

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPAY EKOSİSTEM OPTİMİZASYON ALGORİTMASI
TABANLI DÖRDÜN GENLİK MODÜLASYONU İLE
SENKROFAZÖR ÖLÇÜMÜ

Alperen ŞENGÜL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPAY EKOSİSTEM OPTİMİZASYON ALGORİTMASI TABANLI DÖRDÜN GENLİK MODÜLASYONU İLE SENKROFAZÖR ÖLÇÜMÜ

Alperen ŞENGÜL

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI

Gün geçtikçe artan nüfus ile şebekeye bağlı yüklerin sayısı artmakta ve yükler çeşitlenmektedir. Arz-talep dengesindeki bu değişim nedeniyle sistem ve altyapı bileşenlerinin izlenmesi ve kontrolü ile ilgili gereklilikler ortaya çıkmaktadır. Fazör ölçüm birimleri, sistem üzerinde belirli noktalardan alınan ölçüm verileri birbirleri ile karşılaştırılarak sistem üzerinde meydana gelebilecek bozucu olayların önüne geçilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada, elektrik sistemlerinde güç kalitesi, verimlilik, kontrol ve koruma düzenlerini sağlamak için önemli bir faktör olan senkrofazörlerin doğru ve hassas ölçümünü sağlamak amacıyla Dördün Genlik Modülasyonu tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Öncelikle, güç sisteminde bulunan sinyallerin frekans değerleri Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon algoritması kullanılarak kestirilmiştir. Kestirilen frekans değeri baz alınarak Dördün Genlik Modülasyon yöntemi kullanılarak güç sinyali bu frekans değerinde pozitif ve negatif bileşenlerine ayrılmıştır. Daha sonra bu bileşenler hareketli ortalama filtre olan alçak geçiren filtreden süzülerek yüksek frekanslı bileşenlerin elenip sadece kestirilmek istenen frekansa ait bileşen bilgisi elde edilir. Önerilen bu yöntemin IEEE Std. C37.118.1 standardında tanımlanan M ve P sınıfı için performansı incelenmiştir.

2024, 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Dördün Genlik Modülasyonu, Fazör, Frekans Değişim Oranı, Senkrofazör, Toplam Vektörel Hata

ABSTRACT

MSc Thesis

SYNCHROPHASOR MEASUREMENT WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION BASED ON ARTIFICIAL ECOSYSTEM OPTIMIZATION ALGORITHM

Alperen ŞENGÜL

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric and Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Çağrı ALTINTAŞI

With the increasing population, the number of loads connected to the grid is rising, and the diversity of these loads is expanding. Due to this change in the supply-demand balance, requirements arise concerning the monitoring and control of system and infrastructure components. Phasor measurement units enable the prevention of disruptive events in the system by comparing measurement data taken from specific points on the system. This study proposes an algorithm based on Quadrature Amplitude Modulation to ensure accurate and precise measurement of synchrophasors, which are crucial for ensuring power quality, efficiency, control, and protection systems in electrical systems. Firstly, the frequency values of the signals in the power system are estimated using the Artificial Ecosystem-based Optimization algorithm. Based on the estimated frequency value and using the Quadrature Amplitude Modulation method, the power signal is decomposed into its positive and negative components at this frequency value. Then, these components are filtered using a low-pass filter to eliminate high-frequency components, ensuring that only the components belonging to the frequency estimated by the optimization algorithm are obtained. The performance of this proposed method has been investigated for M and P classes defined in IEEE Std. C37.118.1 standard.

2024, 81 Pages

Keywords: Quadrature Amplitude Modulation, Phasor, ROCOF, Synchrophasor, Total Vector Error (TVE)

TEŞEKKÜR

Bu tezin tamamlanmasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi birikimi ve deneyimleri sayesinde çalışma boyunca bana rehberlik eden saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞ'na teşekkürlerimi sunarım. Sizlerin rehberliği ve desteği olmadan, bu tez çalışmasını başarıyla tamamlamam mümkün olmazdı.

Ayrıca, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, her zaman yanımda hissettiğim aileme sevgi ve saygılarımı sunarım. Her zaman yanımda olduğunuz için minnettarım. Sizin adınıza bu tez çalışmasını tamamlamak benim için büyük bir onurdur.

Alperen ŞENGÜL

Haziran/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	7
3.1. Fazör.....	7
3.2. ROCOF.....	8
3.3. Toplam Vektörel Hata (TVE)	9
3.4. Fazör Ölçüm Birimleri İçin Tanımlanmış Standartlar	10
3.5. Fazör Ölçüm Birimi İçin Ölçüm Raporlaması	10
3.6. Fazör Ölçüm Birimlerinde Kararlı Durum ve Dinamik Koşullarda Test Gereksinimleri	11
3.6.1. Kararlı durum	11
3.6.2. Dinamik uyumluluk ölçüm bant genişliği.....	13
3.6.3. Dinamik uyumluluk – frekans rampa testi	14
3.6.4. Dinamik uyumluluk - faz açısı ve genlik için adım testi	15
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	17
4.1. Dördün Genlik Modülasyonu.....	17
4.2. Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon Algoritması	22
4.3. Hareketli Ortalama Filtre	24
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	26
5.1. Kararlı Durum Test Sonuçları	26
5.1.1. Frekans sapması, genlik ve faz açısı testleri	27
5.1.2. Harmonik bozulma testi	29
5.2. Dinamik Uyumluluk-Ölçüm Bant Genişliği Test Sonuçları	29

5.3. Dinamik Uyumluluk-Faz Açısı ve Genlik için Adım Sinyali Test Sonuçları.....	30
6. SONUÇ.....	32
KAYNAKLAR	33
EKLER.....	37
Ek-1. Önerilen Yöntem İçin Simülasyon Sonuçları.....	38
Ek-2. 24 Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar.....	82



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. PMU Blok Diyagram	4
Şekil 3.1. IEEE C37.118.1-2011 için Senkrofazör Temsili	7
Şekil 4.1. Dördün Genlik Modülasyonu Genlik ve Faz Açısı Hesabı Blok Diyagram...	17
Şekil 4.2. Temel Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=f$)	20
Şekil 4.3. 2. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=2f$)	21
Şekil 4.4. 3. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=3f$)	21
Şekil 4.5. 4. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=4f$)	22
Şekil 4.6. Hareketli Ortalama Filtre Blok Diyagram	25

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. PMU Raporlama Oranı	10
Tablo 3.2. Kararlı Durum Frekans Sapma Test Gereksinimleri	12
Tablo 3.3. Kararlı Durum Harmonik Bozulma Test Gereksinimleri	12
Tablo 3.4. Kararlı Durum Bant Dışı Girişim Test Gereksinimleri	12
Tablo 3.5. Dinamik Uyumluluk Modülasyon Test Gereksinimleri	13
Tablo 3.6. Dinamik Uyumluluk Frekans Rampası Test Gereksinimleri.....	14
Tablo 3.7. Dinamik Uyumluluk Tepki Süresi ve Gecikme Süresi için Test Gereksinimleri.....	15
Tablo 3.8. Dinamik Uyumluluk Frekans ve ROCOF Tepki Süresi için Test Gereksinimleri.....	16
Tablo 4.1. QAM Tekniği ile Gerilim ve Faz Açısı Hata Oranı.....	20
Tablo 5.1. MUSIC Algoritması İçin Frekans Test Sonuçları.....	27
Tablo 5.2. Kararlı Durum Frekans Testi İçin Simülasyon Sonuçları.....	28
Tablo 5.3. Kararlı Durum-Genlik Testi İçin Simülasyon Sonuçları	28
Tablo 5.4. Kararlı Durum-Faz Açısı Testi İçin Simülasyon Sonuçları.....	28
Tablo 5.5. Kararlı Durum-Harmonik Bozulma Testi İçin Simülasyon Sonuçları	29
Tablo 5.6. Dinamik Uyumluluk-Ölçüm Bant Genişliği Testi İçin Simülasyon Sonuçları	30
Tablo 5.7. Dinamik Uyumluluk-Faz Açısı ve Genlik Adım Sinyali Simülasyon Sonuçları	31

SİMGELER ve KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda verilmiştir.

Simgeler

ω	Açısal Frekans
A	Amper
X_1, X_2 ve X_3	Faz 1, 2 ve 3 için Test Sinyalleri
φ	Faz Açısı
k_a	Faz Açısı Modülasyon Katsayısı
f	Frekans
R_f	Frekans Eğim Oranı
k_x	Genlik Modülasyon Katsayısı
Hz	Hertz
ms	Milisaniye
f_m	Modülasyon Frekansı
X_q	QAM Negatif Bileşen
X_d	QAM Pozitif Bileşen
f_s	Raporlama Oranı
s	Saniye
X_m	Sinyal Genlik Değeri
X'_r	Tahmin Fazör Gerçek Kısım
X'_i	Tahmin Fazör Sanal Kısım
X_r	Teorik Fazör Gerçek Kısım
X_i	Teorik Fazör Sanal Kısım
V	Volt
t	Zaman

Kısaltmalar

ADC	Analog Digital Converter
AEO	Artificial Ecosystem-based Optimization
AGS	Alçak Geçiren Süzgeç
DFT	Discrete Fourier Transform
FE	Frequency Error
FÖB	Fazör Ölçüm Birimi
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MUSIC	Multiple Signal Classification
PMU	Phasor Measurement Unit
PPS	Pulse Per Second
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RFE	ROCOF Error
ROCOF	Rate of Change of Frequency
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
Std.	Standard
TVE	Total Vector Error
UTC	Coordinated Universal Time

1. GİRİŞ

Şebekeler, zamanla birlikte yüklerin artışı ve çeşitlenmesi ile sürekli olarak yeni yapıya uyum sağlama amacıyla değişim süreçleri yaşamaktadır. İdeal sistem koşulları içerisinde şebeke sinyali, sinyalin üretimi, iletimi ve dağıtımı esnasında sabit frekansta ve saf sinüs formunda olmalıdır. Güç kalitesi terimi şebeke sinyalinin şebeke üzerinde herhangi bir noktada standartlar dahilinde kalması ve saf sinüs formunda olması şeklinde tanımlanabilir. Bununla birlikte sinyalde meydana gelebilecek bozucu etkiler (kesinti, gerilim darbeleri, dalga şeklinin sinüs formundan uzaklaşması, frekans değişimleri vb.) güç kalitesini olumsuz etkileyen durumlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları ve nonlineer elemanlar nedeniyle meydana gelen bozucu etkiler sistemin izlenmesi ve kontrolü için temel nedenlerdir. Geçmiş zamanlarda şebekelerin daha az karmaşık yapıya sahip olması nedeniyle tahmin edilebilirlik daha kolaydı ancak karmaşıklaşan yapı, izleme ve kontrol sistemlerinde gelişimi beraberinde getirmiştir. Güç sisteminin değişken şartlar altında kararlılığını koruyabilmesi ve bozucu etkiye maruz kalması durumunda gerekli prosedürlerin devreye alınarak standartlar dahilinde bulunan çalışma koşullarına geri dönebilmesi için izleme ve kontrol sistemleri önemli bir etkidir. Güç sisteminde büyük bir bozucu etki olduğunda, ölçüm ve kontrol sistemi, etkiyi sınırlamalı, sistem dalgalanmasını durdurmalı ve gerekli acil durum önlemlerini devreye sokarak sistemi normal işletme koşullarına geri döndürebilmelidir (İpek, 2008). Fazör ölçüm birimleri, şebeke üzerinde gerilim ve akım sinyallerinin anlık olarak genlik, faz açısı ve frekans değerlerini ölçmek için tasarlanmış, gerçek zamanlı ve yüksek hassasiyet özelliklerine sahip cihazlardır. Şebeke üzerinde belirli noktalarda bulunan fazör ölçüm birimleri sayesinde birçok noktadan alınan veriler birbiri ile karşılaştırılarak sistem üzerinde meydana gelebilecek olumsuzlukların önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle sistem sürekli olarak izlenebilmekte, arızalar kısa sürede tespit edilerek güç kalitesinde süreklilik sağlanabilmektedir. İzleme sorunları, koruma cihazlarının yanlış çalışmasına yol açarak tüketicilerin enerjisiz kalmasına ve bu sebeple ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Baldick, 2008).

Bu çalışma ile senkrofazör ölçümünde daha hassas ölçümler yapılarak olumsuz etkilerin önüne geçilmesi amacıyla IEEE C37.118.1-2011 ve C37.118.1a-2014 standartlarında belirtilen *P* ve *M* sınıfı sistemler için performans analizi yapılmıştır. Öncelikle sinyale ait

frekans bileşeni Yapay Ekosistem Tabanlı optimizasyon algoritması kullanılarak kestirilmiştir. Burada elde edilen frekans bilgisi kullanılarak sinyal, Dördün Genlik Modülasyonu yöntemi ile pozitif ve negatif bileşenlere ayrılır. Alçak geçiren hareketli ortalama filtre kullanılarak sinyal süzülür ve istenilen frekanstaki sinyale ait anlık gerilim-faz bilgisi elde edilir. Çalışma benzetim ortamında IEEE Std. C37.118.1 standardında belirtilen kriterlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin P ve M sınıfı senkrofazör ölçümler doğruluk kriterlerini karşıladığı görülmüştür.

Tez yapısı:

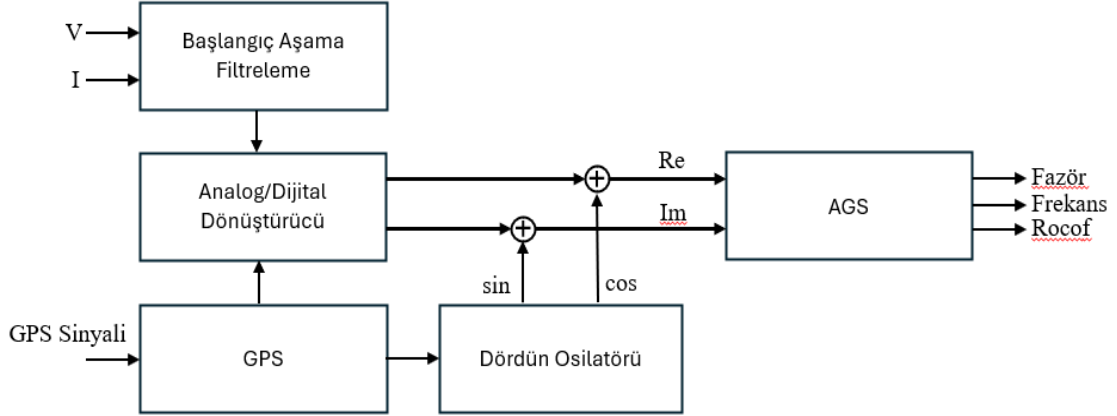
Bölüm 1’de güç sistemleri ve şebekelerde yaşanan olumsuz etkilerden bahsedilmiştir. Fazör Ölçüm Birimleri ile ilgili detay bilgiler öncesinde sistem içerisinde kullanılacak temel kavramlar hakkında bilgilendirme Bölüm 2’de yapılmıştır. Bölüm 3 Fazör Ölçüm Birimleri hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve standart gereksinimleri ile ilgili limitler hakkında bilgi vermektedir. Bölüm 4’te senkrofazör ölçümü için bu çalışmada kullanılacak olan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Simülasyon sonuçları ve bu sonuçlara ait grafikler Bölüm 5 ve Ek 1’de verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Fazör, elektrik şebekesinde bulunan sinüs dalgalarının hem büyüklüğünü hem de faz açısını temsil eden karmaşık bir sayı olarak ifade edilmektedir. Elektrik güç sistemlerinde sinyallerin çeşitli elektriksel büyüklüklerini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Fazör ölçüm birimleri, elektrik şebekesini sürekli olarak izler ve bu verileri senkronize edilmiş bir şekilde (genellikle UTC'ye göre) yüksek hızda toplar. Bu veriler, güç sistemlerindeki gerilim dalgalanmaları, frekans kaymaları gibi sistem üzerinde oluşabilecek olumsuz durumları izlemek ve analiz etmek için kullanılır. Bu ölçümler arz ve talebin eşitlenebilmesi açısından önemlidir. Eğer bu durum sağlanmazsa frekans dengesizlikleri şebekede strese neden olabilir ve bu da elektrik kesintilerinin potansiyel bir nedeni olabilir. Senkrofazör ve fazör ölçüm birimi terimlerinin karıştırılmasına karşın senkrofazör, ölçülen değer olarak tanımlanırken, fazör ölçüm birimi ise bir ölçüm cihazı olarak tanımlanır.

