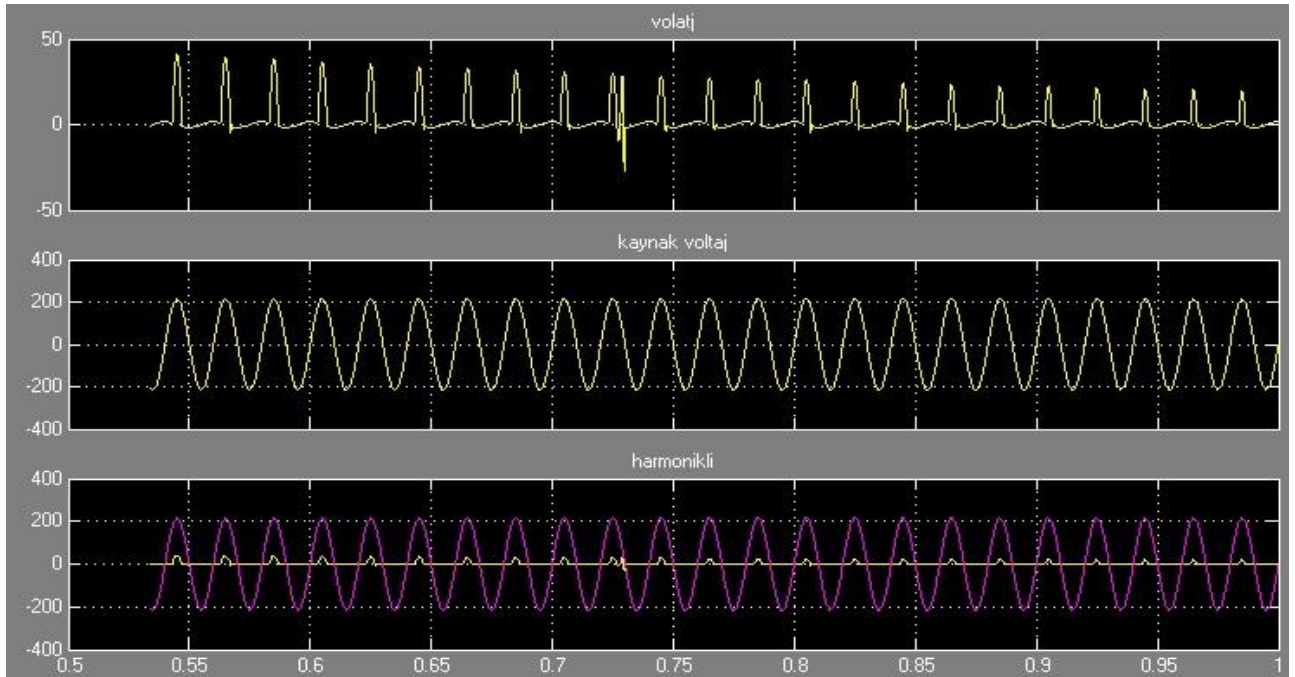
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



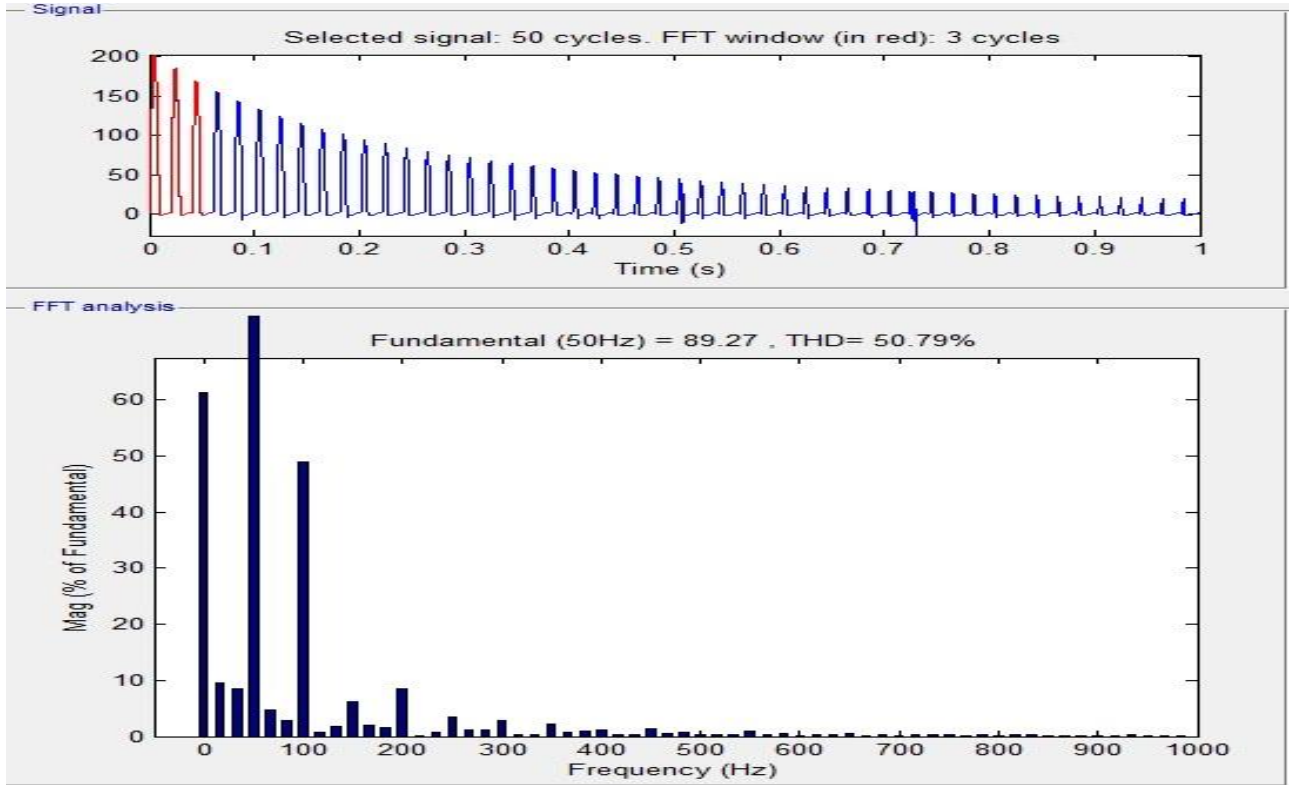
Şekil 4.39. Harmonikli Devreye 6 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklendiği Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreleri sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.40. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.41. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme 6 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.14'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.40'a indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 'e birinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_c = \frac{U^2}{Q_c} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.68)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.69)$$

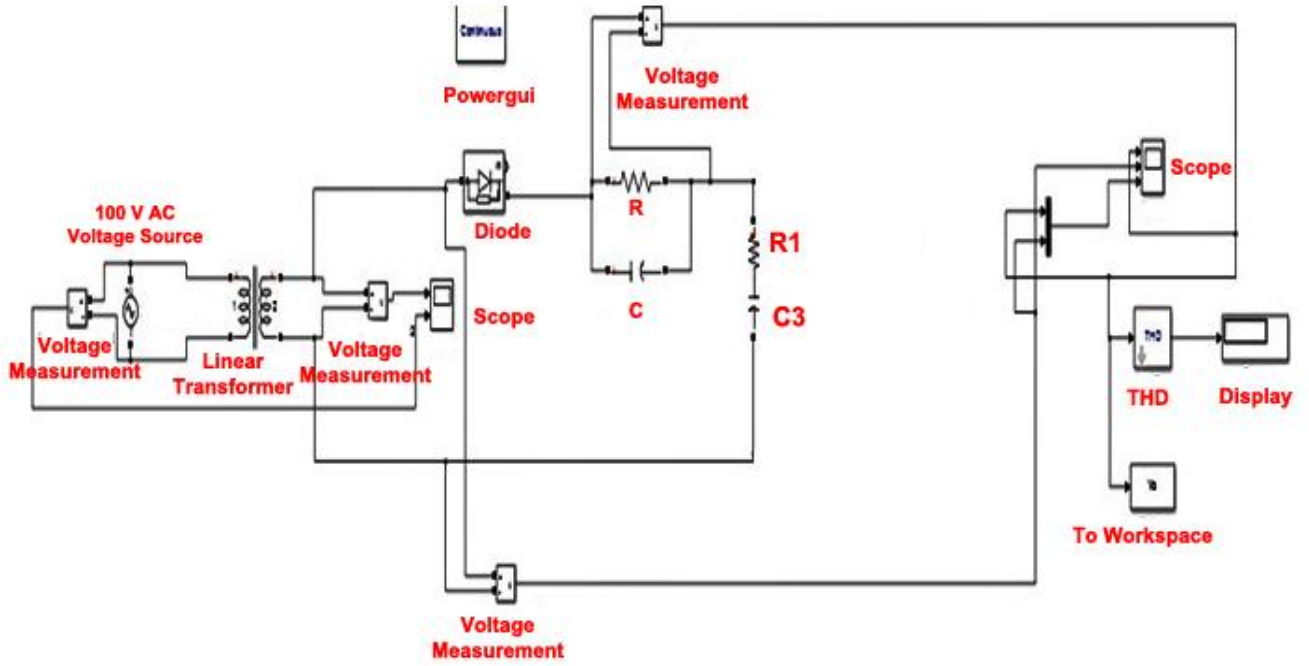
$$C = C_3 = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.70)$$

$$K = \frac{R}{X_c}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.71)$$

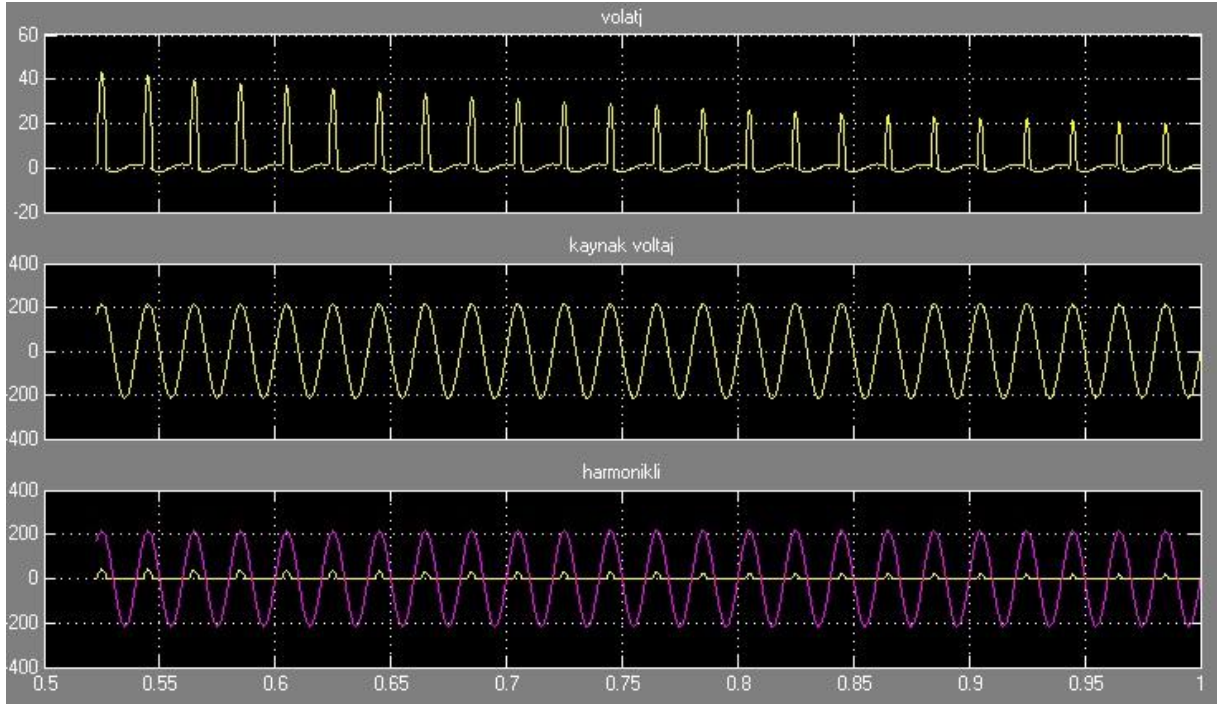
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtre aşağıdaki gibidir;



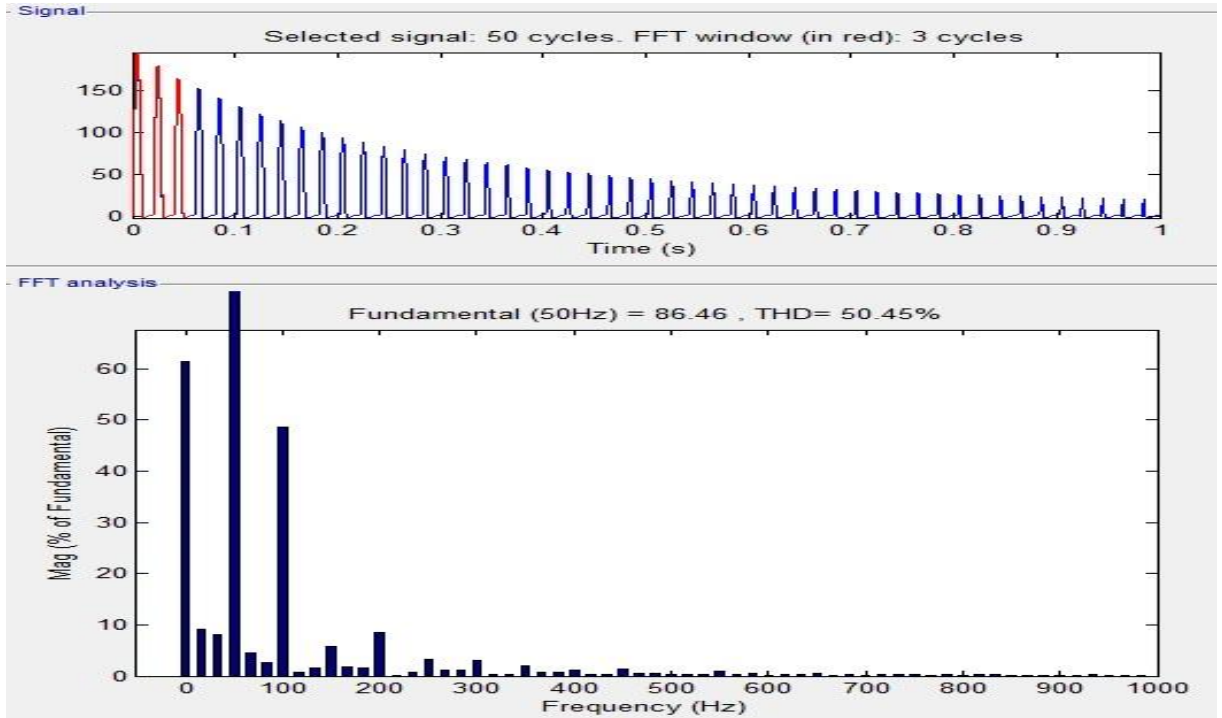
Şekil 4.42. Harmonikli Devreye 1 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklendiği Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.43. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.44. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 için 1 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.87'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.26'ya indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluklar olan H_3 ve H_5 'e birinci dereceden yüksek geçiren filtrelerin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.72)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.73)$$

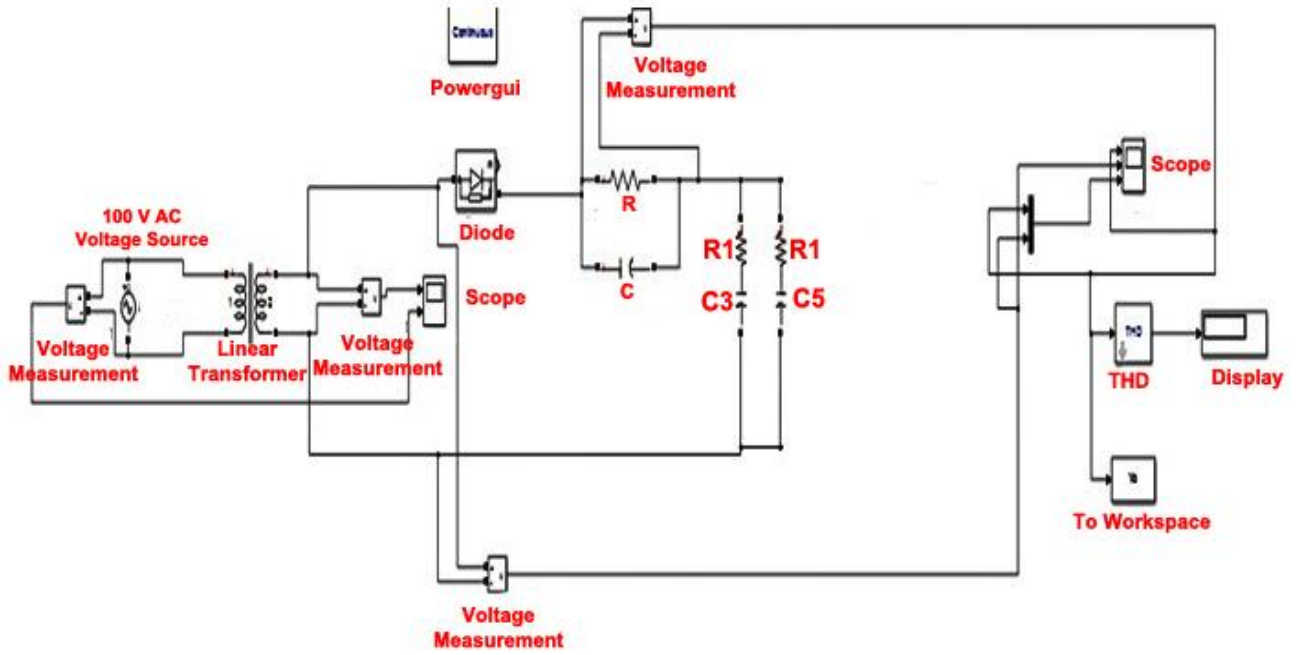
$$C_3 = C_5 = 3,28 \cdot 10^{-4} F \quad (4.74)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.75)$$

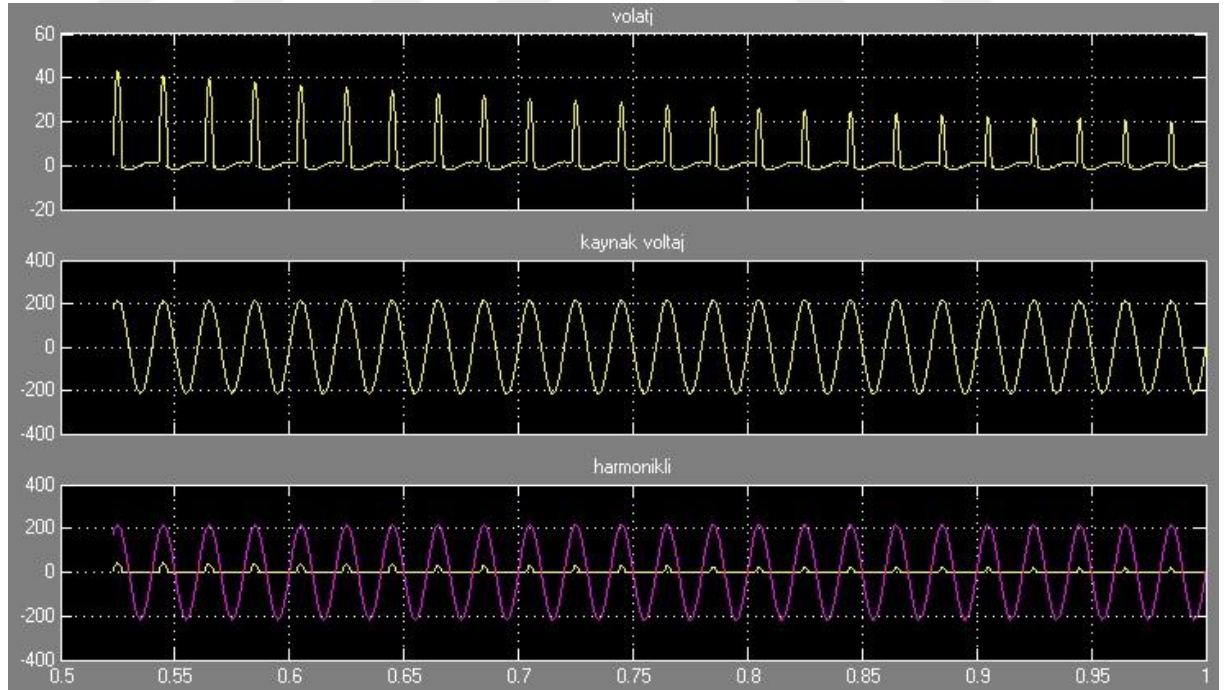
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



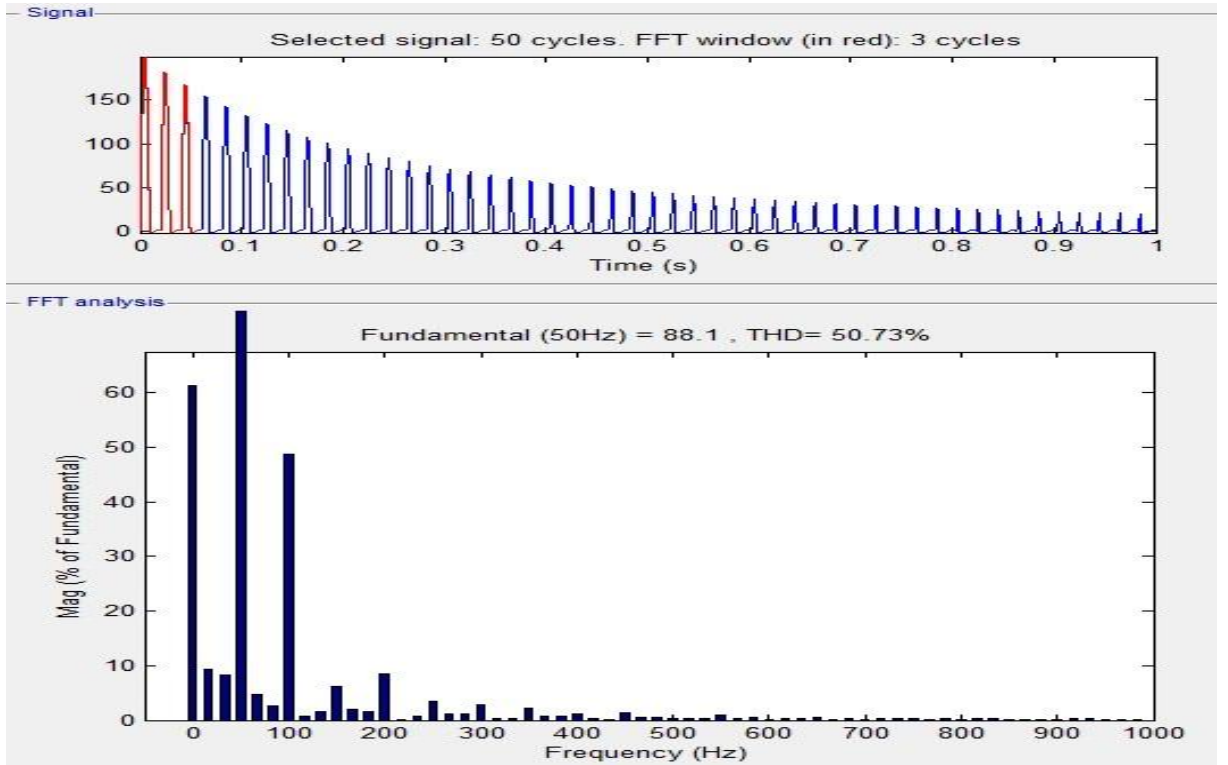
Şekil 4.45. Harmonikli Devreye 2 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklendiği Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.46. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.47. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için 2 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.10'a, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluklar olan H_3 , H_5 ve H_7 'ye birinci dereceden yüksek geçiren filtrelerin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.76)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.77)$$

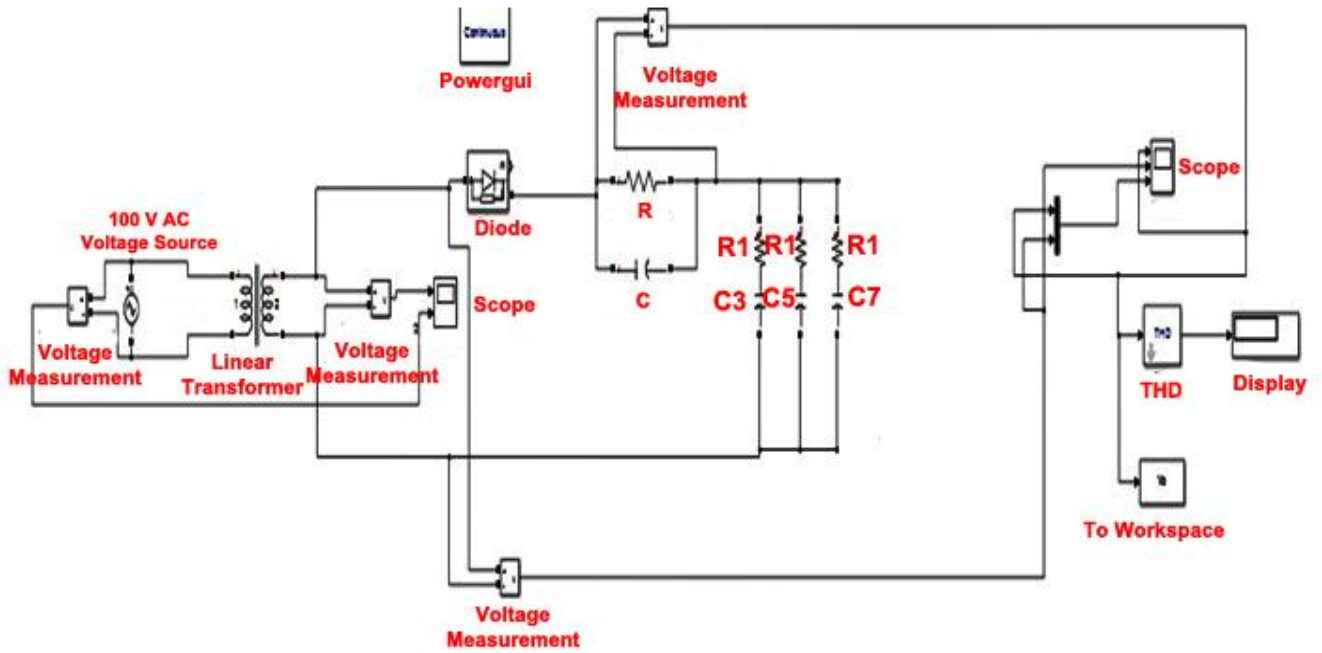
$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,19 \cdot 10^{-4} F \quad (4.78)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.79)$$

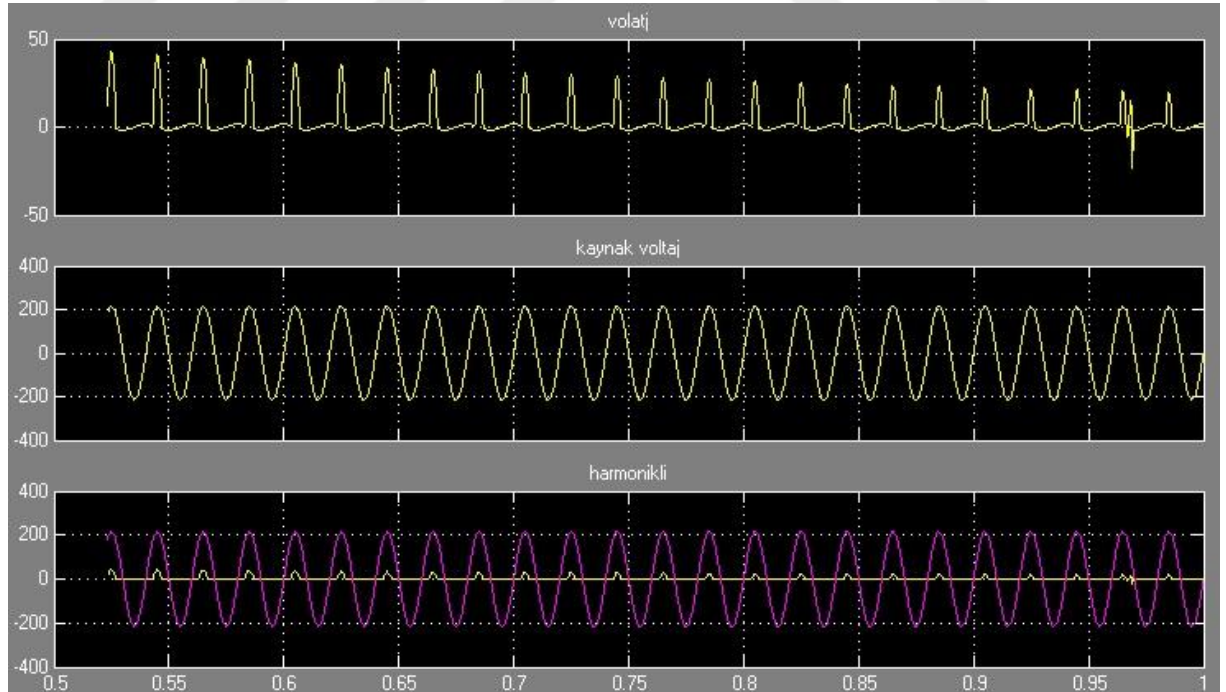
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



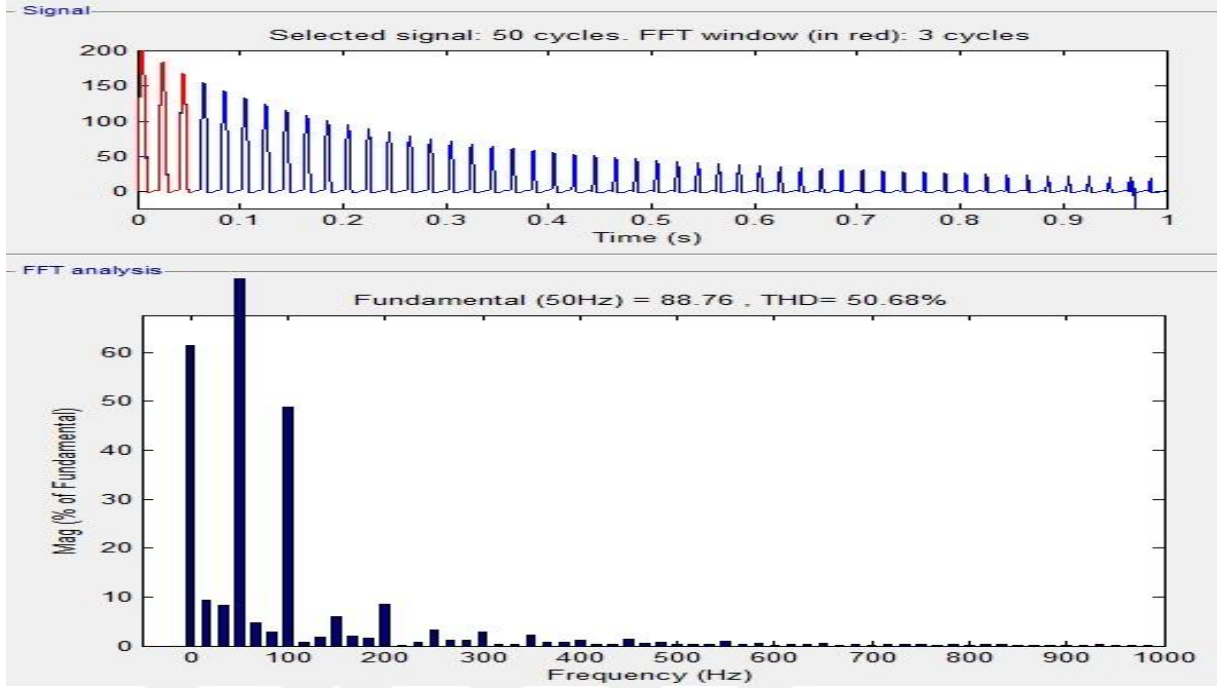
Şekil 4.48. Harmonikli Devreye 3 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklmiş Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.49. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.50. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 için 3 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.05'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.35'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluklar olan H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a birinci dereceden yüksek geçiren filtrelerin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.80)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.81)$$

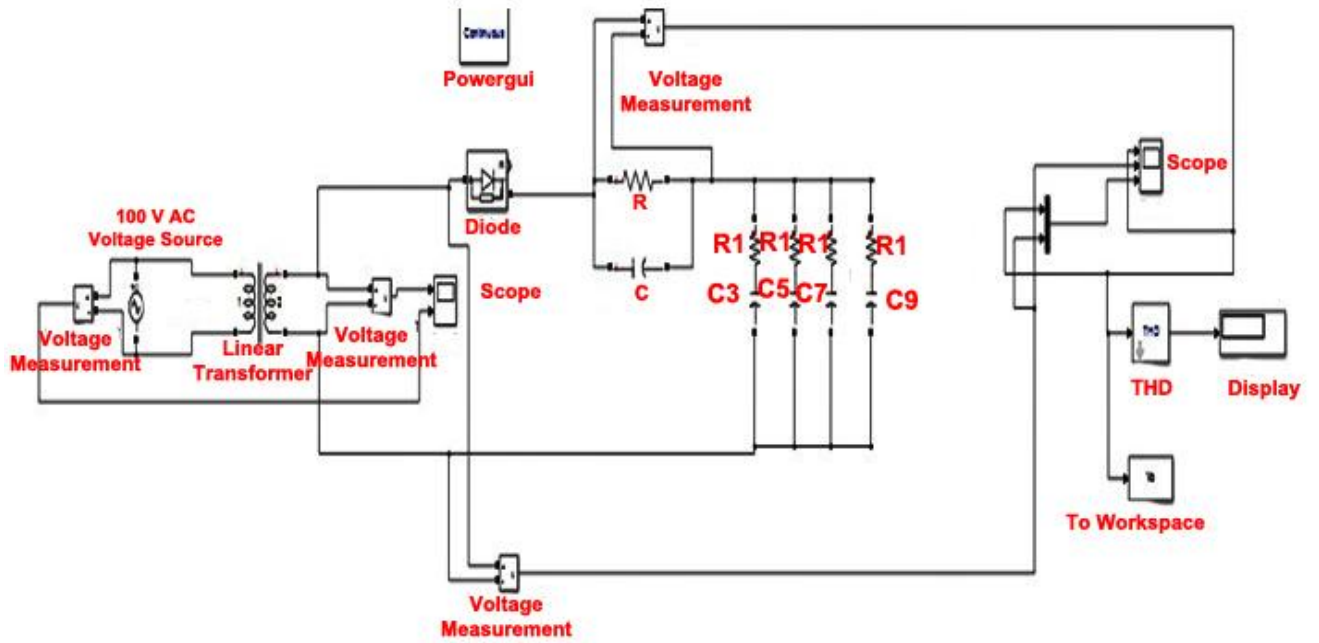
$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = 1,64 \cdot 10^{-4} F \quad (4.82)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.83)$$

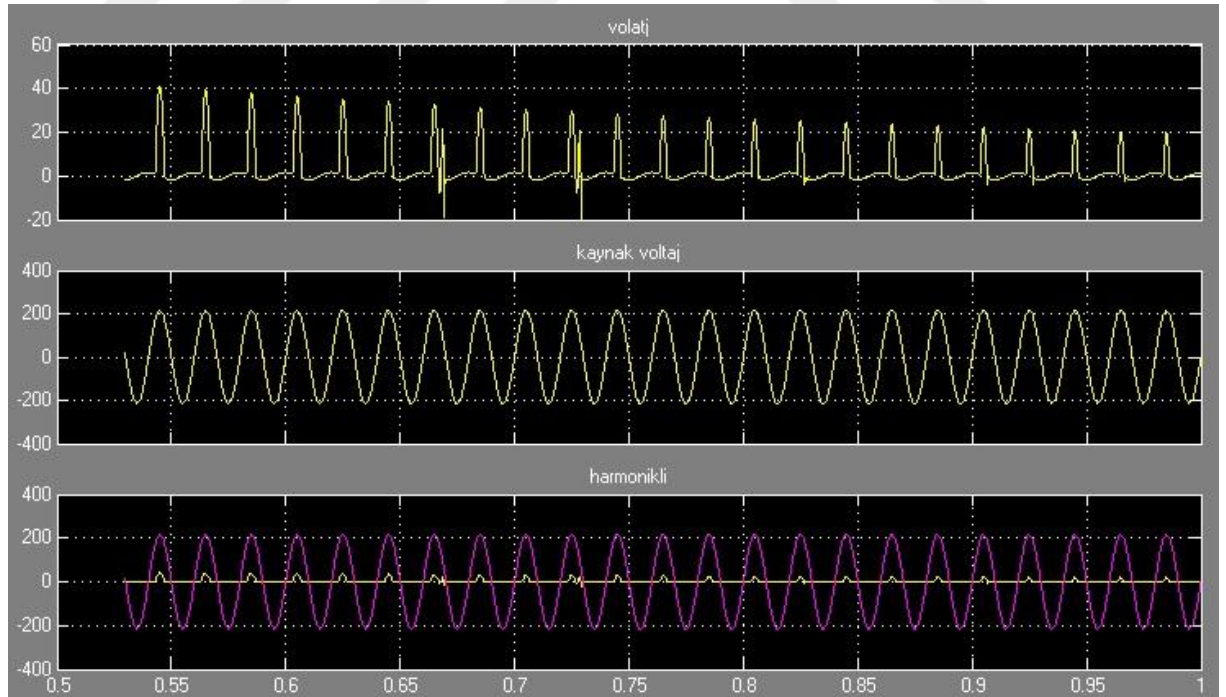
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



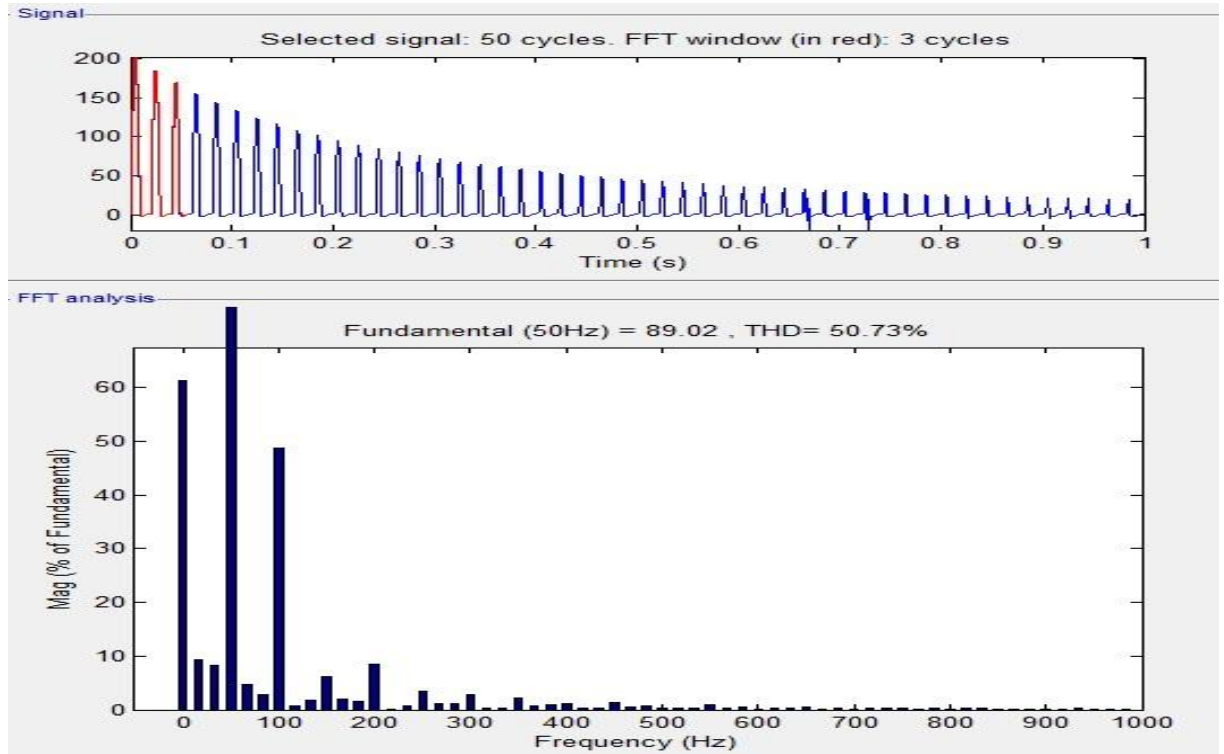
Şekil 4.51. Harmonikli Devreye 4 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklmiş Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.52. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.53. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 için 4 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.09'a, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluklar olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e birinci dereceden yüksek geçiren filtrelerin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_c = \frac{U^2}{Q_c} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.84)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6.57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.85)$$