Fazör ölçüm birimleri, şebekelerde genlik, frekans ve faz değerlerini hızlı bir şekilde ölçerek, uzak noktalarda bulunan sistemlerin ortak bir zamanda etiketlenmesine olanak tanır. Bu ölçümler, şebeke üzerindeki olumsuz etkilerin hızlı bir şekilde tespit edilmesine yardımcı olur. Fazör ölçüm birimleri, saniyede 120 ölçüme kadar raporlama yapabilme yeteneğiyle SCADA sistemlerine göre çok daha yüksek bir raporlama hızına sahiptir. PMU'lar tarafından analog sinyal şeklinde ölçülen AC dalga formları, her faz için bir Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) tarafından dijital forma dönüştürülür. Bu süreçte, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) referans kaynağıyla senkronize olan bir faz kilitli osilatör kullanılır. Böylece zaman damgalı fazörler, alıcıya iletilir. Özetle, fazör ölçüm birimleri enerji şebekesinin sağlığını izlemek ve olası sorunları belirlemek için önemli araçlardır. Bu sayede, şebeke performansının optimize edilmesi ve kesintilerin minimize edilmesi mümkün olur. Gelişen teknoloji ve zamanla değişen sistem gereksinimleri ile güç sistemlerinin daha yüksek hassasiyetle ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için sistem üzerinde çok sayıda PMU kurulması ihtiyacı oluşmaktadır. Böylece sistem üzerinde iyileştirici ve önleyici kontrol düzenlerinin uygulanması artacaktır. Fazör ölçüm birimlerinin yalnızca belirli istasyonlarda kurulması yerine ağ üzerinde çok daha çeşitli

yerlere kurulması gerekmektedir. Şekil 2.1’de fazör ölçüm birimine ait blok diyagram gösterilmektedir (Gurusinghe vd. 2013).



Şekil: 2.1. PMU Blok Diyagram

PMU içerisinde gerilim (V) ve akım (I) sinyalleri, girişim sinyallerini azaltmak için bir ön uç kenar yumuşatma filtresinden geçirilir. Ardından bu sinyaller bir A/D dönüştürücü (ADC) ile sayısallaştırılır ve bununla birlikte senkronize bir GPS saati kullanılarak sabit bir örnekleme hızı sağlanır. Oluşturulan sayısal sinyaller karmaşık çarpma yöntemiyle nominal frekans taşıyıcısıyla işlenir, bu sayede gerçek ve sanal kısımlar elde edilir. Elde edilen bileşenler bir alçak geçiren filtre ile işlenir. Sonuç olarak elde edilen gerilim, akım fazörleri ve faz açısı, frekans değişim hızı gibi büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılır. PMU, izleme sistemlerinde sistemin performans parametreleri hakkında da bilgi sağlar (IEEE C37.244-2013).

Senkrofazör hesaplamaları için daha önceki çalışmalarda DFT tabanlı algoritmalar (Belega ve Dallet, 2009; Macii vd, 2012; Belega ve Petri, 2013; Orallo, 2013; Romano ve Paolone, 2014; Zhan vd., 2016), Kalman Filtre (KF) (Wood vd., 1985; de Sa ve Pedro, 1991; de la O Serna ve Rodriguez-Maldonado, 2011; Liu, 2012; Ferrero vd., 2016), En Küçük Kareler (EKK) yöntemi (de la O Serna, 2007; Premierlani vd., 2007; Das ve Sidhu, 2013; Belega vd., 2015a; Belega vd., 2015b), Sıfır Geçiş (Begovic, 1993; Moore vd., 1996), Faz Kilitlemeli Döngü ve Parçacık Dönüşümü yöntemleri de kullanılmıştır. Sıfır geçiş yöntemi, bir elektrik sinyalinin sıfır geçiş anlarını tespit ederek, bu geçişler arasındaki zaman aralıklarını kullanıp sinyalin frekansını hesaplamaya dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem, elektrik sinyalinin temel frekansını doğrudan belirlemek için

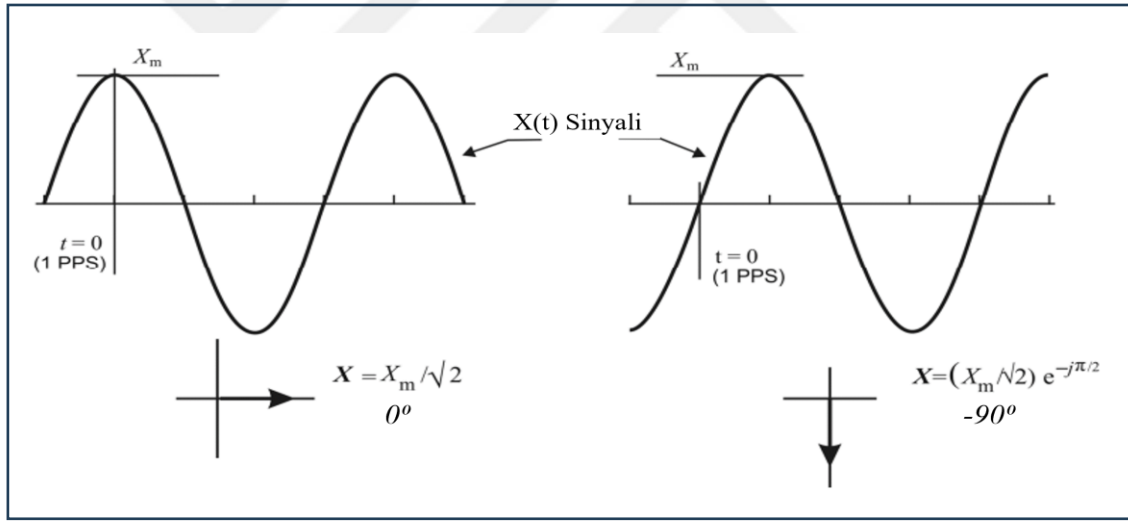
kullanılır. Sinyalin harmonik ve gürültü gibi olaylardan etkilenmesi durumlarında sıfır geçiş noktaları belirlenirken hatalar oluşabilir. Bununla birlikte sıfır geçiş noktalarının en erken yarım döngünün tanımlanmasının ardından belirlenebilmesi nedeniyle frekans değişikliklerinin tespitinde yavaş kalabilmektedir. DFT, zaman alanında verilen bir sinyalin frekans alanına dönüştürülmesini sağlar. Bu dönüşüm ile sinyalin temel frekans bileşenleri ortaya çıkar. KF’de belirsizlik içeren bir sistemin durumunu ve gelecekteki davranışını tahmin etmek için kullanılan bir matematiksel modeldir. Senkrofazörlerin tahmininde, sistem dinamiği ve gözlemlenen veriler arasındaki ilişkiyi modellemek için sıklıkla kullanılmaktadır. EKK metodunda gözlem verileriyle bir model arasındaki uyumu ölçmek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Senkrofazörlerin tahmininde doğrusal bir model oluşturularak model parametreleri en küçük karelerle tahmin edilir. Örneęin, ölçüm yapılacak bir test sinyalinin gerçek değeri ile model arasındaki farkın karelerinin toplamını en aza indirmeyi amaçlar. Burada farkların karelerinin toplamının en küçük olması, modelin gözlemlenen verilere ne kadar yakın olduğunu gösterir. DFT ile sinyalin temel frekans bileşenleri belirlenebilirken Kalman Filtre ve En Küçük Kareler Yöntemleri ile daha karmaşık sinyaller analiz edilebilir. DFT doğrudan hesaplama imkânı sağlarken Kalman Filtre ve En Küçük Kareler Yöntemi modellemeye ihtiyaç duymaktadır. Fakat durağan olmayan sinyallerde ve şebeke sinyalinin nominal değerinde olmadığı durumlarda DFT’nin performansı oldukça azalmaktadır. KF gerçek zamanlı verilere dayalı tahminler yapmak için kullanılır. Bu yöntem, bir sistemin mevcut durumundaki bilgiyi güncelleyecek ve gelecekteki durumu tahmin edecek şekilde çalışır. Gerçek zamanlı olarak toplanan veriler, sürekli olarak filtrelenir ve sürekli olarak tahminler güncellenir. EKK ve KF belirli bir zamanda veya süre içinde toplanan verilere dayanarak analiz yapar. KF’nin ve EKK’nın kendisine ait parametrelerin durağan olmayan sinyallerde belirlenmesinin zorluğu ve gürültülü sinyallerdeki düşük performansı dezavantaj olarak ayrıca ortaya çıkmaktadır. Faz Kilitlemeli Döngü, bir senkrofazörün çıkış frekansını referans frekansına kilitlemek ve faz uyumunu sağlamak için kullanılabilir. Dalgacık Dönüşümü, Fourier Dönüşümü gibi sinyalin frekans eksenini analizini sağlamaktadır. Fourier dönüşümü, bir sinyalin frekans bileşenlerini belirlerken zamana göre bilgi sağlamaz. Dalgacık dönüşümü ise sinyalin hem frekans hem de zaman alanlarında ayrıntılı bir analizini sağlar. Böylece sinyalin zaman içindeki frekans bileşenlerinin değişimi de elde edilir. Dolayısıyla, dalgacık dönüşümü, zamana ve

frekansa göre daha yüksek çözünürlüklü bilgi sağlar. Senkrofazör sinyalinde beklenmeyen frekans veya faz değişikliklerini tespit etmek için Dalgacık Dönüşümü kullanılabilir. Ancak dalgacık dönüşümü kendi sistemi içerisinde bir den fazla alçak geçiren bir filtreleme sistemine sahip olması analizlerde gecikmeye sebep vermektedir. Senkrofazör için literatürde önerilen bir diğer yöntem Prony yöntemi (Gökoğlu, 2019). Bu yöntemin en önemli dezavantajı sinyalin içerisindeki frekans bileşenleri birbirine çok yakın ise Prony'nin performansı oldukça azalmaktadır.

Fazör ölçüm birimleri fiyat açısından dezavantajlı durumda bulunması nedeniyle kritik sistemlerde kullanırlar, yaygın olarak kullanılmamaktadır (Guzman vd., 2006). Elektrik işletmeleri, koruması ve kontrol sorunlarını çözmek için fazör ölçüm birimlerini önemli trafo merkezlerine kurmaktadır (Schweitzer, 2010). Bu nedenle PMU yerleşim problemleri de ayrıca çalışma konusudur. PMU, tek başına fiziksel bir birim olarak kullanılabilirken röle gibi fiziksel birimlere ile kompakt bir birim de olabilir (Benmouyal vd., 2004; Gurusinghe vd., 2012).

3. KURAMSAL TEMELLER

Fazör ölçüm birimlerinin 1988 yılında Dr. Arun G. Phadke ve Dr. James S. Thorp tarafından icadı ile, Steinmetz'in fazör hesaplama tekniği, ortak bir zaman referansı ile senkronize edilerek gerçek zamanlı fazör ölçümlerinin hesaplanmasına dönüştü. Bu nedenle senkronize fazör ölçümlerine senkrofazörler adı verilmektedir. Fazör ölçüm biriminin ilk prototipleri Virginia Tech'te üretildi ve Macrodyne ile fazör ölçüm birimini 1992 yılında üretmiştir (Phadke, 2002). Güç sistemlerinde senkrofazör ölçüm yeterliliklerinin belirlenebilmesi için oluşturulan IEEE C37.118.1-2011 standardında senkrofazör terimi, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi zamanda mutlak bir noktaya göre gerilim ve akım sinyallerinin büyüklüğü ve açısı şeklinde tanımlanır (IEEE C37.118.1-2011). Senkrofazör ölçümü, elektrik güç sistemlerinde arızaların tespiti ve sistem kararlılığının izlenmesi için kullanılan yaygın bir araçtır. Senkrofazör ölçümleri için Fazör Ölçüm Birimleri (PMU) tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. IEEE C37.118.1-2011 için Senkrofazör Temsili

3.1. Fazör

Fazör, 19. yüzyılın sonlarına doğru C. Proteus STEINTMETZ tarafından Oliver HEAVISIDE'in operasyonel hesabından ilham alınarak ortaya çıkmıştır (Yang ve Lee, 2008; Robbins ve Miller, 2012). Fazör gösterim, sinüsoidal bir sinyalin genlik ve faz bilgilerini içeren formülasyon çeşididir.

Alternatif akımın fazör olarak ifadesi;

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (2.1)$$

$$V(t) = V_m \cos(2\pi f_0 t + \alpha) \quad (2.2)$$

Euler Yasası;

$$e^{\pm j\alpha} = \cos(\alpha) \pm j \sin(\alpha) \quad (2.3)$$

$$\cos(\alpha) = \operatorname{Re}(e^{j\alpha}), \sin(\alpha) = \operatorname{Im}(e^{j\alpha}) \quad (2.4)$$

$$V = V_m e^{j(2\pi f_0 t + \alpha)} = V_m \angle \alpha \quad (2.5)$$

3.2. ROCOF

Şebeke frekansının zamana göre türevi olarak ifade edilen ROCOF terimi frekans değişim hızı olarak tanımlanmaktadır. Elektrik şebekesindeki frekans, tüketim ve üretim dengesizlikleri gibi durumlara göre değişebilir. ROCOF, bu frekans değişimlerinin hızını ölçerek, güç sistemlerinin kalite değerlendirmesinde önemli bir parametre olarak kabul edilir. Bir PMU frekans ve ROCOF değerini hesaplayabilme ve aynı zamanda raporlayabilme özelliğine sahip olmalıdır. Eş. 2.6 şeklinde verilen bir sinyal için;

$$x(t) = X_m \cos(\vartheta(t)) \quad (2.6)$$

Frekans değeri Eş. 2.7 şeklinde tanımlanır;

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\vartheta(t))}{dt} \quad (2.7)$$

Bu durumda ROCOF, Hz/s cinsinden ölçülerek Eş. 2.8 şeklinde ifade edilebilir.

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Senkrofazör ölçümü her zaman sistem nominal frekansına (f_0) göre yapılır.

$\vartheta(t) = w_0 t + \varphi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t)$ şeklinde yazılırsa Eş. 2.7 ile ifade edilen frekans formülü Eş. 2.9 ile gösterilen hale gelir.

$$f(t) = f_0 + \frac{d\left(\frac{\varphi(t)}{2\pi}\right)}{dt} = f_0 + \Delta f(t) \quad (2.9)$$

Burada $\Delta f(t)$, frekansın nominal değerinden sapma miktarıdır. Böylece *ROCOF* değeri Eş. 2.10 ile ifade edildiği gibi yeniden düzenlenebilir.

$$ROCOF(t) = \frac{d^2\left(\frac{\varphi(t)}{2\pi}\right)}{dt^2} = \frac{d(\Delta f(t))}{dt} \quad (2.10)$$

Frekans ve ROCOF ölçümleri için ölçüm hata değerleri Eş. 2.11 ve Eş. 2.12 ile verilen eşitlikler ile belirlenmektedir.

Frekans Hatası;

$$FE = |f_{gercek} - f_{tahmin}| \quad (2.11)$$

ROCOF;

$$RFE = |(df/dt)_{gercek} - (df/dt)_{tahmin}| \quad (2.12)$$

Burada gerçek ve tahmin değerleri zaman kaynağı tarafından sağlanan aynı zaman etiketine sahip değerler için hesaplanır.

3.3. Toplam Vektörel Hata (TVE)

Toplam vektörel hata, kestirilen fazör değerleri ile gerçek fazör değeri arasındaki farkın yüzdesel olarak ifadesini gösterir. Bu fark, genellikle bir hata ölçütü olarak kullanılır ve hesaplama yönteminin doğruluğunu değerlendirmede yardımcı olur. Bunun için hesaplama Eş. 2.13 şeklinde ifade edilir.

$$TVE = \sqrt{\frac{\left((X'_r(n) - X_r(n))\right)^2 + \left((X'_i(n) - X_i(n))\right)^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \quad (2.13)$$

Burada X'_r ve X'_i ifadeleri fazör ölçüm birimi tarafından hesaplamalar sonucu ortaya çıkan tahmini fazör değerlerini, X_r ve X_i değerleri gerçek fazör değerlerini temsil etmektedir.

3.4. Fazör Ölçüm Birimleri İçin Tanımlanmış Standartlar

Senkrofazörler için öncelikle IEEE 1344 standardı 1995'te tanımlanmış ve 2001 yılında yeniden onaylanmıştır. Bu standart yıl, zaman kalitesi, yaz saati uygulamaları ve yerel saat farkı bilgilerini kapsayacak şekilde senkrofazörlerin parametrelerini tanımlayan standarttır. Bu standart 2005 yılında yerini, tam bir revizyon olan ve elektrik güç sistemlerinde PMU'ların kullanımına ilişkin konuları ele alan IEEE C37.118-2005'e bıraktı (Zhang vd., 2007). 2011 yılında IEEE C37.118-2005 standardını iki parçaya ayıran yeni bir sürümü yayımlanmıştır. Bunlar, C37.118-1 ve C37.118-2 şeklindedir. 2014 yılında C37.118.1'e ilişkin bir değişiklik yayımlanarak yerini IEEE C37.118.1a-2014 almıştır (C37.118.1a-2014).

3.5. Fazör Ölçüm Birimi İçin Ölçüm Raporlaması

PMU, senkrofazör, frekans ve frekans değişim hızı ölçümlerini sabit bir örnekleme hızında rapor edecek şekilde tasarlanmalıdır. Üç ölçümde aynı raporlama süresinde ölçülmeli ve rapor edilmelidir.

IEEE C37.118.1-2011 için 50 Hz ve 60 Hz'lik sistemler için belirtilen PMU raporlama oranları Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. PMU Raporlama Oranı

Sistem Frekansı	50 Hz			60 Hz					
Raporlama Oranı (f_s)	10	25	50	10	12	15	20	30	60

Raporlama oranı seçimi PMU tasarımcısı tarafından belirlenmektedir. 50 Hz'lik sistemler için saniyede 10, 25 ve 50, 60 Hz sistemler için saniyede 10, 12, 15, 20, 30, ve 60 örneklik seçenekler mevcuttur. Bunun dışında 100/s ve 120/s gibi yüksek raporlama oranları da

desteklenirken 1/s gibi 10/s' den küçük raporlama oranlarının kullanımına da izin verilir. 10/s küçük raporlama oranlarına sahip tasarımlarda IEEE C37.118.1-2011'de belirtilen dinamik koşulların sağlanmasına gerek yoktur. Fazör ölçüm birimlerinin IEEE C37.118.1-2011 gereksinimlerini sağlaması için test koşulları, performans sınıfları, kararlı durum ve dinamik koşullar için test gereksinimleri aşağıda açıklanmıştır. Bu standart iki adet performans sınıfı açıklar. P sınıf ve M sınıfı. Bunlar farklı uygulama ihtiyaçları için performans özelliklerini belirtmektedir. P sınıfı, hızlı yanıt gerektiren uygulamalar için tercih edilir ve açık bir filtreleme gerektirmemektedir. Bu performans sınıfı hızlı yanıt gerektirdiğinden koruma düzenleri için tercih edilir. M sınıfı ise gürültülerden etkilenebilecek ve yüksek raporlama hızına ihtiyaç duymayan uygulamalar için oluşturulmuştur. Her uygulamanın ihtiyaçları farklı olduğundan, kullanıcıların performans sınıfını uygulama gereksinimlerine göre seçmeleri gerekir. Bir fazör ölçüm biriminin belirli bir sınıfa uygun olduğunu kabul edebilmek için, fazör ölçüm birimi o sınıf için belirtilen tüm gereklilikleri karşılamalıdır.

3.6. Fazör Ölçüm Birimlerinde Kararlı Durum ve Dinamik Koşullarda Test Gereksinimleri

TVE, FE ve ROCOF için ölçüm hataları hesaplanırken testler minimum 5 sn'lik süre boyunca raporlanır. Temel frekans değeri aksi belirtilmediği takdirde her zaman 50 Hz olan nominal frekansı temsil etmektedir.

3.6.1. Kararlı durum

Kararlı durum için hesaplanan FE, TVE ve ROCOF değerleri X_m , w ve ϕ değerlerinin test süresi boyunca sabit tutulduğu durumu ifade etmektedir. Kararlı durum testleri frekans sapması, harmonik bozulma ve bant dışı girişim testleri ile gerçekleştirilir. Bu testler için standart gereksinimleri Tablo 3.2 ile Tablo 3.4 arasında verilmiştir.

Tablo 3.2. Kararlı Durum Frekans Sapma Test Gereksinimleri

P Sınıfı					M Sınıfı			
Referans Büyüklik	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)
Nominal Sistem Frekans	± 2 Hz	1	0,005	0,4	Fs<10 için ± 2 Hz	1	0,005	0,1
					10≤Fs≤25 için $\pm$ Fs/5			
					Fs≥25 için ± 5 Hz			

Tablo 3.3. Kararlı Durum Harmonik Bozulma Test Gereksinimleri

P Sınıfı				M Sınıfı			
Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)
50. Harmoniğe Kadar Nominal Gerilimin 1% Kadarı fs≤20	1	0,005	0,4	50. Harmoniğe Kadar Nominal Gerilimin 10% Kadarı fs≤20	1	0,005	7,85

Tablo 3.4. Kararlı Durum Bant Dışı Girişim Test Gereksinimleri

P Sınıfı				M Sınıfı			
Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)
-	-	-	-	Fs≥10 için Giriş Sinyali Büyükliğünün 10%'u.	1,3	0,01	1,57
				Fs<10 için Gereklilik Yoktur			

3.6.2. Dinamik uyumluluk ölçüm bant genişliği

Bu test sinyalin genlik ve faz açısının modüle edilmesiyle yapılmaktadır. Giriş test sinyalleri Eş. 3.1, Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 ile verilmiştir.

$$X_1 = V_m[1 + k_x \cos(wt)] * \cos[w_0t + k_a \cos(wt - \pi)] \quad (3.1)$$

$$X_2 = V_m[1 + k_x \cos(wt)] * \cos[w_0t - 2\pi/3 + k_a \cos(wt - \pi)] \quad (3.2)$$

$$X_3 = V_m[1 + k_x \cos(wt)] * \cos[w_0t + 2\pi/3 + k_a \cos(wt - \pi)] \quad (3.3)$$

Burada X_1 , X_2 ve X_3 3 faz sistem için faz sinyallerini, w_0 , nominal açısal frekansı, w , modülasyon açısal frekansını, k_x , genlik modülasyon çarpanı, k_a , faz açısı için modülasyon çarpanını ifade etmektedir.

Bu test için yukarıda tanımlanan giriş sinyallerinde $t=nT$ raporlama zamanlarında frekans Eş. 3.4 ile ifade edilir.

$$f(t) = \frac{w_0}{2\pi} - k_a(w/2\pi) \sin(wnT - \pi) \quad (3.4)$$

Bu test için standart gereksinimleri Tablo 3.5 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Dinamik Uyumluluk Modülasyon Test Gereksinimleri

P Sınıfı						M Sınıfı			
Seviye	Referans Büyüklik	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)	Aralık	TVE _{max} (%)	FE _{max} (Hz)	ROCOF _{max} (Hz/sn)
$k_x=0,1$ $k_a=0$	Nominal Frekans Değerinde Giriş Geriliminin 100% Kadar	Modülasyon Frekansı 0,1'den Fs/10 veya 2 Hz'e Kadar	3	0,03	0,06	Modülasyon Frekansı 0,1'den Fs/5 veya 5 Hz'e Kadar	3	0,12	2,3
$k_x=0$ $k_a=0,1$	Nominal Frekans Değerinde Giriş Geriliminin 100% Kadar	Modülasyon Frekansı 0,1'den Fs/10 veya 2 Hz'e Kadar	3	0,03	0,06	Modülasyon Frekansı 0,1'den Fs/5 veya 5 Hz'e Kadar	3	0,12	2,3

3.6.3. Dinamik uyumluluk – frekans rampa testi

Güç sisteminde frekans, arz-talep dengesizlikleri ve sistem arızaları nedeniyle değişkenlik gösterebilir. Bu test sistem frekansına doğrusal eğim testi uygulanarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada önerilen yöntem için frekans rampa test koşulları sağlanamamıştır. Burada giriş test sinyalleri Eş. 3.5, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 ile verilmiştir.

$$X_1 = V_m * \cos[w_0 t + \pi R_f t^2] \quad (3.5)$$

$$X_2 = V_m * \cos[w_0 t - 2\pi/3 + \pi R_f t^2] \quad (3.6)$$

$$X_3 = V_m * \cos[w_0 t + 2\pi/3 + \pi R_f t^2] \quad (3.7)$$

R_f : Frekans Eğim Oranı (Hz/sn)

Bu test için yukarıda tanımlanan giriş sinyallerinde $t=nT$ raporlama zamanlarında frekans Eş. 3.8 ile ifade edilir.

$$f(t) = f_0 + R_f(t - \frac{\Delta t}{2}) \quad (3.8)$$

Bu test için standart gereksinimleri Tablo 3.6 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Dinamik Uyumluluk Frekans Rampası Test Gereksinimleri

P Sınıfı					M Sınıfı			
Frekans Eğim Oranı R_f (Hz/sn)	Aralık	FEmax (Hz)	TVEmax (%)	ROCOFmax (Hz/sn)	Aralık	FEmax (Hz)	TVEmax (%)	ROCOFmax (Hz/sn)
± 1 Hz/sn	± 2 Hz	0,01	1	0,4	Fs/5 Hz'den küçük veya ± 5 Hz	0,01	1	0,2

3.6.4. Dinamik uyumluluk - faz açısı ve genlik için adım testi

Bu test sinyalin genlik ve faz açısına belirli bir zamandan itibaren adım değişikliği uygulanarak yapılmaktadır. Giriş test sinyalleri, Eş. 3.9, Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 ile verilmiştir.

$$X_1 = V_m[1 + k_x f_1(t)] * \cos[w_0 t + k_a f_1(t)] \quad (3.9)$$

$$X_2 = V_m[1 + k_x f_1(t)] * \cos[w_0 t - 2\pi/3 + k_a f_1(t)] \quad (3.10)$$

$$X_3 = V_m[1 + k_x f_1(t)] * \cos[w_0 t + 2\pi/3 + k_a f_1(t)] \quad (3.11)$$

Bu test için standart gereksinimleri Tablo 3.7 ve Tablo 3.8 ile gösterilmiştir.

Ölçüm tepki süresi, bir giriş sinyaline bir adım değişikliği uygulanmadan önce ve sonra kararlı duruma ulaşması arasındaki zaman farkını ifade eder, gecikme süresi, PMU girişine adım değişikliği uygulandığı andan itibaren, kademeli parametrenin ilk ve son kararlı durum değerine ulaşılması arasındaki zaman aralığıdır (Gökoğlu, 2019).