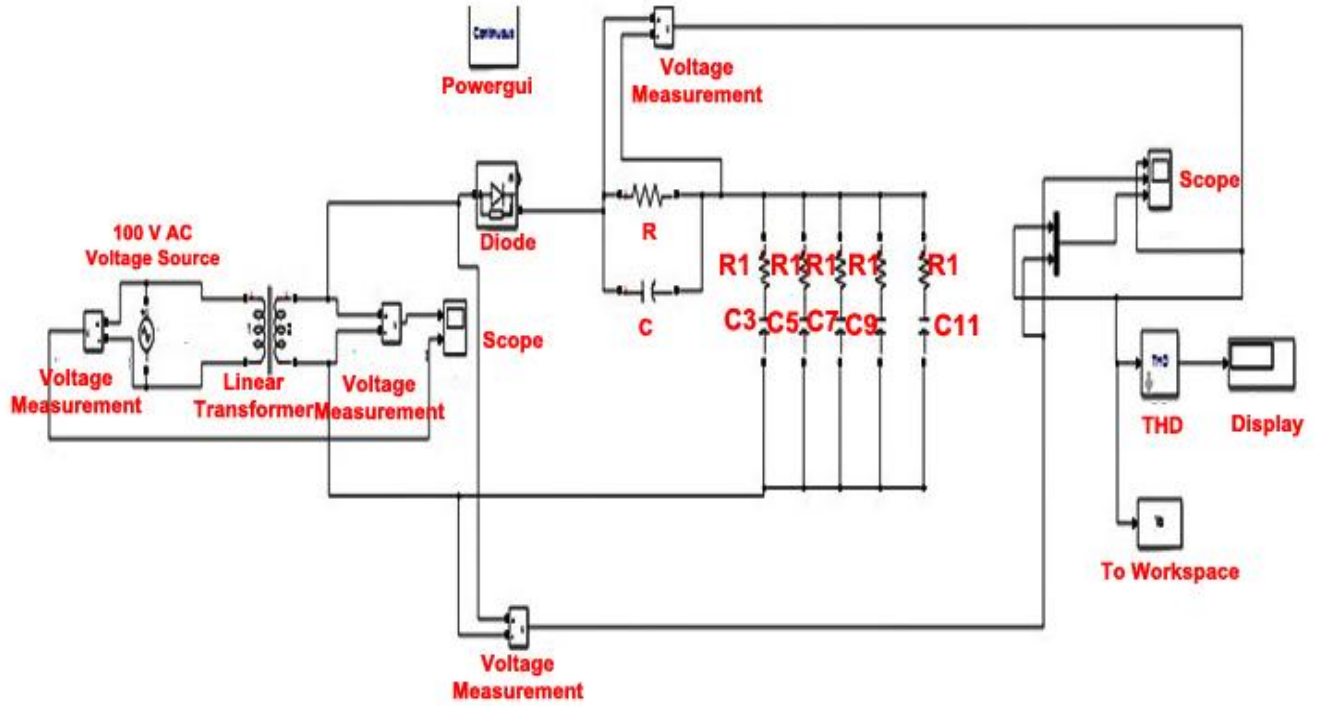
$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1.31 \cdot 10^{-4} F \quad (4.86)$$

$$K = \frac{R}{X_c}$$

$$1 = \frac{R}{4.84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.87)$$

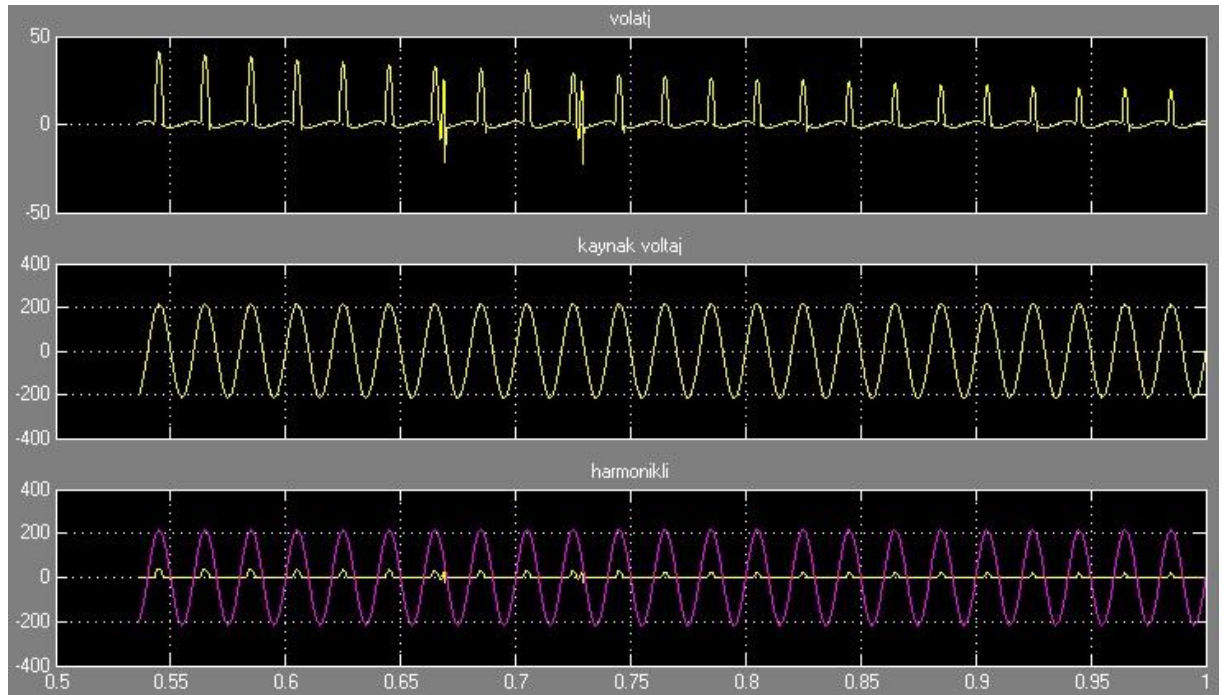
$$R = 4.84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş birinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



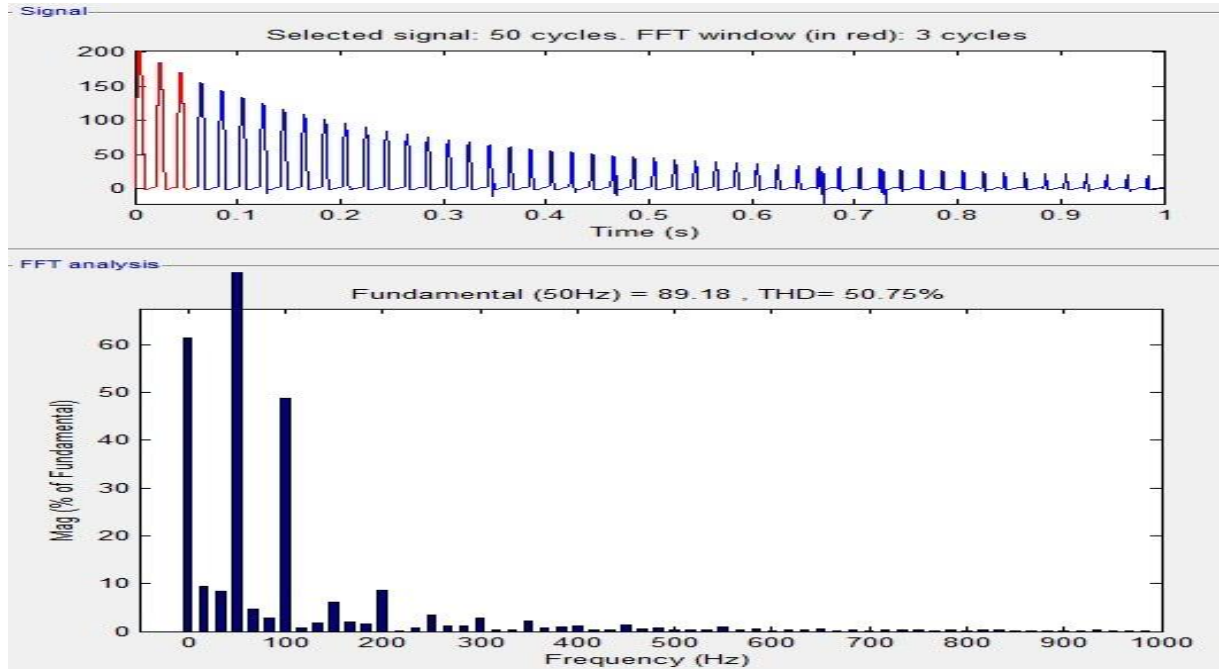
Şekil 4.54. Harmonikli Devreye 5 Adet Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklennmiş Modellemesi.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.55. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.56. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} için 5 adet birinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.15'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.39'a indirgenmiştir.

4.1.1.3.2. İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

İkinci dereceden yüksek geçiren filtrede daha önce hesapladığımız birinci derece yüksek geçiren filtrenin değerlerine sahiptir sadece birinci derece yüksek geçiren sönümlü filtreye ek olarak dirence paralel bir endüktansa sahiptir. [25]

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.88)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.89)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1,09 \cdot 10^{-4} F \quad (4.90)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 10,32 \cdot 10^{-3} H \quad (4.91)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 3,71 \cdot 10^{-3} H \quad (4.92)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,09.10^{-4})} = 1,89.10^{-3} H \quad (4.93)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,09.10^{-4})} = 1,14.10^{-3} H \quad (4.94)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f_{11})^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,09.10^{-4})} = 7,68.10^{-4} H \quad (4.95)$$

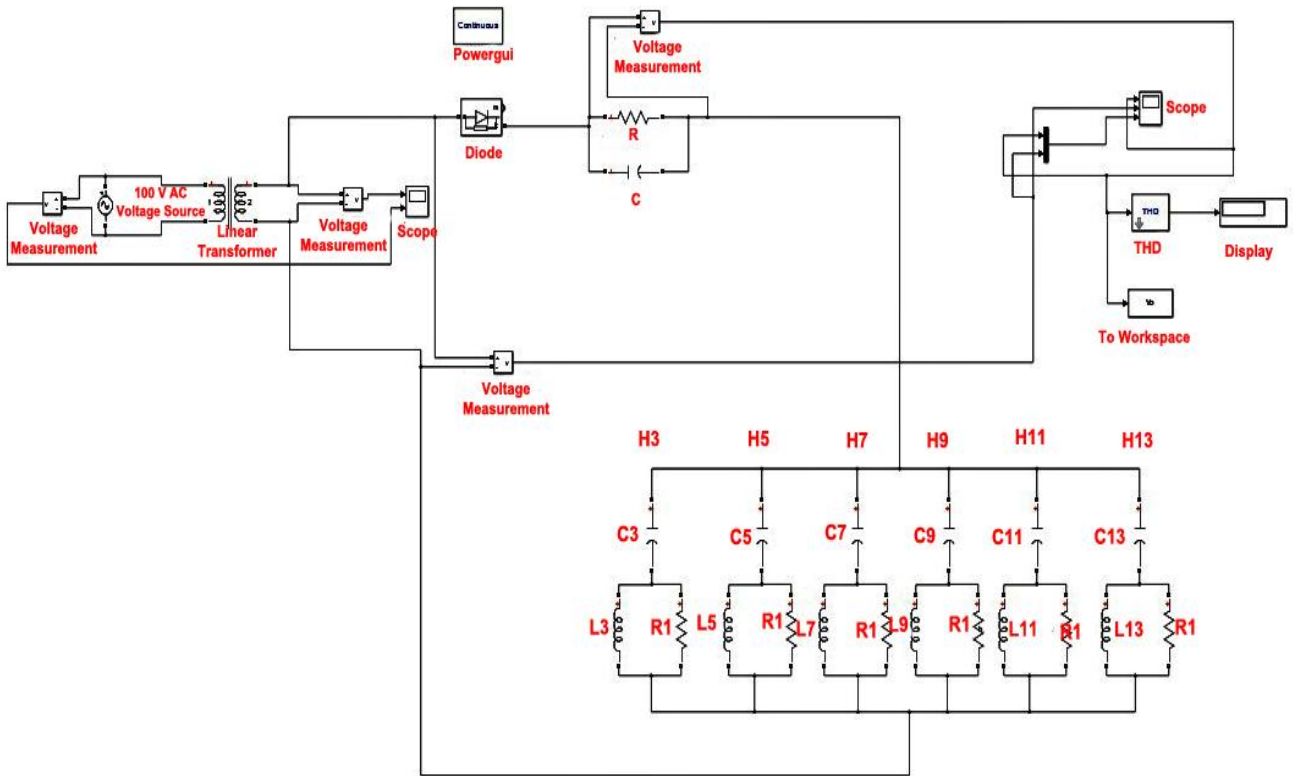
$$L_{13} = \frac{1}{4.\pi^2.(f_{13})^2.(C_{13})} = \frac{1}{4.\pi^2.650^2.(1,09.10^{-4})} = 5,5.10^{-4} H \quad (4.96)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.97)$$

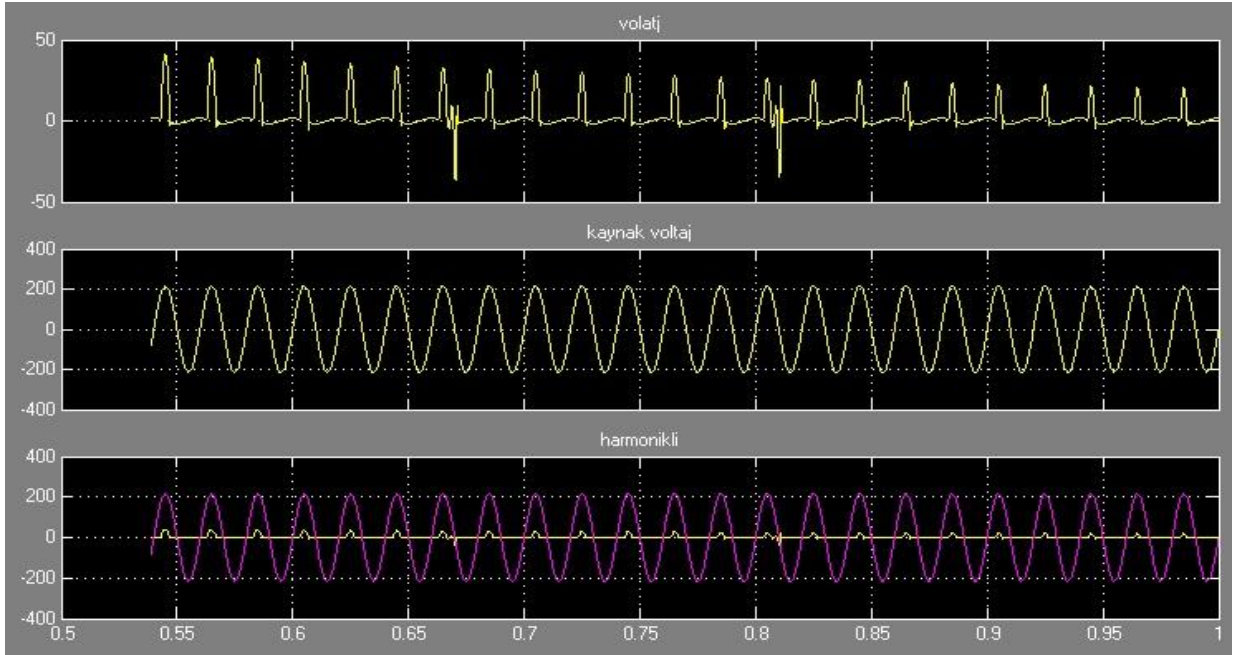
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



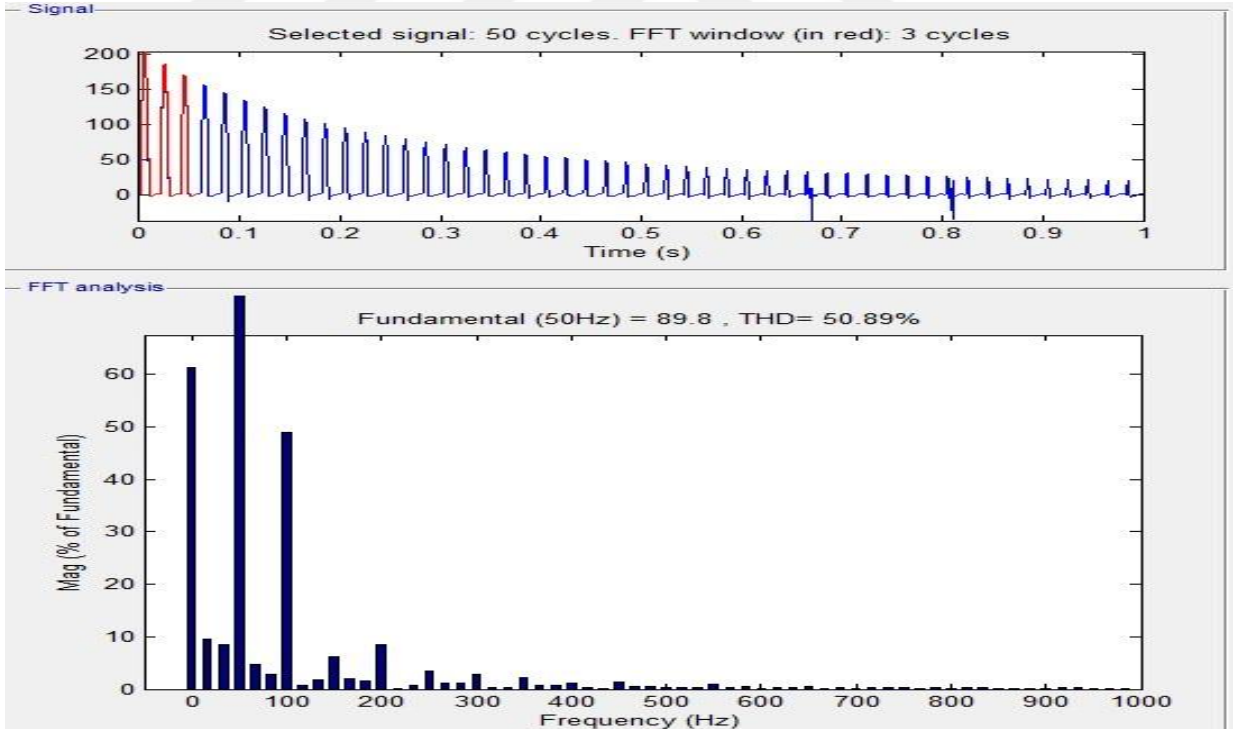
Şekil 4.57. Harmonikli Devreye 6 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreleri sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.58. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.59. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme 6 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekansındaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik frekansındaki bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 'e ikinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.98)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.199)$$

$$C = C_3 = 6,57.10^{-4} F$$

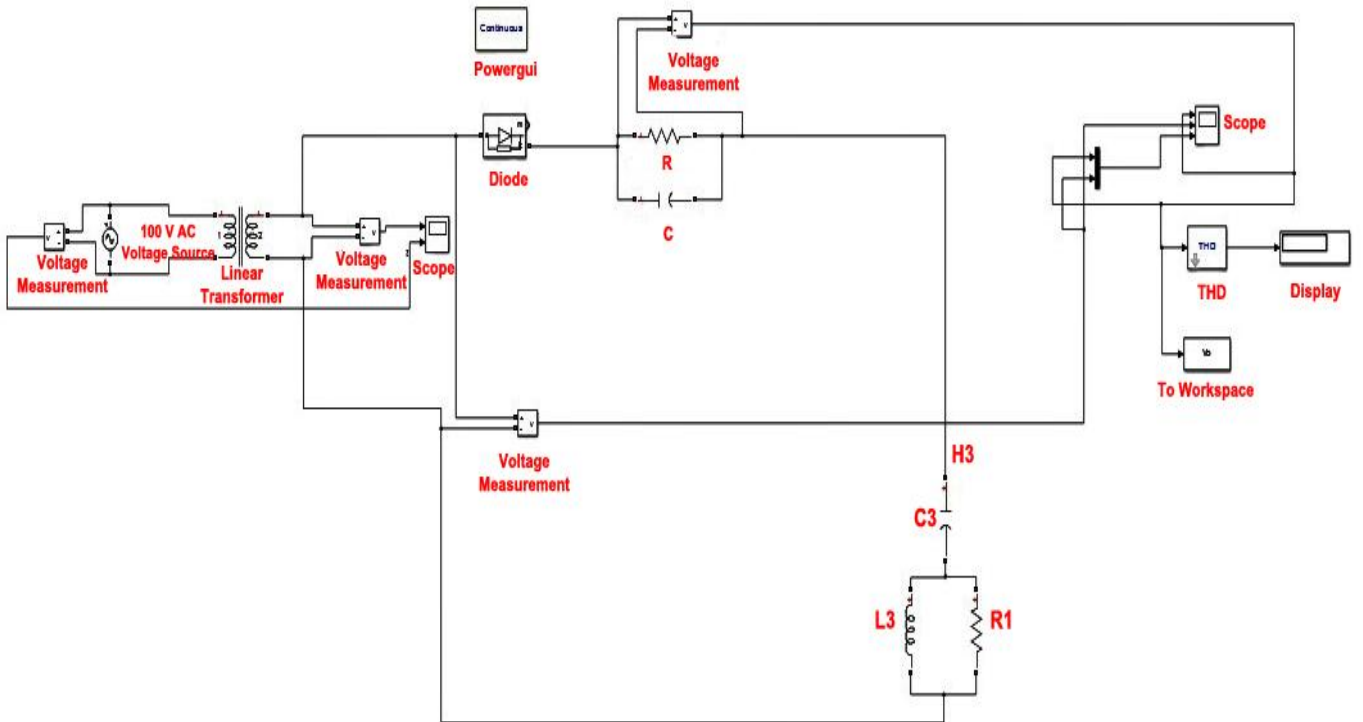
$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(6,57.10^{-4})} = 1,71.10^{-3} H \quad (4.100)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.101)$$

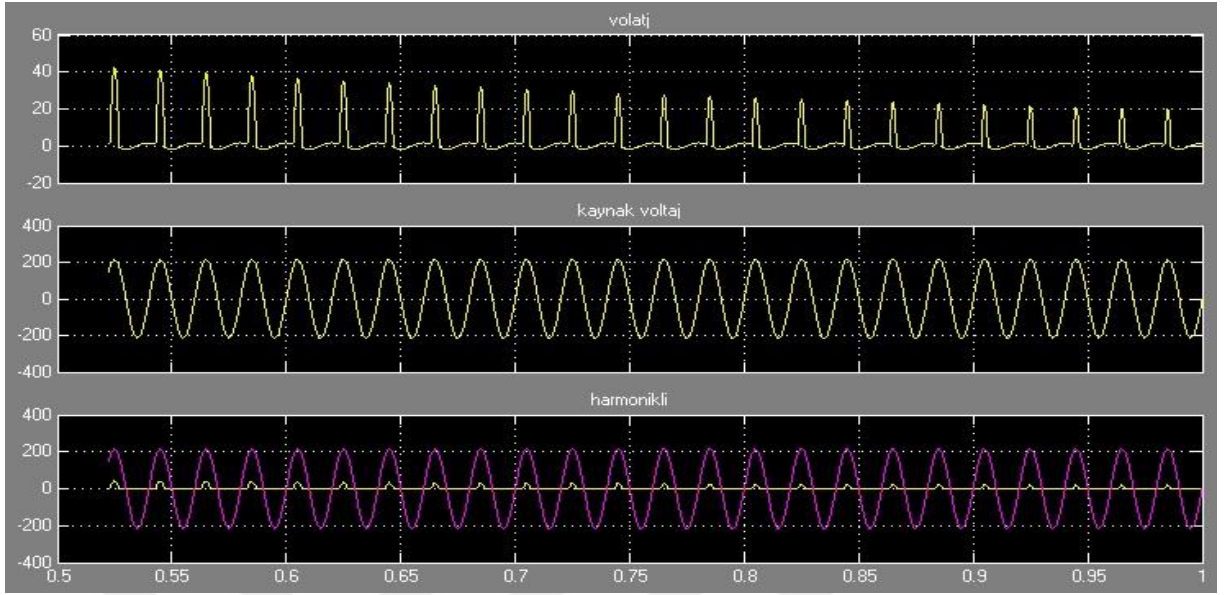
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtre aşağıdaki gibidir;



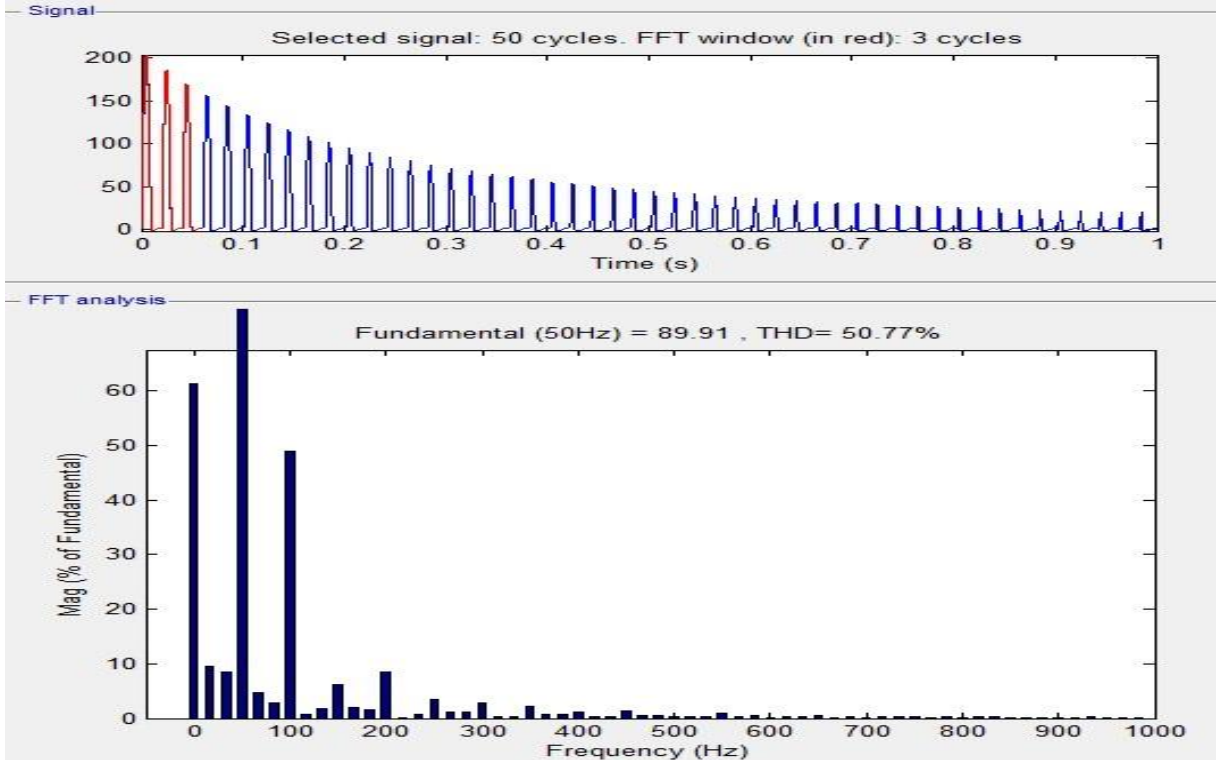
Şekil 4.60. Harmonikli Devreye 1 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.61. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.62. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 için 1 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.35'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 ve H_5 'e ikinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.102)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.103)$$

$$C_3 = C_5 = 3,25 \cdot 10^{-4} F \quad (4.104)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 3,4 \cdot 10^{-3} H \quad (4.105)$$

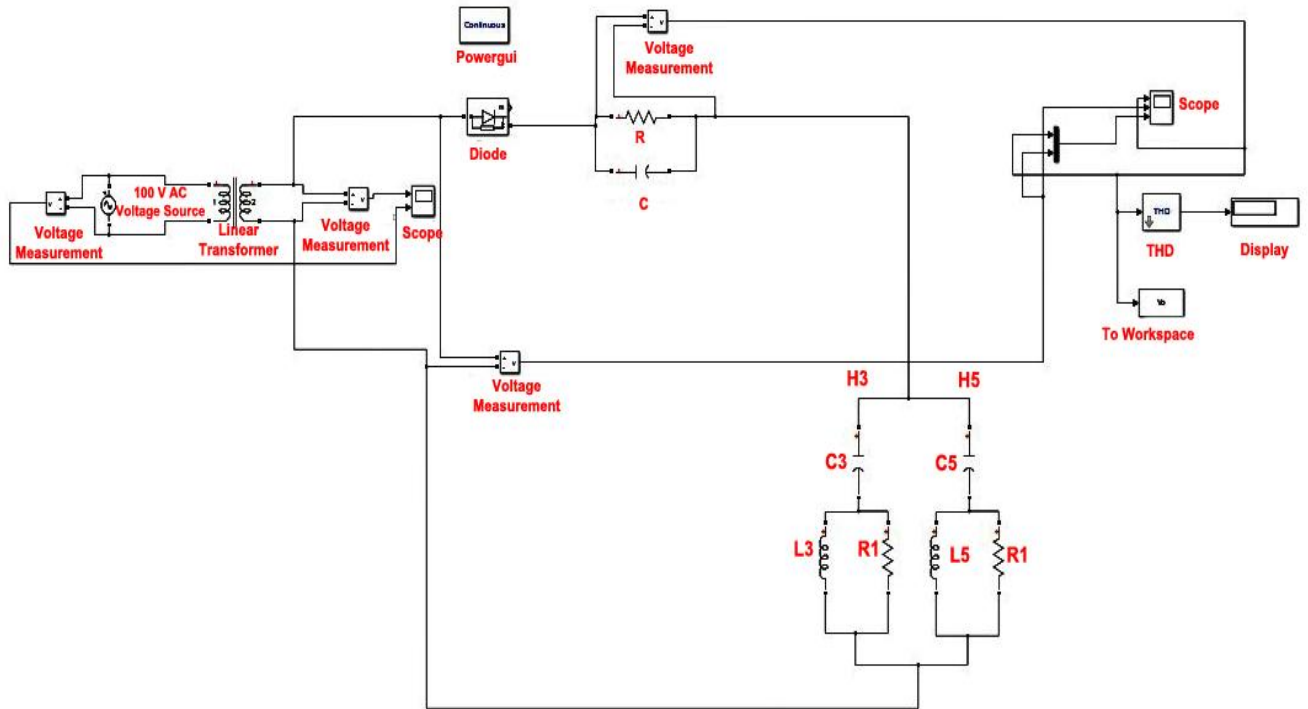
$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 1,2 \cdot 10^{-3} H \quad (4.106)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad K \text{ sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.107)$$

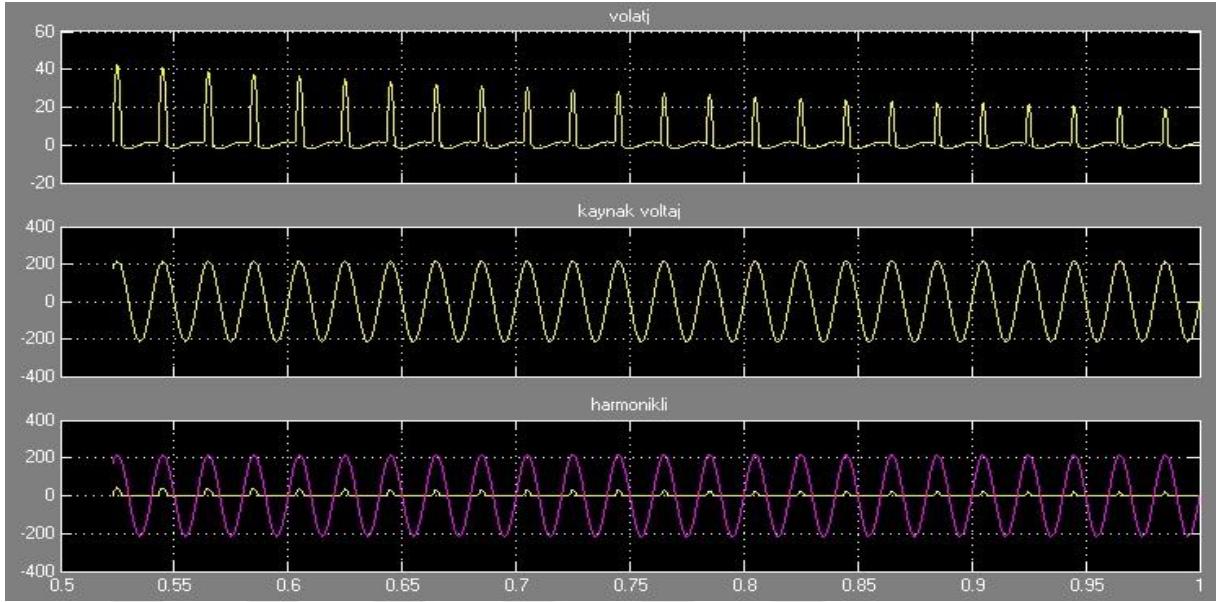
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



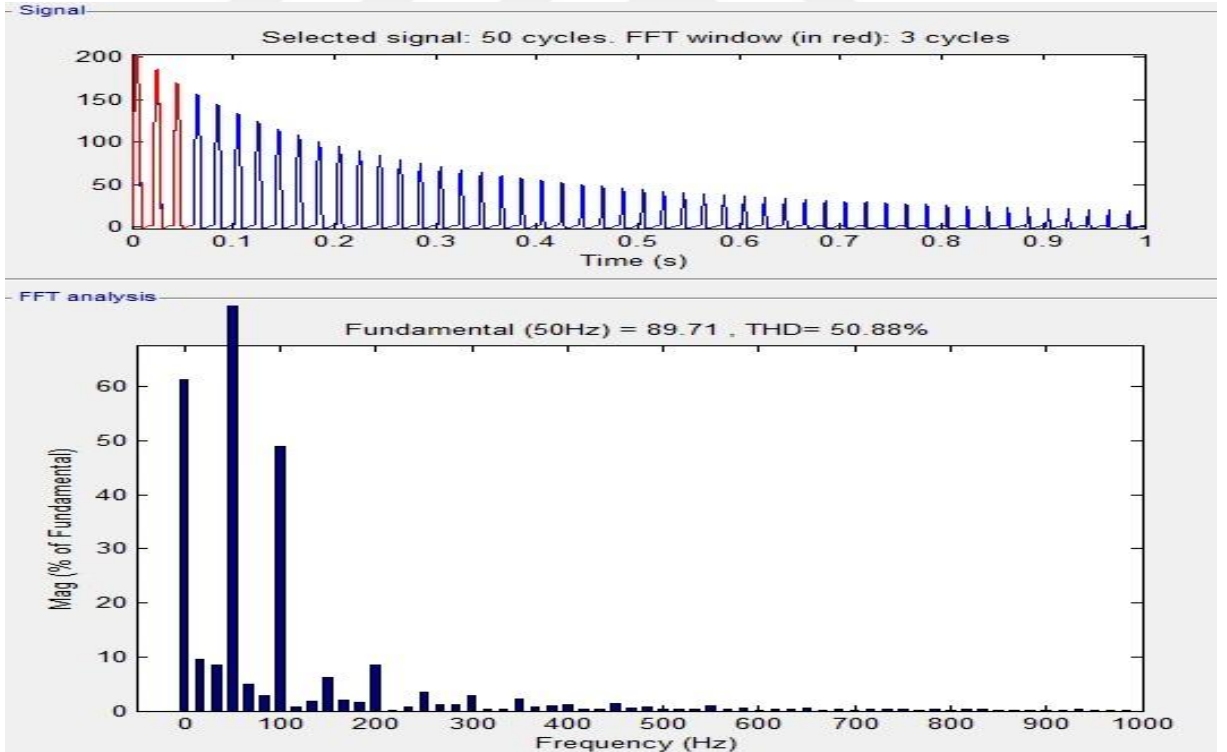
Şekil 4.63. Harmonikli Devreye 2 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.64. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.65. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için 2 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.23'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 ve H_7 'ye ikinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.108)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.109)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,16 \cdot 10^{-4} F \quad (4.110)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 5,21 \cdot 10^{-3} H \quad (4.111)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 1,87 \cdot 10^{-3} H \quad (4.112)$$

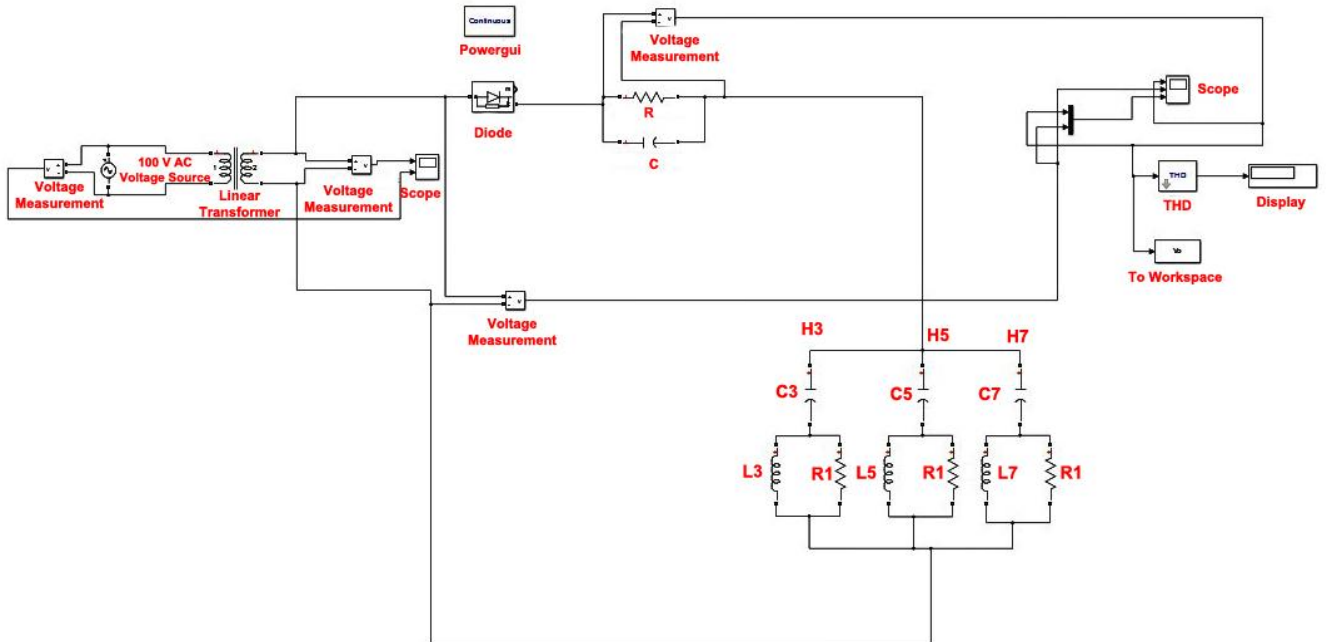
$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 9,57 \cdot 10^{-4} H \quad (4.113)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.114)$$