Tablo 3.7. Dinamik Uyumluluk Tepki Süresi ve Gecikme Süresi için Test Gereksinimleri

P Sınıfı				M Sınıfı		
Modülasyon Seviyesi	Tepki Süresi (sn)	Gecikme Süresi (sn)	En Yüksek Aşım/Düşme	Tepki Süresi (sn)	Gecikme Süresi (sn)	En Yüksek Aşım/Düşme
Genlik±10% k _x =0,1 k _a =0	2/f ₀	1/(4.Fs)	Adım Sinyali %5'i	7/Fs	1/(4.Fs)	Adım Sinyali %10'u
Faz Açısı±10% k _x =0 k _a =0,1	2/f ₀	1/(4.Fs)	Adım Sinyali %5'i	7/Fs	1/(4.Fs)	Adım Sinyali %10'u

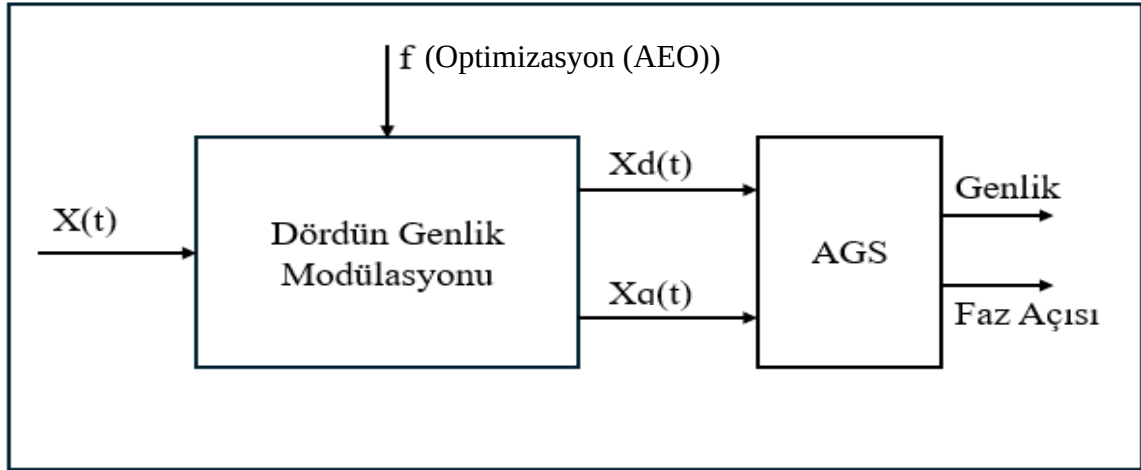
Tablo 3.8. Dinamik Uyumluluk Tepki Süresi için Test Gereksinimleri

Modülasyon Seviyesi	P Sınıfı		M Sınıfı	
	Frekans Tepki Süresi (sn)	ROCOF Tepki Süresi (sn)	Frekans Tepki Süresi (sn)	ROCOF Tepki Süresi (sn)
Genlik $\pm 10\%$ $k_x=0,1$ $k_a=0$	4,5/f ₀	6/f ₀	14/Fs veya 14/f ₀ Büyük Olanı	14/Fs veya 14/f ₀ Büyük Olanı
Faz Açısı $\pm 10\%$ $k_x=0$ $k_a=0,1$	4,5/f ₀	6/f ₀	14/Fs veya 14/f ₀ Büyük Olanı	14/Fs veya 14/f ₀ Büyük Olanı

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada senkrofazör ölçümü için Dördün Genlik Modülasyonu temelli bir algoritma önerilmiştir. Senkrofazör ölçümü için FE, TVE ve ROCOF hesaplamaları yapılacak olan sinyale ait temel frekans değeri optimizasyon algoritması aracılığıyla kestirim edilmektedir. Güç sinyalinde istenmeyen gürültülerin bastırılması amacıyla alçak geçiren filtre kullanılmaktadır.

Dördün Genlik Modülasyon yöntemi kullanılarak güç sinyali aranan frekans değerinde pozitif ve negatif bileşenlerine ayrılır. Daha sonra bu bileşenler alçak geçiren filtre olan hareketli ortalama filtreden geçirilerek yüksek frekanslı bileşenler süzülerek yalnızca istenilen frekansa ait bileşen bilgisi elde edilir. Böylece senkrofazör için anlık genlik ve faz açısı değerleri hesaplanabilir. Bu işlemler için blok diyagram Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Dördün Genlik Modülasyonu Genlik ve Faz Açısı Hesabı Blok Diyagram

4.1. Dördün Genlik Modülasyonu

Dördün genlik modülasyon yöntemi, bir mesaj sinyalinin taşıyıcı sinyallerle modüle edilmesi işlemidir. Bu teknik, mesaj sinyalinin içindeki frekans bileşenlerini taşıyıcı sinyal frekansına taşıyarak sinyalin iletimini sağlar. Mesaj sinyali, taşıyıcı sinyallerle çarpıldığında yüksek ve düşük frekanslı bileşen ortaya çıkar. Düşük frekansa ait bileşen, modülasyon sonucunda 0 Hz'de oluşurken, yüksek frekansa ait bileşen temel frekansın iki katında oluşur. Böylece alçak geçiren süzgeç kullanılarak 0 Hz etrafında oluşan sinyallere ait veriler elde edilir. Bu yöntem ile sinyalin içerdiği frekanslarda anlık genlik

ve faz açısı verileri elde edilir. Bu yöntemde mesaj sinyali, aralarında 90° faz farkı bulunan iki taşıyıcı sinyal ile modüle edilir.

Eş. 4.1 ile ifade edildiği üzere A genlikli, f_0 temel frekans değerine sahip ve faz açısı φ ile ifade edilen bir $X(t)$ akım veya gerilim sinyali oluşturulur:

$$X(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (4.1)$$

QAM yönteminde taşıyıcı sinyallerin oluşturulabilmesi için Denklem (4.10) ile ifade edilen $X(t)$ sinyali $e^{j\omega t}$ ile çarpılarak Eş. 4.2' de ifade edildiği üzere Re ve Im kısımlar oluşturulur. Burada $X_m(t)$ sinyali modüle edilmiş sinyali ve f_m modülasyon frekansını temsil etmektedir.

$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t)$ eşitliği kullanılarak;

$$X_m(t) = (A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)) * (\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) \quad (4.2)$$

$\omega = 2\pi f_m$ için denklem yeniden düzenlenirse;

$$X_m(t) = (A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)) * (\cos(2\pi f_m t) + j\sin(2\pi f_m t)) \text{ olacaktır.}$$

Burada gerçek ve sanal kısımlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Re(X_m(t)) = (A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)) * (\cos(2\pi f_m t))$$

$$Im(X_m(t)) = (A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)) * (\sin(2\pi f_m t))$$

Reel ve sanal kısımlar, trigonometrik fonksiyonların ters dönüşüm formülleri kullanılarak Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 ile gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$Re(X_m(t)) = \frac{1}{2} * [(\cos(2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi)) + (\cos(2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi))] \quad (4.3)$$

$$Im(X_m(t)) = \frac{1}{2} * [(\sin(2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi)) + (\sin(2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi))] \quad (4.4)$$

Modülasyon sinyali f_m , temel frekans değeri f_0 değerine eşit seçildiğinde biri 0 Hz değerinde diğeri ise daha yüksek bir frekans değerinde iki bileşen oluşmaktadır. Oluşan bu yüksek frekanslı bileşeni yok etmek için sinyal alçak geçiren filtreden süzülerek 0 Hz etrafında oluşan bileşen elde edilir.

Filtreleme işlemi sonucunda oluşan sinyale ait Re ve Im kısımları Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 şeklinde ifade edilebilir.

$$Re(X_m(t)) = 1/2 * [(cos(2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi))] \quad (4.5)$$

$$Im(X_m(t)) = 1/2 * [(sin(2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi))] \quad (4.6)$$

Sinyalin genlik değerinin elde edilebilmesi için Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 ile verilen bileşenlerin kareleri toplanıp karekökleri alınır. Burada trigonometrik dönüşüm formüllerinden kaynaklanan gerilim değerinin yarıya inmesi durumunun yok edilmesi için sonuç 2 ile çarpılır. Bu durum Eş. 4.7 ile gösterilmiştir.

$$A = 2\sqrt{(Re(X_m(t)))^2 + Im(X_m(t))^2} \quad (4.7)$$

Sinyalin faz açısı değerinin elde edilebilmesi için Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 ile verilen bileşenlerin oranlanıp ters tanjant değeri alınır. Bu durum Eş. 4.8 ile gösterilmiştir.

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{Im(X_m(t))}{Re(X_m(t))} \quad (4.8)$$

Dördün genlik modülasyonu yöntemi ile genlik ve faz açısı değerlerinin hesaplanma işlemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla MATLAB ortamında temel frekans değeri $f=50$ Hz olan, 2., 3. ve 4. harmonik değerleri de içeren örnek $X(t)$ sinyali oluşturulmuştur.

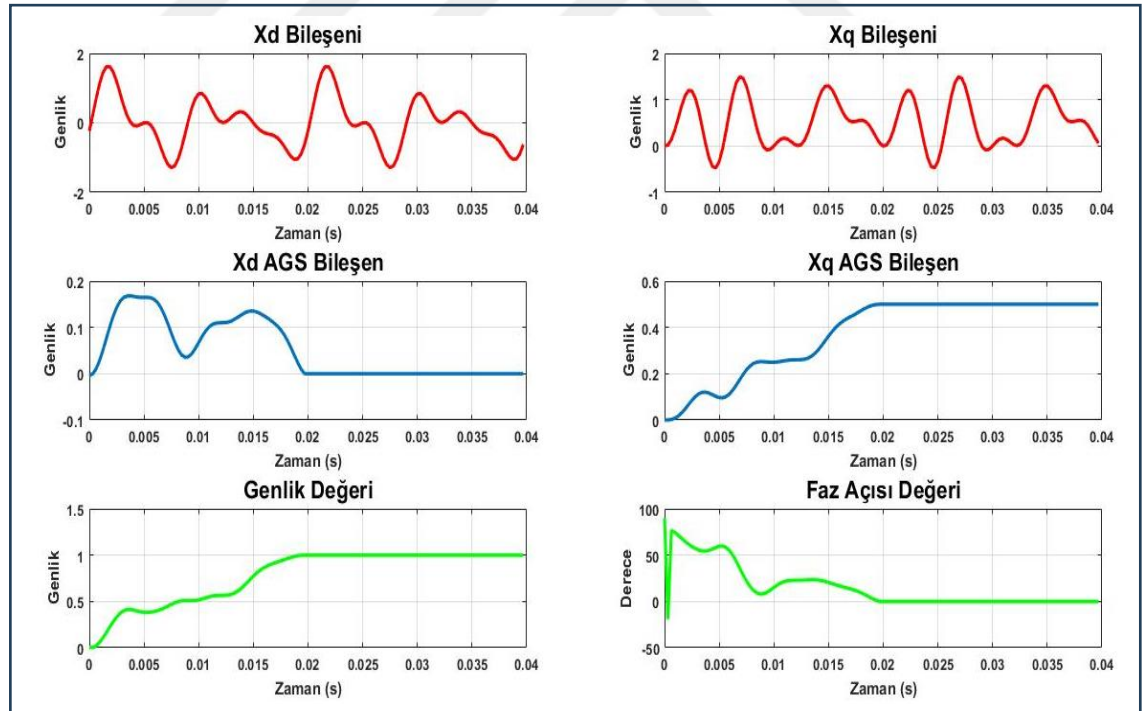
$$X(t) = \cos(2\pi ft) + 0.2\cos\left(2\pi(2f)t + \frac{\pi}{4}\right) + 0.6\cos\left(2\pi(3f)t + \frac{\pi}{6}\right) + 0.78\cos\left(2\pi(4f)t - \frac{\pi}{3}\right)$$

Denklem (4.6) ve Denklem (4.7) ile belirtilen eşitliklerde f_m modülasyon frekans değeri, genlik ve faz açısı bilgisi bulunmak istenilen frekansa eşit olarak seçilerek döngü gerçekleştirilmiştir. Burada f_m değeri sırasıyla f , $2f$, $3f$ ve $4f$ değerlerinde seçilerek simülasyon sonuçları Şekil 4.2 ile Şekil 4.5 arasında verilmiştir. Grafiklerde de görüleceği üzere algoritma yalnızca her döngü için istenilen frekans değerinde bileşenleri hesaplamış, diğer frekans bileşenlerini elemeştir.

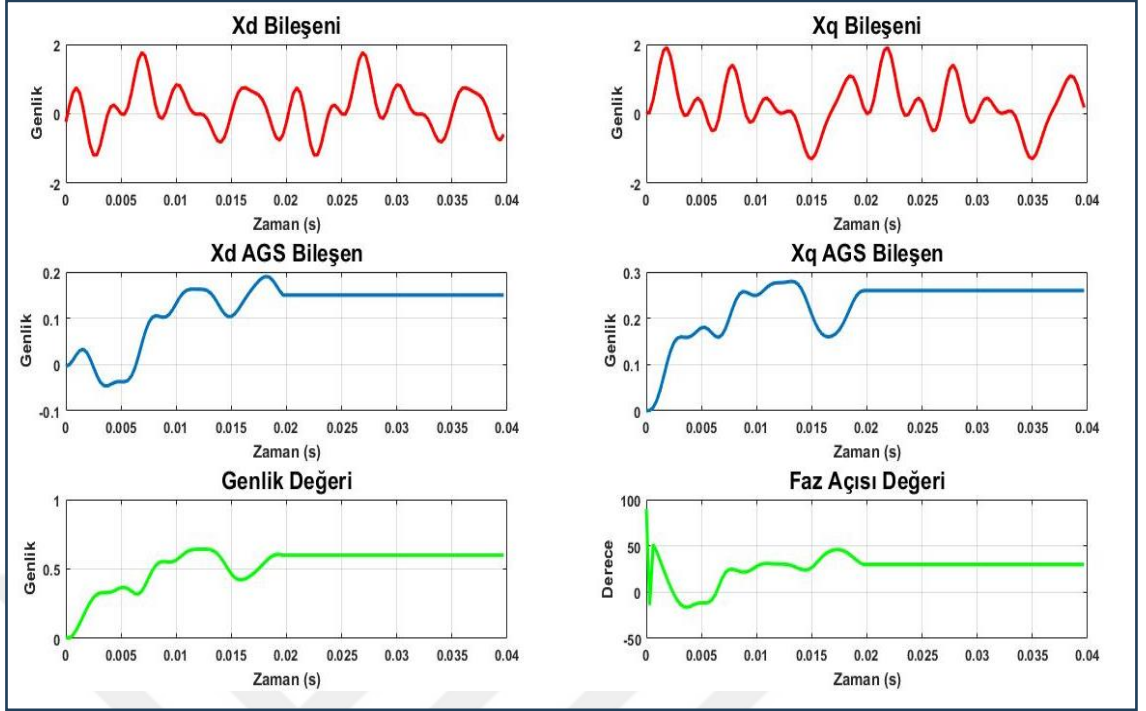
Simülasyon sonuçları incelendiğinde temel bileşen, 2., 3. ve 4. harmonikli bileşenler için hesaplanan gerilim ve faz açısı değerlerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu Tablo 4.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. QAM Tekniği ile Gerilim ve Faz Açısı Hata Oranı