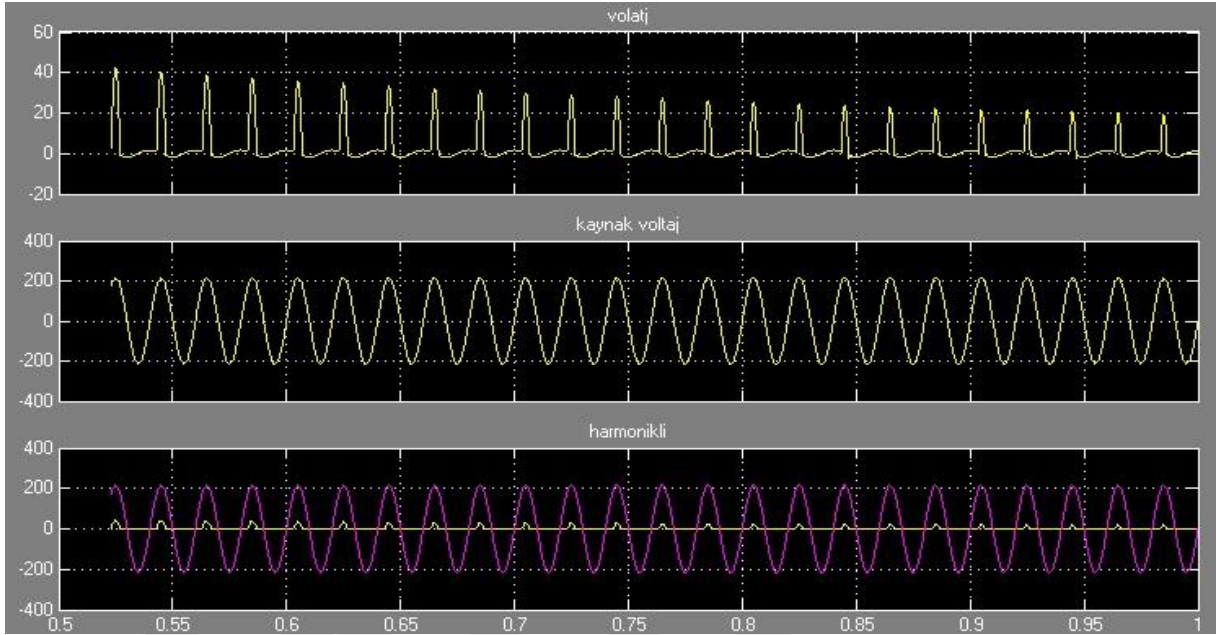
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



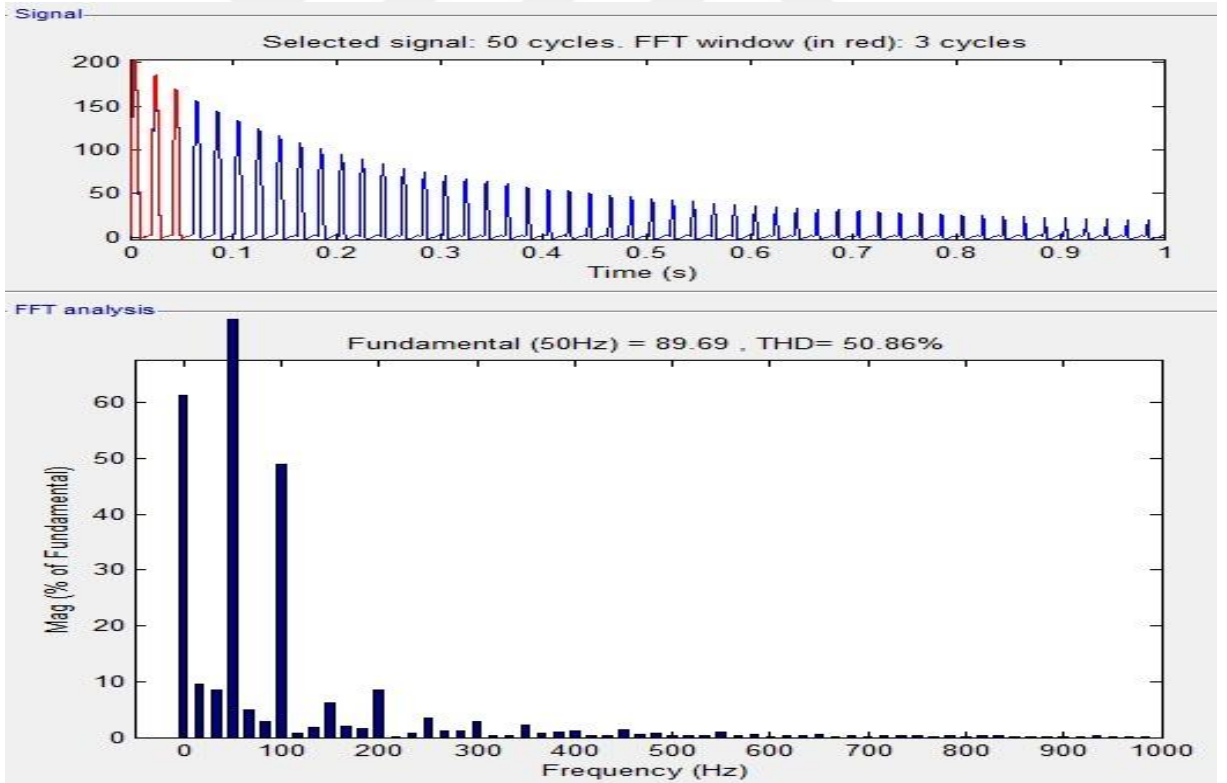
Şekil 4.66. Harmonikli Devreye 3 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.67. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.68. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 için 3 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.21'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.43'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a ikinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.115)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.116)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = 1,6.10^{-4} F \quad (4.117)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,6.10^{-4})} = 7,03.10^{-3} H \quad (4.118)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,6.10^{-4})} = 2,53.10^{-3} H \quad (4.119)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,6.10^{-4})} = 1,29.10^{-3} H \quad (4.120)$$

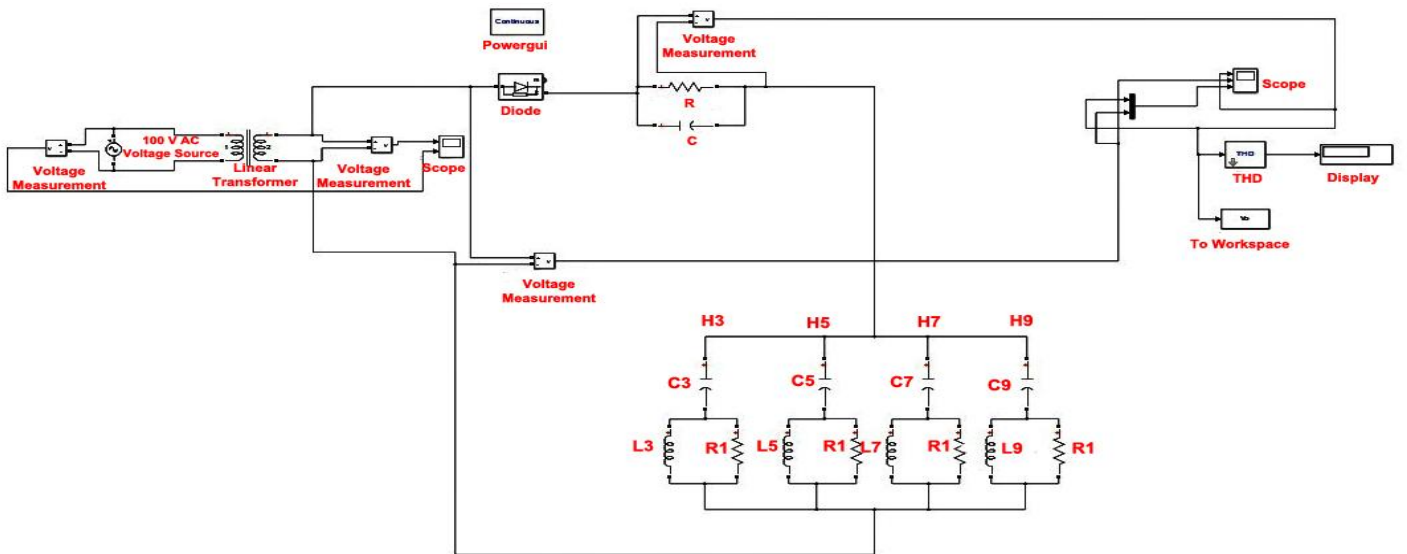
$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,6.10^{-3})} = 7,81.10^{-4} H \quad (4.121)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.122)$$

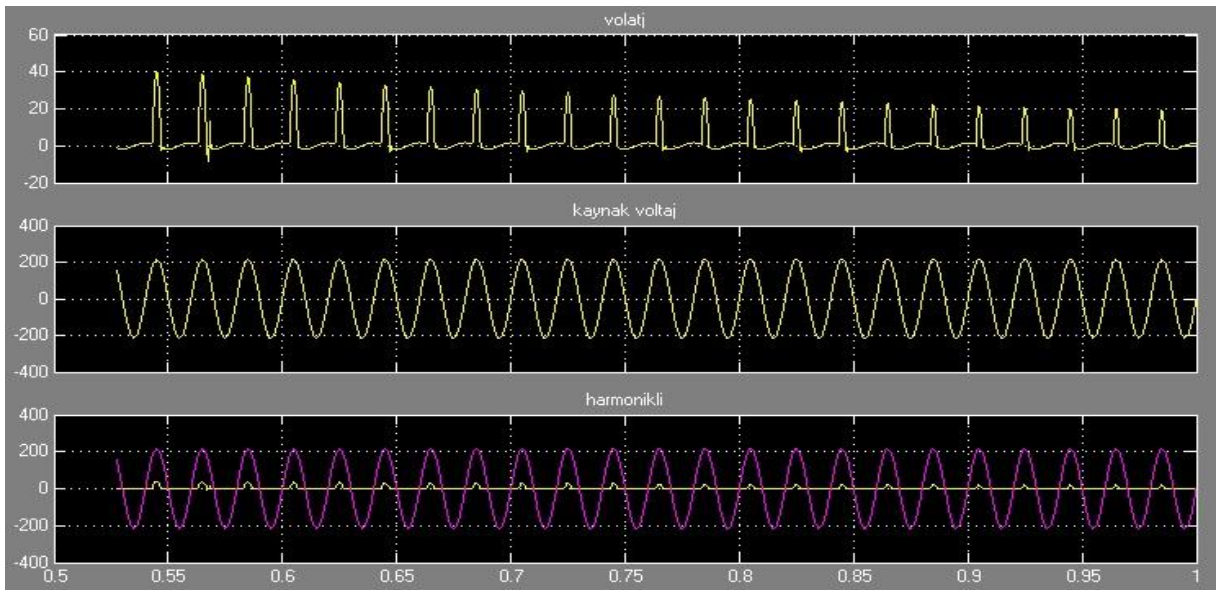
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



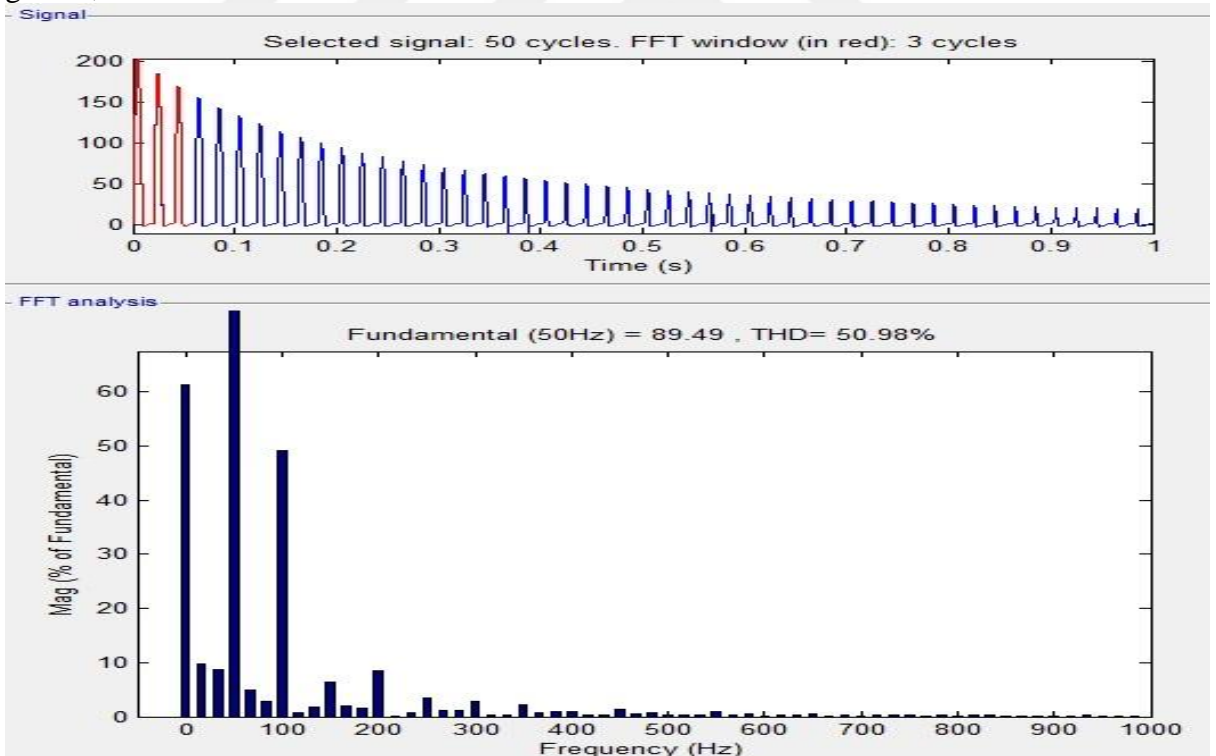
Şekil 4.69. Harmonikli Devreye 4 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.70. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.71. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 için 4 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.32'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.48'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e ikinci dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.123)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.124)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1,3.10^{-4} F \quad (4.125)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,3.10^{-4})} = 8,66.10^{-3} H \quad (4.126)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,3.10^{-4})} = 3,11.10^{-3} H \quad (4.127)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,3.10^{-4})} = 1,59.10^{-3} H \quad (4.128)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,3.10^{-4})} = 9,62.10^{-4} H \quad (4.129)$$

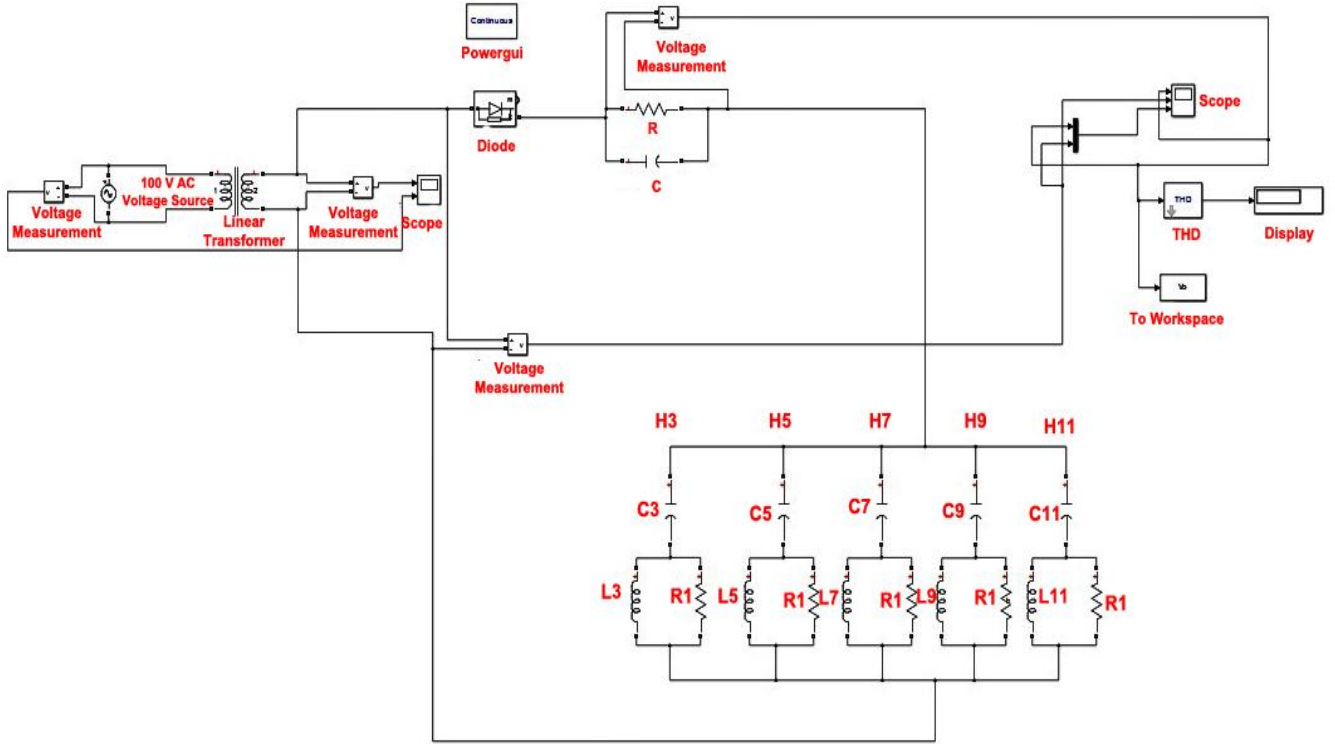
$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f11)^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,3.10^{-4})} = 6,44.10^{-4} H \quad (4.130)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.131)$$

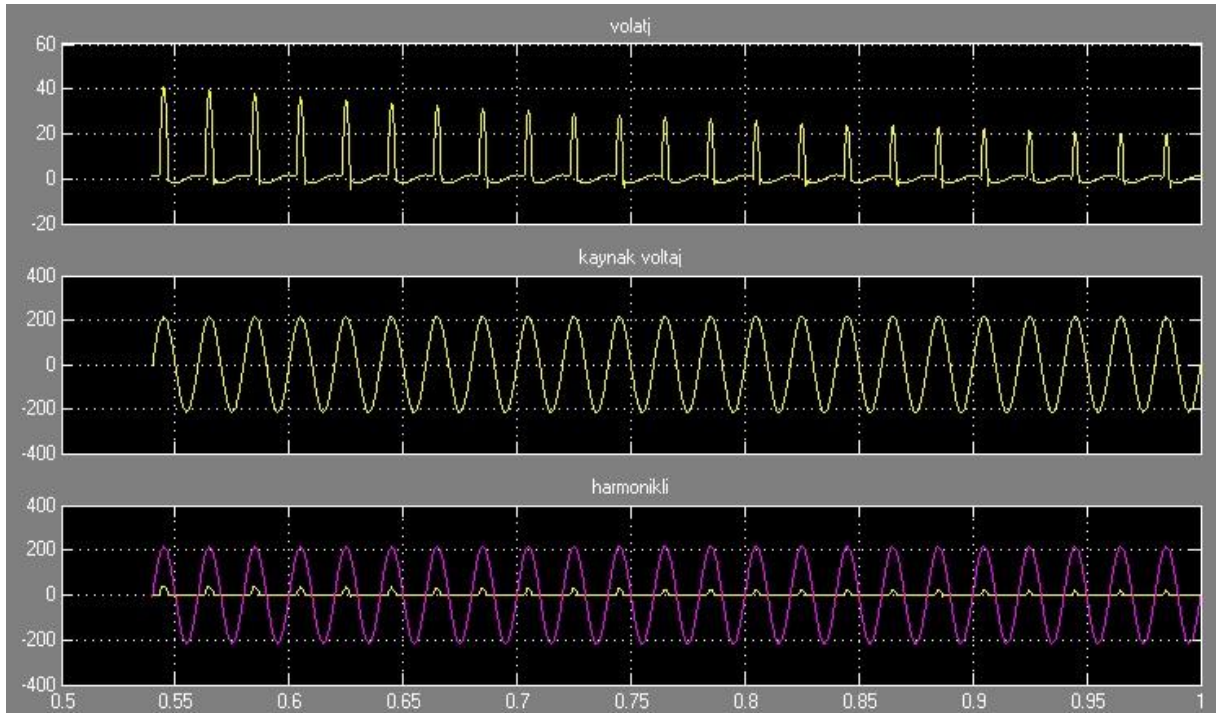
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş ikinci dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



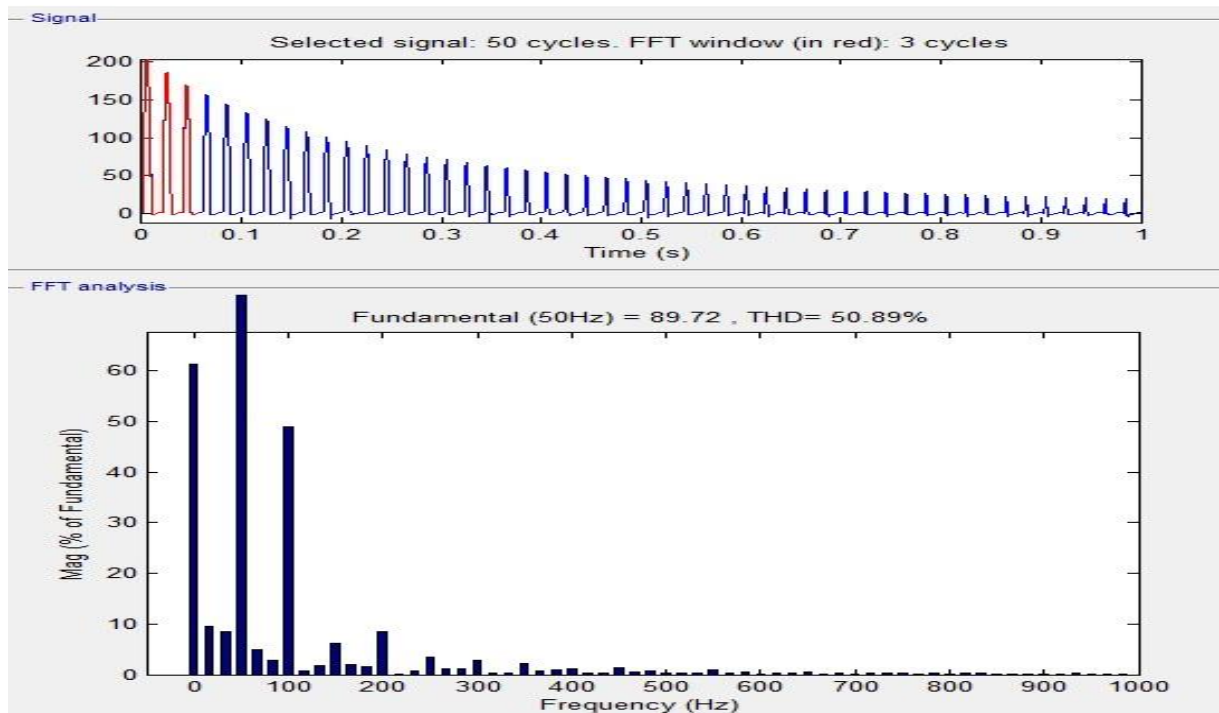
Şekil 4.72. Harmonikli Devreye 5 Adet İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklmiş Modellemesi.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.73. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.74. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} için 5 adet ikinci dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozuluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

4.1.1.3.3. Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre için tasarlanmış olduğumuz filtreye ek olarak üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtreye bir adet daha kapasite bulunmaktadır. Bu ikinci kapasite direnç kolundadır. Yapılacak olan bu modellemeye C_1 ve C_2 eşit değerlerde alınacaktır. Geri kalan tüm hesaplamalar ikinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre gibi olacaktır. [25]

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.132)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.133)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1,09.10^{-4} F \quad (4.134)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,09.10^{-4})} = 10,32.10^{-3} H \quad (4.135)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,09.10^{-4})} = 3,71.10^{-3} H \quad (4.136)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,09.10^{-4})} = 1,89.10^{-3} H \quad (4.137)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,09.10^{-4})} = 1,14.10^{-3} H \quad (4.138)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f11)^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,09.10^{-4})} = 7,68.10^{-4} H \quad (4.139)$$

$$L_{13} = \frac{1}{4.\pi^2.(f13)^2.(C_{13})} = \frac{1}{4.\pi^2.650^2.(1,09.10^{-4})} = 5,5.10^{-4} H \quad (4.140)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

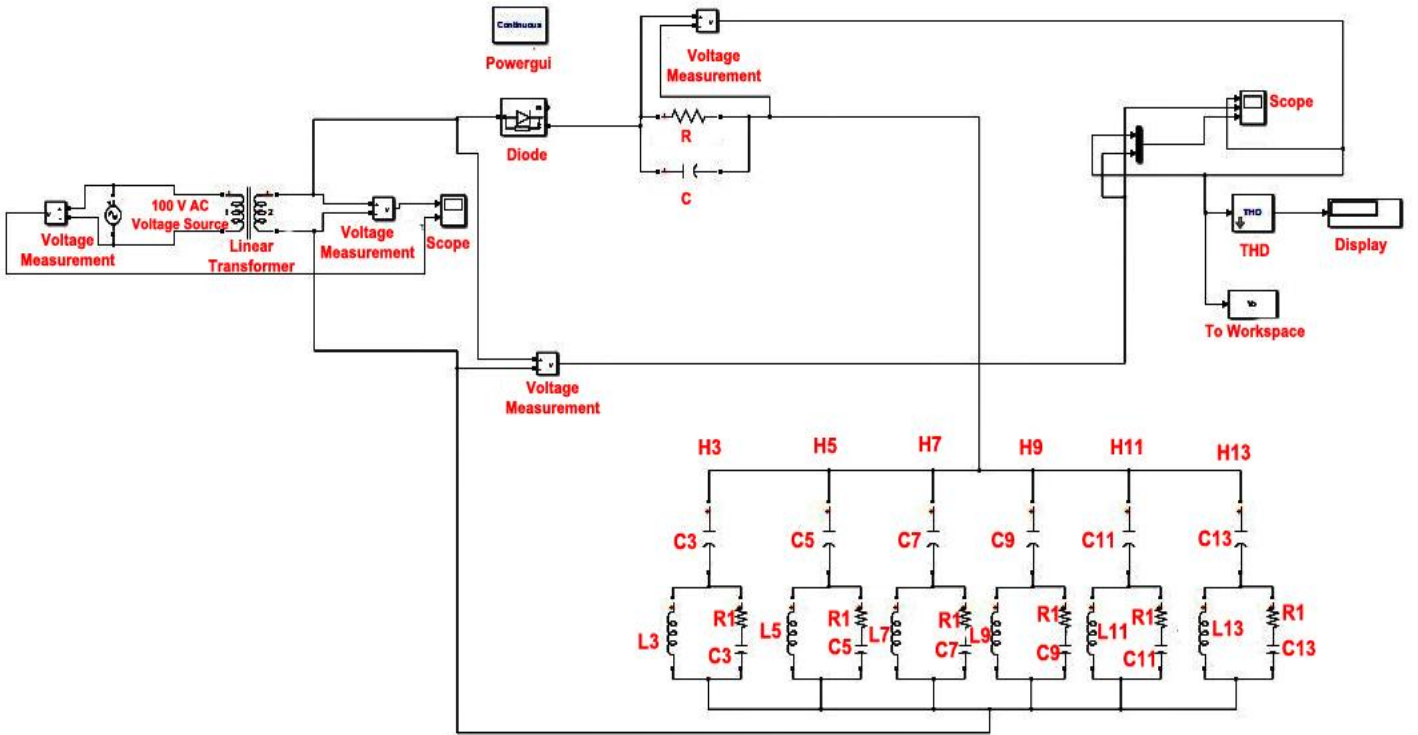
$$1 = \frac{R}{4,84}$$

$$R = 4,84\Omega$$

K sabitinin 1 alındığı durumda

$$(4.141)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



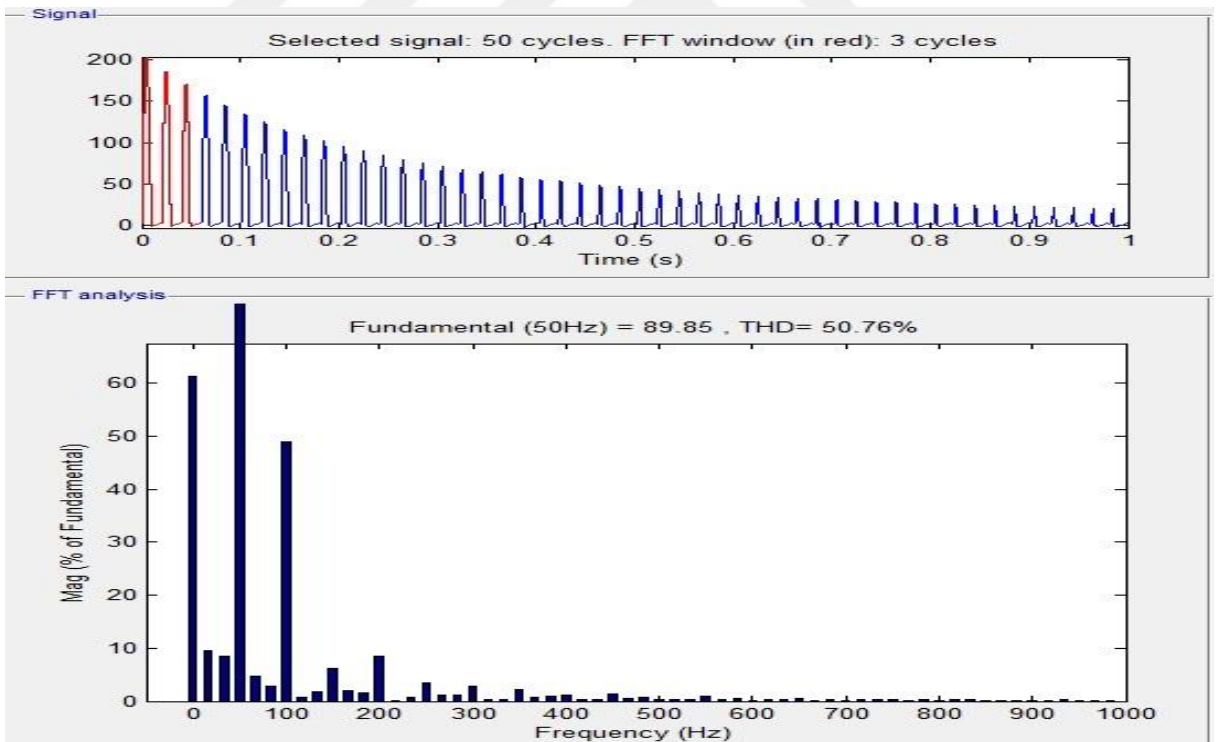
Şekil 4.75. Harmonikli Devreye 6 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklendiği Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreleri sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.76. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.77. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme 6 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.13'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.37'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 'e üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.142)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.143)$$

$$C = C_3 = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.144)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (6,5 \cdot 10^{-4})} = 1,7 \cdot 10^{-3} H \quad (4.145)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

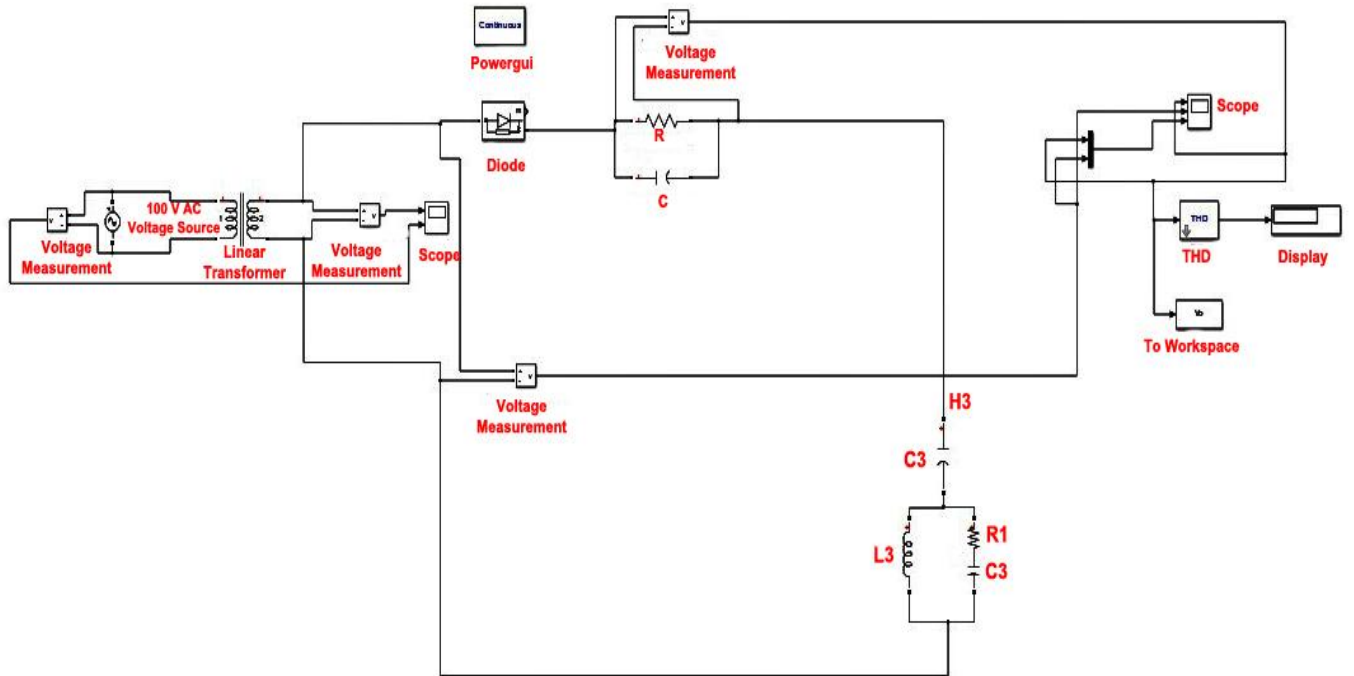
$$1 = \frac{R}{4,84}$$

$$R = 4,84\Omega$$

K sabitinin 1 alındığı durumda

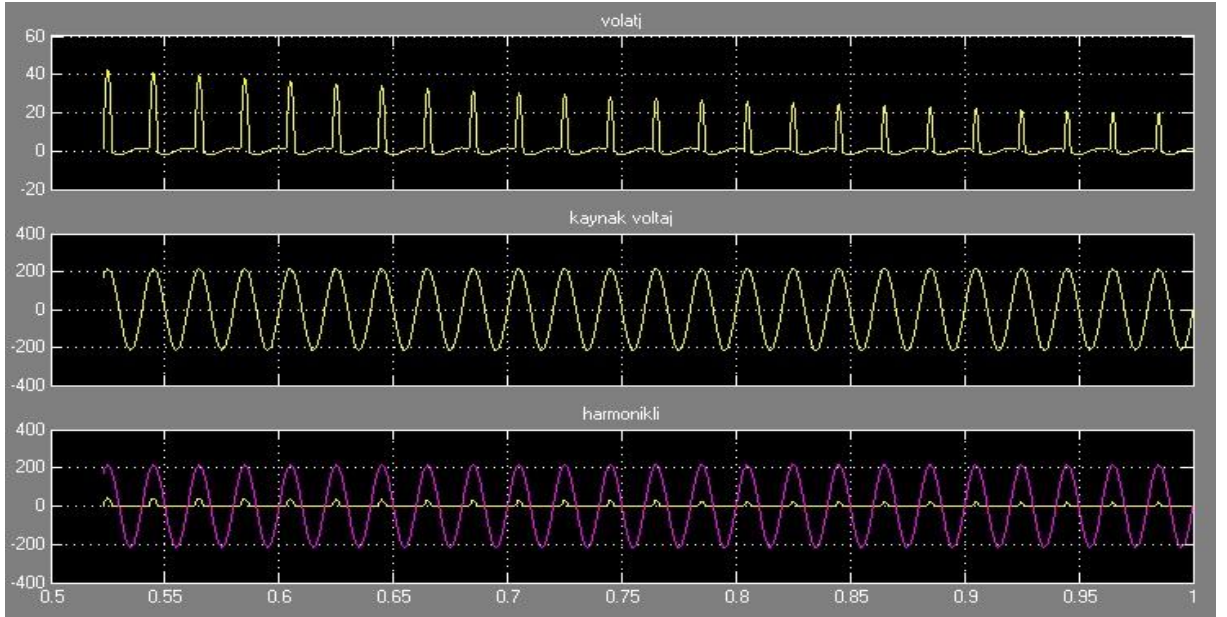
$$(4.146)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtre aşağıdaki gibidir;



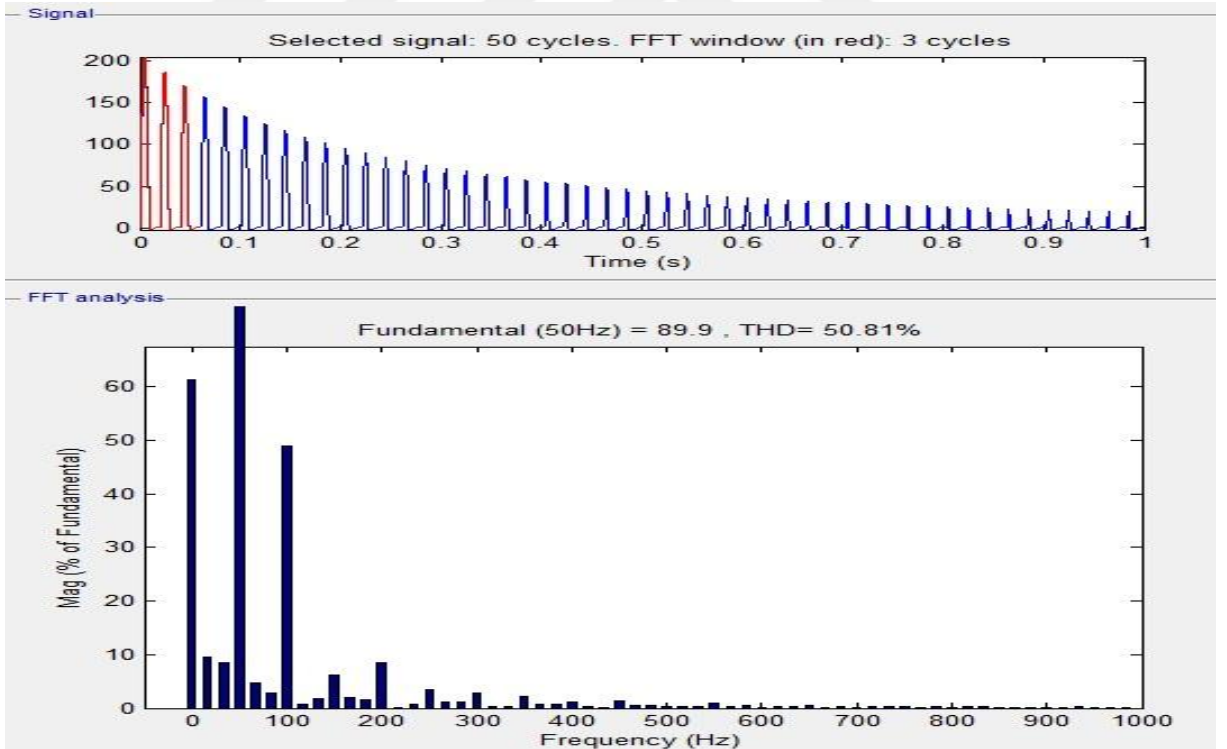
Şekil 4.78. Harmonikli Devreye 1 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklendiği Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.79. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.80. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 için 1 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.19'a, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.40'a indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 ve H_5 'e üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.147)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.148)$$

$$C_3 = C_5 = 3,25 \cdot 10^{-4} F \quad (4.149)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 3,4 \cdot 10^{-3} H \quad (4.150)$$

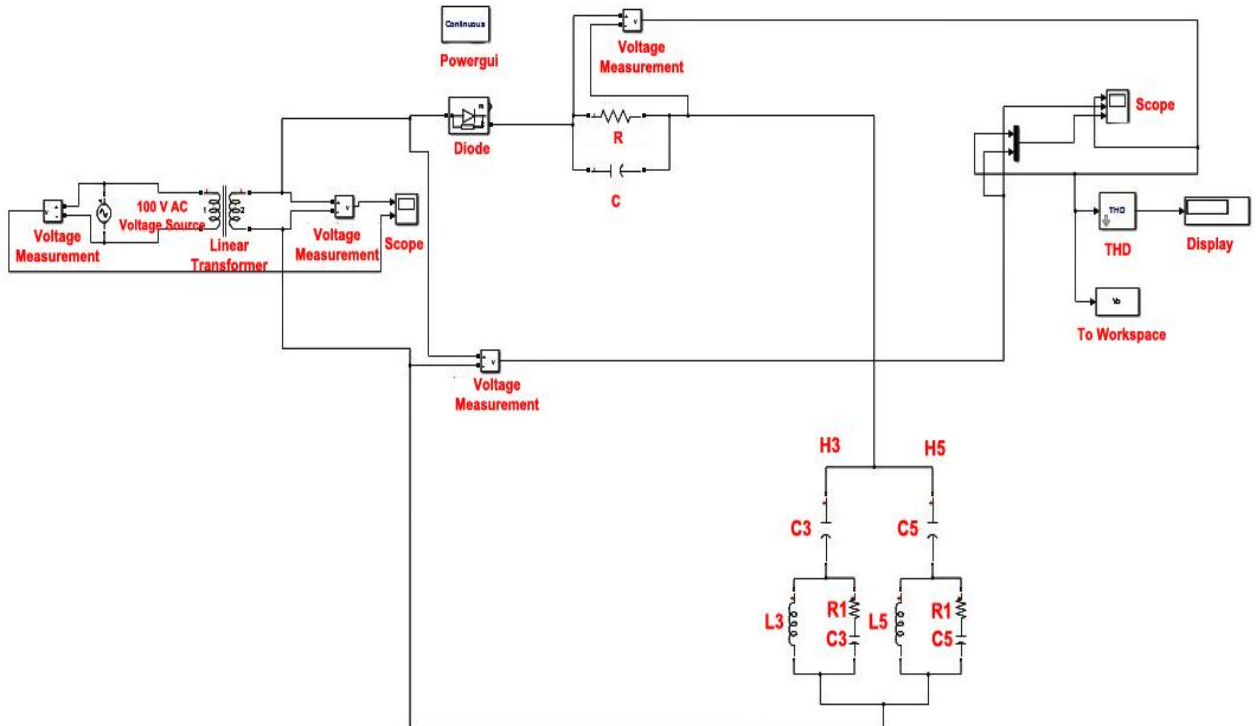
$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 1,2 \cdot 10^{-3} H \quad (4.151)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.152)$$

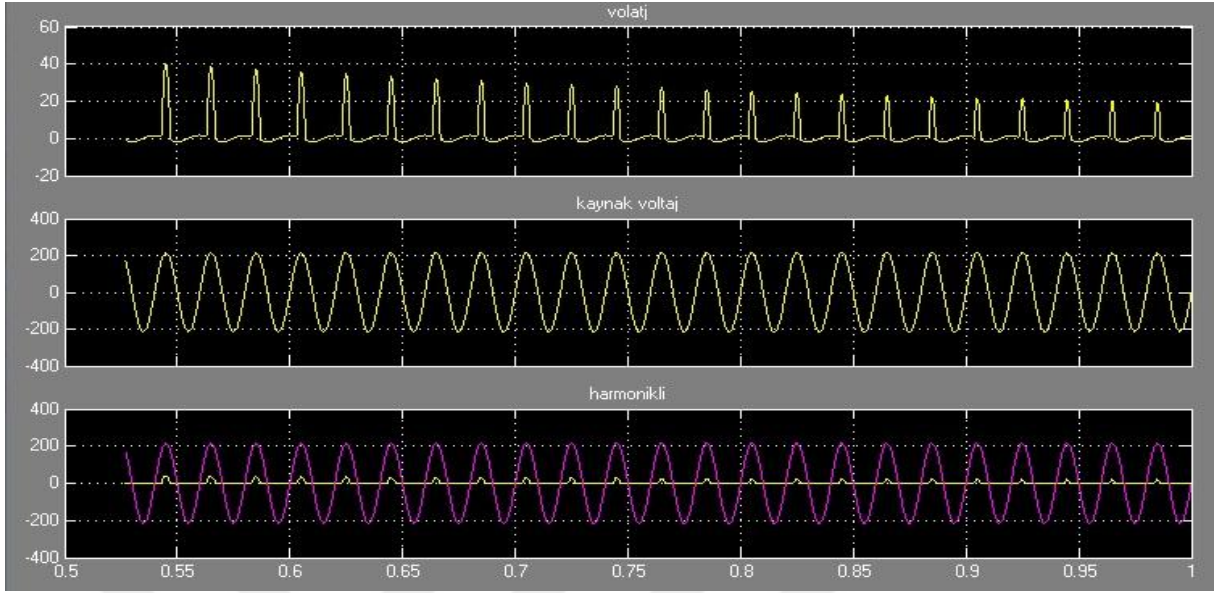
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



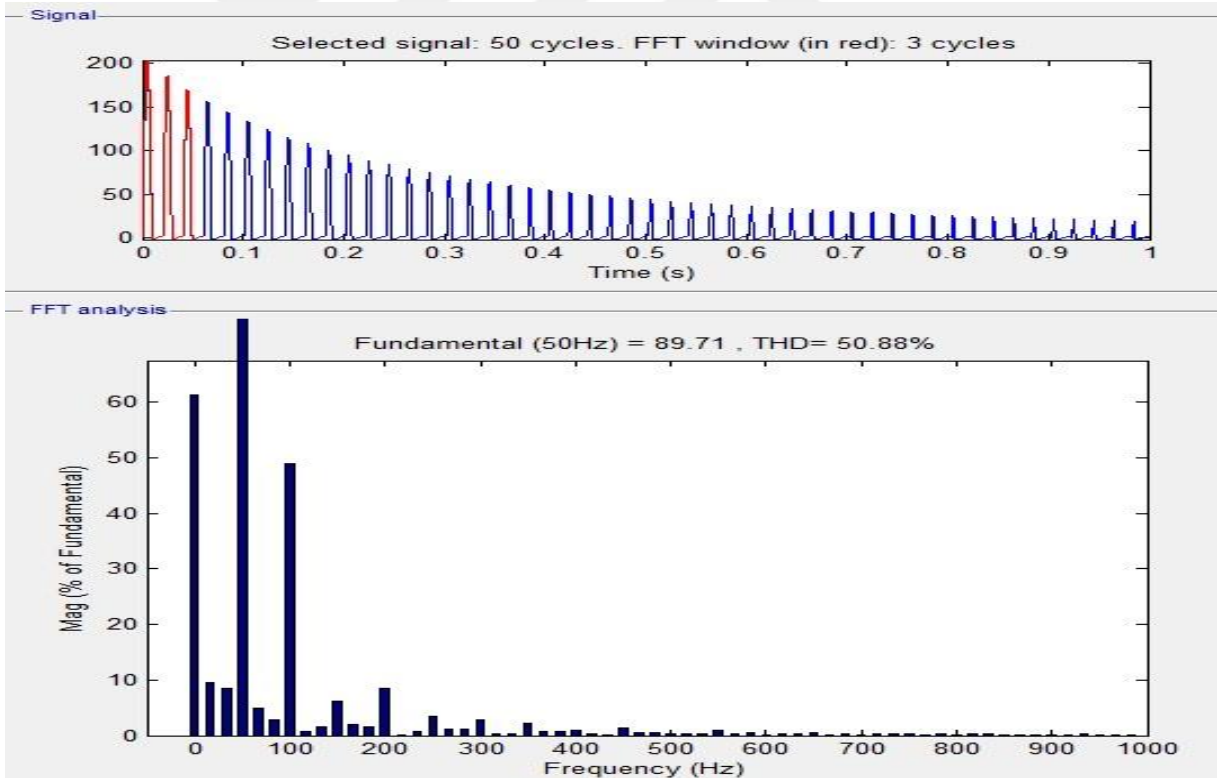
Şekil 4.81. Harmonikli Devreye 2 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklennmiş Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.82. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.83. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için 2 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 ve H_7 'ye üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.153)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.154)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,16 \cdot 10^{-4} F \quad (4.155)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 5,21 \cdot 10^{-3} H \quad (4.156)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 1,87 \cdot 10^{-3} H \quad (4.157)$$

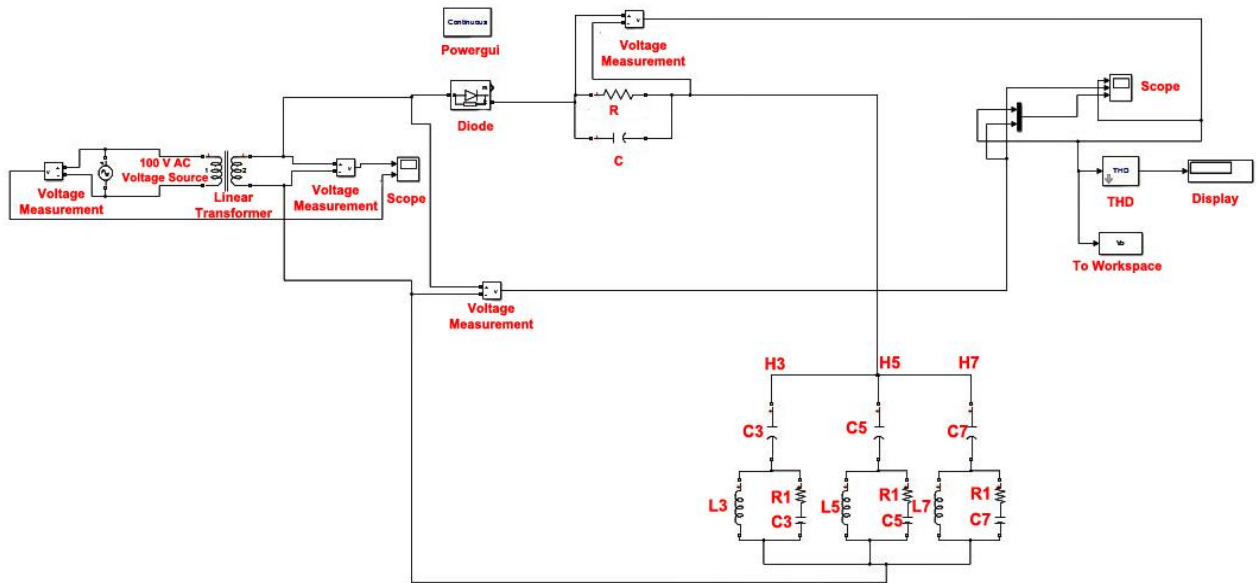
$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 9,57 \cdot 10^{-4} H \quad (4.158)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.159)$$

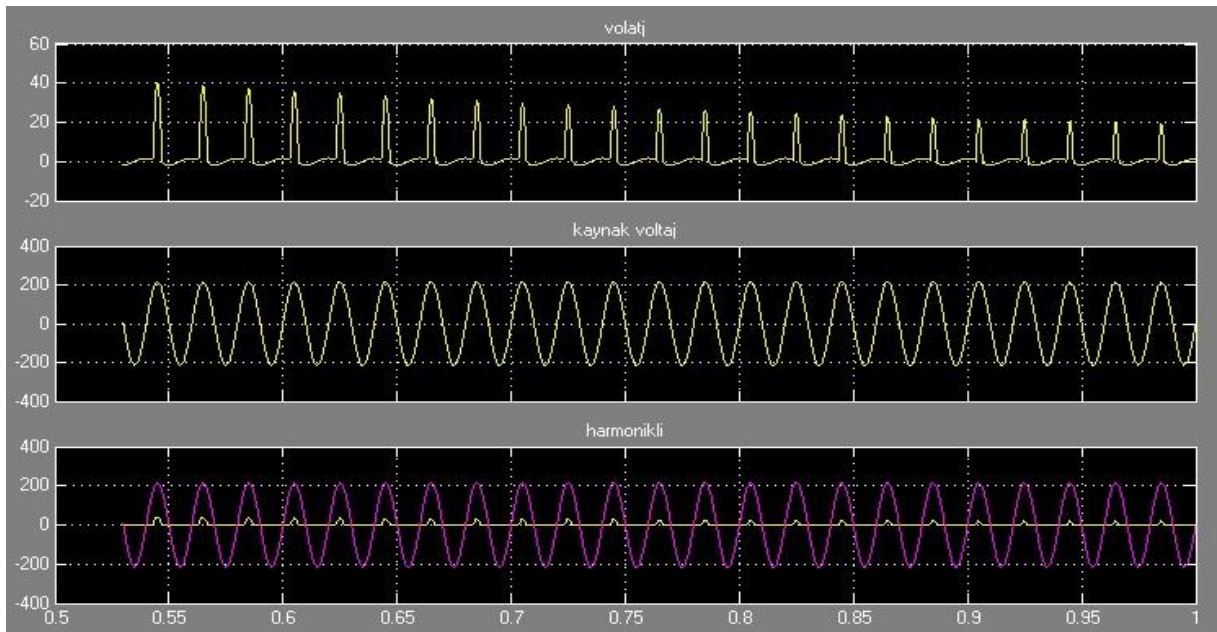
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



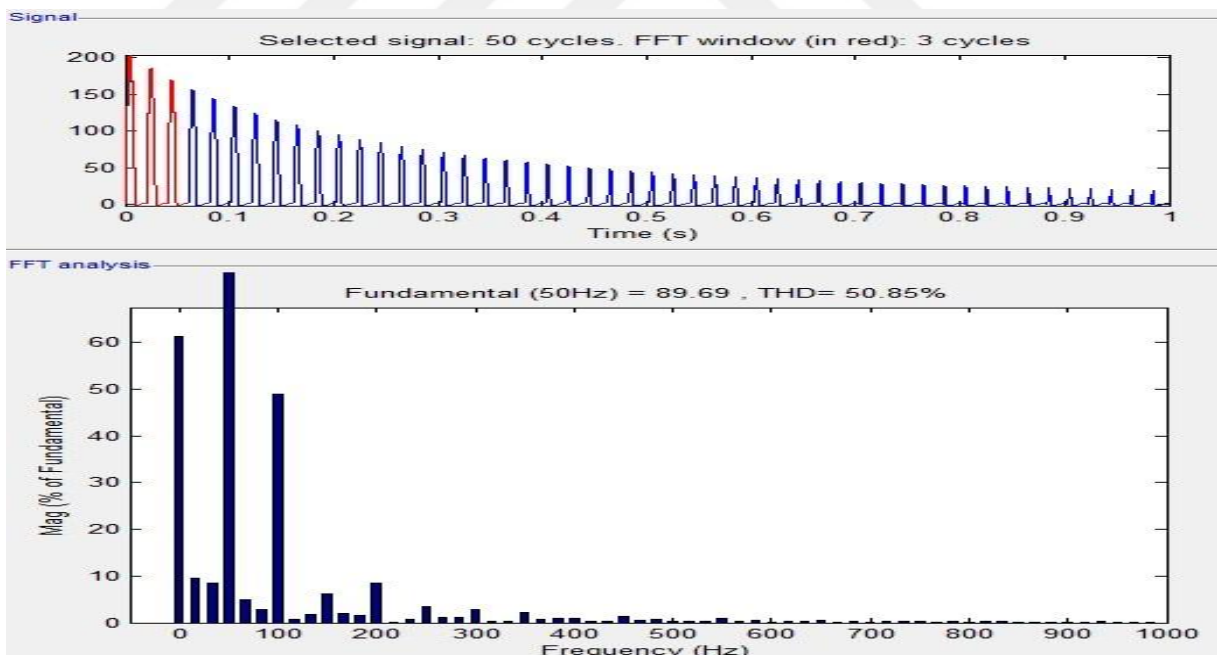
Şekil 4.84. Harmonikli Devreye 3 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklmiş Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.85. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.86. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 için 3 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.21'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.42'ye indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.160)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.161)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = 1,6 \cdot 10^{-4} F \quad (4.162)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 7,03 \cdot 10^{-3} H \quad (4.163)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 2,53 \cdot 10^{-3} H \quad (4.164)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 1,29 \cdot 10^{-3} H \quad (4.165)$$

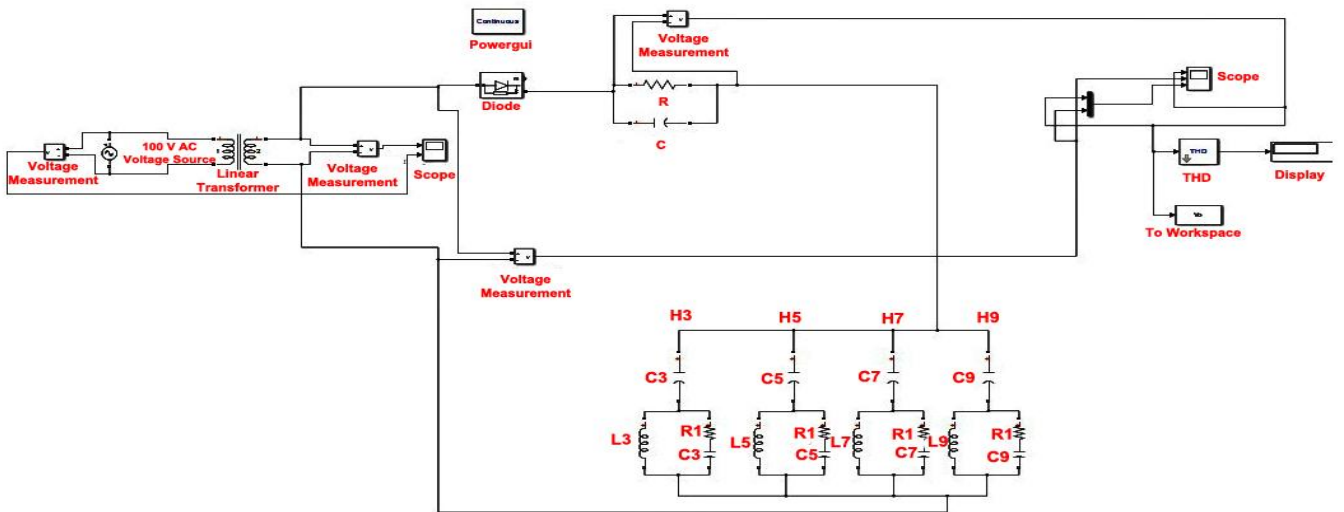
$$L_9 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f9)^2 \cdot (C_9)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 450^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-4})} = 7,81 \cdot 10^{-4} H \quad (4.166)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.167)$$

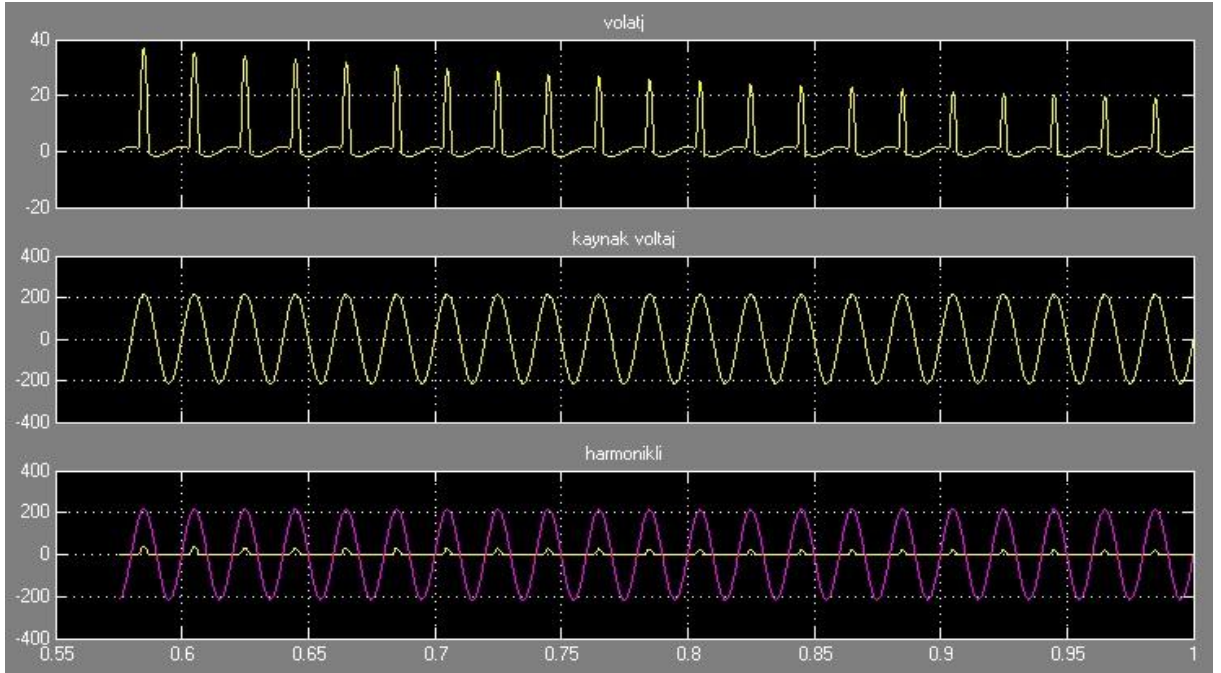
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



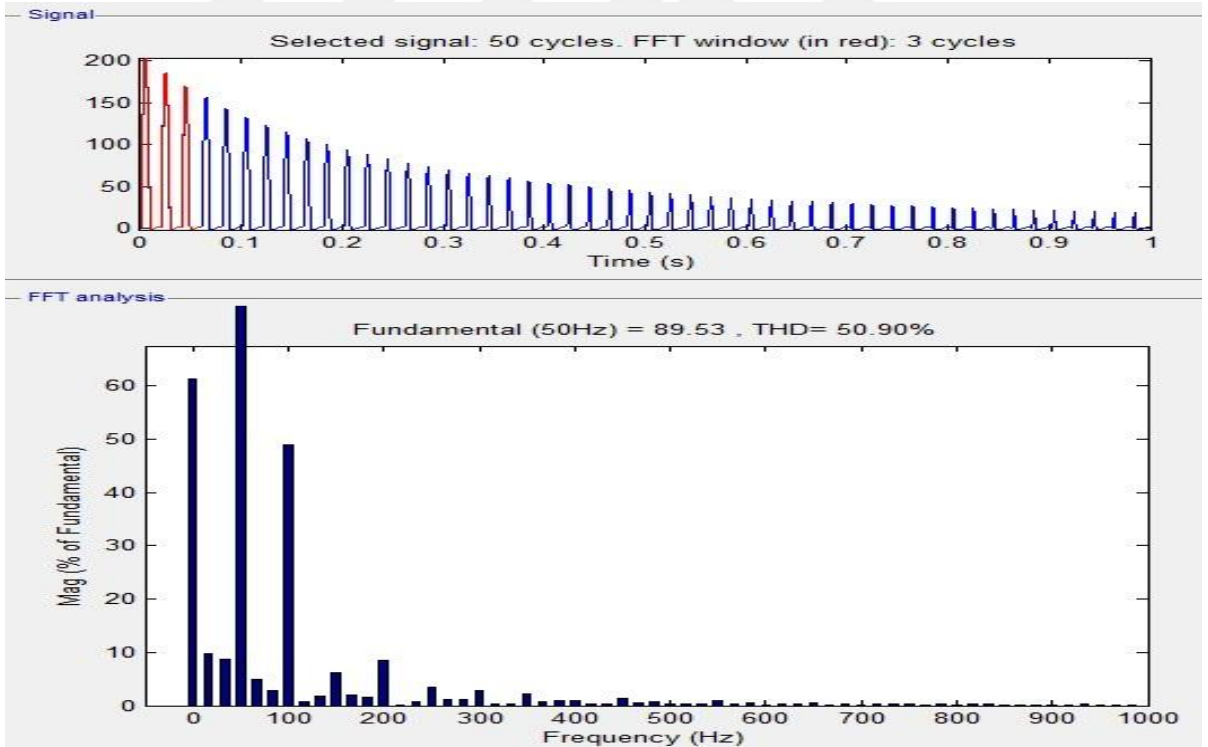
Şekil 4.87. Harmonikli Devreye 4 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.88. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.89. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 için 4 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.25'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.43'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.168)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.169)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1,3.10^{-4} F \quad (4.170)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,3.10^{-4})} = 8,66.10^{-3} H \quad (4.171)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,3.10^{-4})} = 3,11.10^{-3} H \quad (4.172)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,3.10^{-4})} = 1,59.10^{-3} H \quad (4.173)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,3.10^{-4})} = 9,62.10^{-4} H \quad (4.174)$$

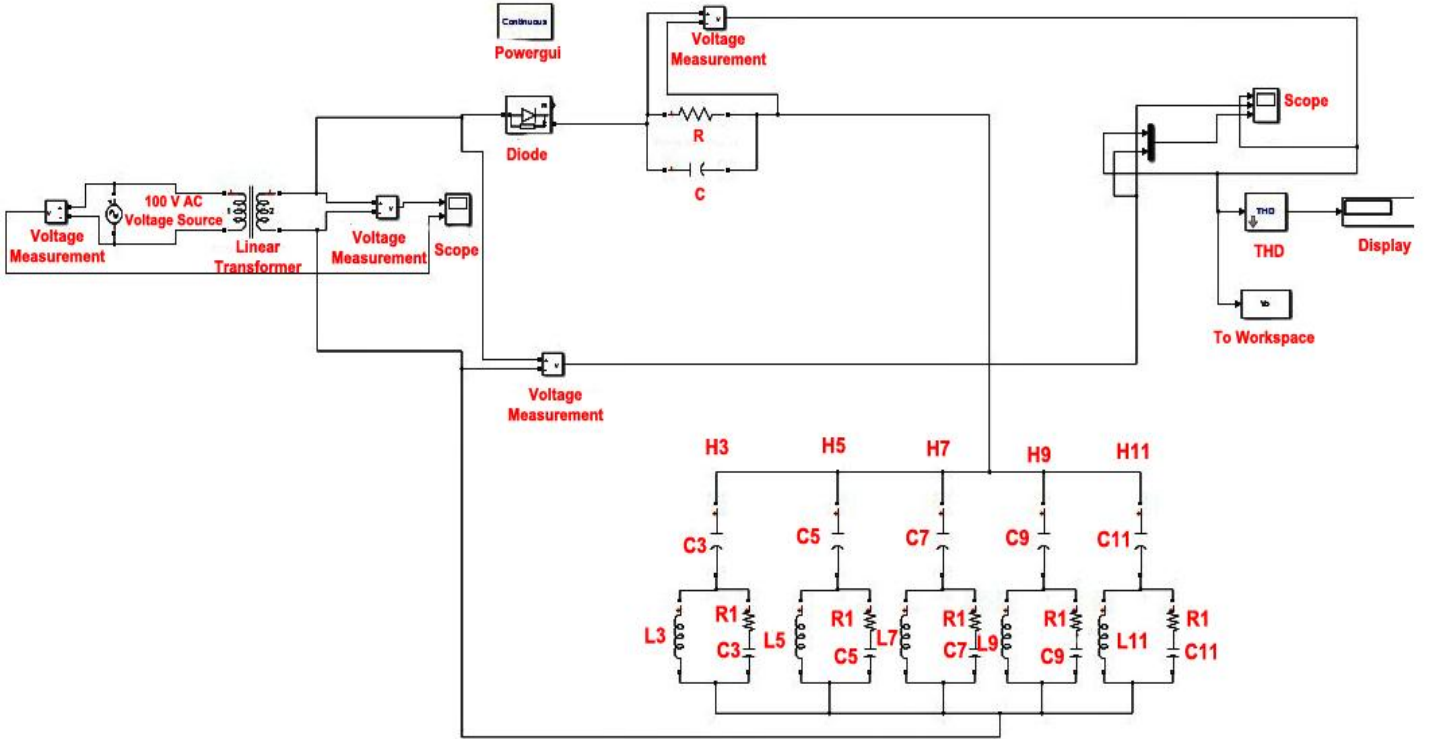
$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f11)^2.(C_{13})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,3.10^{-4})} = 6,44.10^{-4} H \quad (4.175)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.176)$$

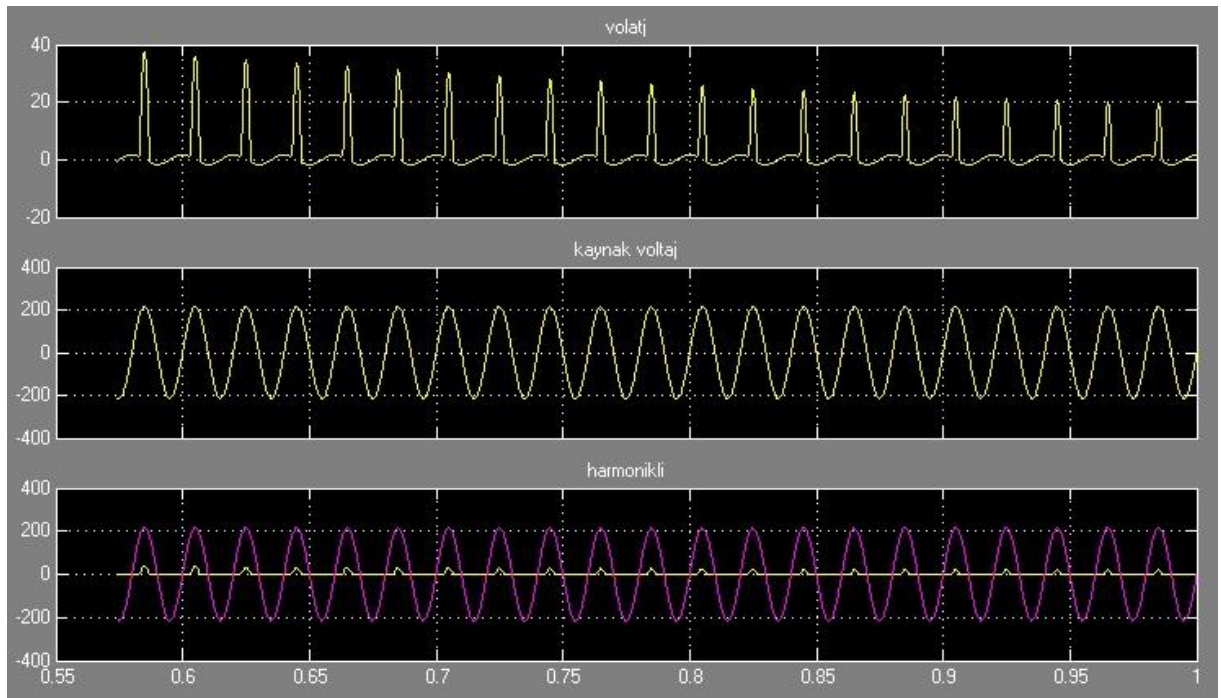
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş üçüncü dereceden yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



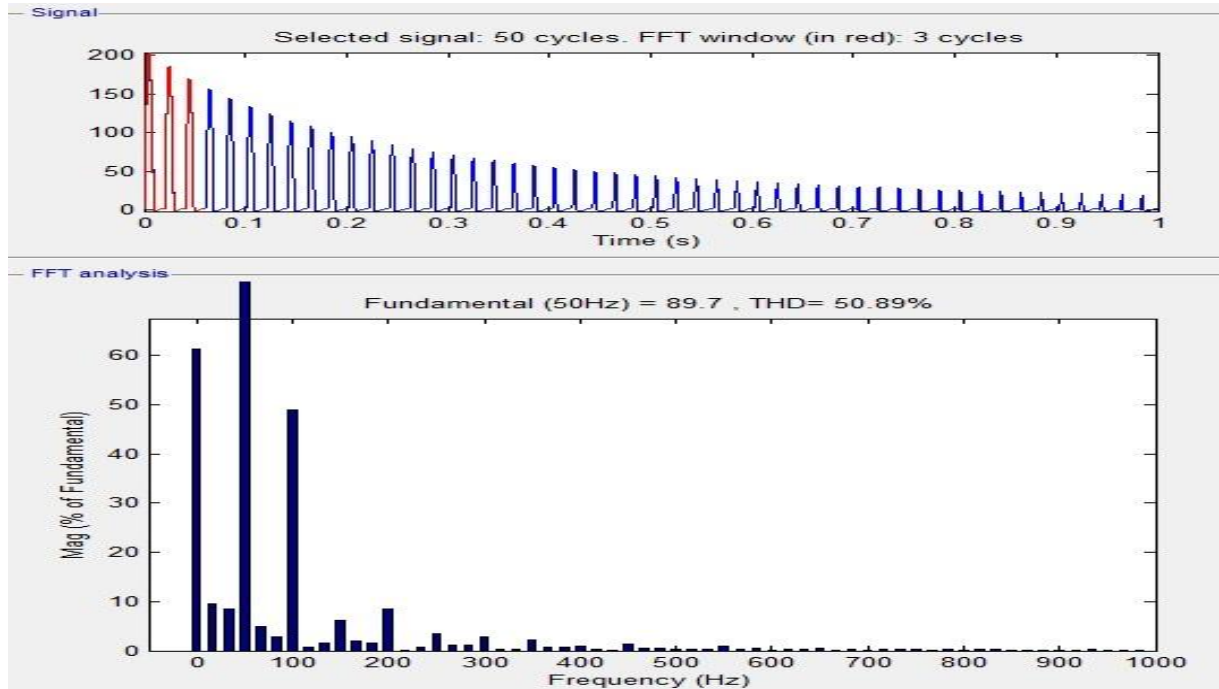
Şekil 4.90. Harmonikli Devreye 5 Adet Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.91. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.92. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} için 5 adet üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozuluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.25'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

4.1.1.3.4. C Tipi Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

C tipi yüksek geçiren filtre, üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtreye göre tek farkı ikinci kapasite olan C_2 'nin direnç değil bobin tarafında olmasıdır. Diğer tüm hesaplamalar üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre gibidir. [25]

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.177)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.178)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1,09 \cdot 10^{-4} F \quad (4.179)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 10,32 \cdot 10^{-3} H \quad (4.180)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 3,71 \cdot 10^{-3} H \quad (4.181)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 1,89 \cdot 10^{-3} H \quad (4.182)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,09.10^{-4})} = 1,14.10^{-3} H \quad (4.183)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f_{11})^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,09.10^{-4})} = 7,68.10^{-4} H \quad (4.184)$$

$$L_{13} = \frac{1}{4.\pi^2.(f_{13})^2.(C_{13})} = \frac{1}{4.\pi^2.650^2.(1,09.10^{-4})} = 5,5.10^{-4} H \quad (4.185)$$

$$K = \frac{R}{X_c}$$

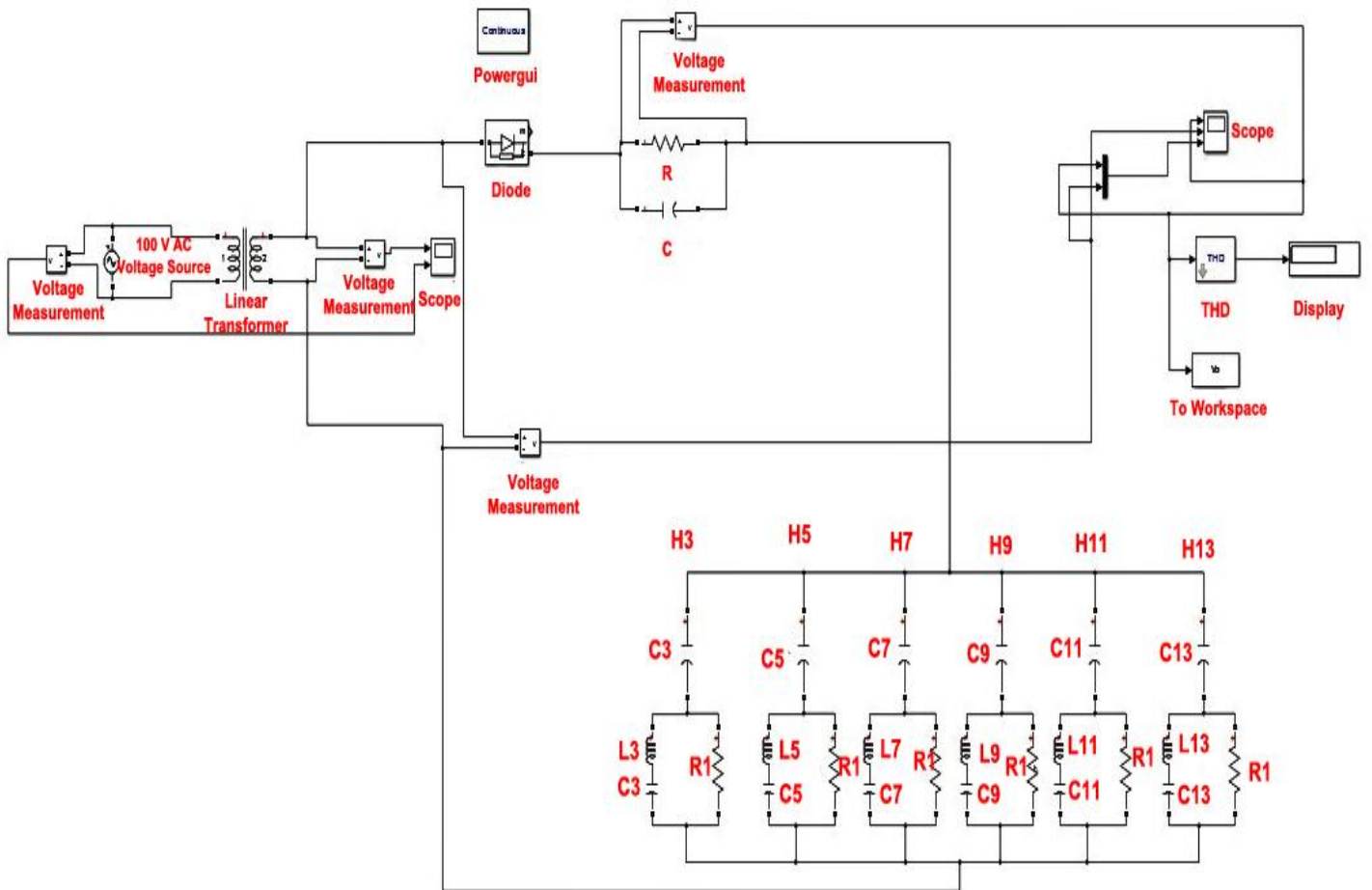
$$1 = \frac{R}{4,84}$$

$$R = 4,84\Omega$$

K sabitinin 1 alındığı durumda

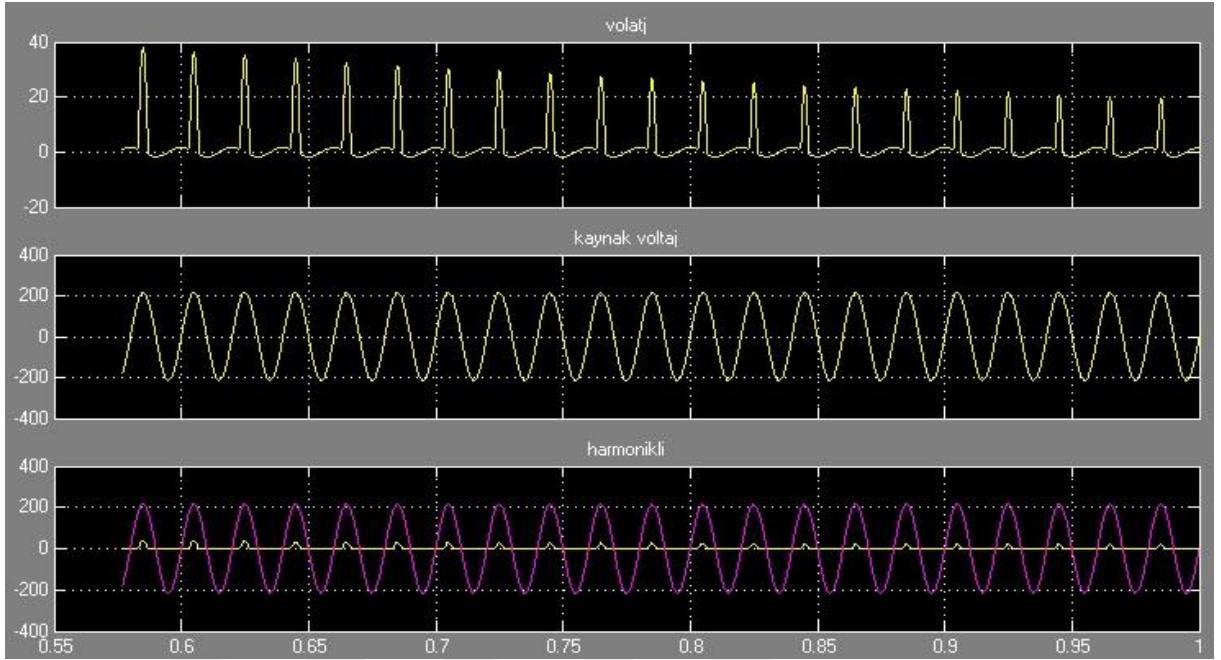
$$(4.186)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş C tipi yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