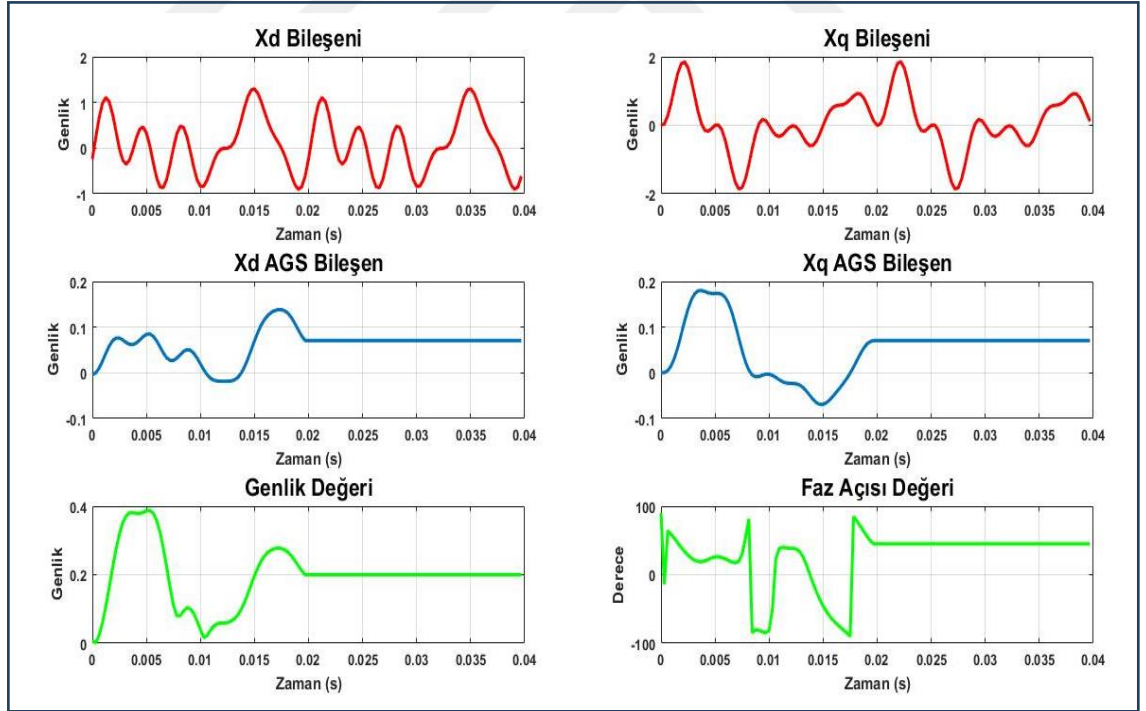
	Teorik Genlik (V)	Hata (%)	Teorik Faz Açısı (°)	Hata (%)
Temel Bileşen	1	1,11E-14	0	1,01E-12
2. Harmonik Bileşen	0,2	3,36E-14	45	2,84E-12
3. Harmonik Bileşen	0,6	2,20E-14	30	3,55E-12
4. Harmonik Bileşen	0,78	1,14E-14	-60	7,10E-13



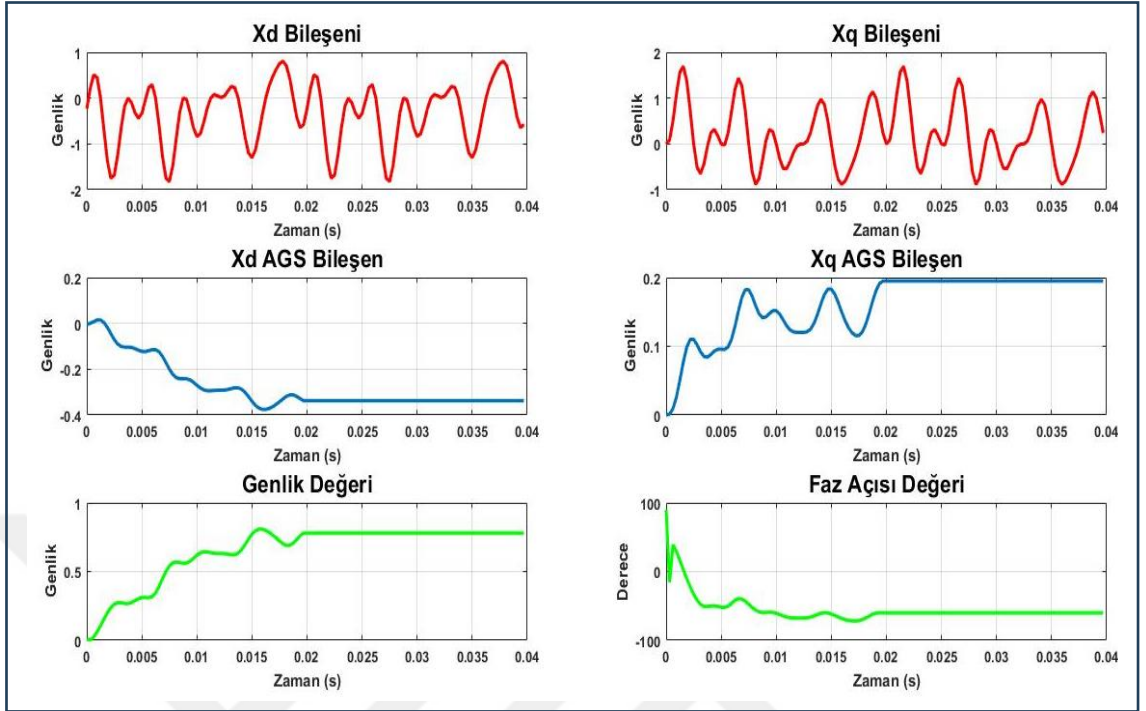
Şekil 4.2. Temel Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=f$)



Şekil 4.3. 2. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m = 2f$)



Şekil 4.4. 3. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m = 3f$)



Şekil 4.5. 4. Harmonik Bileşen İçin Genlik ve Faz Açısı Değerleri ($f_m=4f$)

4.2. Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon Algoritması

Bu çalışmada sinyal frekans kestirimi için Artificial Ecosystem-based Optimization (AEO) optimizasyon algoritması ve filtreleme işlemleri için hareketli ortalama filtre kullanılmıştır.

Frekans Kestirimi;

Optimizasyon algoritmaları, belirli bir problem için en iyi çözümü bulabilmek amacıyla kullanılan matematiksel yöntemlerdir. Bu algoritmalar, genellikle belirli bir amaç için sistem içerisinde var olan değişkenleri optimize etmeye çalışırlar. Örnek olarak belirli bir fonksiyon için en küçük veya en büyük değerini bulma, belirli şartlar içerisinde en iyi çözümü elde etme gibi hesaplama işlemlerini yerine getirirler. Optimizasyon algoritmaları temel olarak iki başlık altında incelenebilir. Bunlar kesikli ve sürekli optimizasyon şeklindedir. Kesikli optimizasyon, değişkenlerin genelde belirli tamsayılardan oluşan bir kümeden seçilmesi gereken problemlerde kullanılırken, sürekli

optimizasyon, değişkenlerin gerçel sayılar da içeren bir aralıktan seçilmesi gereken problemleri kapsamaktadır. Optimizasyon, bilgisayar biliminden mühendisliğe, işletme araştırmalarından ekonomiye kadar tüm sistemlerde kullanılabilmektedir (Martins ve Ning, 2021). Optimizasyon yöntemlerinin gelişimi bilim alanında odak noktası olmuştur (Du vd., 2009). Özetle bir optimizasyon problemi, belirli bir fonksiyonun değerini en yüksek veya en düşük yapmak için sistem değişken değerlerini izin verilen bir aralıktan seçerek ve fonksiyonun değerini hesaplayarak oluşturulur. Elektrik sistemlerinde oluşabilecek güç kayıplarının azaltılması, sistem kararlılığının artırılması gibi amaçlar için farklı optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Problem çözümü için tek bir amaç elde edildiğinde problem tek amaçlı optimizasyon olarak kabul edilir (Hassan, 2017; Reddy ve Yesuratnam, 2015). Diğer taraftan birçok farklı amaç elde ediliyorsa bu durum çok amaçlı optimizasyon (multi-objective optimization) olarak kabul edilir (Thangaraj ve Kuppan, 2017; Mohammadi, 2018; Prakash ve Lakshminarayana, 2018; Maheswarapu, 2019).

Bu çalışmada sinyal frekans kestirimi için Artificial Ecosystem-based Optimization (AEO) algoritması kullanılmıştır. AEO, biyolojik ekosistemlerden esinlenerek oluşturulan bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma çözüm alanı içerisinde potansiyel çözümleri arar.

İlk adım olarak maksimum iterasyon sayısı popülasyon büyüklüğü belirlenerek çözüm kümesi içerisinde rasgele değer alan başlangıç popülasyonu oluşturulur. Probleme ait kısıtlar ve hedefler doğrultusunda çevre modeli oluşturulur ve çözümlerin performansı değerlendirilir. Popülasyon içerisindeki çözüm adayları kalite derecesine göre sınıflandırılır ve adayların seçimi gerçekleştirilir. Algoritma belirli bir durma kriterine veya iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar çalışmaya devam eder.

Bu algoritma için tanımlar ve matematiksel ifadeler aşağıda verilmiştir (Zhao vd, 2020). Algoritmanın gerçekleştirilmesi için ilk aşamaya ait matematiksel ifade Eş. 4.9 ile verilmiştir.

$$X_1(t + 1) = (1 - a)X_n(t) + aX_{rand}(t) \quad (4.9)$$

$$a = \left(\frac{1-t}{T}\right) r_1 \quad (4.10)$$

$$X_{rand} = r * (up - lw) + lw \quad (4.11)$$

Yeni çözüm güncellemesi için matematiksel ifade Eş. 4.12 ile verilmiştir.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + C[X_i(t) - X_1(t)] , i \in [2,...,n] \quad (4.12)$$

$$C = \left(\frac{1}{2}\right) (v_1/v_2) , v_1, v_2 \sim N(0,1) \quad (4.13)$$

Burada, T ifadesi max iterasyon sayısını, t , anlık iterasyon değerini, r_1 , 0 ile 1 arasında rastgele değer alan bir sayıyı, up ve lw ifadeleri fonksiyonun alabileceği en yüksek ve en düşük değerleri ifade etmektedir.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + C[X_i(t) - X_j(t)] \quad (4.14)$$

Burada $i \in [3,...,n]$ ve j , $[2 \text{ i}-1]$ aralığında rastgele tam sayı değer almaktadır.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + C[r_2(X_i(t) - X_1(t)) + (1 - r_2)(X_i(t) - X_j(t))] \quad (4.15)$$

Böylece algoritma için matematiksel model Eş. 4.16 şeklinde elde edilmektedir.

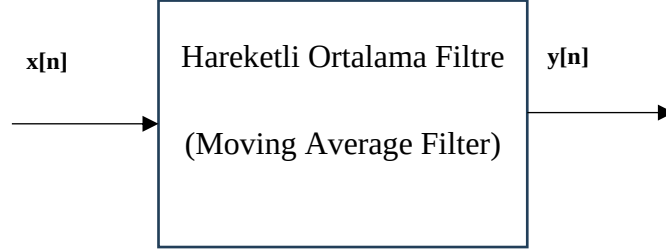
$$X_i(t + 1) = X_n(t) + D[eX_n(t) - hX_i(t)], i \in [1, n] \quad (4.16)$$

Burada $D=3u$, $u \sim N(0,1)$, $e = r_3 \text{randi}([1 \ 2] - 1)$, $h = 2r_3 - 1$ ve r_2, r_3 , 0 ile 1 arası rastgele değer almaktadır.

4.3. Hareketli Ortalama Filtre

Güç sinyalinde istenmeyen gürültülerin bastırılması amacıyla alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. Bu çalışmada filtreleme işlemleri için hareketli ortalama filtre kullanılmıştır. Hareketli ortalama filtre, bir zaman serisinin düzgünleştirilmesi için kullanılan sinyal işleme tekniğidir. Bu filtre, veri noktalarının belirli bir pencere boyunca

ortalamasını alarak yeni bir veri noktası ortaya çıkarır. Bu işlem ile verilerdeki dalgalanmalar azaltılır ve daha düzenli bir görünüm elde edilir. Şekil 4.6 ile verilen blok diyagram için hareketli ortalama filtre, Eş. 4.19 ile verildiği şekilde hesaplanır.



Şekil 4.6. Hareketli Ortalama Filtre Blok Diyagram

2 nokta;

$$y[n] = \frac{x[n] + x[n-1]}{2} \quad (4.17)$$

3 nokta;

$$y[n] = \frac{x[n] + x[n-1] + x[n-2]}{3} \quad (4.18)$$

M nokta;

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x[n-m] \quad (4.19)$$

Hareketli ortalama filtre için pencere uzunluğu, ortalamayı hesaplarken kullanılan örnekleme penceresinin içerdiği örnek sayısını ifade etmektedir. Örnek olarak, bir pencere boyutu 5 seçildiğinde, her bir hareketli ortalama değeri hesaplanırken, o andaki örneği içeren pencerede 5 örnek bulunur. Bu örneklerin ortalaması alınarak hareketli ortalama değeri bulunur. Ardından pencere bir örnek sağa kaydırılır ve bu işlem tekrarlanır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu kısımda çalışmada kullanılan yönteme ait simülasyon sonuçları verilmiştir.

Senkrofazör ölçümü için IEEE 37.118-2011 ve IEEE 37.118-2014 standartlarında belirtilen kararlı durum ve dinamik uyumluluk testleri için MATLAB ortamında test sinyalleri oluşturularak 5 sn uzunluğunda veri için her 0.5 saniyede örnekler alınarak 10 çevrim boyunca FE, TVE ve ROCOF değerleri hesaplanmıştır. Raporlama oranı saniyede 2 örnektir. Test sinyalleri için temel frekans 50 Hz olarak alınmış olup, örnekleme frekansı saniyede 3200 örnektir.

5.1. Kararlı Durum Test Sonuçları

Kararlı durum testleri frekans sapması ve harmonik bozulma testleri için gerçekleştirilmiştir.

Frekans kestirimi için ayrıca MUSIC (Multiple Signal Classification) algoritması da kullanılmış, kararlı durum frekans testi için değerler hesaplanmıştır. Bu yöntem için simülasyon ortamında MATLAB yazılımı kullanılarak 50 Hz temel frekansa sahip güç sinyalinin frekansı 48-52 Hz aralığında 1 Hz adımlarla değiştirilerek Frekans Hatası (FE), Toplam Vektörel Hata (TVE) ve Frekans Değişim Oranı (ROCOF) değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum FE değeri 52 Hz’de $2,08e-5$, maksimum TVE değeri 49 Hz’de $6,94e-5$ ve maksimum ROCOF 52 Hz’de $3,52e-5$ bulunmuştur. Frekans testi için sonuçlar Tablo 5.1 ile verilmiştir.

Tablo 5.1. MUSIC Algoritması İçin Frekans Test Sonuçları

FE (Hz)				ROCOF (HZ/sn)			TVE(%)		
Hz	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3
48	1,05E-05	1,00E-05	1,63E-05	2,04E-05	1,34E-05	3,20E-05	1,09E-05	1,13E-05	1,58E-05
49	1,54E-05	5,05E-06	7,34E-06	2,27E-05	5,24E-06	1,15E-05	1,56E-05	5,62E-05	6,94E-05
50	1,56E-05	1,92E-05	1,16E-05	2,98E-05	3,84E-05	2,01E-05	1,55E-05	2,10E-05	1,07E-05
51	1,78E-05	1,82E-05	1,31E-05	3,25E-05	3,48E-05	1,95E-05	1,73E-05	1,95E-05	1,19E-05
52	1,84E-05	2,08E-05	2,06E-05	2,19E-05	3,49E-05	3,52E-05	1,76E-05	2,19E-05	1,82E-05

MUSIC algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar optimizasyon algoritması ile elde edilen sonuçlara göre daha yüksek hata oranına sahiptir. Bu nedenle kararlı durum ve dinamik koşullar için diğer testler optimizasyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Frekans sapması, genlik ve faz açısı testleri

Frekans sapması, genlik ve faz açısı için gerçekleştirilen testlerde önceki bölümlerde verilen FE, TVE ve ROCOF gereksinim değerlerine göre simülasyon sonuçları Tablo 5.2 ile Tablo 5.4 aralığında verilmiştir.