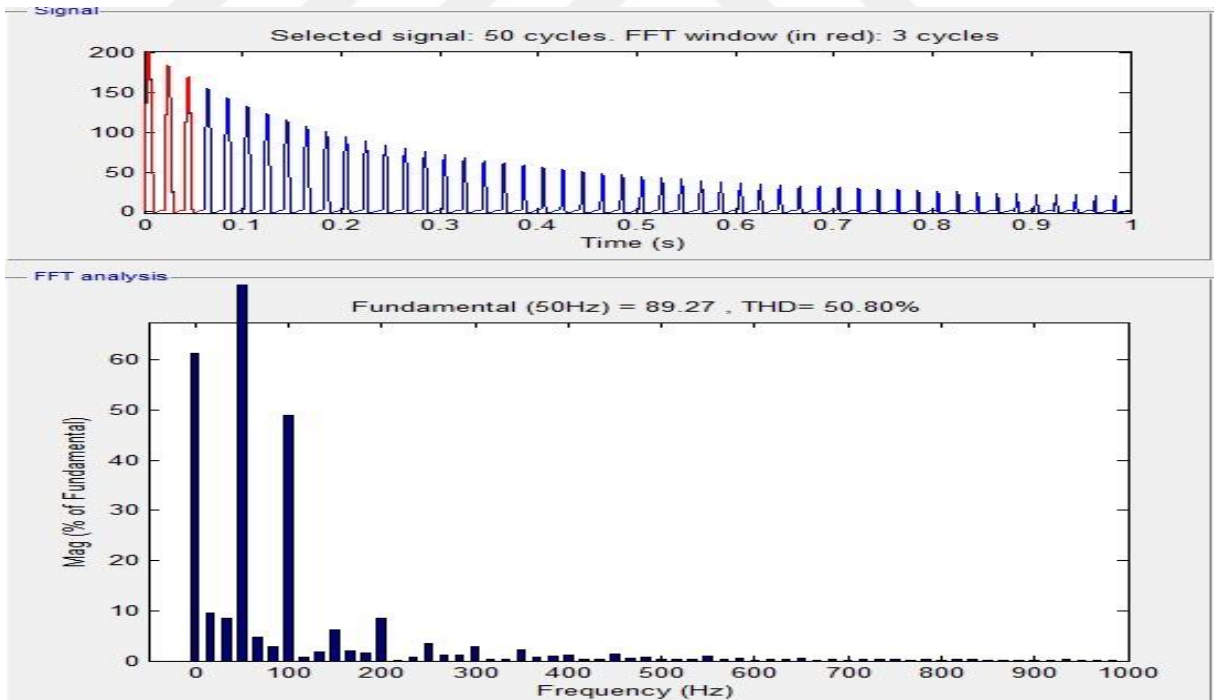
Şekil 4.93. Harmonikli Devreye 6 Adet C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreleri sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.94. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.95. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme 6 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekansındaki bozulma %34.62'den %6.17'ye, 5. harmonik frekansındaki bozulma ise %14.63'den %3.41'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 'e C tipi yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.187)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4.84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.188)$$

$$C = C_3 = 6,57.10^{-4} F \quad (4.189)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f_3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(6,5.10^{-4})} = 1,7.10^{-3} H \quad (4.190)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

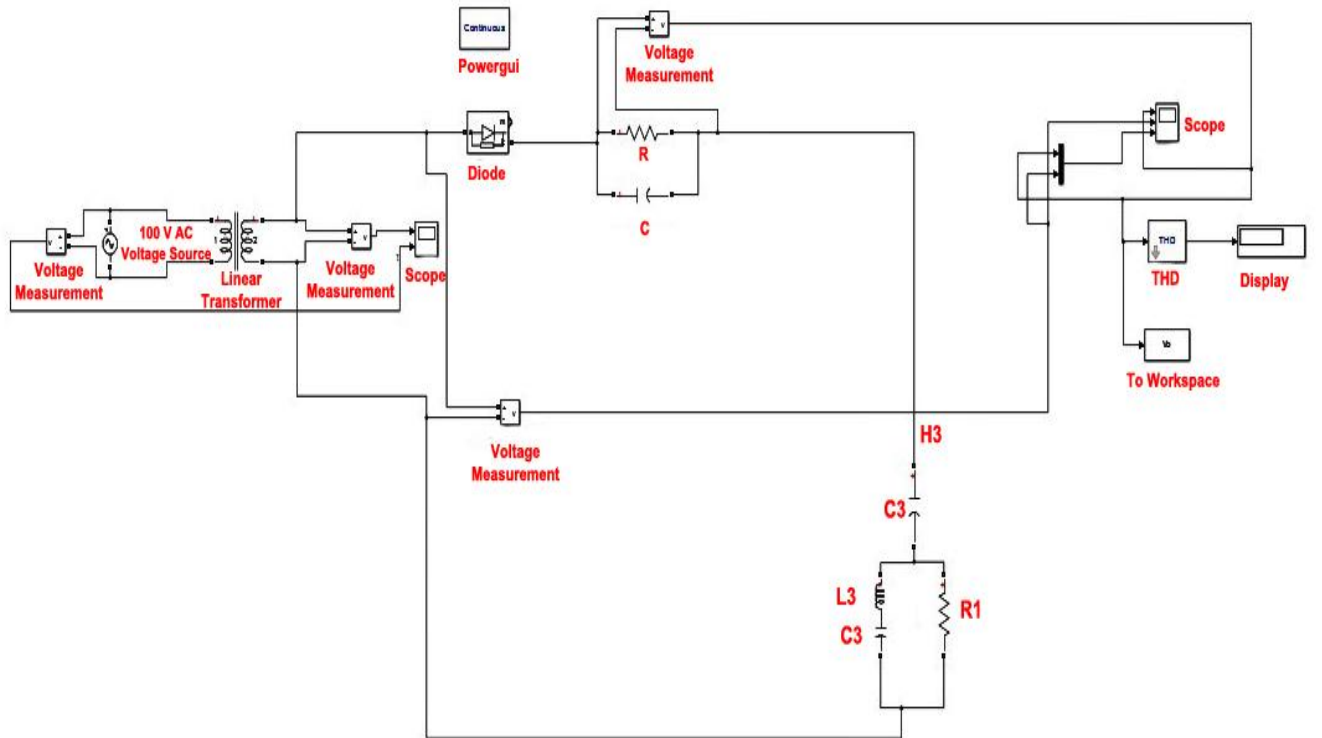
$$1 = \frac{R}{4,84}$$

$$R = 4,84\Omega$$

K sabitinin 1 alındığı durumda

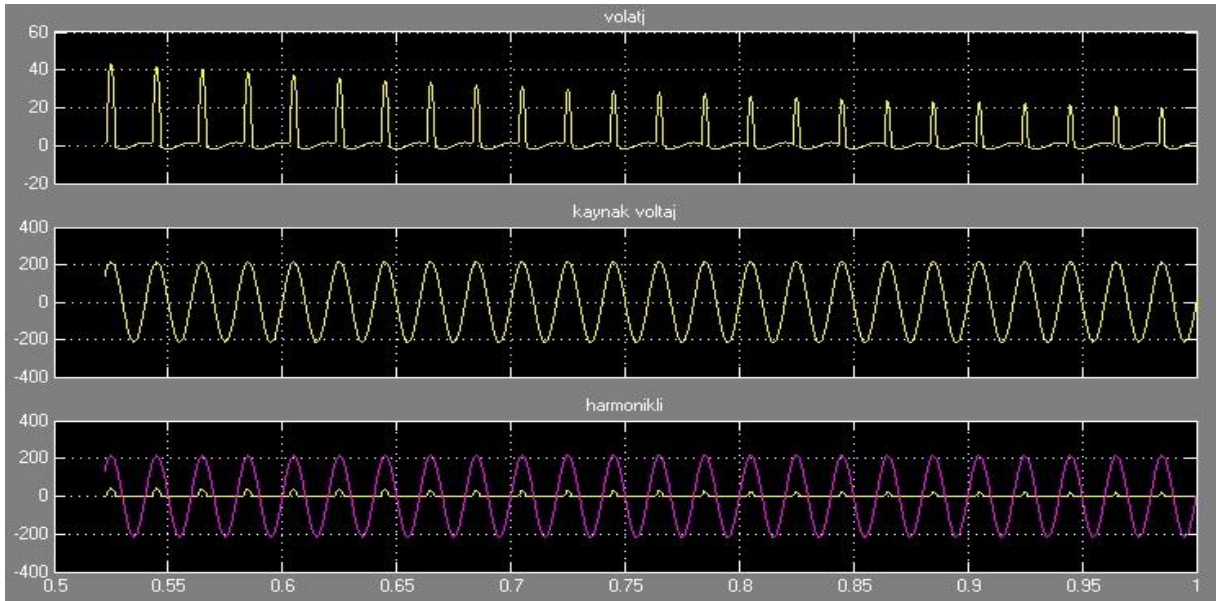
$$(4.191)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş C tipi yüksek geçiren harmonik filtre aşağıdaki gibidir;



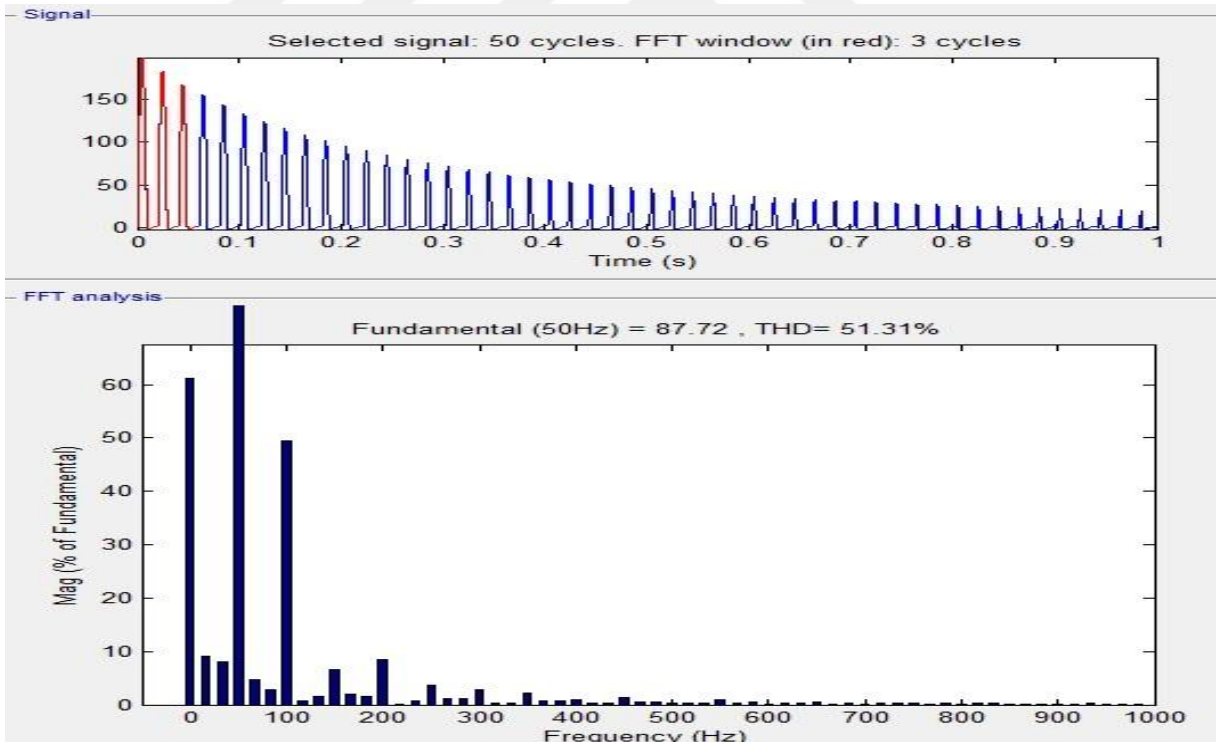
Şekil 4.96. Harmonikli Devreye 1 Adet C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtre sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.97. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.98. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 için 1 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.66'ya, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.67'ye indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 ve H_5 'e C tipi yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.192)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.193)$$

$$C_3 = C_5 = 3,25 \cdot 10^{-4} F \quad (4.194)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 3,4 \cdot 10^{-3} H \quad (4.195)$$

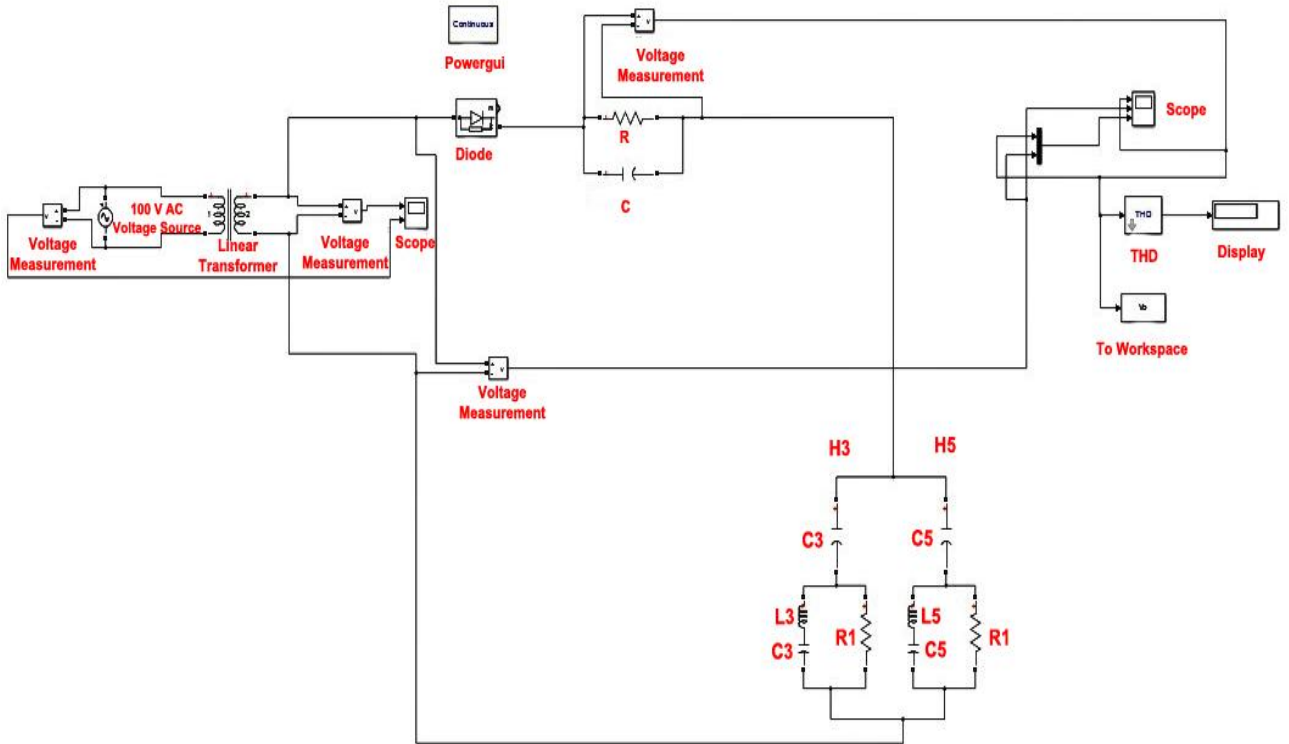
$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 1,2 \cdot 10^{-3} H \quad (4.196)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.197)$$

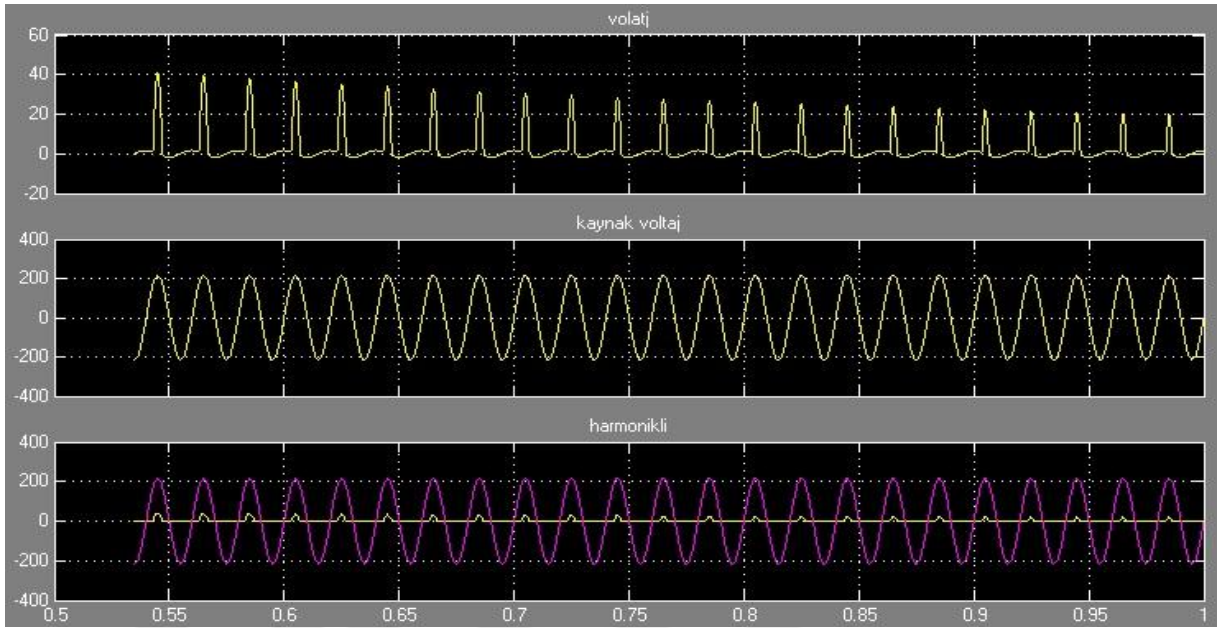
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş C tipi yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



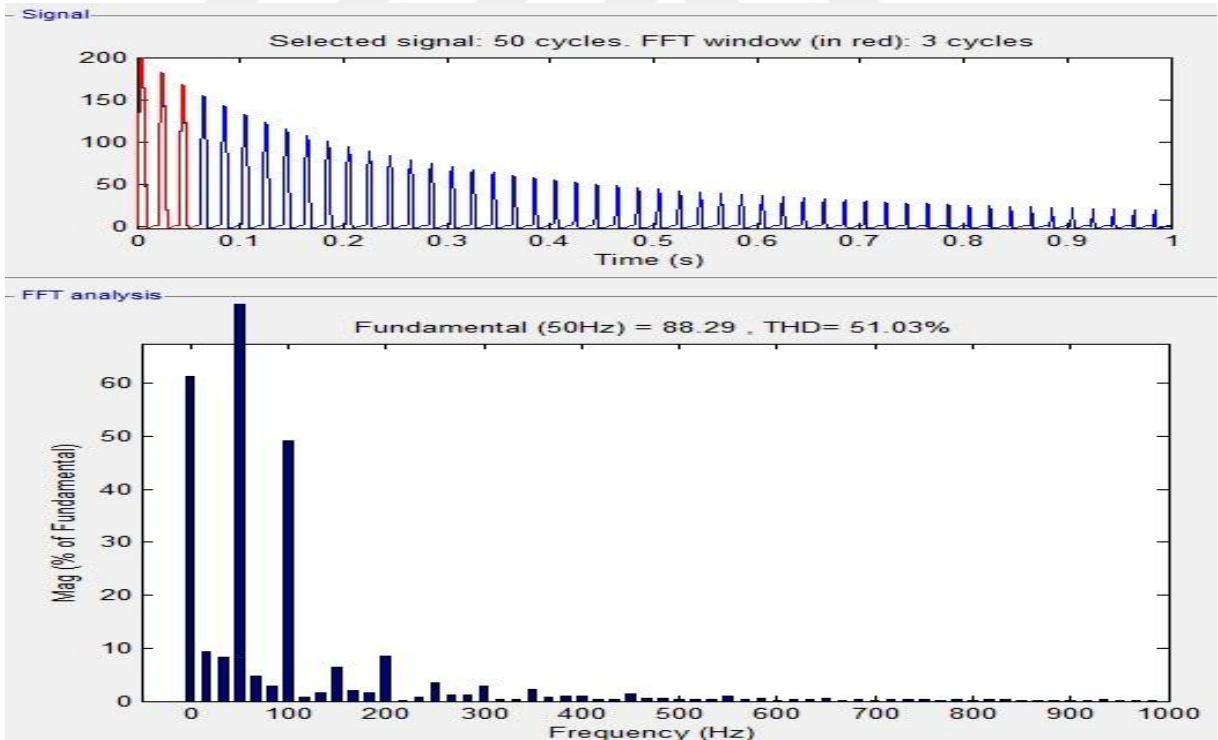
Şekil 4.99. Harmonikli Devreye 2 Adet C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.100. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.101. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için 2 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.40'a, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.52'ye indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 ve H_7 'ye C tipi yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.198)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.199)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,16.10^{-4} F \quad (4.200)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(2,16.10^{-4})} = 5,21.10^{-3} H \quad (4.201)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(2,16.10^{-4})} = 1,87.10^{-3} H \quad (4.202)$$

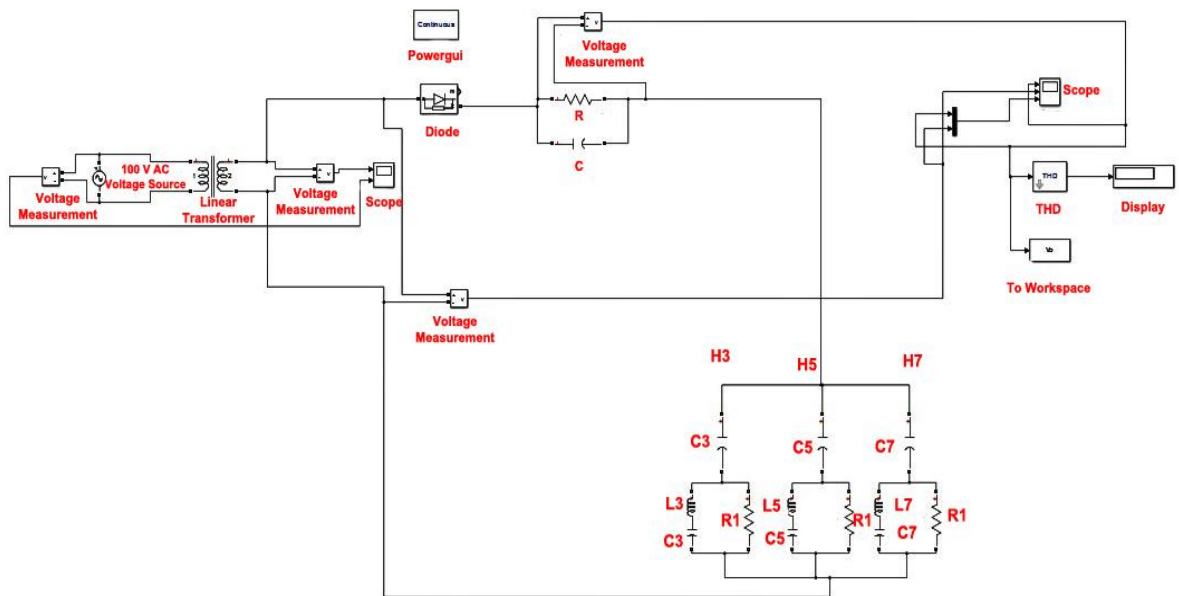
$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(2,16.10^{-4})} = 9,57.10^{-4} H \quad (4.203)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

$$1 = \frac{R}{4,84} \quad \text{K sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.204)$$

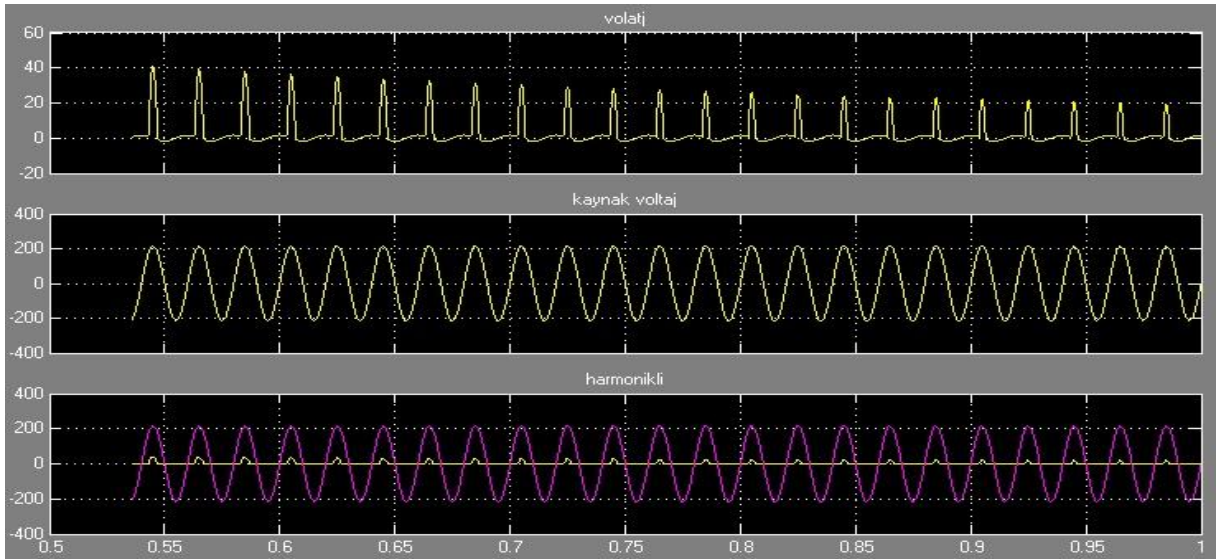
$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş C tipi yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



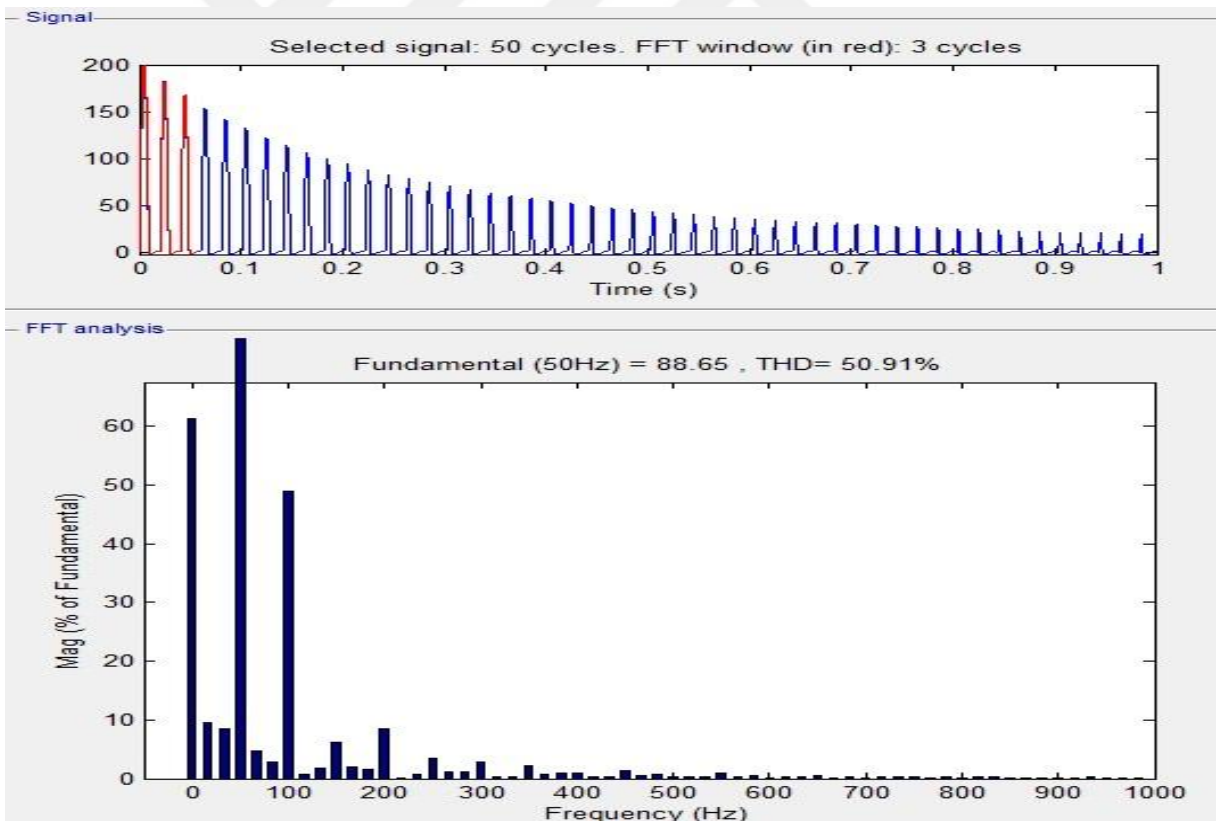
Şekil 4.102. Harmonikli Devreye 3 Adet C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.103. Sinyal Analizi Sonuçları.

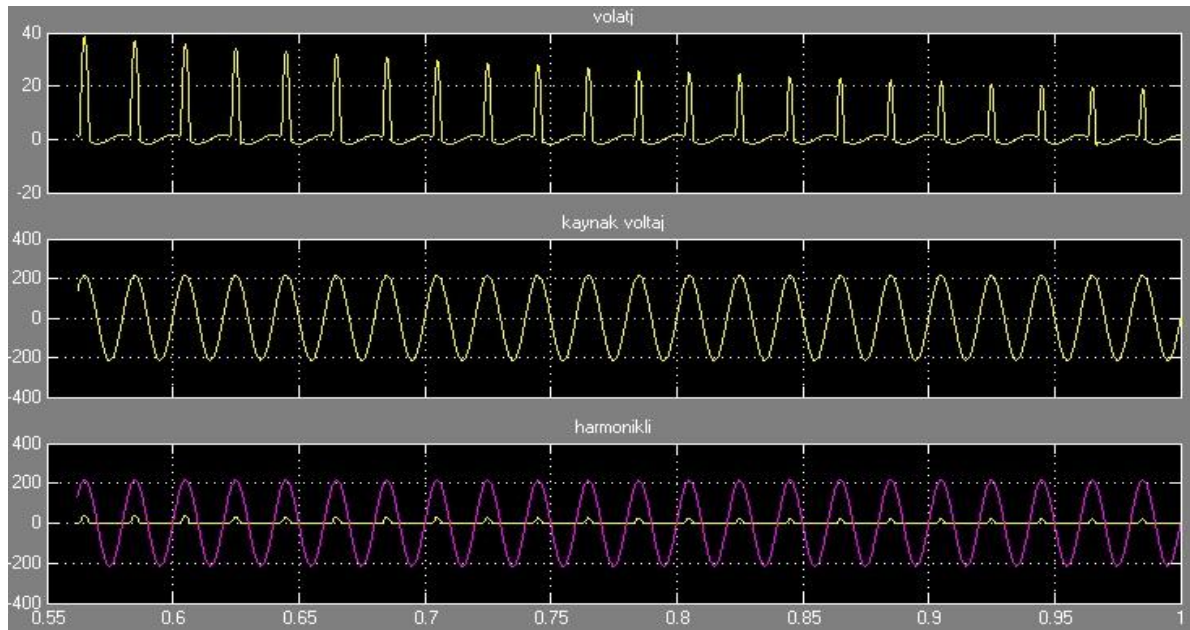
Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.104. FFT Analizi Sonuçları.

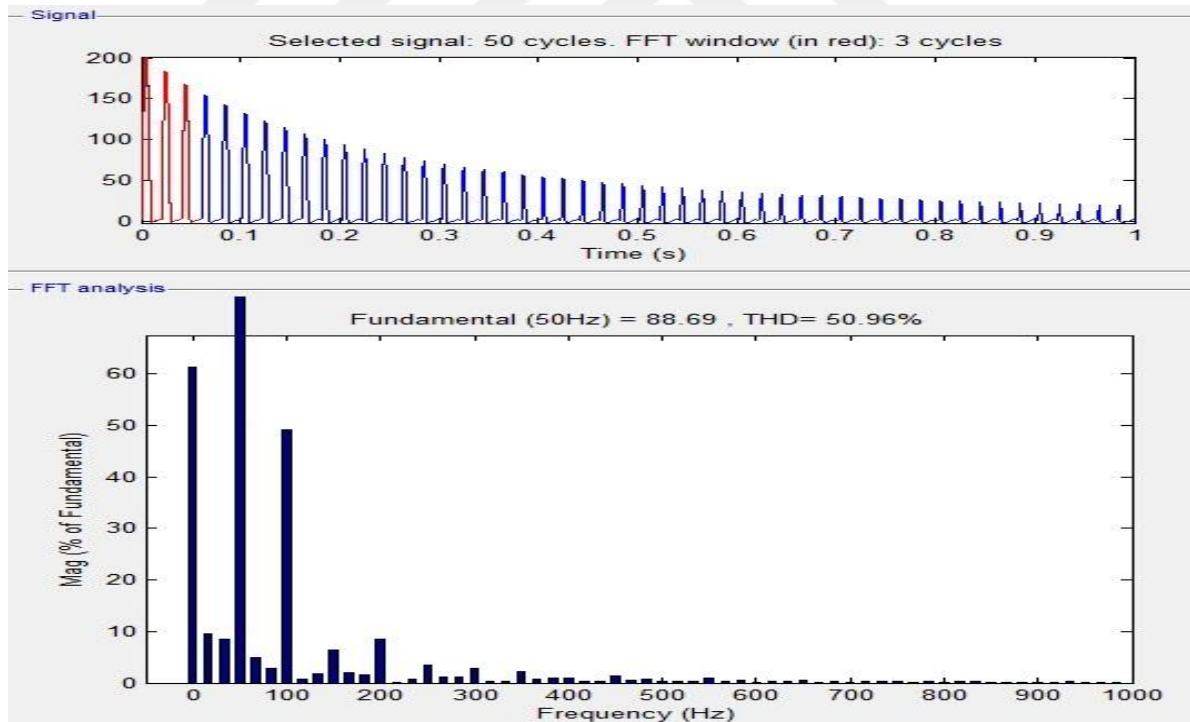
Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 için 3 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.27'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.46'ya indirgenmiştir.

C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.106. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.107. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 için 4 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.31'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.48'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e C tipi yüksek geçiren filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4,84\Omega \quad (4.213)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.214)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1,3.10^{-4} F \quad (4.215)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,3.10^{-4})} = 8,66.10^{-3} H \quad (4.216)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,3.10^{-4})} = 3,11.10^{-3} H \quad (4.217)$$

$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,3.10^{-4})} = 1,59.10^{-3} H \quad (4.218)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,3.10^{-4})} = 9,62.10^{-4} H \quad (4.219)$$

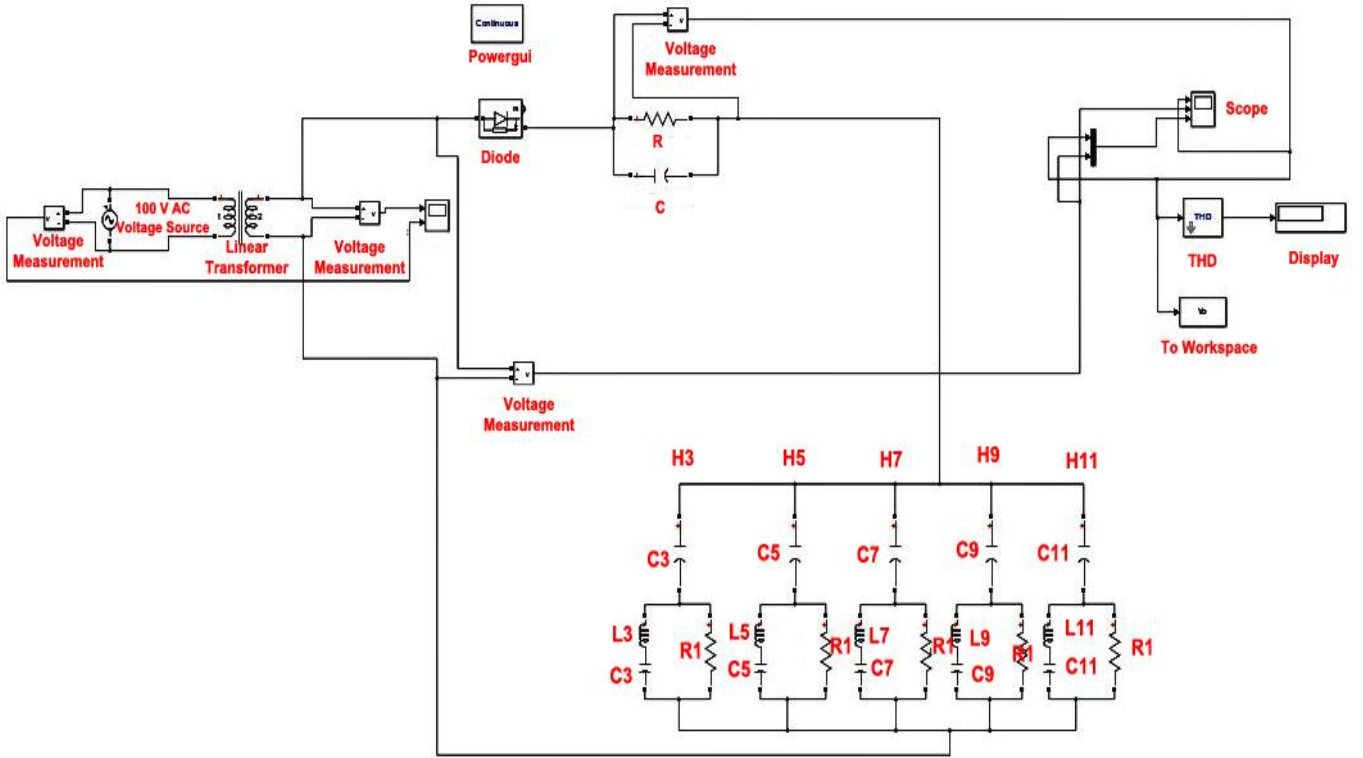
$$L_{11} = \frac{1}{4.\pi^2.(f11)^2.(C_{11})} = \frac{1}{4.\pi^2.550^2.(1,3.10^{-4})} = 6,44.10^{-4} H \quad (4.220)$$

$$K = \frac{R}{X_C}$$

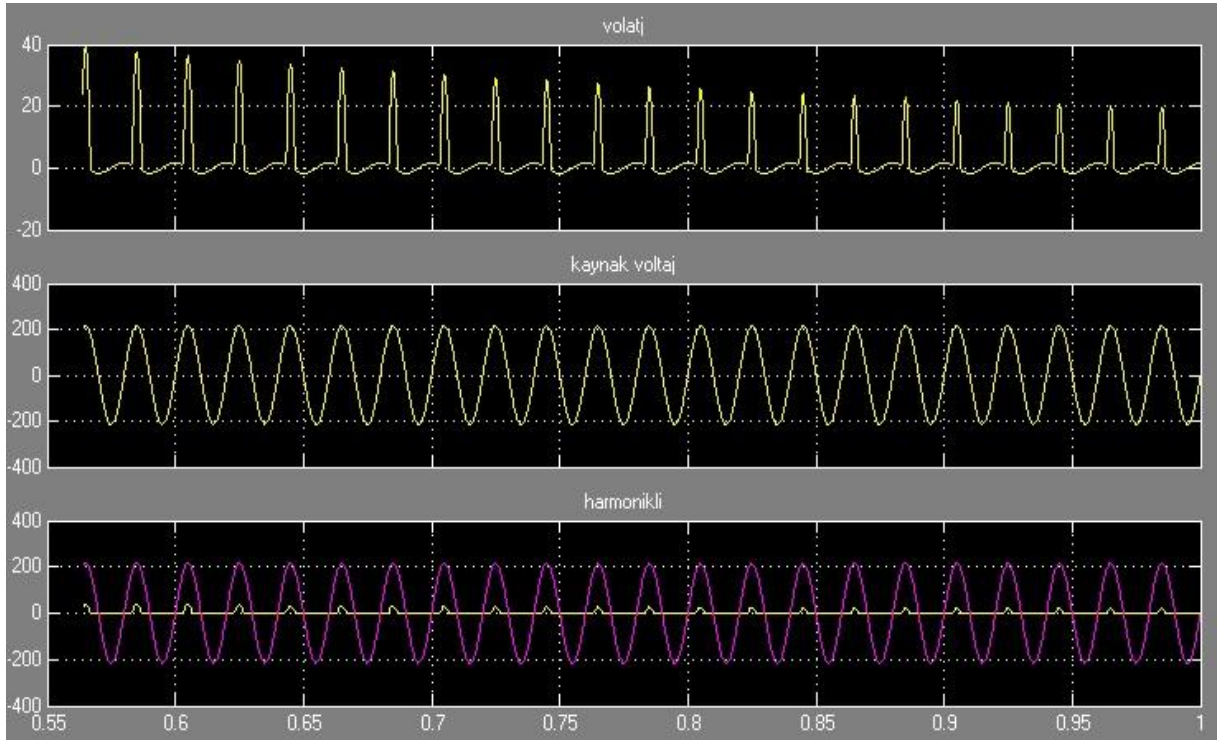
$$1 = \frac{R}{4,84} \quad K \text{ sabitinin 1 alındığı durumda} \quad (4.221)$$

$$R = 4,84\Omega$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş C tipi yüksek geçiren harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;

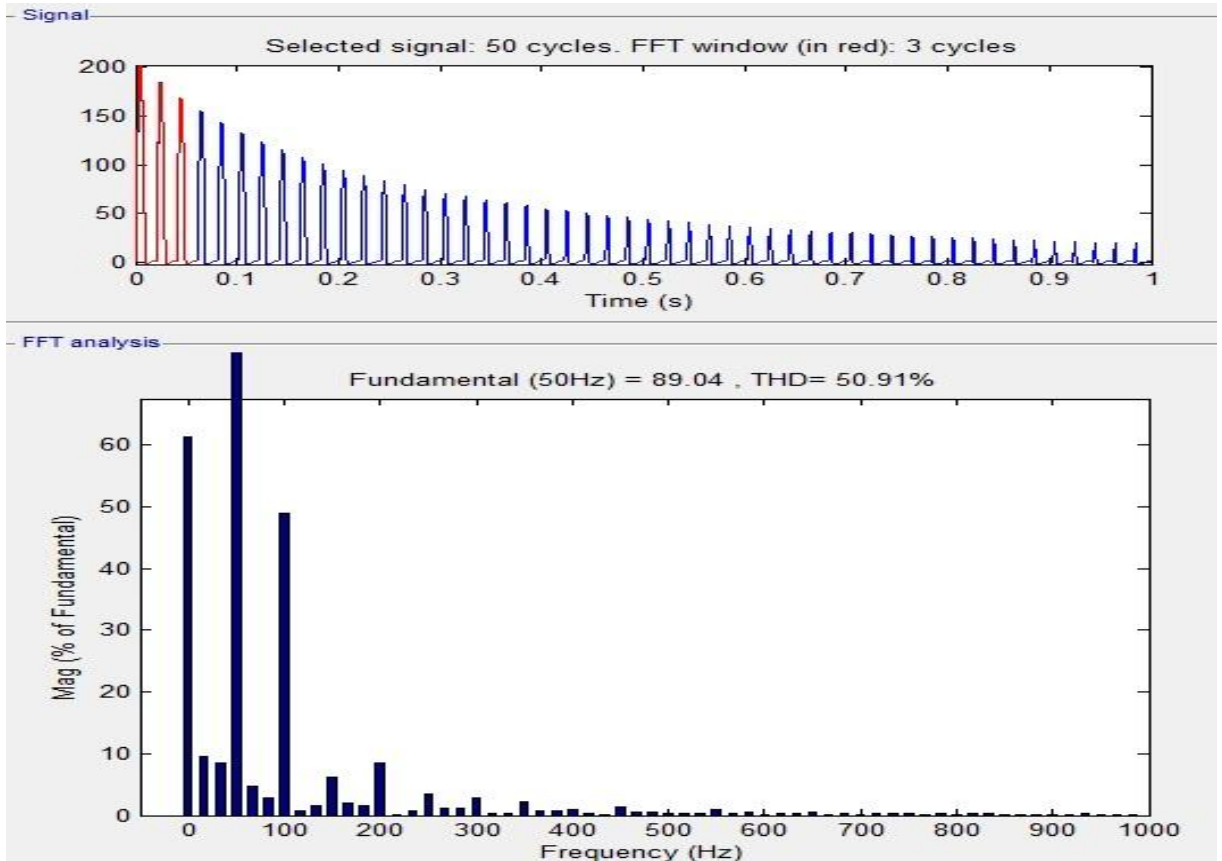


Şekil 4.108. Harmonikli Devreye 5 Adet C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Eklmiş Modellemesi. C tipi yüksek geçiren sönümlü harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.109. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;

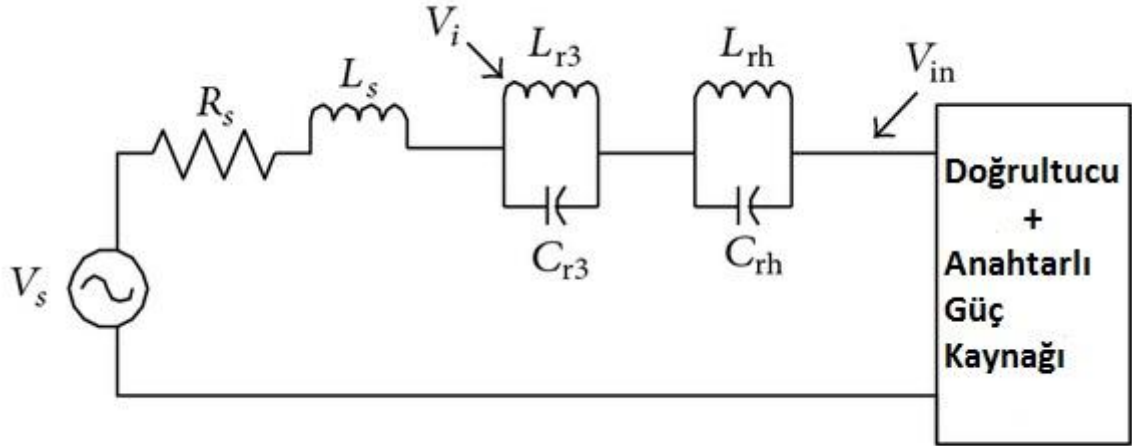


Şekil 4.110. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} için 5 adet C tipi yüksek geçiren filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.27'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %3.46'ya indirgenmiştir.

4.1.2. Seri Pasif Filtreler

Seri pasif filtreler, paralel pasif filtrelerle aynı prensipte çalışırlar fakat sisteme bağlanacak olan LC devreleri yük ile kaynak arasında seri bir şekilde bağlanırlar. Seri filtreler yalnızca tek bir harmonik frekansa ayarlanabilirler. Eğer sistemde birden çok harmonik frekans varsa sistemdeki her harmonik frekans için o frekansa ait bir seri pasif filtre tasarlanır. Şekil 4.111.'de örnek olarak görülebildiği gibi üçüncü harmonik frekansı azaltmak için L_{r3} ve C_{r3} 'den oluşan bir seri harmonik filtre kullanılmıştır ve eğer sistemde başka bir harmonik frekans varsa onlarında L_{rh} ve C_{rh} gibi sisteme yerleştirilebileceği anlaşılmaktadır. [25]



Şekil 4.111. Devre Üzerinde Bir Seri Filtre Modeli.[25]

Endüktans ve kapasitans ayarlandıkları frekansta yüksek empedans göstermek için birbirlerine paralel bağlanırlar. Yüksek empedans yalnızca ayarlanan frekanstaki bileşenlere uygulanır. Temel bileşen frekansında ise düşük bir empedans değerine ayarlanarak temel frekanstaki bileşende kayıpların önlenmesi sağlanır. [25]

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrelerinin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımı filtre üzerinden geçmekte, tam hat gerilimleri için yalıtılması gerekmekte ve hatta gerilim düşümüne sebep olmaktadır. [25]

Yukarıda da değinildiği üzere seri pasif filtrenin tüm hesaplamaları aynı paralel pasif filtre gibi olacaktır yalnızca indüktör ve kapasitör devre üzerine bağlanırken sisteme seri kendi aralarında paralel olarak yerleştirileceklerdir. [25]

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 'e seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

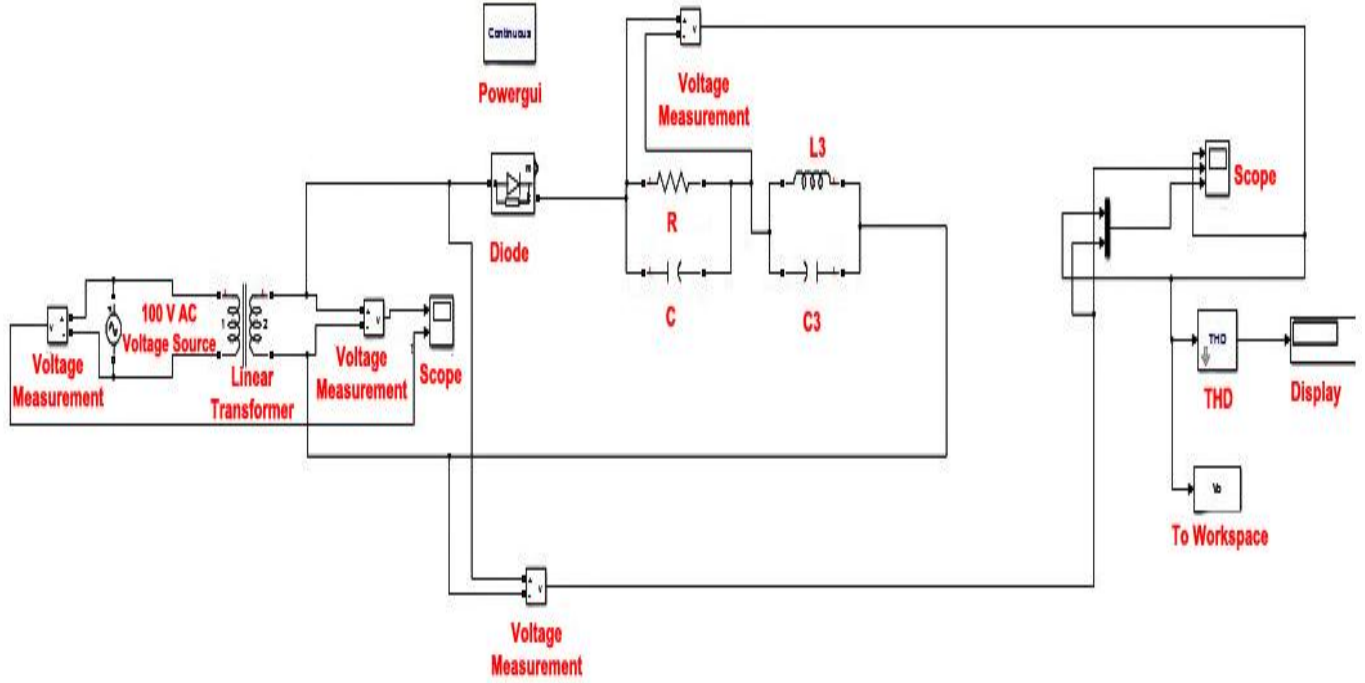
$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.222)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.223)$$

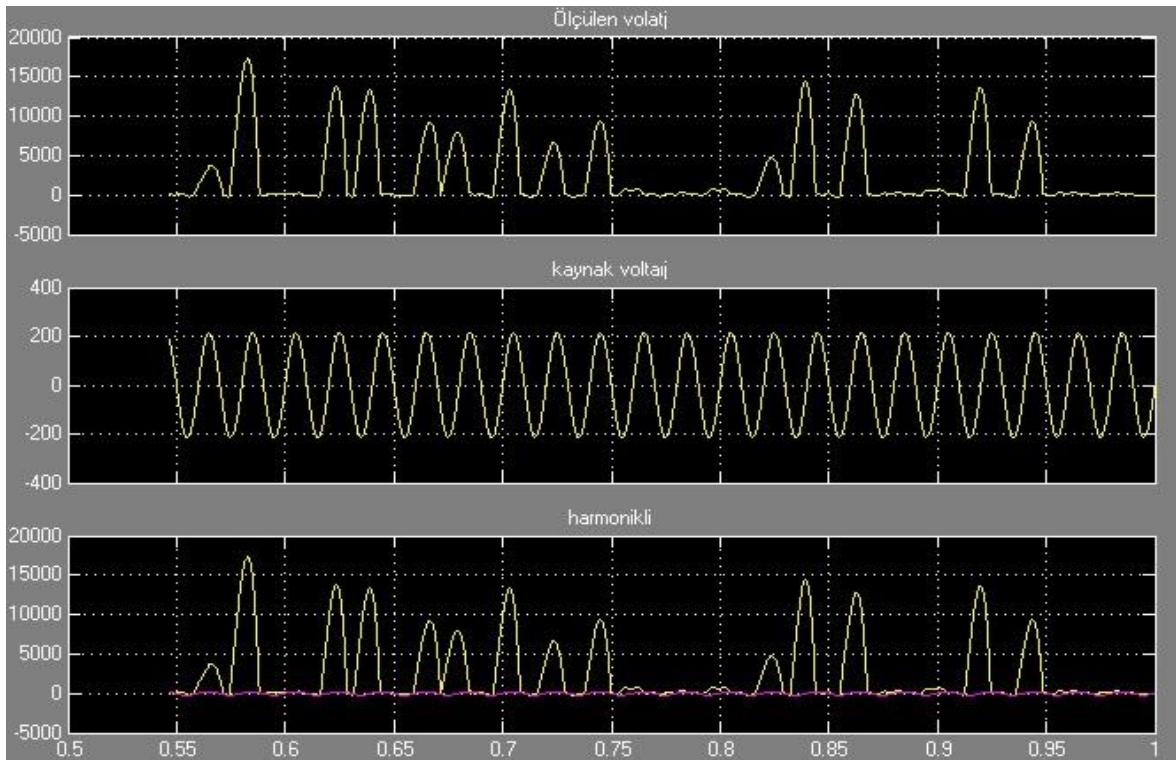
$$C = C_3 = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.224)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (6,5 \cdot 10^{-4})} = 1,7 \cdot 10^{-3} H \quad (4.225)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink’de modellenmiş seri pasif harmonik filtre aşağıdaki gibidir;

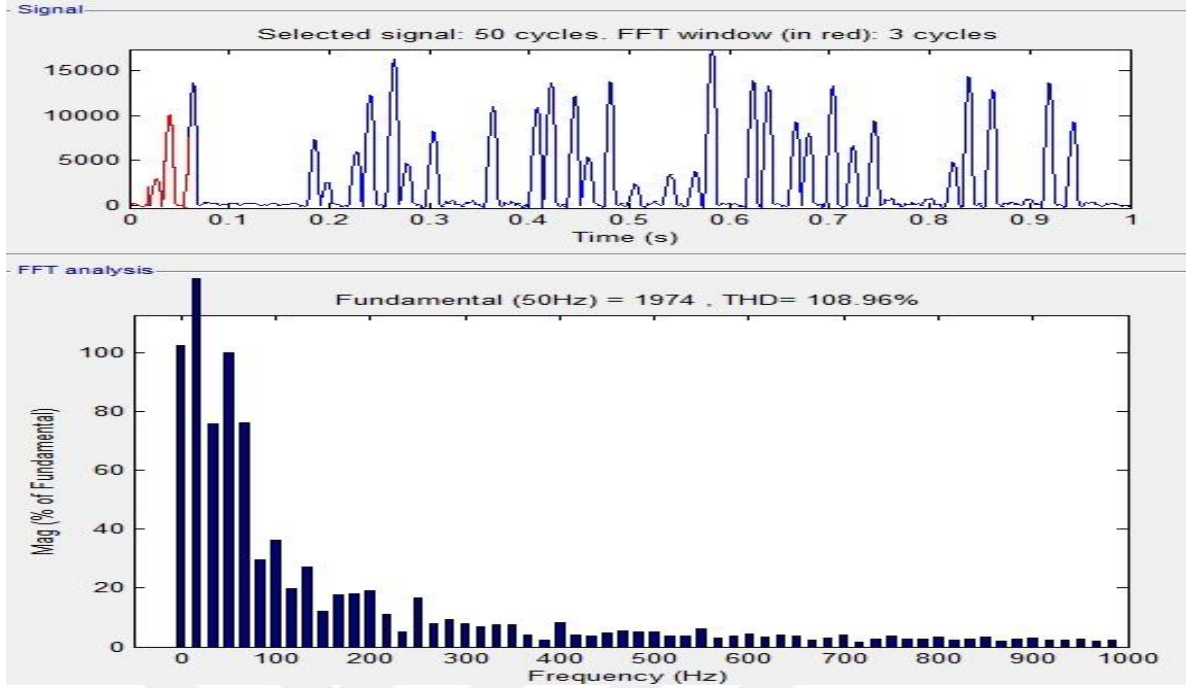


Şekil 4.112. Harmonikli Devreye 1 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi. Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.113. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.114. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme sadece H_3 için 1 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %12.11'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %16.71'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozulma olan H_3 ve H_5 'e seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.226)$$

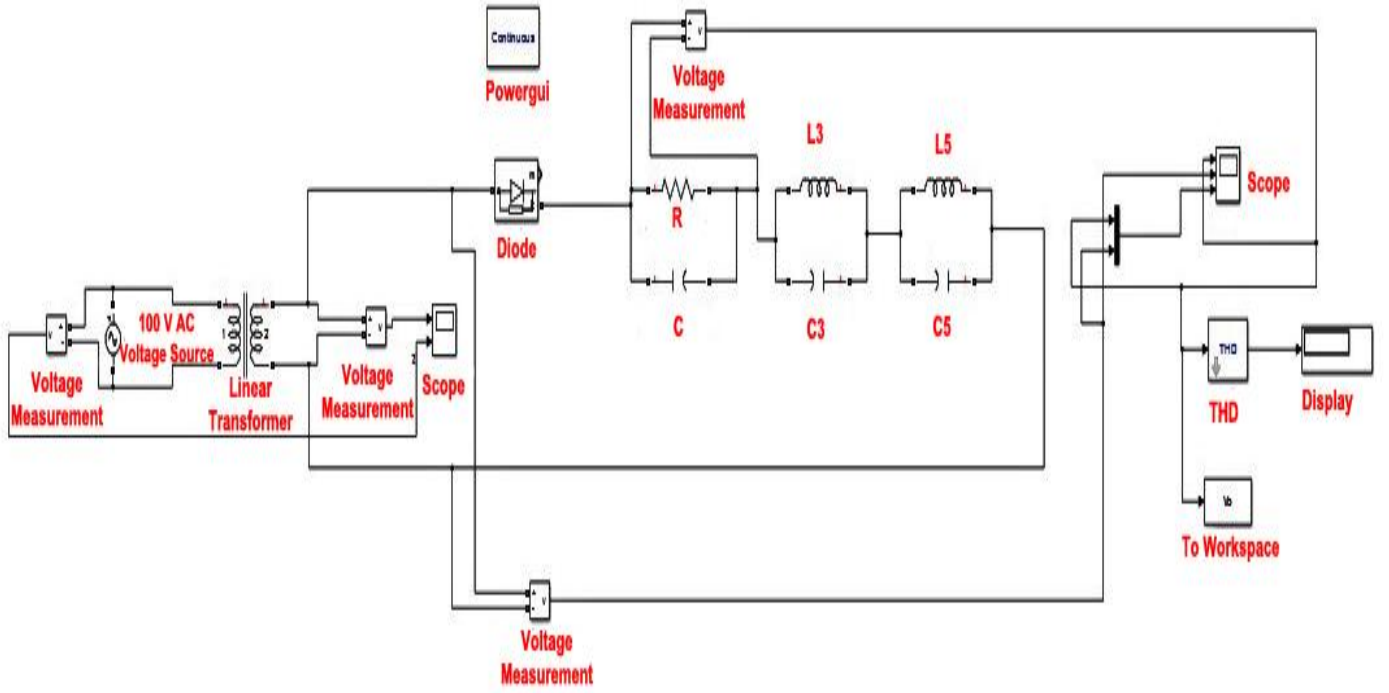
$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.227)$$

$$C_3 = C_5 = 3,25 \cdot 10^{-4} F \quad (4.228)$$

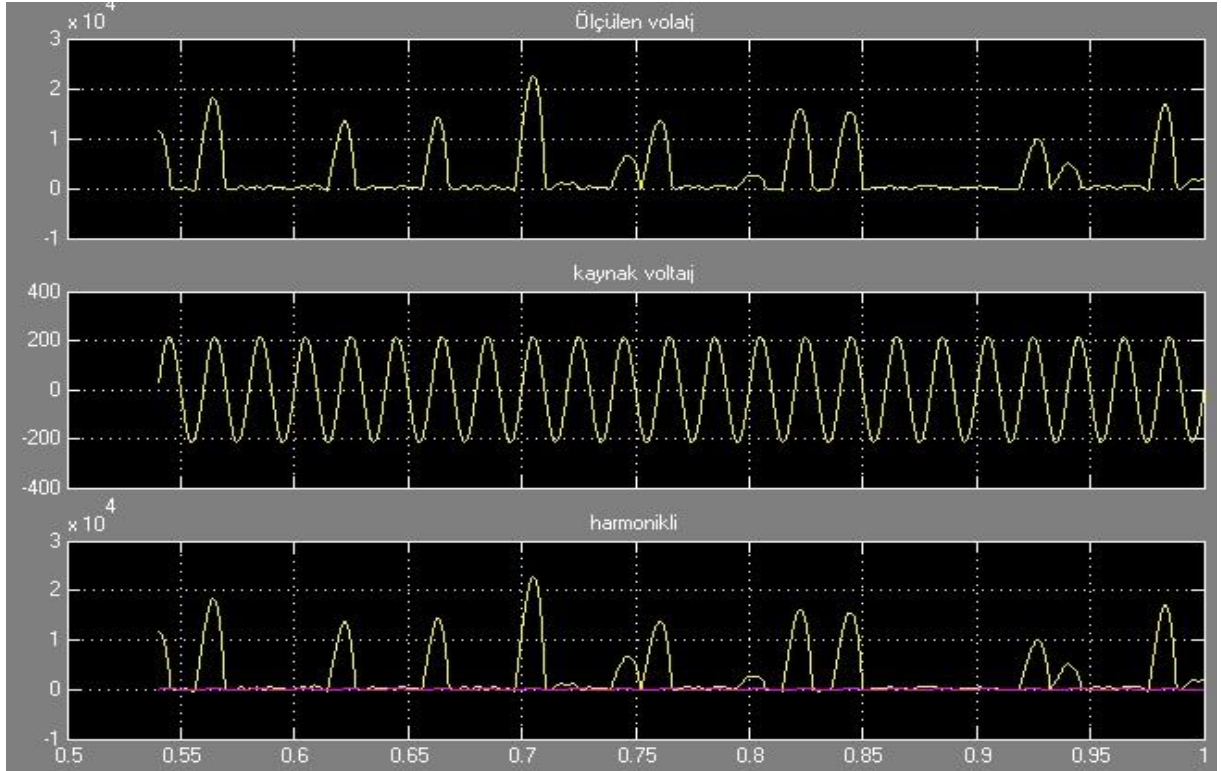
$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 3,4 \cdot 10^{-3} H \quad (4.229)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (3,25 \cdot 10^{-4})} = 1,2 \cdot 10^{-3} H \quad (4.230)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş seri pasif harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;

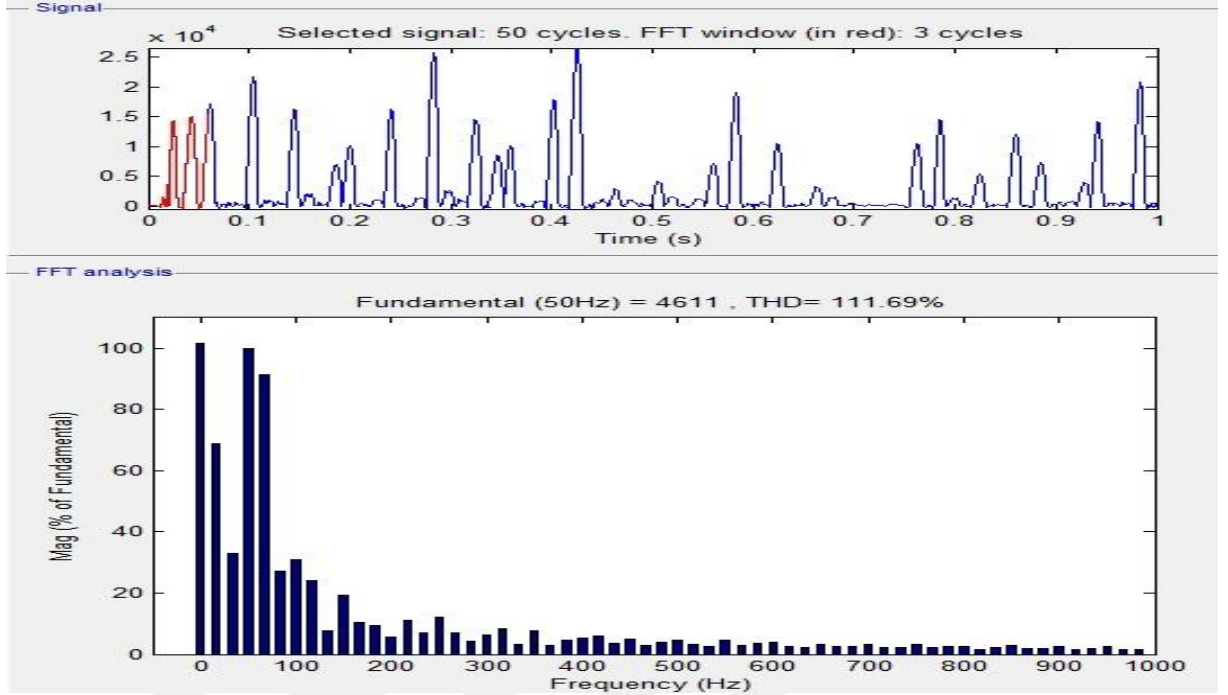


Şekil 4.115. Harmonikli Devreye 2 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi. Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.116. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.117. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 ve H_5 için 2 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %19.44'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %12.15'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 ve H_7 'ye seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.231)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.232)$$

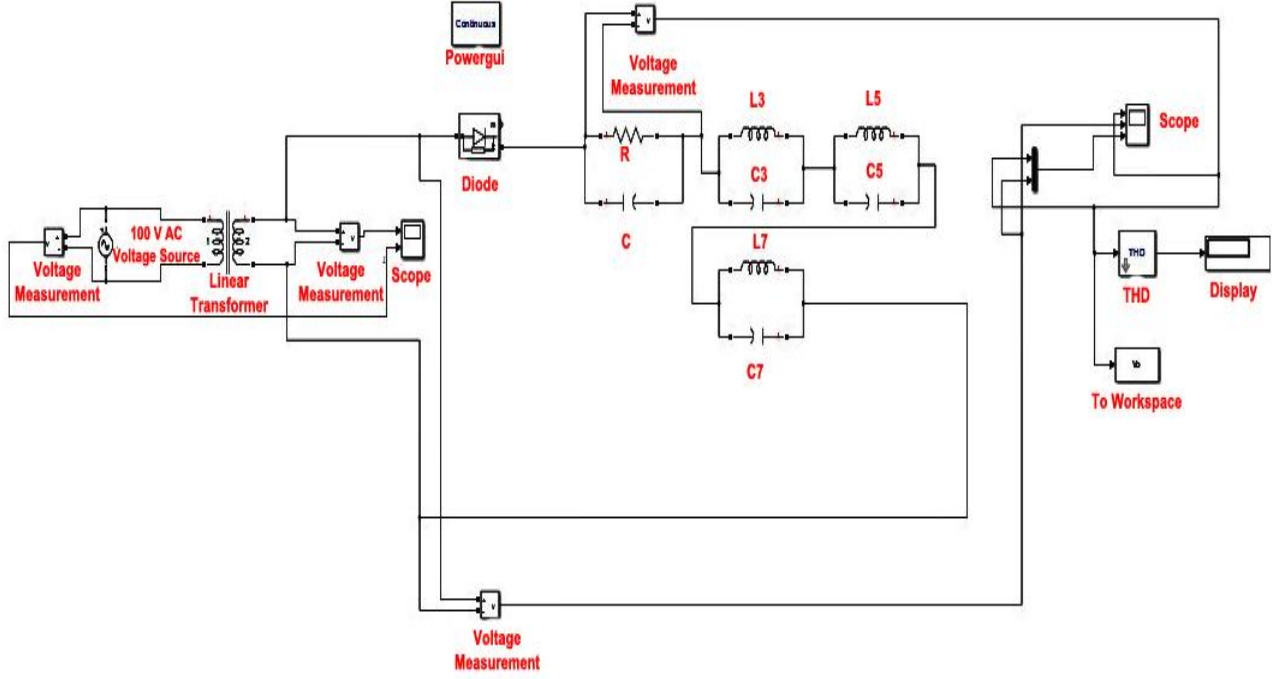
$$C_3 = C_5 = C_7 = 2,16 \cdot 10^{-4} F \quad (4.233)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 5,21 \cdot 10^{-3} H \quad (4.234)$$

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 1,87 \cdot 10^{-3} H \quad (4.235)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f_7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (2,16 \cdot 10^{-4})} = 9,57 \cdot 10^{-4} H \quad (4.236)$$

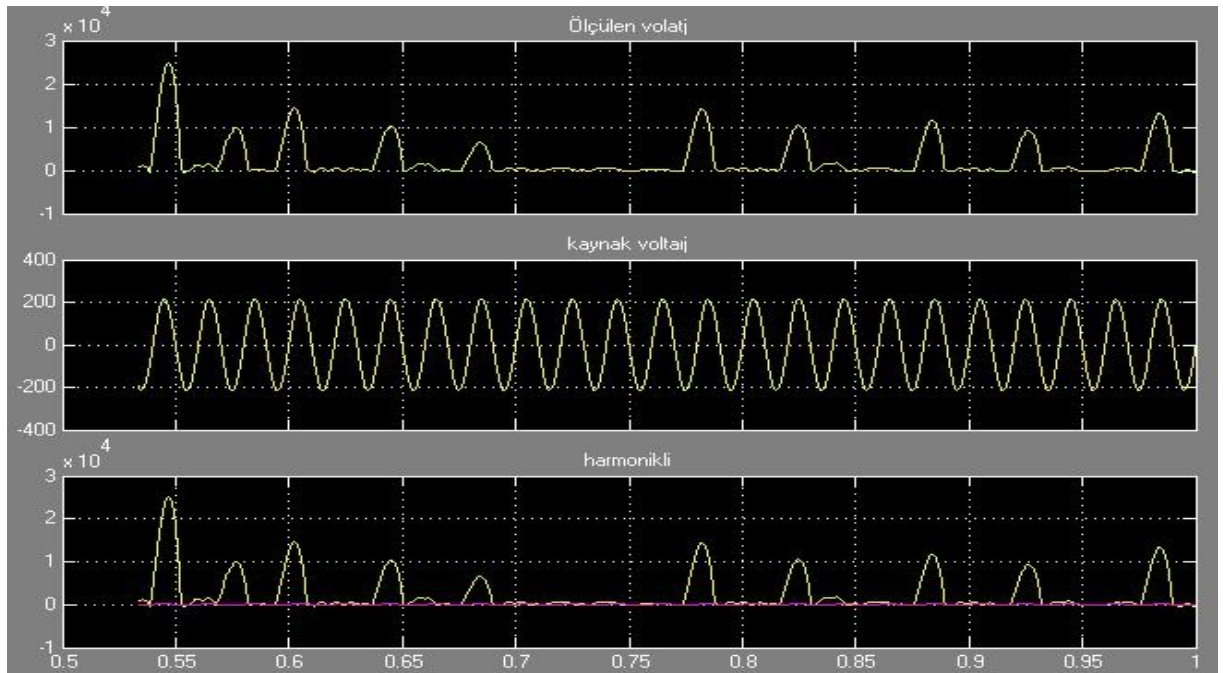
Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş seri pasif harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



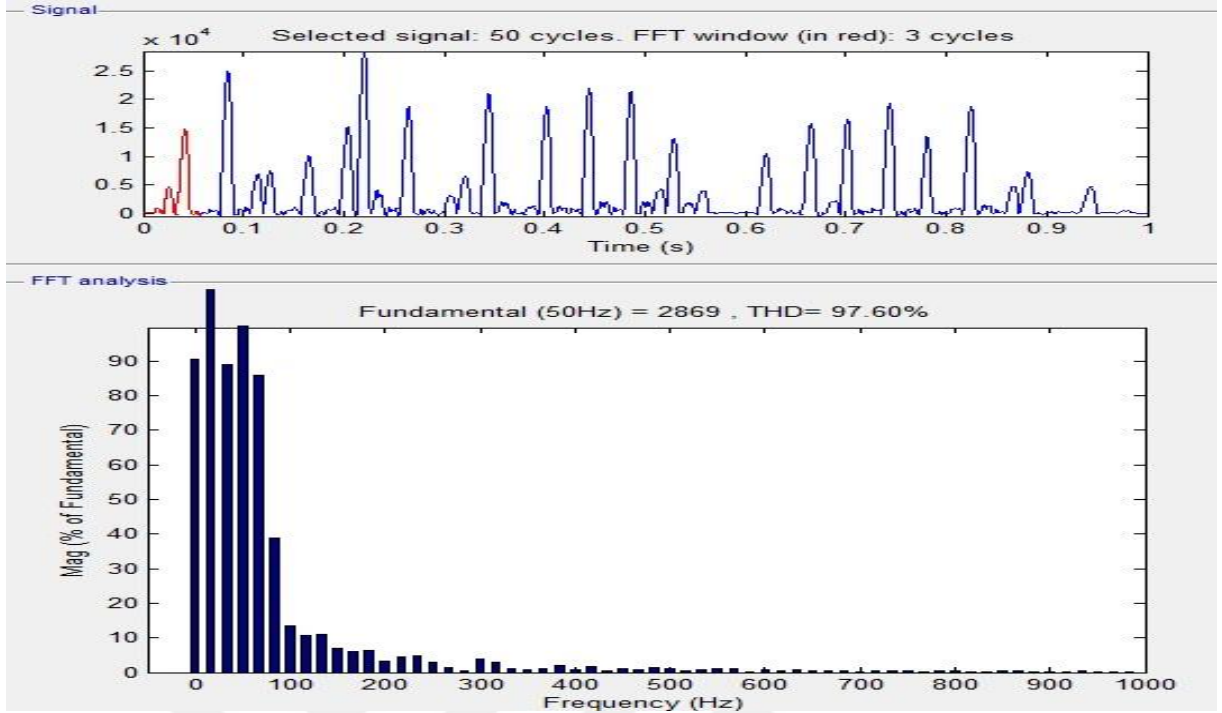
Şekil 4.118. Harmonikli Devreye 3 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;

Şekil 4.119. Sinyal Analizi Sonuçları.



Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.120. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 ve H_7 için 3 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.92'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.88'e indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.237)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.238)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = 1,6.10^{-4} F \quad (4.239)$$

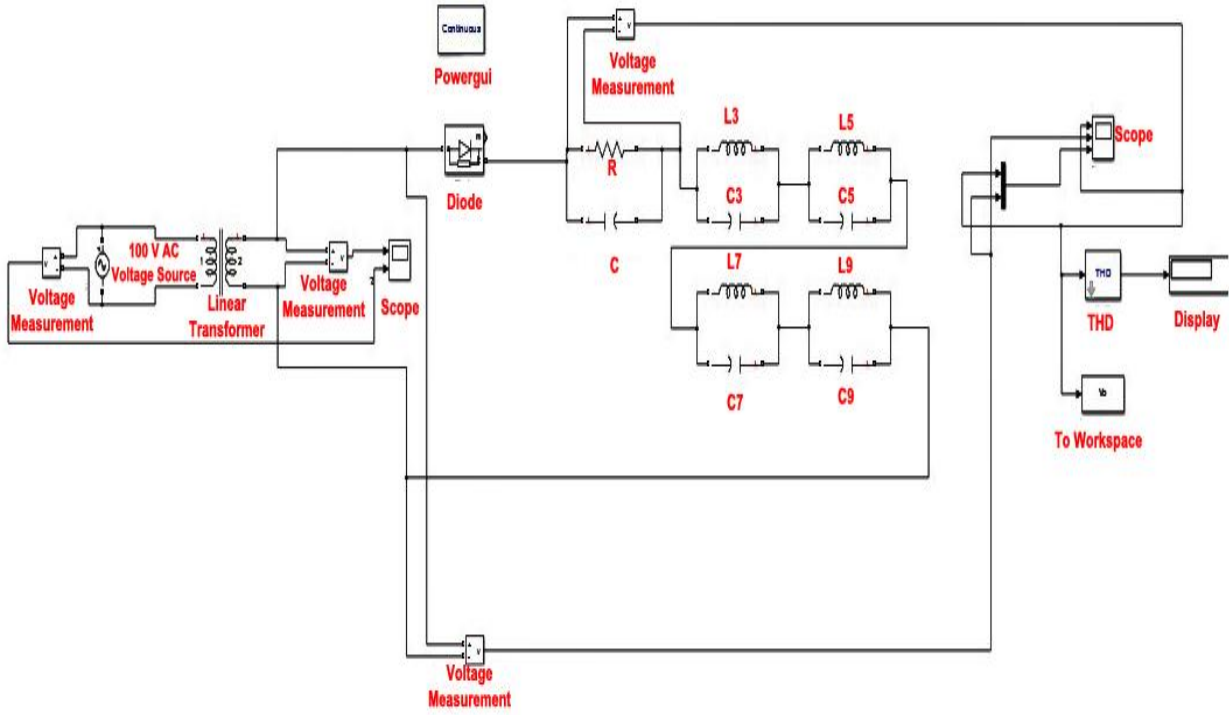
$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,6.10^{-4})} = 7,03.10^{-3} H \quad (4.240)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,6.10^{-4})} = 2,53.10^{-3} H \quad (4.241)$$

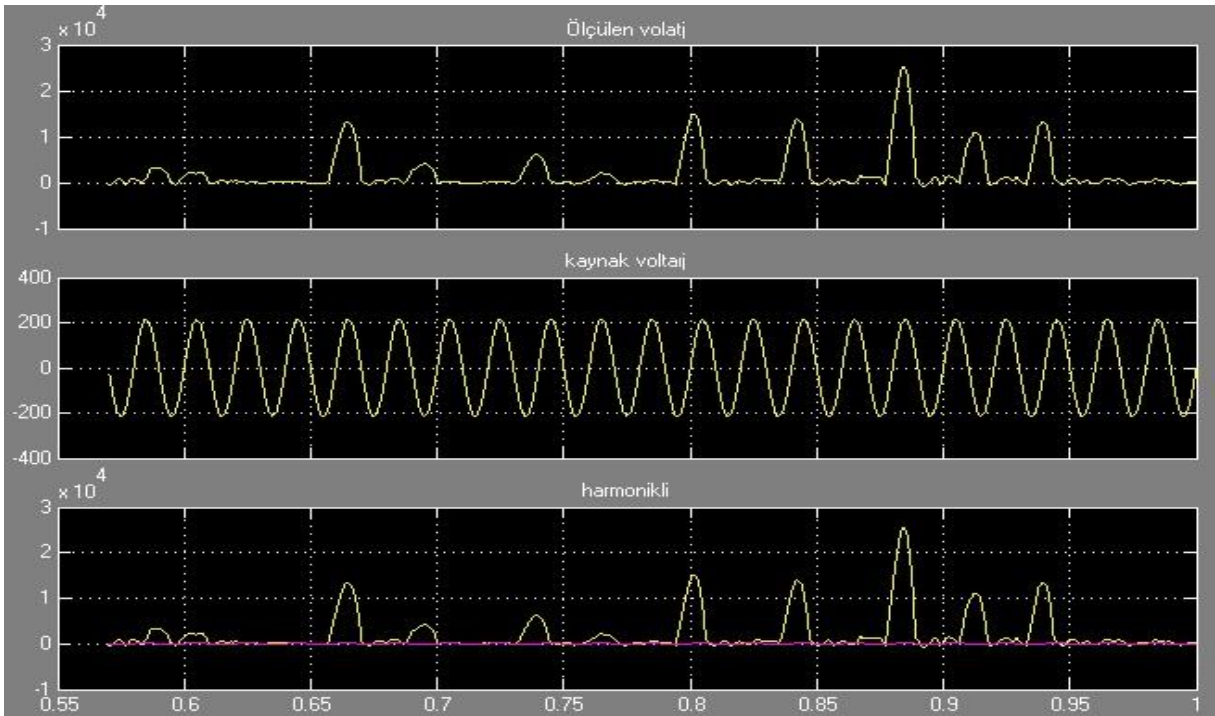
$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,6.10^{-4})} = 1,29.10^{-3} H \quad (4.242)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,6.10^{-4})} = 7,81.10^{-4} H \quad (4.243)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş seri pasif harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;

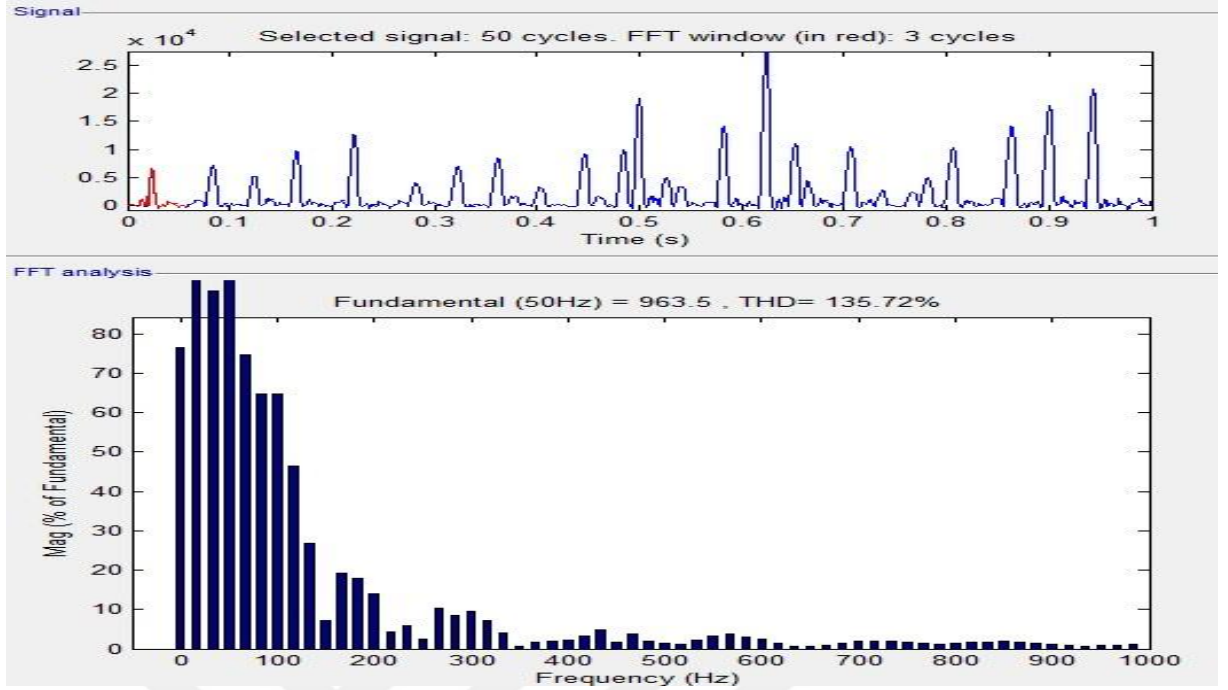


Şekil 4.121. Harmonikli Devreye 4 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi. Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.122. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.123. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 için 4 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %7.19'a, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.46'ya indirgenmiştir.

Sadece en yüksek harmonik bozukluk olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.244)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4.84} = 6,57 \cdot 10^{-4} F \quad (4.245)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = 1,3 \cdot 10^{-4} F \quad (4.246)$$

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f3)^2 \cdot (C_3)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 150^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 8,66 \cdot 10^{-3} H \quad (4.247)$$

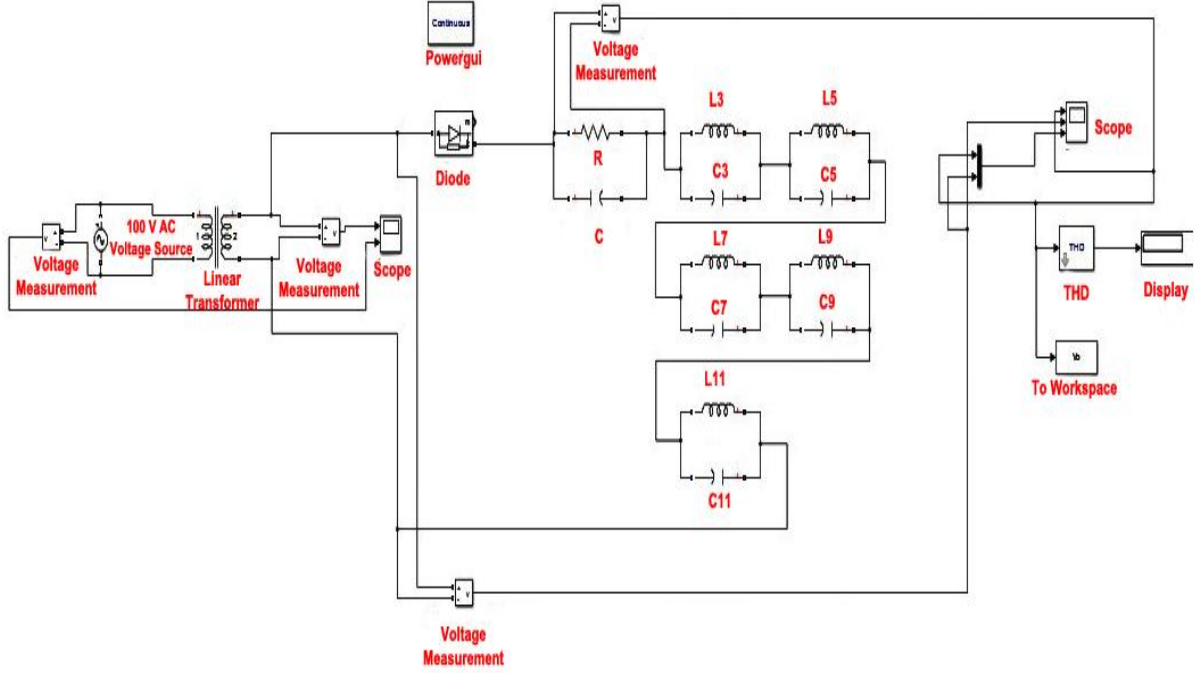
$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f5)^2 \cdot (C_5)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 250^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 3,11 \cdot 10^{-3} H \quad (4.248)$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f7)^2 \cdot (C_7)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-4})} = 1,59 \cdot 10^{-3} H \quad (4.249)$$

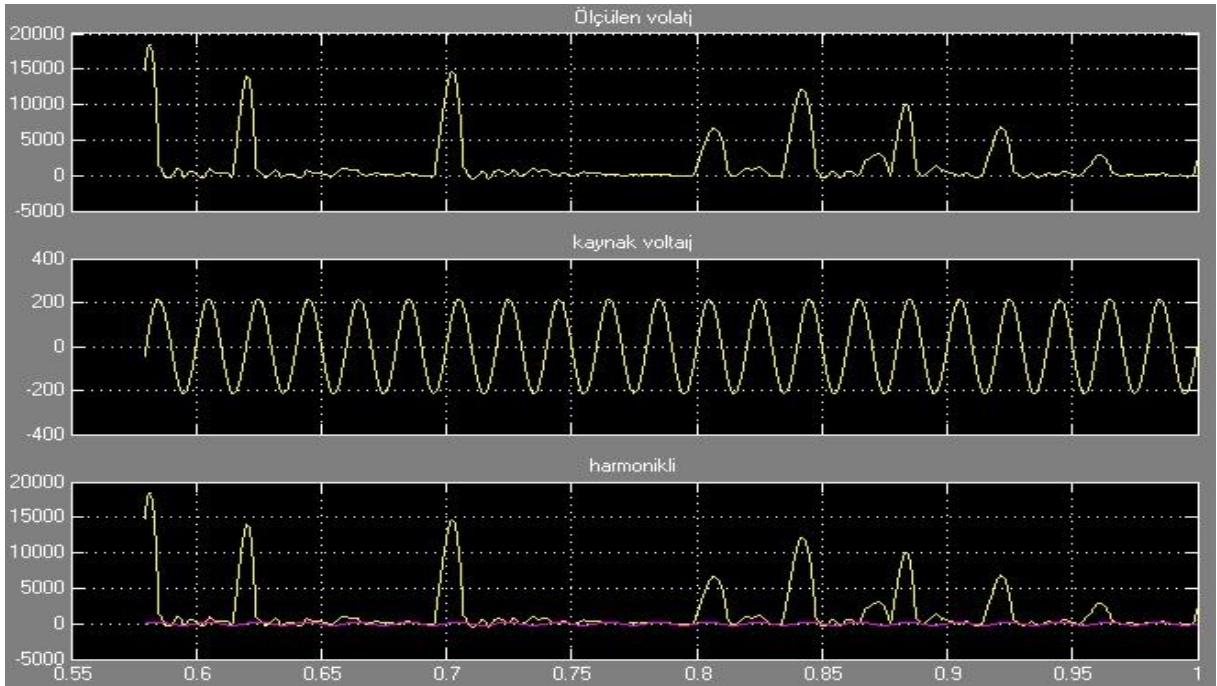
$$L_9 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (f9)^2 \cdot (C_9)} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 450^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-3})} = 9,62 \cdot 10^{-4} H \quad (4.250)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (f_{11})^2 \cdot (C_{11})} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 550^2 \cdot (1,3 \cdot 10^{-3})} = 6,44 \cdot 10^{-4} H \quad (4.251)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş seri pasif harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;

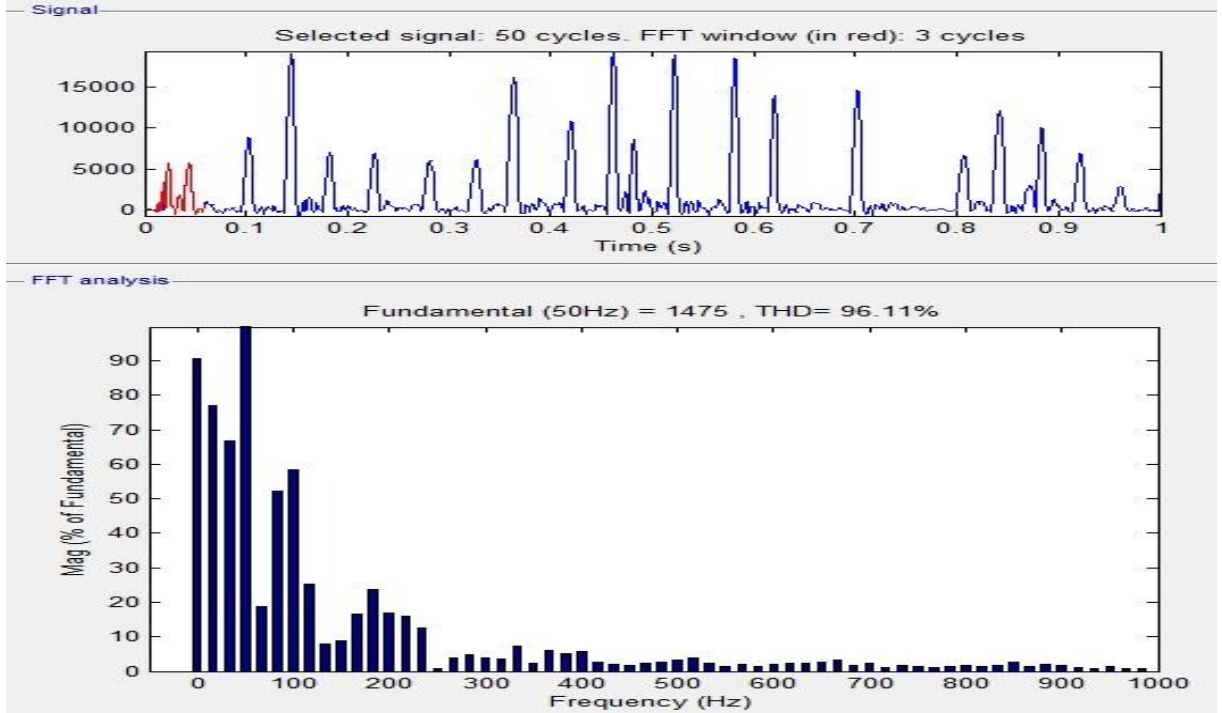


Şekil 4.124. Harmonikli Devreye 5 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi. Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.125. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.126. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} için 5 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozulma olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %8.82'ye, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.83'e indirgenmiştir.

Bütün harmonik bozukluklar olan H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} 'e seri pasif filtrenin tasarlanması aşağıdaki gibidir;

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega \quad (4.252)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.4,84} = 6,57.10^{-4} F \quad (4.253)$$

$$C_3 = C_5 = C_7 = C_9 = C_{11} = C_{13} = 1,09.10^{-4} F \quad (4.254)$$

$$L_3 = \frac{1}{4.\pi^2.(f3)^2.(C_3)} = \frac{1}{4.\pi^2.150^2.(1,09.10^{-4})} = 10,32.10^{-3} H \quad (4.255)$$

$$L_5 = \frac{1}{4.\pi^2.(f5)^2.(C_5)} = \frac{1}{4.\pi^2.250^2.(1,09.10^{-4})} = 3,71.10^{-3} H \quad (4.256)$$

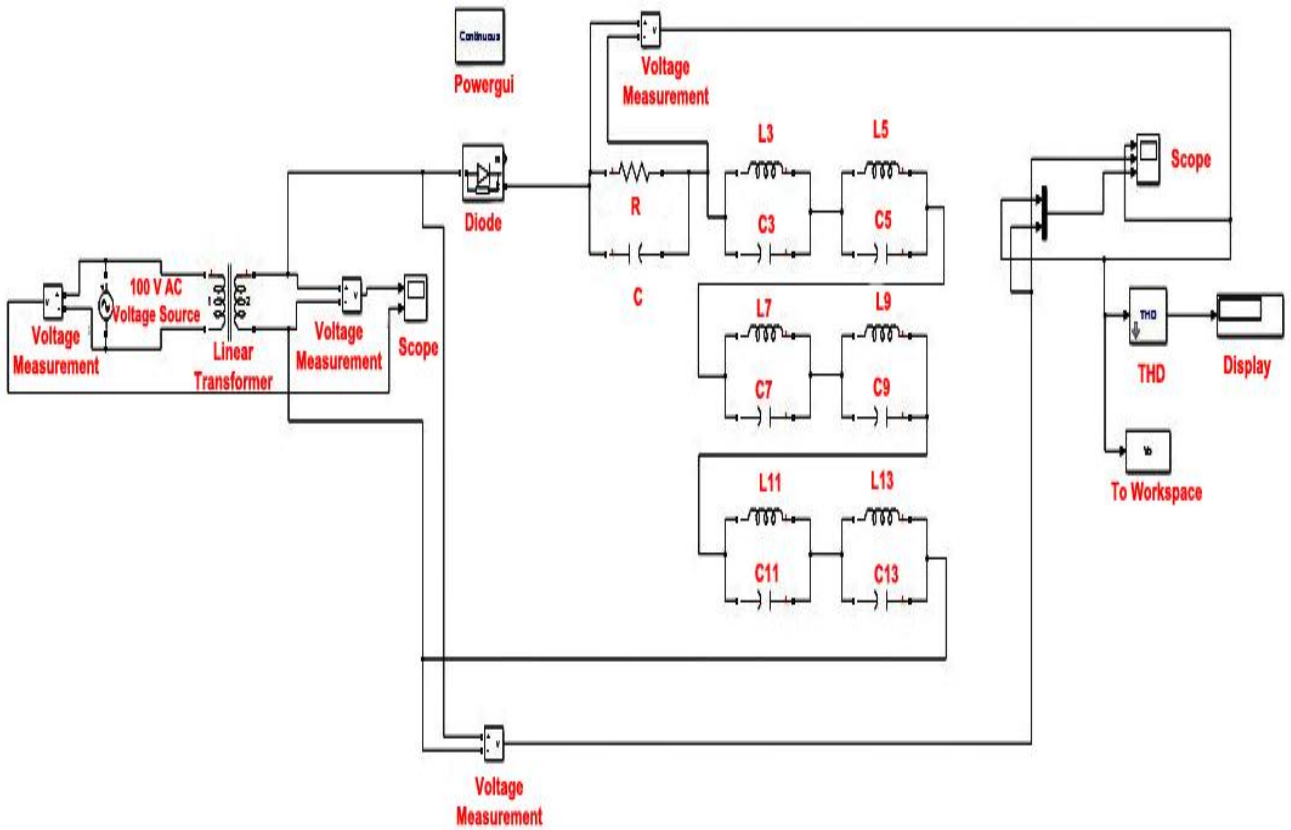
$$L_7 = \frac{1}{4.\pi^2.(f7)^2.(C_7)} = \frac{1}{4.\pi^2.350^2.(1,09.10^{-4})} = 1,89.10^{-3} H \quad (4.257)$$

$$L_9 = \frac{1}{4.\pi^2.(f9)^2.(C_9)} = \frac{1}{4.\pi^2.450^2.(1,09.10^{-4})} = 1,14.10^{-3} H \quad (4.258)$$

$$L_{11} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (f_{11})^2 \cdot (C_{11})} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 550^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 7,68 \cdot 10^{-4} H \quad (4.259)$$

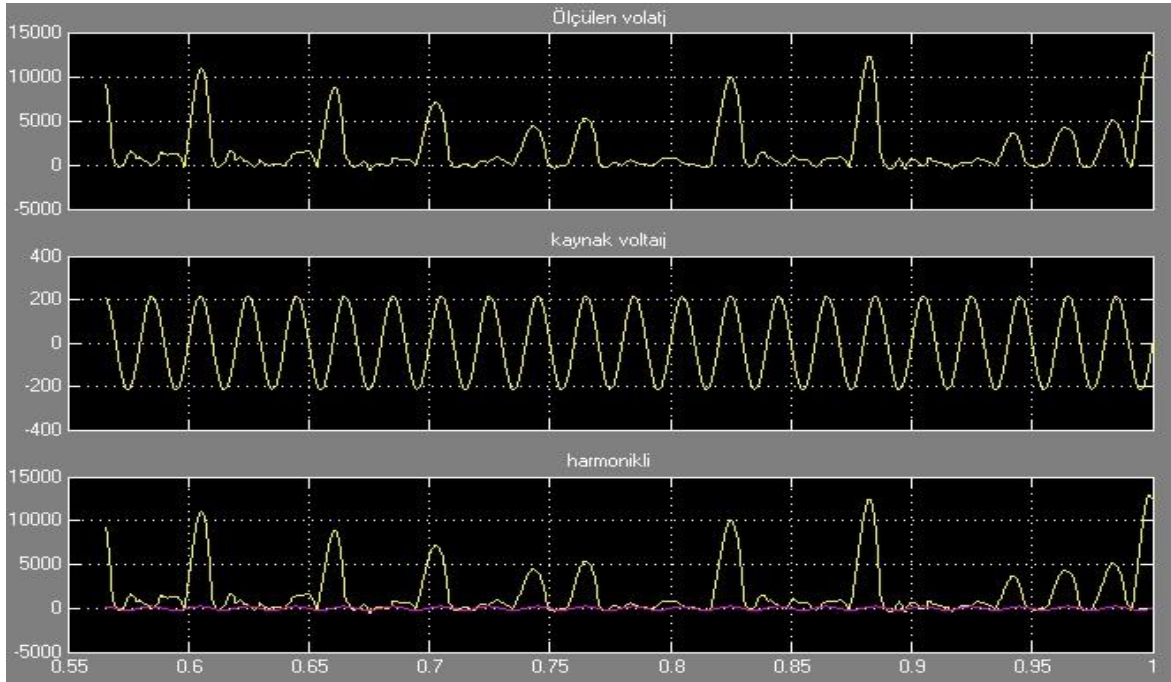
$$L_{13} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (f_{13})^2 \cdot (C_{13})} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 650^2 \cdot (1,09 \cdot 10^{-4})} = 5,5 \cdot 10^{-4} H \quad (4.260)$$

Tüm bu hesaplamalara göre Matlab/Simulink'de modellenmiş seri pasif harmonik filtreler aşağıdaki gibidir;



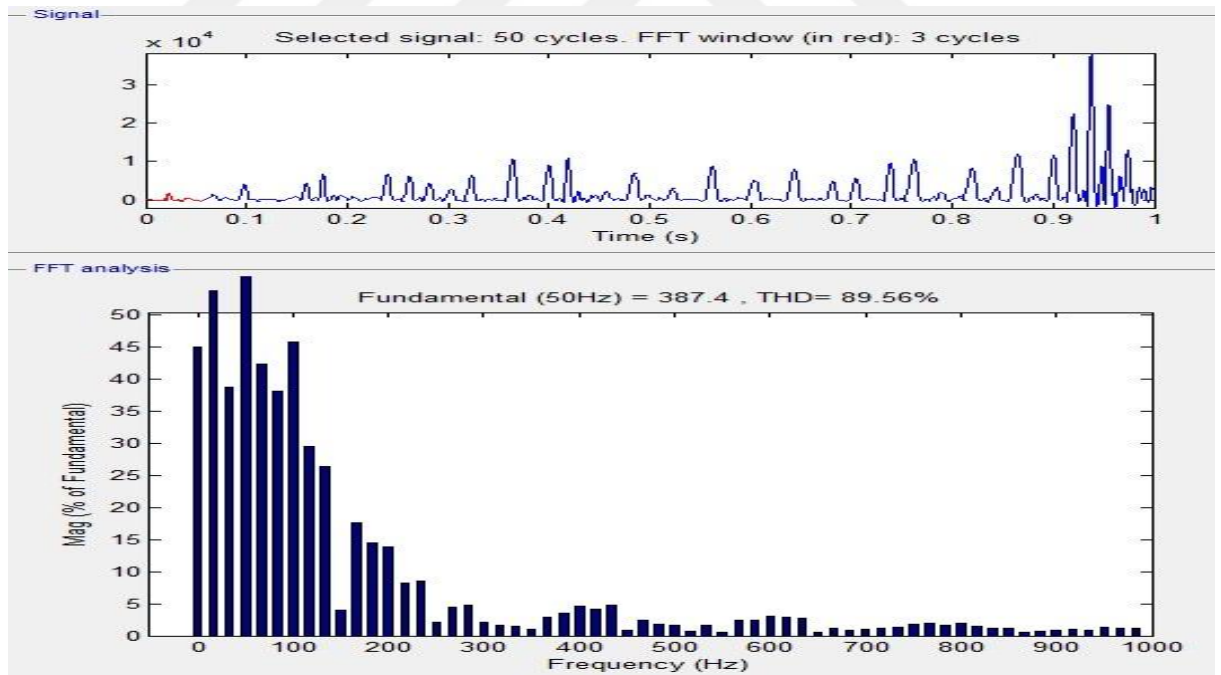
Şekil 4.127. Harmonikli Devreye 6 Adet Seri Pasif Harmonik Filtre Eklenmiş Modellemesi.

Seri pasif harmonik filtreler sisteme eklendikten sonra oluşan gerilim grafikleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.128. Sinyal Analizi Sonuçları.

Sistemin incelediğimiz harmonik frekanslarındaki değişim ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.129. FFT Analizi Sonuçları.

Harmonikli sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} için 6 adet seri pasif filtre eklenerek yapılan FFT analizi sonucunda; en yüksek harmonik bozukluk olan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.94'e, 5. harmonik frekanstaki bozulma ise %14.63'den %2.04'e indirgenmiştir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tasarlanan pasif filtrelerin üzerine ekleneceği harmonikli ana devrede oluşan harmonikler Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir;

Çizelge 5.1. Ölçülen Harmonik Değerleri.

H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05

Çizelge 5.1.'de görülebileceği gibi tüm harmonik frekanslarda ölçülen harmonik değerler, uluslararası harmonik standartlarında voltaj harmonikleri için belirtilen %3'lük seviyenin oldukça üstündedir. Bu devreye sırasıyla pasif harmonik filtreler eklenecek ve en verimli şekilde harmonikleri azaltan filtre tipi belirlenecektir.

Her harmonik frekansa tek ayarlı pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.2.'de ki gibidir;

Çizelge 5.2. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%5.80	%3.23	%2.05	%1.36	%0.90	%0.58

Çizelge 5.2.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.80'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.23'e indirgenmiştir. Uluslararası harmonik seviyeleri doğrultusunda yapmış olduğumuz tek ayarlı filtreler ile yeterli seviyede harmonik azaltımı yapılmıştır.

Yukarıda yapmış olduğumuz harmonik filtre tasarımında sistemde oluşmuş olan her harmonik frekans için ayrı ayrı tek ayarlı pasif filtreyi devreye soktuk. Normal şartlar altında yapmış olduğumuz her harmonik bozukluk frekansı için bir adet filtrenin aksine sistemde oluşan en yüksek harmonik bozukluğun frekansına göre bir adet tek ayarlı filtre uygulaması gerçekleştirilmektedir. Bu durumda harmonikler azaltımı küçük oranda değişecek ancak kullanılan eleman sayısı ve boyutu azalacağı için filtre maliyetinde önemli ölçüde düşme gerçekleşecektir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre bir adet tek ayarlı filtre pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.3.'de ki gibidir;

Çizelge 5.3. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%3.26	%1.90	%1.30	%0.96	%0.72	%0.56

Çizelge 5.3.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.26'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %1.90'a indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek iki harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 ve H_5 'e göre iki adet tek ayarlı filtre pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.4.'de ki gibidir;

Çizelge 5.4. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%4.26	%2.44	%1.63	%1.16	%0.84	%0.61

Çizelge 5.4.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %4.26'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.44'e indirgenmiştir.

Sistemde H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre üç adet tek ayarlı pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.5.'de ki gibidir;

Çizelge 5.5. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%4.76	%2.71	%1.78	%1.24	%0.88	%0.62

Çizelge 5.5.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %4.76'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.71'e indirgenmiştir.

Sistemde H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre dört adet tek ayarlı pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.6.'da ki gibidir;

Çizelge 5.6. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%5.13	%2.90	%1.88	%1.29	%0.89	%0.61

Çizelge 5.6.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.13'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.90'a indirgenmiştir.

Sistemde H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre beş adet tek ayarlı pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.7.'de ki gibidir;

Çizelge 5.7. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%5.32	%2.99	%1.94	%1.32	%0.91	%0.61

Çizelge 5.7.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.32'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.99'a indirgenmiştir.

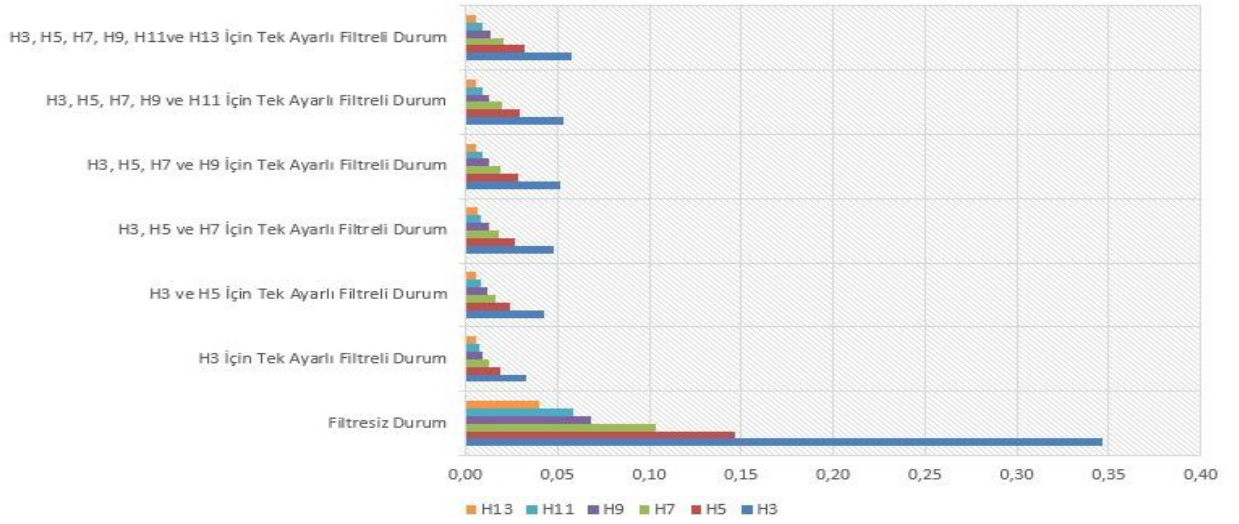
Tek ayarlı pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.8.'de ve Şekil 5.1.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.8. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%3.26	%1.90	%1.30	%0.96	%0.72	%0.56
H_3 ve H_5 İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%4.26	%2.44	%1.63	%1.16	%0.84	%0.61
H_3 , H_5 ve H_7 İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%4.76	%2.71	%1.78	%1.24	%0.88	%0.62
H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%5.13	%2.90	%1.88	%1.29	%0.89	%0.61
H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%5.32	%2.99	%1.94	%1.32	%0.91	%0.61

$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%5.80	%3.23	%2.05	%1.36	%0.90	%0.58
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tek Ayarlı Filtrelerin Karşılaştırılması



Şekil 5.1. Tek Ayarlı Pasif Harmonik Filtrelerin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

Çizelge 5.8.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.26'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %1.90'a indirgenerek en verimli şekilde H_3 'e göre 1 adet tek ayarlı filtre uygulandığında gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerine H_3 'e göre 1 adet tek ayarlı filtre uygulandığında harmoniklerin azaltılması, her harmonik frekansa tek tek filtre uygulandığı duruma göre daha çok verimlidir.

Tek ayarlı filtrelerin olumlu özellikleri şunlardır:

- Eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa kayıplar çok azdır.
- Ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sıfıra yakın bir empedans gösterir.
- Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre paralel kullanılabilir.

Tek ayarlı filtrelerin olumsuz yanları ise:

- Hassas yapılan hesaplamalarından dolayı filtreyi oluşturan elemanların değerinde zamanla oluşan değişmelere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum ilave kondansatör ve direnç değerleri ile giderilebilir.

- Tek ayarlı filtreler sadece gücü sabit olan lineer olmayan yüklü sistemlerde kullanılabilir. Çünkü üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından sistemdeki endüktif yükler kalktığında kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir veya lineer olmayan yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit lineer olmayan yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devreden çıktığında tek ayarlı filtreler de devreden çıkarılmalıdır.

H_3 ve H_5 'e göre tasarlanan çift ayarlı pasif harmonik filtrenin devreye eklediğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.9.'da ki gibidir;

Çizelge 5.9. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.74	%3.65	%2.22	%1.38	%0.84	%0.48

Çizelge 5.9.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.74'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.65'e indirgenmiştir.

H_7 ve H_9 'a göre tasarlanan çift ayarlı pasif harmonik filtrenin devreye eklediğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.10.'de ki gibidir;

Çizelge 5.10. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.66	%3.61	%2.20	%1.37	%0.83	%0.48

Çizelge 5.10.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.66'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.61'e indirgenmiştir.

H_3, H_5 ve H_7, H_9 için tasarlanmış olan çift ayarlı filtrelerin harmonikleri azaltma verileri yukarıda görüldüğü üzere birbirine çok yakındır. H_3, H_5 ve H_7, H_9 için tasarlanmış olan çift ayarlı filtrelerin aynı anda devreye eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.11.'de ki gibidir;

Çizelge 5.11. Ölçülen Harmonik Değerleri.

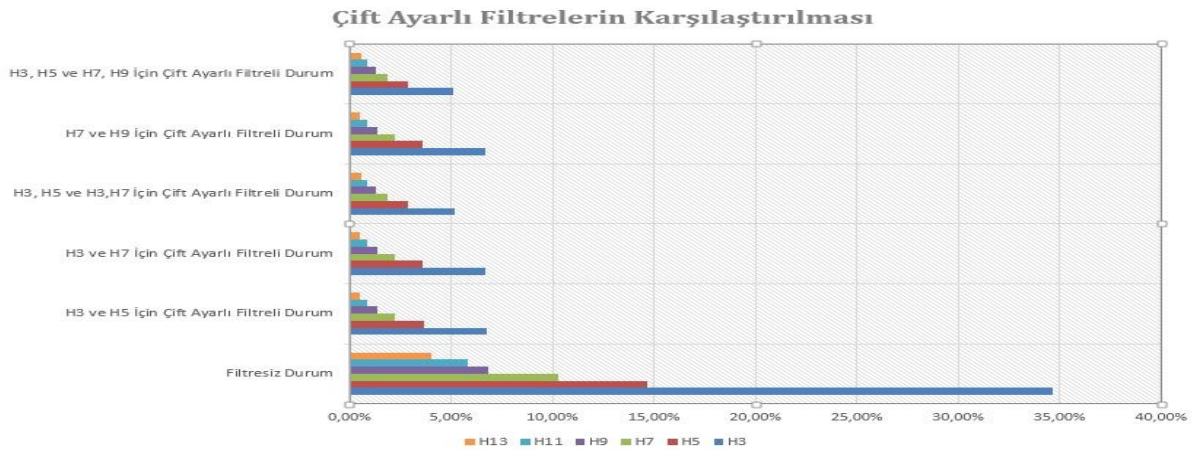
	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%5.11	%2.88	%1.87	%1.27	%0.88	%0.60

Çizelge 5.11.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.11'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.88'e indirgenmiştir.

Çift ayarlı pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.12.'de ve Şekil 5.2.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.12. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 ve H_5 İçin Çift Ayarlı Filtreli Durum	%6.74	%3.65	%2.22	%1.38	%0.84	%0.48
H_7 ve H_9 İçin Çift Ayarlı Filtreli Durum	%6.66	%3.61	%2.20	%1.37	%0.83	%0.48
H_3, H_5 ve H_7, H_9 İçin Çift Ayarlı Filtreli Durum	%5.11	%2.88	%1.87	%1.27	%0.88	%0.60

**Şekil 5.2.** Çift Ayarlı Pasif Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Çizelge 5.12.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.11'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.88'e indirgenerek en verimli şekilde H_3, H_5 ve H_7, H_9 için çift ayarlı filtrede gerçekleştirilmiştir. Uluslararası standartlara göre alçak gerilim voltaj harmoniklerinin en fazla %3 olmalarına izin verilmiştir. Bu şartlar doğrultusunda yapmış olduğumuz çift ayarlı filtre ile yeterli seviyede harmonik azaltımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan eleman sayısı ve boyutu bakımından H_3, H_5 ve H_7, H_9 için çift ayarlı filtre, H_3 için tek ayarlı filtreye göre daha çok eleman ve hacime sahip olduğundan dolayı filtre maliyeti bakımından maliyeti daha fazladır.

Her harmonik frekansa birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.13.'de ki gibidir;

Çizelge 5.13. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.14	%3.40	%2.14	%1.40	%0.92	%0.58

Çizelge 5.13.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.14'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.40'a indirgenmiştir. Kullanılan eleman sayısının ve boyutunun azlığı bakımından H_3 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren filtre maliyet olarak diğer yüksek geçiren tiplerine göre daha uygun olacaktır. Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.14.'da ki gibidir;

Çizelge 5.14. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%5.87	%3.26	%2.07	%1.36	%0.90	%0.58

Çizelge 5.14.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.87'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.26'ya indirgenmiştir.