Frekans testi, sinyal frekansı 48-52 Hz aralığında 1 Hz adımlarla değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda FE için en yüksek hata değeri 4,98e-14, TVE için en yüksek hata değeri 8,63e-09, ROCOF için en yüksek hata değeri 1,27e-13 olarak ölçülmüştür. Çevrim sayısına göre simülasyon sonuçları EK 1, Ek 1- Şekil 1 ile Ek 1- Şekil 45 arasında verilmiştir.

Tablo 5.2. Kararlı Durum Frekans Testi İçin Simülasyon Sonuçları

Frekans (Hz) (Faz 1, 2 ve 3 için)	FE _{max} (Hz)	TVE _{max} (%)	ROCOF _{max} (Hz/s)
48	3,55e-14	7,53e-09	7,11e-14
49	4,26e-14	8,61e-09	8,52e-14
50	4,97e-14	8,63e-09	1,27e-13
51	4,26e-14	8,18e-09	7,10e-14
52	4,98e-14	7,60e-09	9,94e-14

Genlik testi, sinyal genliği nominal genlik değerinin %10-%120 aralığında %1 adımla değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda TVE için en yüksek hata değeri 8,63e-09, olarak ölçülmüştür. Çevrim sayısına göre ölçüm sonucuna ait grafikler Ek 1- Şekil 46 ile Ek 1- Şekil 48 aralığında verilmiştir.

Tablo 5.3. Kararlı Durum-Genlik Testi İçin Simülasyon Sonuçları

Genlik Testi (Faz 1, 2 ve 3 için)	Test Aralığı	TVE _{max} (%)
Gerilim	Nominalin 10%-120% Arası	1,07e-08

Faz açısı testi, sinyal faz açısı $\pm\pi$ aralığında 1° adımla değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda TVE için en yüksek hata değeri 8,94e-09 olarak ölçülmüştür. Çevrim sayısına göre simülasyon sonuçları EK 1, Ek 1- Şekil 49 ile Ek 1- Şekil 51 arasında verilmiştir.

Tablo 5.4. Kararlı Durum-Faz Açısı Testi İçin Simülasyon Sonuçları

Faz Açısı Testi (Faz 1, 2 ve 3 için)	Test Aralığı	TVE _{max} (%)
Faz Açısı	$\pm\pi$	1,64e-08

5.1.2. Harmonik bozulma testi

Harmonik bozulma testi, 2. harmonikten 50. harmoniğe kadar bileşen içeren test sinyali ile gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda FE için en yüksek hata değeri $2,86e-11$, TVE için en yüksek hata değeri $4,97e-06$, ROCOF için en yüksek hata değeri $7,63e-11$ olarak ölçülmüştür. Çevrim sayısına göre simülasyon sonuçları Tablo 5.5 ile verilmiştir. Grafikler EK 1, Ek 1- Şekil 52 ile Ek 1- Şekil 60 arasında verilmiştir.

Tablo 5.5. Kararlı Durum-Harmonik Bozulma Testi İçin Simülasyon Sonuçları

Harmonik Bozulma Testi (Faz 1, 2 ve 3 için)	FE (Hz)	TVE (%)	ROCOF (Hz/s)
2. Harmonikten 50. Harmoniğe Kadar Nominal Gerilimin 10% Kadarı	$2,86e-11$	$8,02e-06$	$9,98e-11$

5.2. Dinamik Uyumluluk-Ölçüm Bant Genişliği Test Sonuçları

Bu test sinyal genlik değerinin ve faz açısının modüle edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Genlik ve faz modülasyonunda modülasyon frekansı 0.1 ile $f_s/5$ değeri aralığında 0.1 Hz adımla değiştirilerek gerçekleştirilir. Bunun sonucunda FE için en yüksek hata değeri 0,023, TVE için en yüksek hata değeri 0,71, ROCOF için en yüksek hata değeri 0,0029 olarak ölçülmüştür.

Çevrim sayısına göre ölçüm sonucuna ait simülasyon sonuçları Tablo 5.6 ile verilmiştir. Grafikler, EK 1 bölümü Ek 1- Şekil 61 ile Ek 1- Şekil 96 arasında verilmiştir.

Tablo 5.6. Dinamik Uyumluluk-Ölçüm Bant Genişliği Testi İçin Simülasyon Sonuçları

Ölçüm Bant Genişliği Testi (Faz 1, 2 ve 3 için)	Test Aralığı	FE (Hz)	TVE (%)	ROCOF (Hz/s)
$k_x=0,1$ ve $k_a=0$	Modülasyon Frekansı $0.1-f_s/5$	1,19e-04	0,71	2,68e-04
$k_x=-0,1$ ve $k_a=0$	Modülasyon Frekansı $0.1-f_s/5$	1,27e-04	0,59	1,66e-04
$k_x=0$ ve $k_a=0,1$	Modülasyon Frekansı $0.1-f_s/5$	0,023	0,65	0,0029
$k_x=0$ ve $k_a=-0,1$	Modülasyon Frekansı $0.1-f_s/5$	0,022	0,64	0,0028

5.3. Dinamik Uyumluluk-Faz Açısı ve Genlik için Adım Sinyali Test Sonuçları

Bu test giriş sinyaline 10% genlik ve 10% faz açısı büyüklüğüne sahip pozitif ve negatif adım sinyali uygulanması işlemlerini içermektedir. Fonksiyona belirli bir anda birim adım fonksiyonu uygulanarak ani giriş değişikliğine karşılık performans ölçümü yapılmaktadır. Giriş sinyaline $t=0.5$ anından itibaren birim adım fonksiyonu uygulanmış ve simülasyon sonuçları Tablo 5.7, grafikleri EK 1, Ek 1- Şekil 97 ile Ek 1- Şekil 108 arasında verilmiştir.

Tablo 5.7. Dinamik Uyumluluk-Faz Açısı ve Genlik Adım Sinyali Simülasyon Sonuçları

Adım Değişimi	Frekans Tepki Süresi (sn)	TVE Tepki Süresi (sn)	Gecikme Süresi (sn)	Genlik Adım Değişimi (%)
$k_x=10\%$ $k_a=0$	0	0,5083	0,0032	0,6
$k_x=-10\%$ $k_a=0$	0	0,5763	0,0124	0,28
$k_a=10\%$ $k_x=0$	0,4694	0,6093	0,0022	0,11
$k_a=-10\%$ $k_x=0$	0,513	0,6093	0,0076	0,5

6. SONUÇ

Bu çalışmada, elektrik sistemlerinde güç kalitesi, verimlilik, kontrol ve koruma düzenlerini sağlamak için önemli bir faktör olan senkrofazörlerin doğru ve hassas ölçümünü sağlamak amacıyla Dördün Genlik Modülasyonu tabanlı algoritma önerilmiştir. Giriş sinyalleri için frekans bileşeni kestirimi Artificial Ecosystem-based Optimization (AEO) optimizasyon algoritması kullanılarak yapılmıştır.

Ölçüm yapılan senkrofazörler için zorunlu gereksinimlere uyumluluk tespiti (kararlı durum ve dinamik koşullar altında) için Frekans Hatası, Toplam Vektörel Hata ve Frekans Değişim Oranı değerleri hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları, hesaplanan verilerin ilgili standartlarda belirtilen üst limit değerlerden çok çok altında kaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar çalışmanın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ve çalışmanın amacına ulaştığını göstermektedir. Çalışmada kullanılan yöntemler ile senkrofazörlerin doğru ve hassas bir şekilde hesaplanabildiğini kanıtlamaktadır. Bu çalışmada frekans rampa testi için hesaplanan TVE değeri standart gereksinimini karşılamamaktadır. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda filtreme aşaması geliştirilebilir.

Senkrofazör ölçümünde uygunluk için baz alınan IEEE C37.118.1-2011 ve C37.118.1a-2014 standartları, dengesiz yükler, yüksek frekans içeren anahtarlama harmonikleri, elektromanyetik parazitleri ve sistem üzerinde meydana gelen geçici hal durumlarına ait test içermemektedir.

Gerçek koşullar altında şebeke, tüm faktörlerin etkisi altında kalabilmektedir. Bu nedenle Fazör Ölçüm Birimleri ve test standartları halen gelişime açıktır, ilerleyen çalışmalarda yeni algoritmalar ile test standartları da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Allan, H. R., & Miller, W. (2012). Circuit Analysis: *Theory and Practice (5th ed.)*. Cengage Learning. p. 536. ISBN 978-1-285-40192-8.
- Baldick, R. (2008). Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures. *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*.
- Begovic, M. (1993). "Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics." *IEEE Transactions on Power Delivery* **8.2** (1993): 480-486.
- Belega, D., & Dominique, D. (2009). "Multifrequency signal analysis by interpolated DFT method with maximum sidelobe decay windows." *Measurement* **42.3** (2009): 420-426.
- Belega, D., & Petri, D. (2013). "Accuracy analysis of the multicycle synchrophasor estimator provided by the interpolated DFT algorithm." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **62.5** (2013): 942-953.
- Belega, D., Fontanelli, D., & Petri, D. (2015). "Low-complexity leastsquares dynamic synchrophasor estimation based on the discrete Fourier transform." *IEEE Transactions on instrumentation and Measurement* **64.12** (2015): 3284-3296.
- Belega, D., Fontanelli, D., & Petri, D. (2015). "Dynamic phasor and frequency measurements by an improved Taylor weighted least squares algorithm." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **64.8** (2015): 2165- 2178.
- Benmouyal, G., Schweitzer, E., & Guzmán, A. (2004). "Synchronized phasor measurement in protective relays for protection, control, and analysis of electric power systems." **57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2004**. IEEE, 2004.
- Das, S., & Sidhu, T. (2013). "A simple synchrophasor estimation algorithm considering IEEE standard C37. 118.1-2011 and protection requirements." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **62.10** (2013): 2704-2715.
- De La O Serna, J. (2007). "Dynamic phasor estimates for power system oscillations." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **56.5** (2007): 1648-1657.
- De La O Serna, J., & Rodriguez, J. (2011). "Instantaneous Oscillating Phasor Estimates With Taylor $\hat{K}$ Kalman Filters." *IEEE Transactions on Power Systems* **26.4** (2011): 2336-2344.

- De La, J., & Pedro, L. (1991). Modal Kalman filtering based impedance relaying." *IEEE transactions on power delivery* 6.1 (1991): 78-84.
- Du, D.-Z., Pardalos, P., & Wu, W. (2009). "**History of Optimization**" (2009): 1538-1542.
- Ferrero, R., Pegoraro, P., & Toscani, S. (2016). "Dynamic fundamental and harmonic synchrophasor estimation by Extended Kalman filter" *2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*. IEEE, 2016.
- Gökoğlu, A. (2019). Dördün genlik modülasyonu kullanarak senkrofazör ölçüm yöntemi. **Yüksek Lisans Tezi**, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gurusinghe, D. R., Rajapakse, A., & Muthumuni, D. (2013). "Modeling of a synchrophasor measurement unit in an electromagnetic transient simulation program.". "*Modeling of a synchrophasor measurement unit in an electromagnetic transient simulation program.*". *Proceedings of the 2013 international conference on power system transients, Vancouver, Canada*.
- Gurusinghe, D., Rajapakse, A., & Narendra, K. (2012). "Evaluation of steady-state and dynamic performance of a synchronized phasor measurement unit." *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference*. IEEE, 2012.
- Guzman, A., Samineni, S., & Bryson, M. (2006). "Protective relay synchrophasor measurements during fault conditions." *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*. IEEE, 2006.
- Hassan, A. (2017). "Genetic single objective optimisation for sizing and allocation of renewable DG systems." *International Journal of Sustainable Energy* 36.6 (2017): 545-562.
- IEEE C37.118.1-2011: *IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems*.
- IEEE C37.118.1a-2014 - *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*.
- IEEE C37.244-2013 *Phasor data concentrator requirements for power*.
- Ipek, M. M. (2008). Elektrik Güç Sistemlerinde Geniş Alan Ölçüm Sistemi ve Fazör Ölçüm Birimlerinin Yerleştirilmesinin İncelenmesi. *Elektrik Güç Sistemlerinde Geniş Alan Ölçüm Sistemi ve Fazör Ölçüm Birimlerinin Yerleştirilmesinin İncelenmesi. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Liu, J. (2012). "Fundamental and harmonic synchrophasors estimation using modified Taylor-Kalman filter." *2012 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) Proceedings*. IEEE, 2012.

- Macii, D., Petri, D., & Zorat, A. (2012). "Accuracy analysis and enhancement of DFT-based synchrophasor estimators in off-nominal conditions." *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement* **61.10** (2012): 2653-2664.
- Maheswarapu, S. (2019). "A solution to multi-objective optimal accommodation of distributed generation problem of power distribution networks: *An analytical approach.*" *International Transactions on Electrical Energy Systems* **29.10** (2019).
- Martins, J., & Ning, A. (2021). Engineering design optimization. *Cambridge University Press*, 2021.
- Mohammadi, H. (2018). "Voltage stability assessment using multi-objective biogeography-based subset selection." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **103** (2018): 525-536.
- Moore, P., Carranza, R., & Johns, A. (1996). "Model system tests on a new numeric method of power system frequency measurement." *IEEE Transactions on Power Delivery* **11.2** (1996): 696-701.
- Orallo, C. (2013). . "Harmonics measurement with a modulated sliding discrete Fourier transform algorithm." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **63.4** (2013): 781-793.
- Phadke, A. (2002). "Synchronized phasor measurements-a historical overview." *IEEE/PES transmission and distribution conference and exhibition. Vol. 1. IEEE*, 2002.
- Prakash,, D., & Lakshminarayana, C. (2018). "Multiple DG placements in radial distribution system for multi objectives using Whale Optimization Algorithm." *Alexandria engineering journal* **57.4** (2018): 2797-2806.
- Premarlani, W., Kasztenny, B., & Adamiak, M. (2007). "Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions." *IEEE Transactions on Power Delivery* **23.1** (2007): 109-123.
- Reddy, P., & Yesuratnam, G. (2015). "PSO based optimal reactive power dispatch for voltage profile improvement." *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*. IEEE, 2015.
- Romano, P., & Paolone, M. (2014). "Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: Theory, implementation, and validation of a PMU prototype." *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* **63.12** (2014): 2824-2836.
- Schweitzer, E. (2010). "Synchrophasor-based power system protection and control applications." *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. IEEE, 2010.

- Thangaraj, Y., & Kuppan, R. (2017). "Multi-objective simultaneous placement of DG and DSTATCOM using novel lightning search algorithm." *Journal of applied research and technology* **15.5** (2017): 477-491.
- Won , Y., & Lee, S. (2008). Circuit Systems with MATLAB and PSpice. *John Wiley & Sons. pp. 256–261*. ISBN 978-0-470-82240-1.
- Wood, H., Johnson , N., & Sachdev, M. (1985). "Kalman filtering applied to power system measurements relaying." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **12** (1985): 3565-3573.
- Zhan, L., Liu, Y., & Liu, Y. (2016). "A Clarke transformation-based DFT phasor and frequency algorithm for wide frequency range." *IEEE Transactions on Smart Grid* **9.1** (2016): 67-77.
- Zhang, P., Chen, J., & Shao, M. (2007). "Phasor measurement unit (PMU) implementation and applications." *Electr. Power Res. Inst. EPRI, Rep. Final 2007* (2007).
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2020). "Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm." *Neural Computing and Applications* **32.13** (2020): 9383-9425.

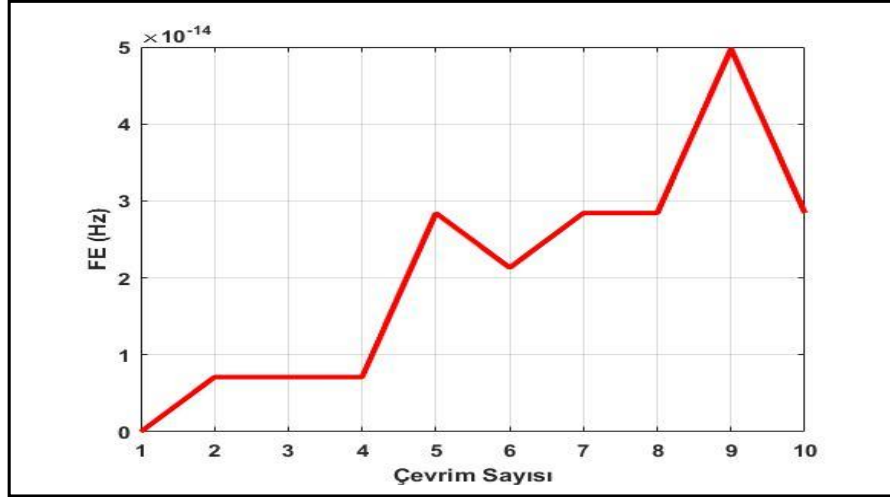
EKLER

Ek-1. Önerilen Yöntem İçin Simülasyon Sonuçları

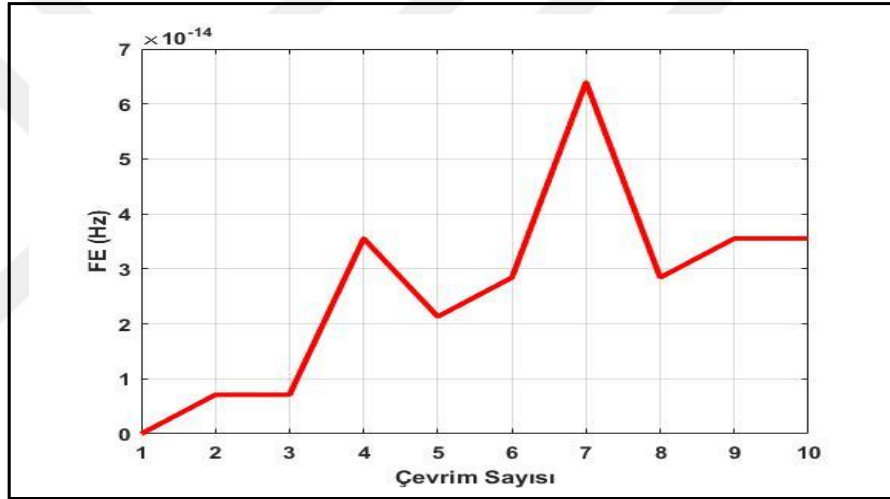
Ek-2. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar



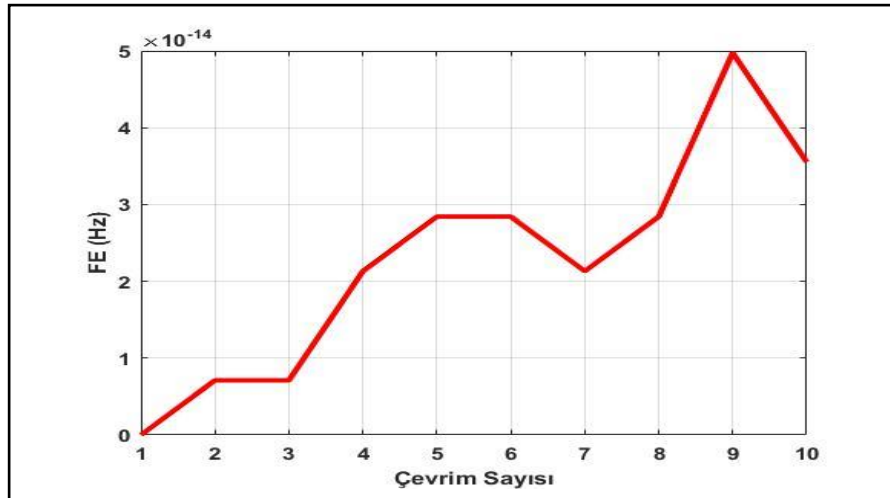
Ek-1. Önerilen Yöntem İçin Simülasyon Sonuçları



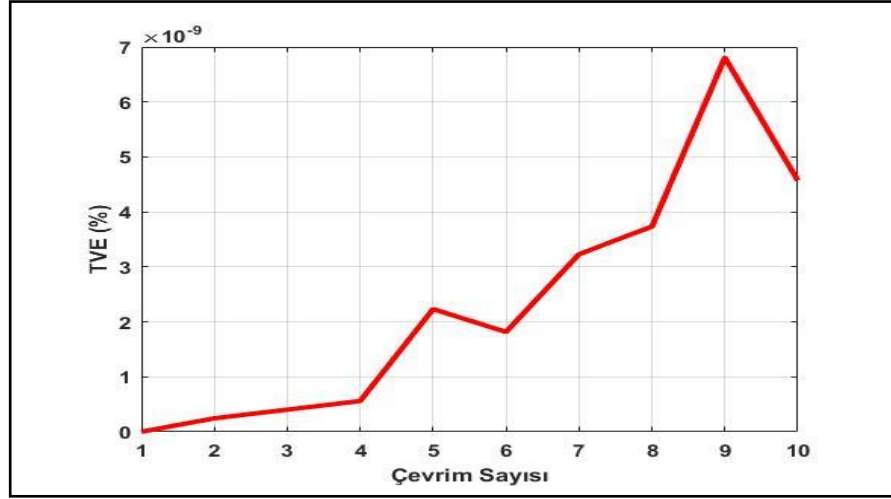
Ek 1- Şekil 1. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre FE (48 Hz)



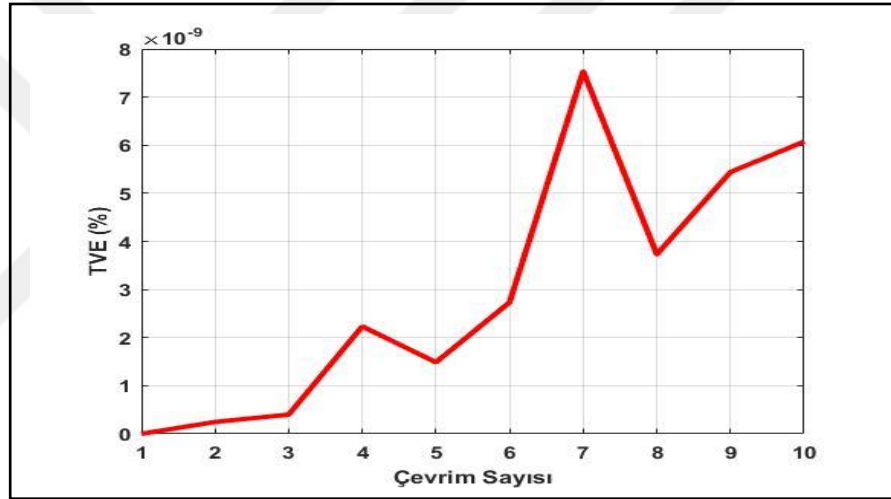
Ek 1- Şekil 2. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (48 Hz)



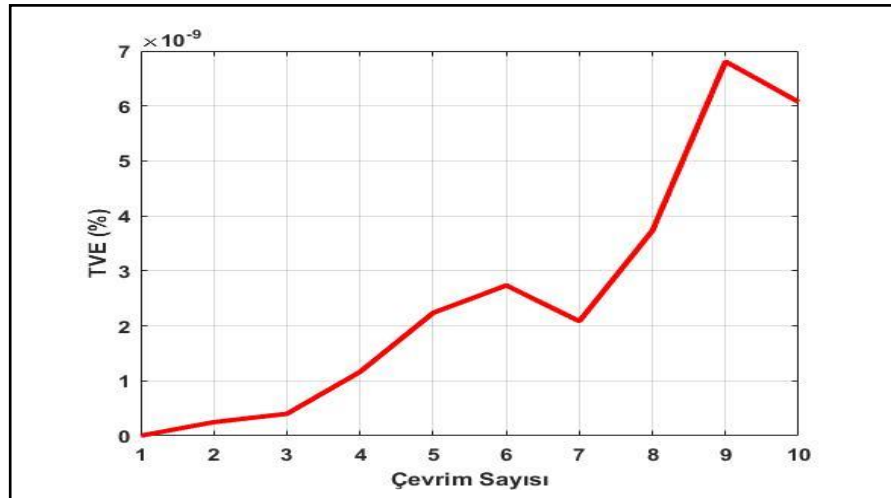
Ek 1- Şekil 3. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (48 Hz)



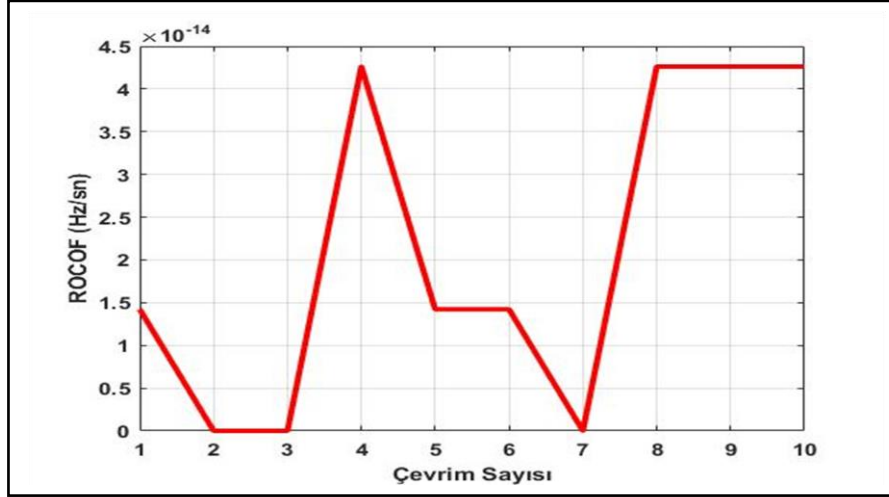
Ek 1- Şekil 4. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre TVE (48 Hz)



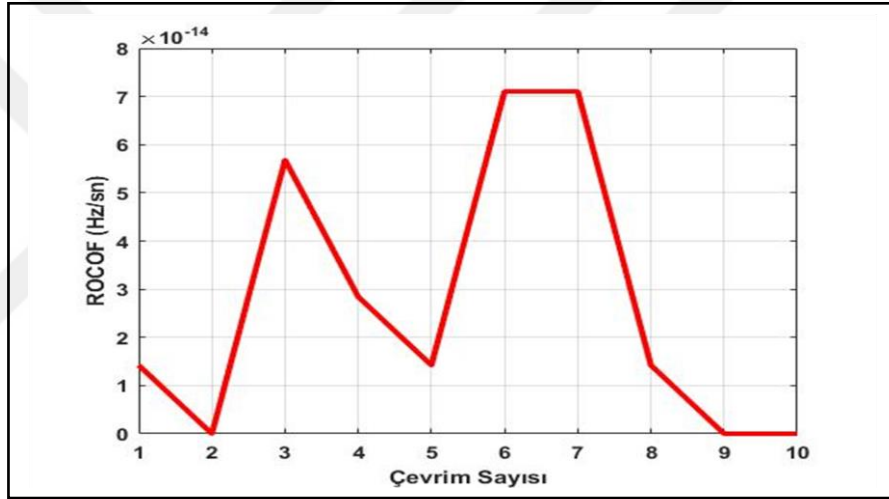
Ek 1- Ek 1- Şekil Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (48 Hz)



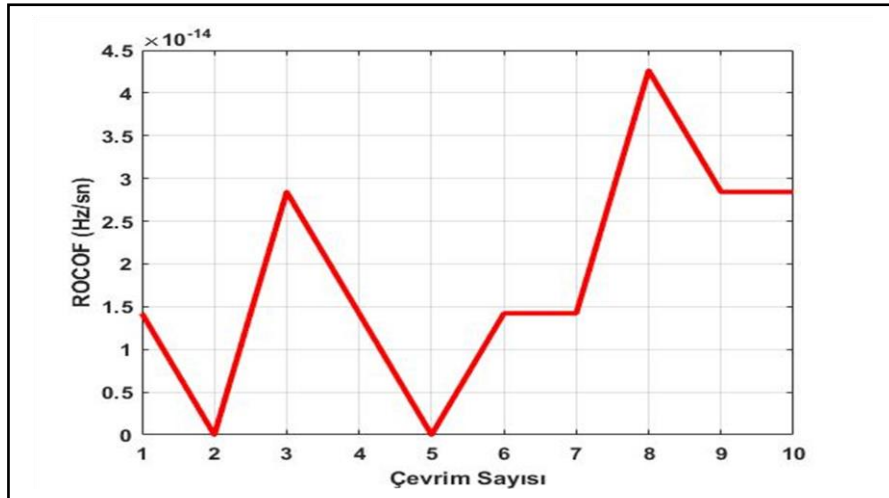
Ek 1- Şekil 6. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (48 Hz)



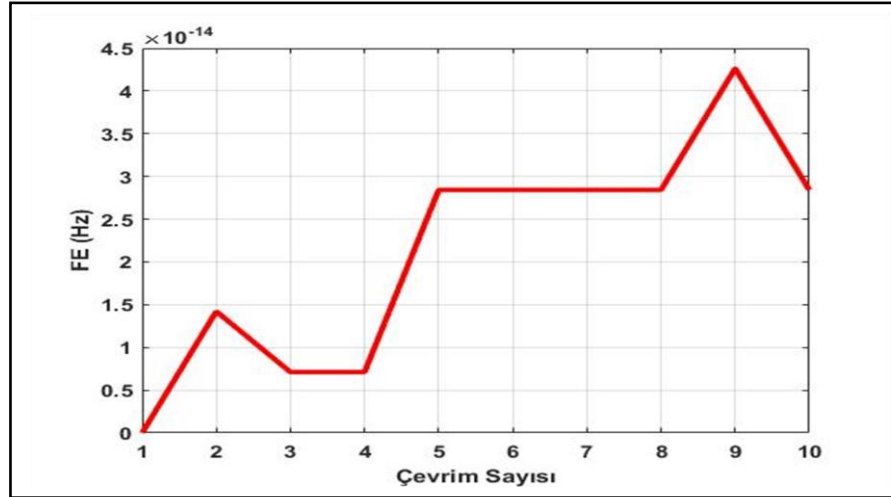
Ek 1- Şekil 7. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (48 Hz)