Sisteme H_3 ve H_5 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.15.'de ki gibidir;

Çizelge 5.15. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.10	%3.38	%2.14	%1.40	%0.92	%0.59

Çizelge 5.15.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.10'a, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.16.'de ki gibidir;

Çizelge 5.16. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.05	%3.35	%2.12	%1.39	%0.91	%0.58

Çizelge 5.16.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.05'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.35'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.17.'de ki gibidir;

Çizelge 5.17. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.09	%3.38	%2.13	%1.40	%0.92	%0.58

Çizelge 5.17.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.09'a, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.18.'de ki gibidir;

Çizelge 5.18. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.15	%3.39	%2.14	%1.40	%0.91	%0.58

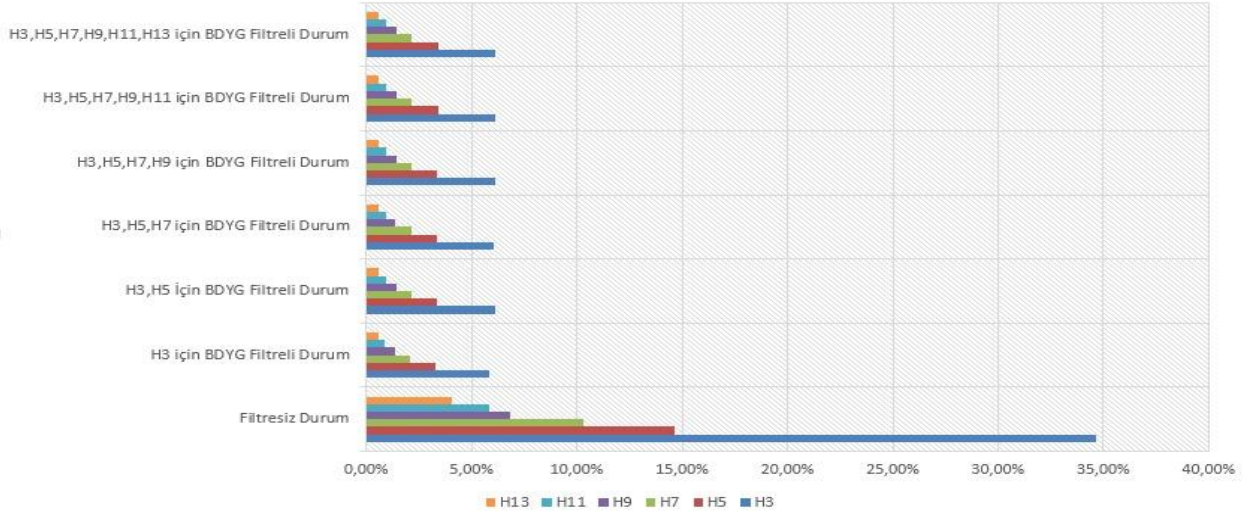
Çizelge 5.18.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.15'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.39'a indirgenmiştir.

Birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.19.'de ve Şekil 5.3.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.19. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin BDYG Filtreli Durum	%5.87	%3.26	%2.07	%1.36	%0.90	%0.58
H_3 ve H_5 İçin BDYG Filtreli Durum	%6.10	%3.38	%2.14	%1.40	%0.92	%0.59
H_3 , H_5 ve H_7 İçin BDYG Filtreli Durum	%6.05	%3.35	%2.12	%1.39	%0.91	%0.58
H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 İçin BDYG Filtreli Durum	%6.09	%3.38	%2.13	%1.40	%0.92	%0.58
H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} İçin BDYG Filtreli Durum	%6.15	%3.39	%2.14	%1.40	%0.91	%0.58
H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} İçin BDYG Filtreli D.	%6.14	%3.40	%2.14	%1.40	%0.92	%0.58

Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Filtrelerin Karşılaştırılması



Şekil 5.3. Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Çizelge 5.19.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.87'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.26'ya indirgenerek en verimli H_3 için birinci dereceden yüksek geçiren filtrede gerçekleştirilmiştir.

Her harmonik frekansa ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.20.'de ki gibidir;

Çizelge 5.20. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.24	%3.44	%2.17	%1.41	%0.92	%0.58

Çizelge 5.20.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.21.'de ki gibidir;

Çizelge 5.21. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.15	%3.38	%2.11	%1.37	%0.89	%0.56

Çizelge 5.21.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.15'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 ve H_5 'e göre ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.22.'de ki gibidir;

Çizelge 5.22. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.23	%3.44	%2.16	%1.40	%0.91	%0.57

Çizelge 5.22.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.23'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.23.'de ki gibidir;

Çizelge 5.23. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.21	%3.43	%2.16	%1.40	%0.91	%0.57

Çizelge 5.23.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.21'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.43'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.24.'da ki gibidir;

Çizelge 5.24. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.32	%3.48	%2.18	%1.41	%0.91	%0.56

Çizelge 5.24.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.32'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.48'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre ikinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.25.'da ki gibidir;

Çizelge 5.25. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.24	%3.44	%2.16	%1.41	%0.91	%0.57

Çizelge 5.25.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

İkinci dereceden yüksek geçiren pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.26.'de ve Şekil 5.4.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

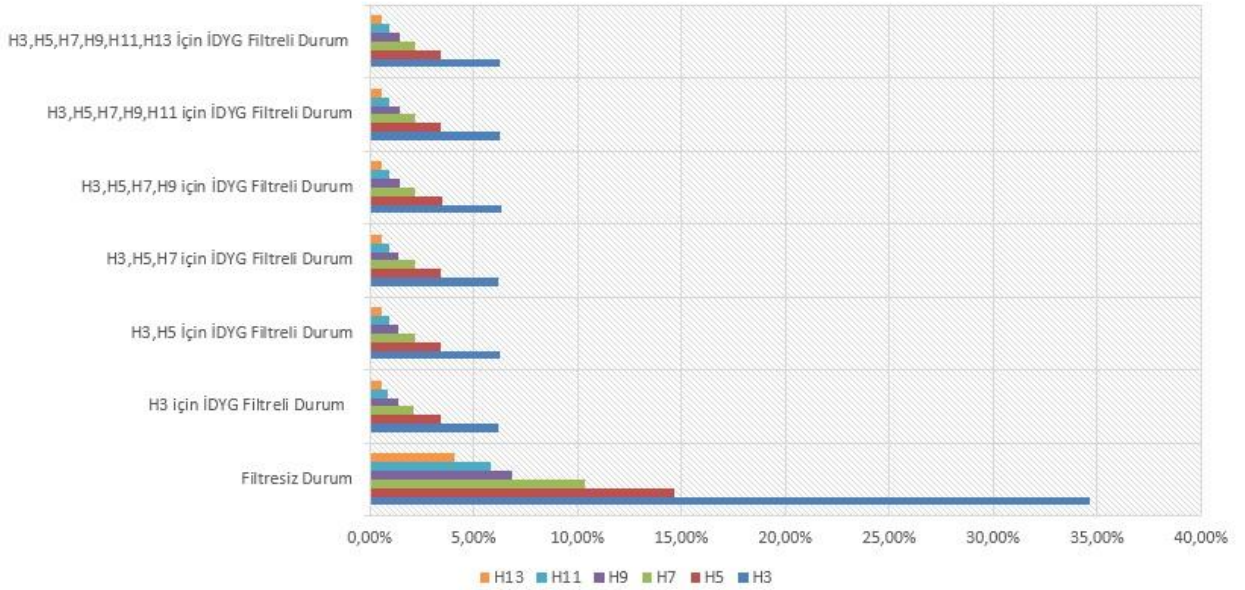
Çizelge 5.26. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin İDYG Filtreli Durum	%6.15	%3.38	%2.11	%1.37	%0.89	%0.56
H_3 ve H_5 İçin İDYG Filtreli Durum	%6.23	%3.44	%2.16	%1.40	%0.91	%0.57
H_3 , H_5 ve H_7 İçin İDYG Filtreli Durum	%6.21	%3.43	%2.16	%1.40	%0.91	%0.57
H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 İçin İDYG Filtreli Durum	%6.32	%3.48	%2.18	%1.41	%0.91	%0.56

H_3, H_5, H_7, H_9 ve H_{11} İçin İDYG Filtreli Durum	%6.24	%3.44	%2.16	%1.41	%0.91	%0.57
$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin İDYG Filtreli D.	%6.24	%3.44	%2.17	%1.41	%0.92	%0.58

Çizelge 5.26.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.15'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.38'e indirgenerek en verimli H_3 için ikinci dereceden yüksek geçiren filtrede gerçekleştirilmiştir.

İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Filtrenin Karşılaştırılması



Şekil 5.4. İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Her harmonik frekansa üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.27.'de ki gibidir;

Çizelge 5.27. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.13	%3.37	%2.12	%1.38	%0.89	%0.56

Çizelge 5.27.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.13'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.37'ye indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.28.'de ki gibidir;

Çizelge 5.28. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.19	%3.40	%2.12	%1.37	%0.89	%0.56

Çizelge 5.28.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.19'a, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.40'a indirgenmiştir.

Sisteme H_3 ve H_5 'e göre üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.29.'de ki gibidir;

Çizelge 5.29. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.24	%3.44	%2.15	%1.39	%0.89	%0.56

Çizelge 5.29.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.24'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.30.'de ki gibidir;

Çizelge 5.30. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.21	%3.42	%2.14	%1.39	%0.89	%0.55

Çizelge 5.30.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.21'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.42'ye indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.31.'da ki gibidir;

Çizelge 5.31. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli D.	%6.25	%3.43	%2.15	%1.39	%0.89	%0.55

Çizelge 5.31.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.25'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.43'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.32.'de ki gibidir;

Çizelge 5.32. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.25	%3.44	%2.15	%1.40	%0.90	%0.56

Çizelge 5.32.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.25'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.44'e indirgenmiştir.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.33.'de ve Şekil 5.5.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

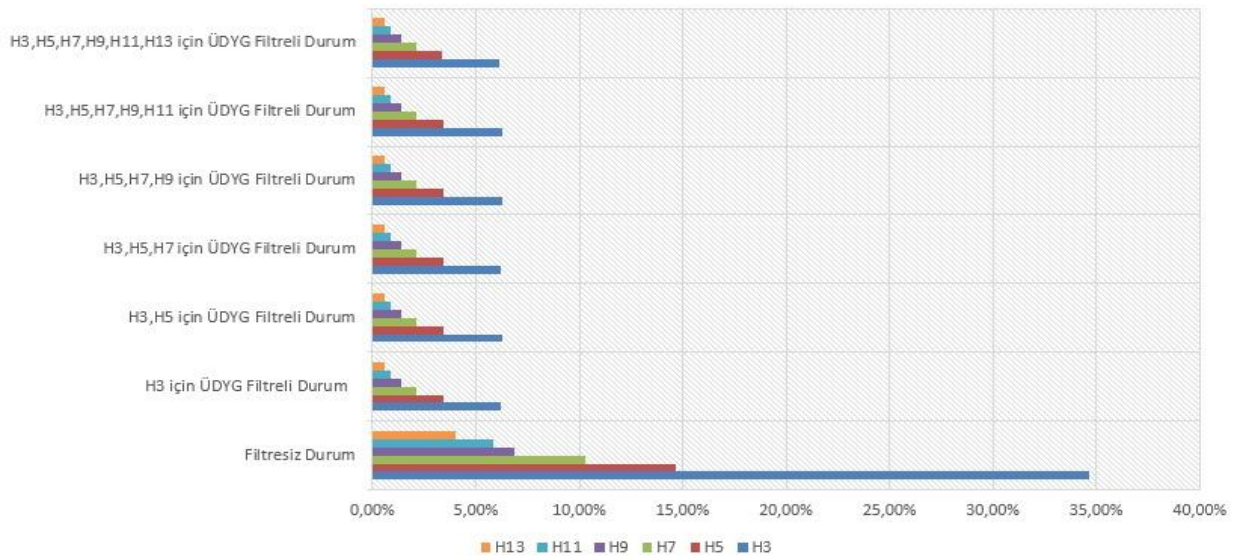
Çizelge 5.33. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.19	%3.40	%2.12	%1.37	%0.89	%0.56
H_3 ve H_5 İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.24	%3.44	%2.15	%1.39	%0.89	%0.56

H_3, H_5 ve H_7 İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.21	%3.42	%2.14	%1.39	%0.89	%0.55
H_3, H_5, H_7 ve H_9 İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.25	%3.43	%2.15	%1.39	%0.89	%0.55
H_3, H_5, H_7, H_9 ve H_{11} İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.25	%3.44	%2.15	%1.40	%0.90	%0.56
$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.13	%3.37	%2.12	%1.38	%0.89	%0.56

Çizelge 5.33.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.13'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.37'ye indirgenerek en verimli $H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} için üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrede gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Filtrelerin Karşılaştırılması



Şekil 5.5. Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Şekil 5.5.'de görülebildiği gibi en verimli harmonik sönümlemesi yalnızca H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} için üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrede alınmıştır.

Her harmonik frekansa C tipi yüksek geçiren pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.34.'da ki gibidir;

Çizelge 5.34. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.17	%3.41	%2.14	%1.41	%0.90	%0.56

Çizelge 5.34.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.17'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.41'e indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre C tipi yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.35.'da ki gibidir;

Çizelge 5.35. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.66	%3.67	%2.28	%1.46	%0.93	%0.57

Çizelge 5.35.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.66'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.67'ye indirgenmiştir.

Sisteme H_3 ve H_5 'e göre C tipi yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.36.'de ki gibidir;

Çizelge 5.36. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.40	%3.52	%2.21	%1.43	%0.92	%0.57

Çizelge 5.36.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.40'a, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.52'ye indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre C tipi yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.37.'de ki gibidir;

Çizelge 5.37. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.27	%3.46	%2.18	%1.41	%0.91	%0.56

Çizelge 5.37.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.27'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.46'ya indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre C tipi yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.38.'de ki gibidir;

Çizelge 5.38. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.31	%3.48	%2.18	%1.41	%0.90	%0.56

Çizelge 5.38.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.31'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.48'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre C tipi yüksek geçiren pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.39.'de ki gibidir;

Çizelge 5.39. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.27	%3.46	%2.17	%1.41	%0.91	%0.57

Çizelge 5.39.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.27'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.46'ya indirgenmiştir.

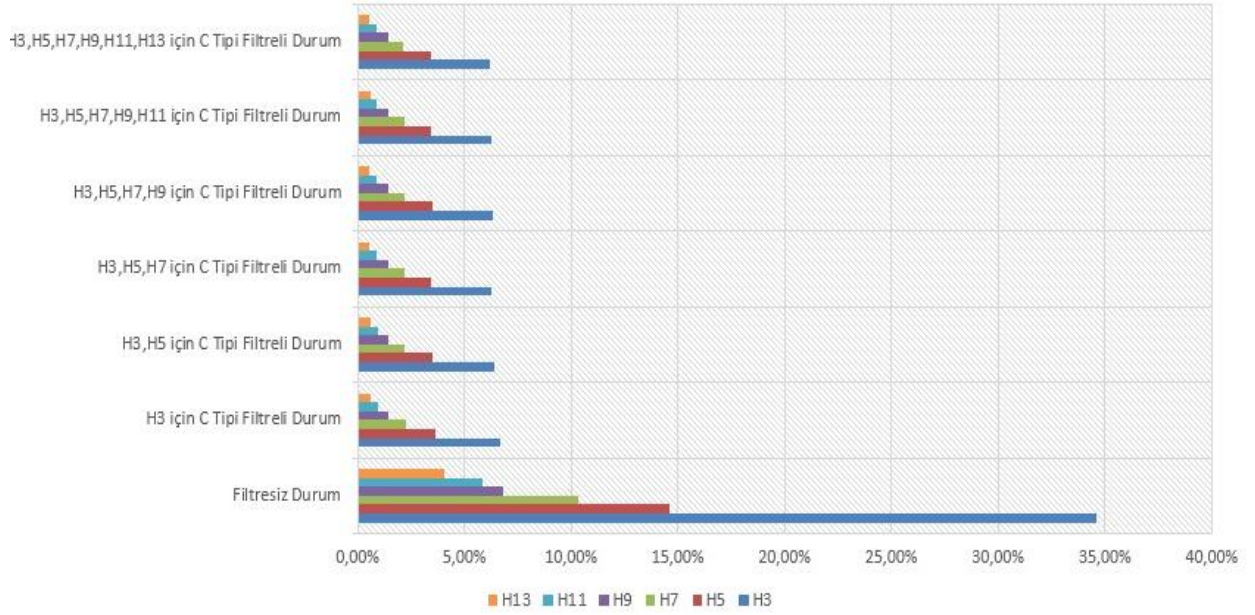
C tipi yüksek geçiren pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.40.'de ve Şekil 5.6.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.40. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.66	%3.67	%2.28	%1.46	%0.93	%0.57
H_3 ve H_5 İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.40	%3.52	%2.21	%1.43	%0.92	%0.57
H_3, H_5 ve H_7 İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.27	%3.46	%2.18	%1.41	%0.91	%0.56
H_3, H_5, H_7 ve H_9 İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.31	%3.48	%2.18	%1.41	%0.90	%0.56
H_3, H_5, H_7, H_9 ve H_{11} İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.27	%3.46	%2.17	%1.41	%0.91	%0.57
$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.17	%3.41	%2.14	%1.41	%0.90	%0.56

Çizelge 5.40.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.17'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.41'e indirgenerek en verimli $H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} için C tipi yüksek geçiren filtrede gerçekleştirilmiştir.

C Tipi Yüksek Geçiren Filtrelerin Karşılaştırılması



Şekil 5.6. C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Şekil 5.6.'da görülebildiği gibi en verimli harmonik sönümlenmesi yalnızca H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} için C tipi yüksek geçiren filtrede alınmıştır.

Yüksek geçiren pasif filtre tiplerinin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra kendi aralarında azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.41.'de ve Şekil 5.7.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.41. Yüksek geçiren filtre tiplerinin en verimlilerinin kendi aralarında karşılaştırılması.

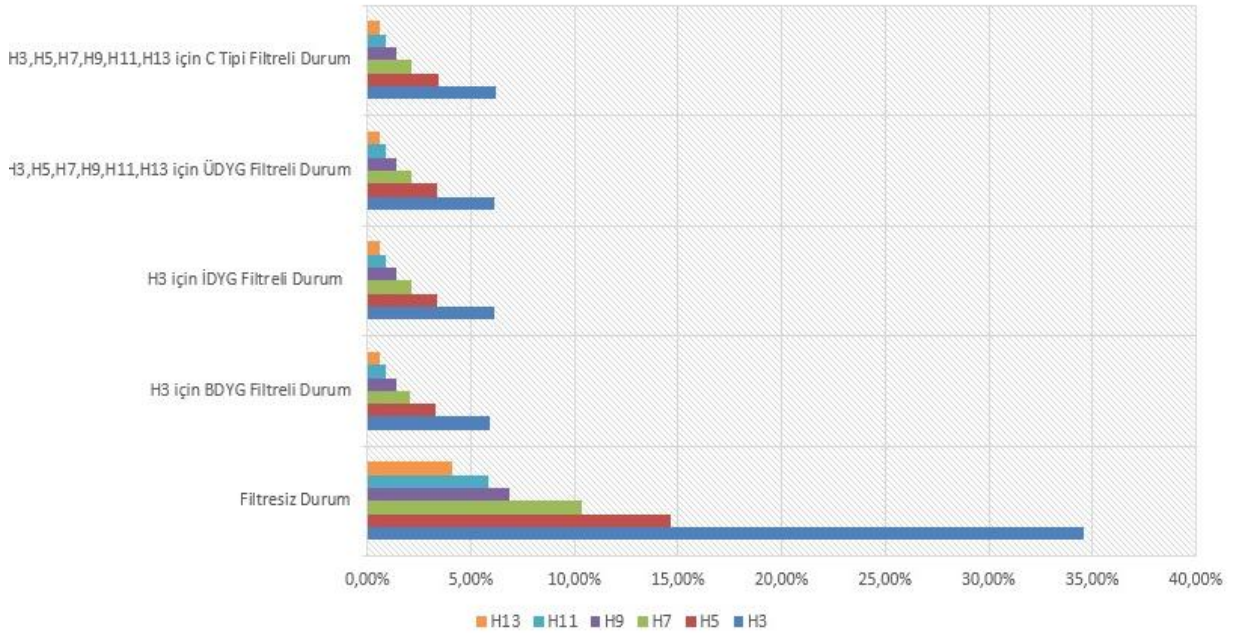
	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin BDYG Filtreli Durum	%5.87	%3.26	%2.07	%1.36	%0.90	%0.58
H_3 İçin İDYG Filtreli Durum	%6.15	%3.38	%2.11	%1.37	%0.89	%0.56
$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin ÜDYG Filtreli Durum	%6.13	%3.37	%2.12	%1.38	%0.89	%0.56

$H_3, H_5,$ H_7, H_9 $, H_{11}$ ve H_{13} İçin C Tipi Filtreli Durum	%6.17	%3.41	%2.14	%1.41	%0.90	%0.56
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Çizelge 5.41.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %5.87'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %3.26'ya indirgenerek en verimli olarak H_3 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtrede gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca kullanılan eleman sayısının ve boyutunun azlığı bakımından H_3 'e göre birinci dereceden yüksek geçiren pasif filtre maliyet olarak diğer tüm yüksek geçiren pasif filtre tiplerine göre daha uygun olacaktır.

En Verimli Yüksek Geçiren Filtrelerin Karşılaştırılması



Şekil 5.7. En Verimli Yüksek Geçiren Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

Düşük mertebeli harmonikler için sönümlü filtrelerin kullanımı ekonomik olmamakla beraber bu filtrelerin başlıca üstünlükleri şu şekilde ifade edilebilir:

- Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişimine daha az duyarlıdır. Frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır.

- Artan anahtarlama ve bakım sorunları koşut kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.

İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada tek ayarlı bir filtreden daha etkilidir. Enerji sistemindeki harmonikleri gidermek ve yükün güç katsayısını düzeltmek için bugüne kadar geleneksel LC edilgen filtreler kullanılmıştır. Ancak uygulamada bu edilgen filtreler aşağıdaki sakıncalara sahiptir;

- Filtre karakteristiği kaynak empedansından önemli derecede etkilenir,
- Filtre sığacı akımın hem ana hem de harmonikli bileşenlerine göre boyutlandırılır,
- Harmonikli akım bileşenleri arttığı zaman filtre aşırı yüklenebilir,
- Güç sistemi ile filtre bileşenleri arasında belirli bir frekansta koşut rezonans oluşarak kaynak tarafında harmonikli akımların yükselmesine sebep olabilir,
- Edilgen filtre güç sistemi ile seri rezonansada düşebilir.
- Edilgen filtrelerin dezavantajları ve yetersizlikleri nedeniyle bu sorunu çözmek için etkin güç filtreleri geliştirilmiştir.

Her harmonik frekansa seri pasif filtre eklendiğinde harmoniklerin son ölçümleri Çizelge 5.42.'de ki gibidir;

Çizelge 5.42. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%3.94	%2.04	%1.00	%0.92	%0.60	%0.62

Çizelge 5.42.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.94'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.04'e indirgenmiştir.

Sisteme sadece en yüksek harmonik bozulmanın frekansına yani H_3 'e göre seri pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.43.'de ki gibidir;

Çizelge 5.43. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%12.11	%16.71	%7.55	%4.71	%6.12	%3.56

Çizelge 5.43.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %12.11'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %16.71'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 ve H_5 'e göre seri pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.44.'de ki gibidir;

Çizelge 5.44. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%19.44	%12.15	%7.52	%4.88	%4.68	%3.32

Çizelge 5.44.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %19.44'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %12.15'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 ve H_7 'ye göre seri pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.45.'de ki gibidir;

Çizelge 5.45. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%6.92	%2.88	%0.47	%1.01	%0.94	%0.42

Çizelge 5.45.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %6.92'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.88'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 'a göre seri pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.46.'de ki gibidir;

Çizelge 5.46. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%7.19	%2.46	%0.76	%1.63	%3.25	%0.69

Çizelge 5.46.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %7.19'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.46'e indirgenmiştir.

Sisteme H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} 'e göre seri pasif filtre devreye eklendiğinde sistemde son durumda kalan harmonikler Çizelge 5.47.'de ki gibidir;

Çizelge 5.47. Ölçülen Harmonik Değerleri.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
Filtreli Durum	%8.82	%2.83	%2.38	%1.72	%1.29	%2.55

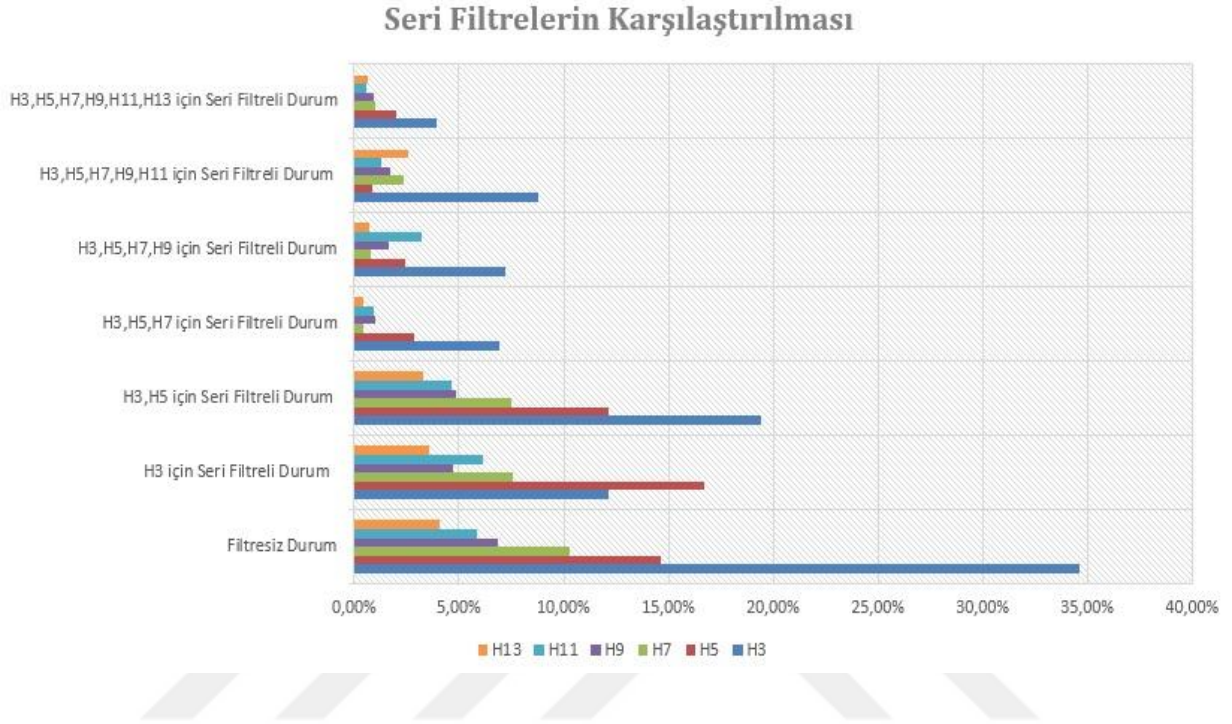
Çizelge 5.47.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %8.82'ye, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.83'e indirgenmiştir.

Seri pasif filtrelerin harmonikli devreye sırasıyla eklendikten sonra azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.48.'de ve Şekil 5.8.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.48. Ölçülen Harmonik Değerlerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması.

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin Seri Filtreli Durum	%12.11	%16.71	%7.55	%4.71	%6.12	%3.56
H_3 ve H_5 İçin Seri Filtreli Durum	%19.44	%12.15	%7.52	%4.88	%4.68	%3.32
H_3 , H_5 ve H_7 İçin Seri Filtreli Durum	%6.92	%2.88	%0.47	%1.01	%0.94	%0.42
H_3 , H_5 , H_7 ve H_9 İçin Seri Filtreli Durum	%7.19	%2.46	%0.76	%1.63	%3.25	%0.69
H_3 , H_5 , H_7 , H_9 ve H_{11} İçin Seri Filtreli Durum	%8.82	%2.83	%2.38	%1.72	%1.29	%2.55
H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} İçin Seri Filtreli Durum	%3.94	%2.04	%1.00	%0.92	%0.60	%0.62

Çizelge 5.48.'de görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.94'e, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %2.04'e indirgenerek en verimli olarak H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} için seri filtrede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Seri Pasif Harmonik Filtrelerin Karşılaştırılması.

H_3 , H_5 , H_7 , H_9 , H_{11} ve H_{13} için seri filtre, devredeki harmoniği efektif olarak azaltmasına rağmen kullanılan eleman sayısının ve boyutunun fazla olması bakımından filtre maliyeti açısından diğer seri pasif filtre tiplerine göre maliyeti daha fazla olacaktır. Modelleme esnasında üzerinde çalışılan devrede kaynak ve lineer olmayan yükler sabit tutulmuş, sadece tasarlanan farklı tiplerdeki filtreler sırasıyla harmonikli devreye eklenmiştir. Bu sayede tüm filtre tiplerinin aynı devre üzerinde ki harmoniği azaltma oranları karşılaştırılabildiği görülmüştür.

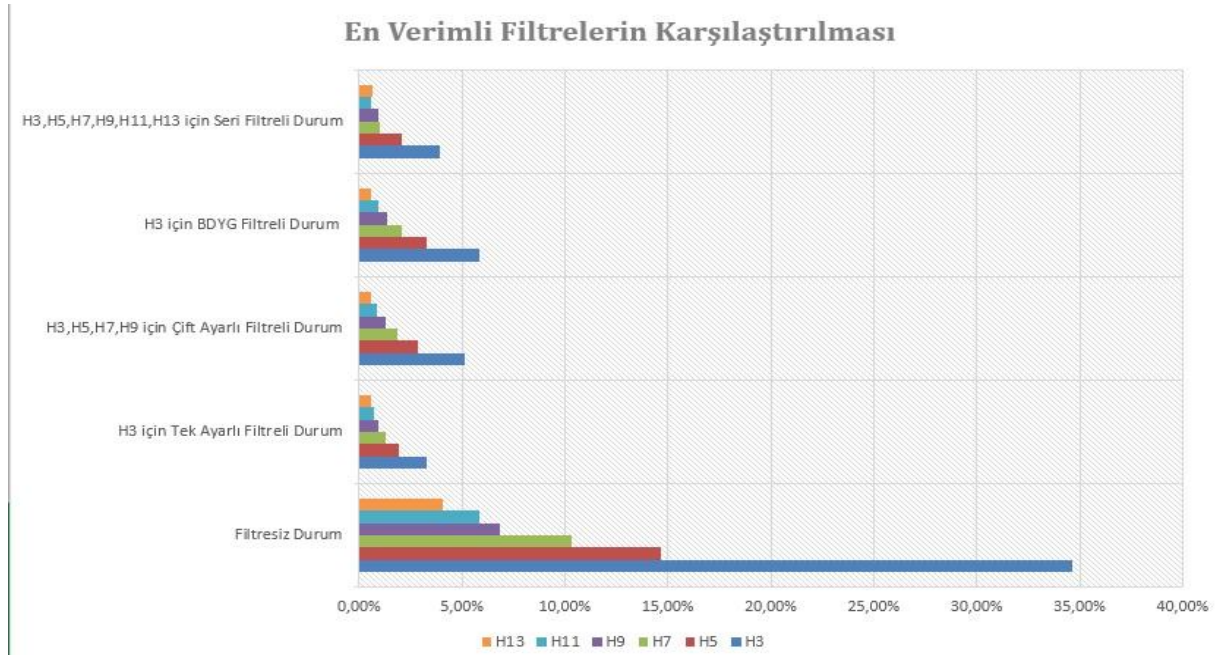
Tasarlanan tüm filtre tipleri arasında en verimlilerinin kendi aralarında azalttıkları harmonik oranları Çizelge 5.49.'de ve Şekil 5.9.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.49. Tasarlanan Tüm Filtre Tiplerinin En Verimlilerinin Kendi Aralarında Karşılaştırılması

	H_3	H_5	H_7	H_9	H_{11}	H_{13}
Filtresiz Durum	%34.62	%14.63	%10.31	%6.83	%5.84	%4.05
H_3 İçin Tek Ayarlı Filtreli Durum	%3.26	%1.90	%1.30	%0.96	%0.72	%0.56
H_3, H_5, H_7 ve H_9 İçin Çift Ayarlı Filtreli Durum	%5.11	%2.88	%1.87	%1.27	%0.88	%0.60
H_3 İçin BDYG Filtreli Durum	%5.87	%3.26	%2.07	%1.36	%0.90	%0.58
$H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}$ ve H_{13} İçin Seri Filtreli D.	%3.94	%2.04	%1.00	%0.92	%0.60	%0.62

Çizelge 5.49.'da görülebileceği üzere en büyük harmonik bozulmalardan 3. harmonik frekanstaki bozulma %34.62'den %3.26'ya, 5. harmonik bozulma ise %14.63'den %1.90'a indirgenerek en verimli olarak H_3 için tek ayarlı filtrede gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca kullanılan eleman sayısının ve boyutunun azlığı bakımından H_3 'e göre tek ayarlı pasif filtre maliyet olarak diğer tüm filtre tiplerine göre daha uygun olacaktır.

**Şekil 5.9.** En Verimli Filtre Tiplerinin Karşılaştırılması.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, lineer olmayan yükler sonucunda ortaya çıkan harmonikleri enerji standartlarında belirtilen en alt limite çekmek için MATLAB/SİMULİNK programında oluşturduğumuz devre üzerinde sırasıyla; Tek Ayarlı, Çift Ayarlı, Birinci Dereceden Yüksek Geçiren, İkinci Dereceden Yüksek Geçiren, Üçüncü Dereceden Yüksek Geçiren, C Tipi Yüksek Geçiren Paralel Pasif Filtreler ve Seri Pasif Filtreler denenmiştir. Harmonikli devreye uygulanan tüm pasif filtre tiplerinin amacı $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı $Z_{T0} = R$ olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmoniği kendi üzerinden toprağa akıtır. Gerçekleştirilen gözlemlerle en verimli harmonik filtrelemenin H_3 için Tek Ayarlı Pasif Filtreyle sağlandığı simülasyon sonuçlarına göre belirlenmiştir.

Güç sistemlerinde önem kazanan harmonik problemleri hakkında tüketicilerin daha çok bilinçlendirilmesi ve bu sayede ülkemizde gittikçe daha fazla karşılaştığımız enerji kalitesi sorununun üstesinden gelinmesinin sağlanması bu çalışmada amaçlanmıştır. Bu konuda büyük güç tüketicilerinin kesinlikle filtre kullanımına teşvik edilmeleri gerekmektedir.

Harmoniklerin azaltılması konusunda diğer yapılması gerekenler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Projelendirme safhasında şartnamelere uluslararası harmonik standartlarını sağlayacak değerler yerleştirilmeli ki uygulama safhasında malzeme seçiminde bu şartlar sağlansın.
- Sistemin genel topraklamasına standartlarda belirtildiği ölçüde özen gösterilmelidir.
- Sistemde lineer olmayan yüklerin olması durumunda sistem dengede olsa dahi eş kutuplu bileşenler olması nedeniyle üç ve üçün katları harmonik akımlarının toplamı aritmetik olacaktır ve nötr hattından geçen akım fazlar arası akımdan daha fazla olabilir. Bu durumda nötr iletkeninden geçen akım iletken kesit seçiminde ciddi dikkat gösterilmesini gerektirecektir. Nötr iletken kesitinin seçiminde önem gösterilecek hususlar TS HD 60364-5-52 standardında belirtilmiştir. Bu standarda göre; 3. harmonik bileşenin faz akımının % 15'inden daha büyük ise nötr iletkenin boyutu faz iletkenlerinin boyutundan daha küçük olmamalıdır.

- Sistemde seçilecek olan kapasitörlerin, anlık olarak aşırı boyutlara ulaşabilecek harmonik gerilimlerine dayanması için sistem geriliminden daha yüksek değerde seçilmelidir.
- Tüm elektronik cihazların etiket değerlerine, akım, gerilim v.b değerlerin yanında THD değerinin de yazılması zorunlu hale getirilmelidir ki elektronik cihaz üreticilerinin harmonikler üzerine çalışma ve dikkatleri çekilsin.



KAYNAKLAR

- [1] - Erdogan, N., “Aktif Güç Filtrelerinin İncelenmesi ve Matlab ile Bir Simülasyon Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1989.
- [2] – Akaigi, H., “New Trends in Active Filters for Improving Power Quality”, IEEE-PEDED Transactions, sayfa: 416-425, 1996.
- [3] – Argın, M., “Güç Sistem Harmonikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
- [4] – Kocatepe, C., “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [5] – Akbal, B., “Fabrika Beslemelerinde Harmonik Ölçümü ve Filtre Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
- [6] – Adak, S., “Elektrik Tesislerinde Üçüncü Harmonik”, ETMD Teknik Yayınlar, Sayı:58, Sayfa:80, 2013.
- [7] – Gezeğin, C., “Harmoniklerin Süzülmesi ve Tepkin Güç Kompanzasyonu İçin Melez Koşut Etkin Güç Süzeçleri”, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2006.
- [8] – IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models”, IEEE Transactions on Power Delivery, 18(2): 625–630, 2003.
- [9] – Ribeiro, P.F., “Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation”, Chapter 3: Distribution System, Loads and other Elements Modeling, IEEE PES Winter Meeting, 1-5 Feb. Florida, 1998.
- [10] – Koval, D.O. ve Carter, C., “Power Quality Characteristics of Computer Loads” IEEE Transactions on Industry Applications, 33(3): 613–620, 1997.
- [11] – IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Modeling Devices with Nonlinear Voltage-Current Characteristics for Harmonic Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, 19(4): 1802–1811, 2004.
- [12] – Arrilaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P. “Power System Harmonics”, John Willey, 1985.
- [13] – Dugan R.C., McGranaghan F.M., Beaty H.W., “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill, 1996.
- [14] – Şahin, Ö., “Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [15] – Yeşil, M., “Enerji Sistemleri Üzerindeki Nonlineer Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.

- [16] – Eroğlu, H., “Bir Dağıtım Őebekesinin Gc Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009
- [17] – Chapman, D., “The Cost of Poor Power Quality”, Power Quality Application Guide, Section 2.1, 2001.
- [18] – Keulenaer, H. D., “The hidden cost of poor power quality”, European Copper Institute, Power Quality Application Guide, 2004.
- [19] – Faltis, D., “For Most Facilities - Huge Cost Savings Available Through Reducing Harmonic distortion”, 2008.
- [20] – Almeida, A. T., “Power Quality Problems and New Solutions”, International Conference on Renewable Power and Power Quality, April 9 – 11, Vigo, 2003.
- [21] – Allan, G., “Electrical Transients in Power Systems”, Wiley interscience, sayfa: 233-298, Pennsylvania, 1970.
- [22] – Yılmaz, M., “Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [23] – Sezer, M., “c Fazlı Sistemlerde Paralel Aktif Filtre ” Yüksek Lisans Tezi İTÜ, 2006.
- [24] – TS EN 61000-4-13, “Elektromagnetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-7: Deneyler ve lme Teknikleri- - A.A. Enerji Ucunda Enerji Şebeke İŐaretlemesini İçeren Harmonikler ve Ara-Harmonikler– DŐuk Frekans BađıŐıklık Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara , 2004.
- [25] – Sucu, M., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi ,Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [26] – Stefan, Fassbinder, “Power Quality Application Guide : Harmonics-Passive Filters”, Leonardo Power Quality Initiative, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Orhun DÖŞ
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Ayrancı 16/10/1993
Telefon : 0(531)0100782
Faks : -
e-mail : orhun.dos@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ereğli Anadolu Lisesi, Ereğli, Konya	2011
Üniversite	: Bozok Üniversitesi, Yozgat	2015
Yüksek Lisans :		
Doktora :		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019-	Milli Savunma Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Enerji Kalitesi ve Sistemleri

YABANCI DİLLER

İngilizce
Portekizce

YAYINLAR

YAĞCI, M., DÖŞ, O., “Elimination Of Harmonics With Using Passive Filters In Power System” III International Conference on Engineering and Natural Sciences, Budapest, 2017 (Yüksek Lisans Yayını)