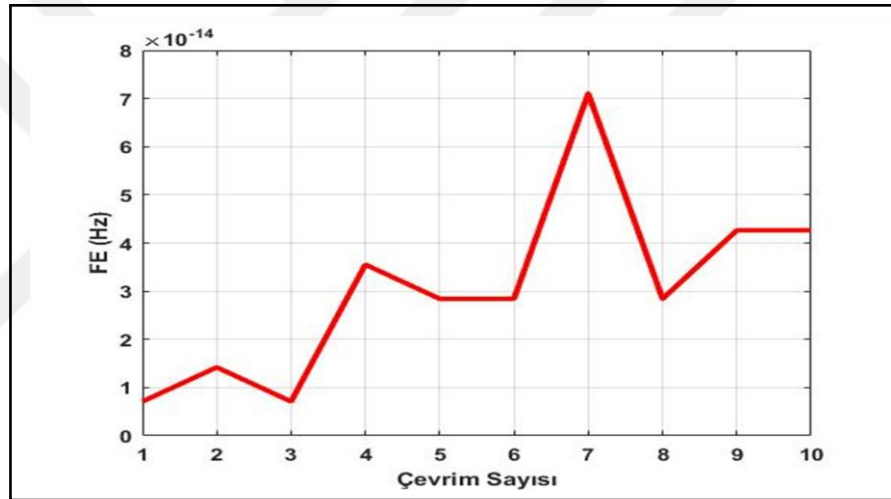
Ek 1- Şekil 8. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (48 Hz)



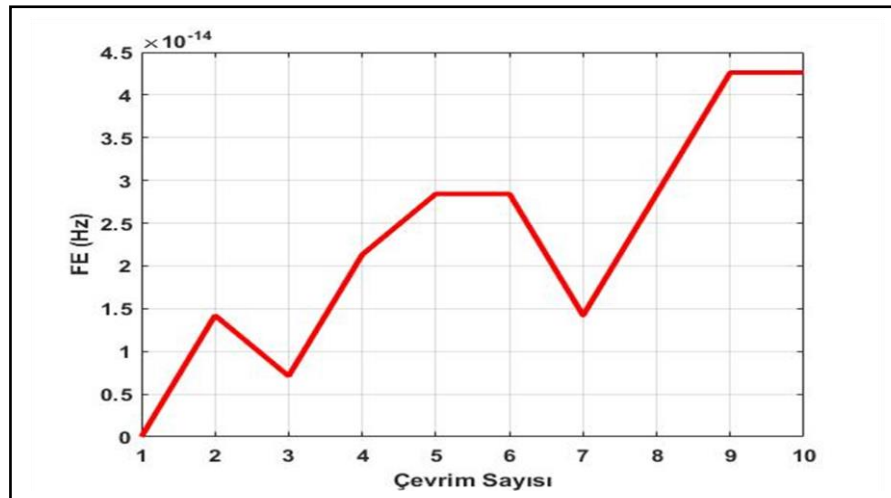
Ek 1- Şekil 9. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (48 Hz)



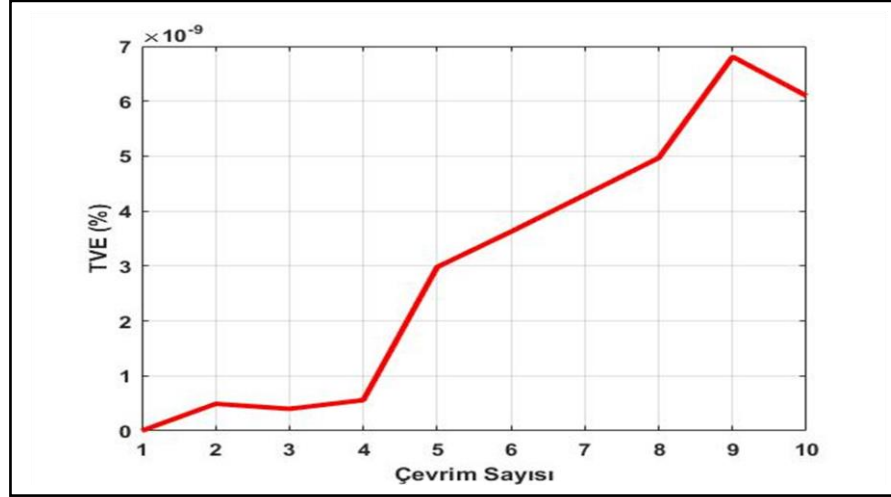
Ek 1- Şekil 10. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre FE (49 Hz)



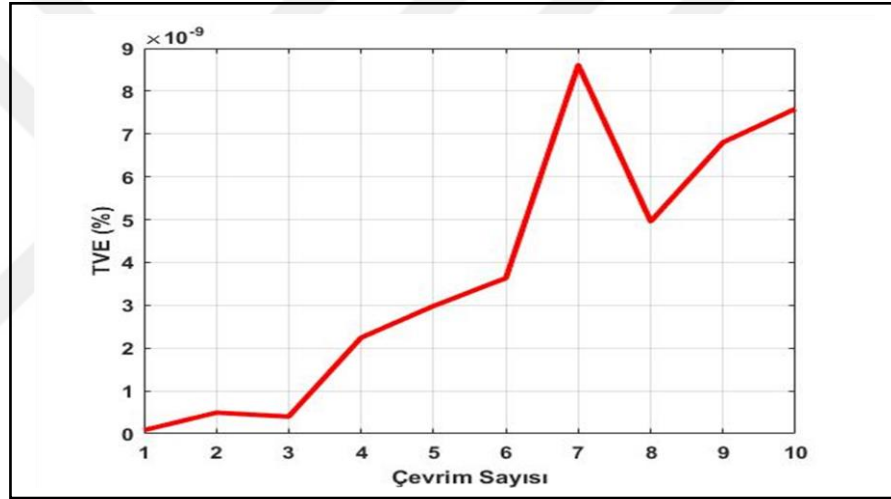
Ek 1- Şekil 11. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (49 Hz)



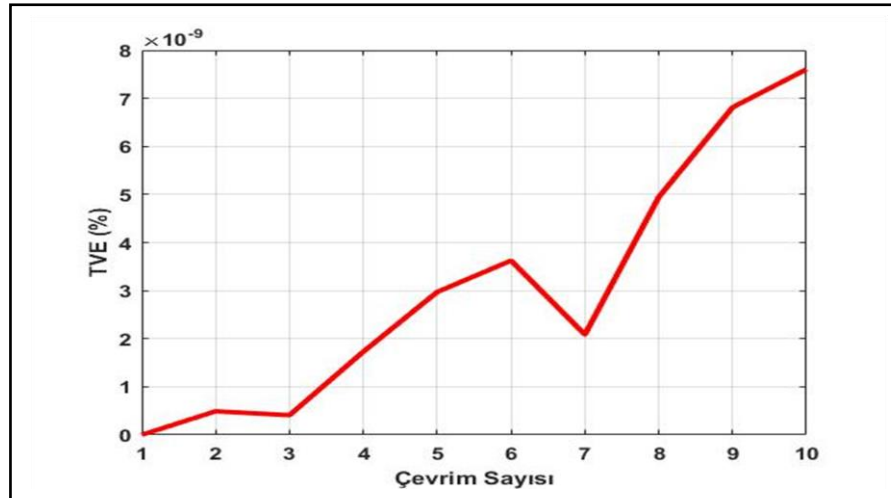
Ek 1- Şekil 12. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (49 Hz)



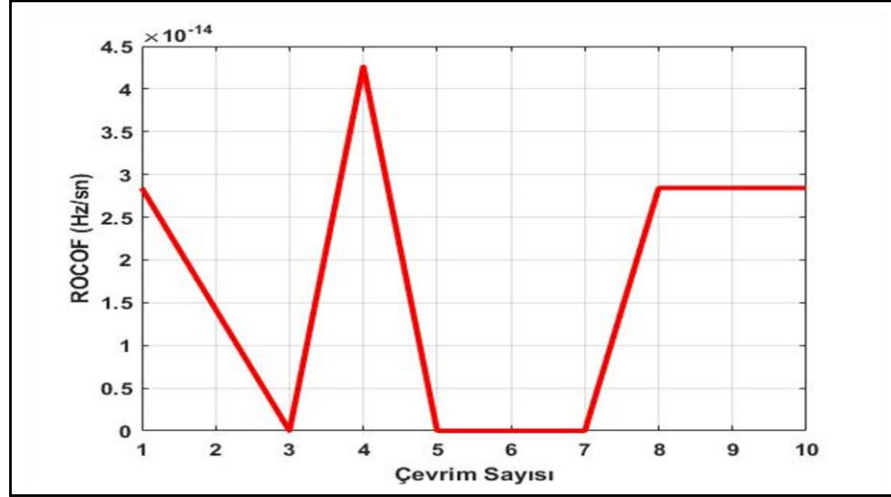
Ek 1- Şekil 13. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre TVE (49 Hz)



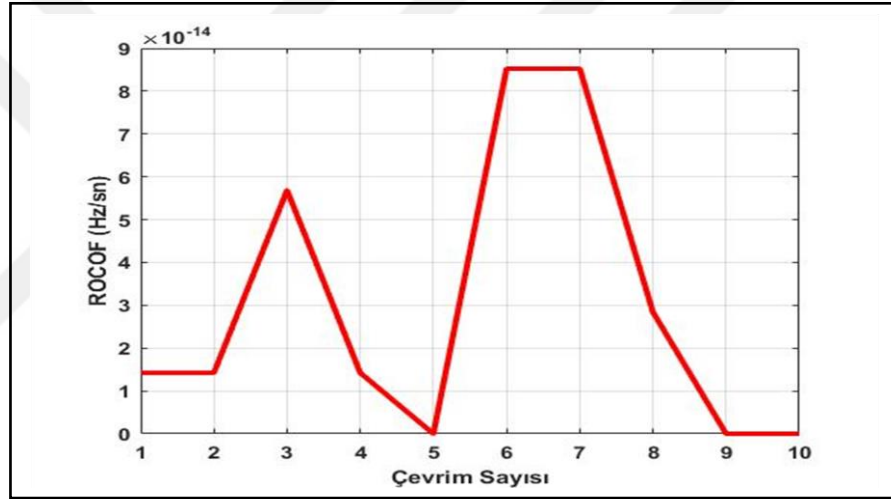
Ek 1- Şekil 14. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (49 Hz)



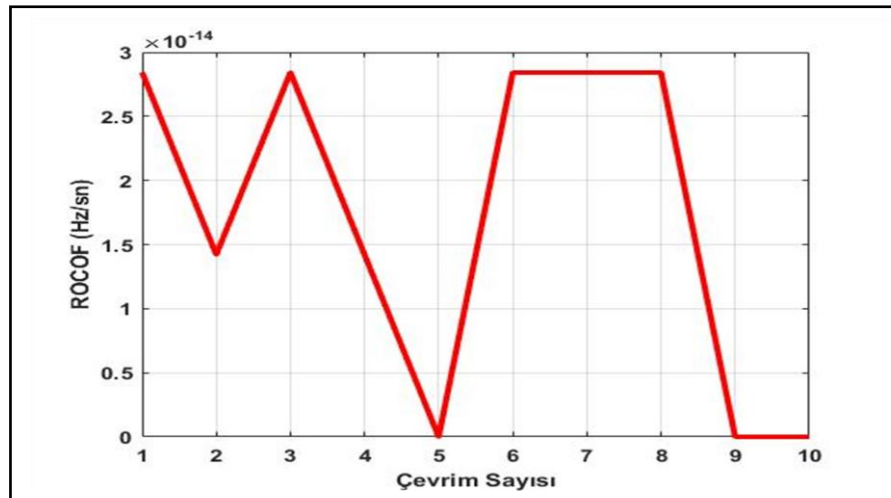
Ek 1- Şekil 15. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (49 Hz)



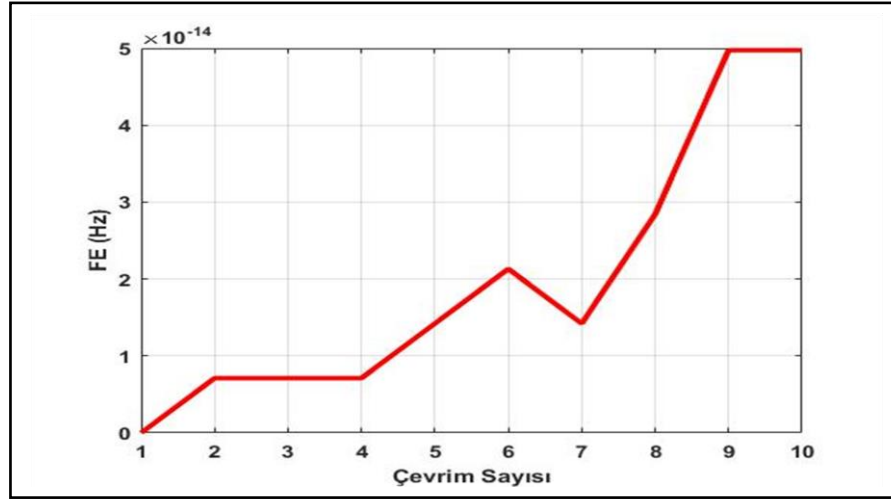
Ek 1- Şekil 16. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre ROCOF (49 Hz)



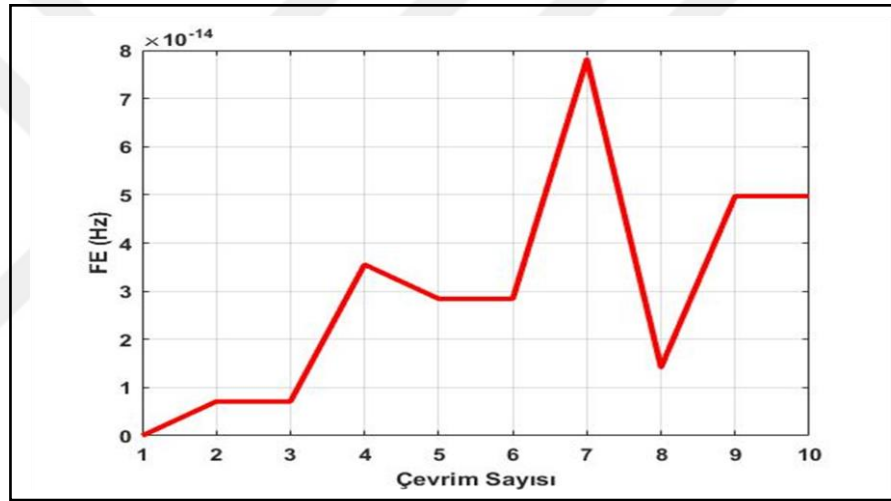
Ek 1- Şekil 17. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (49 Hz)



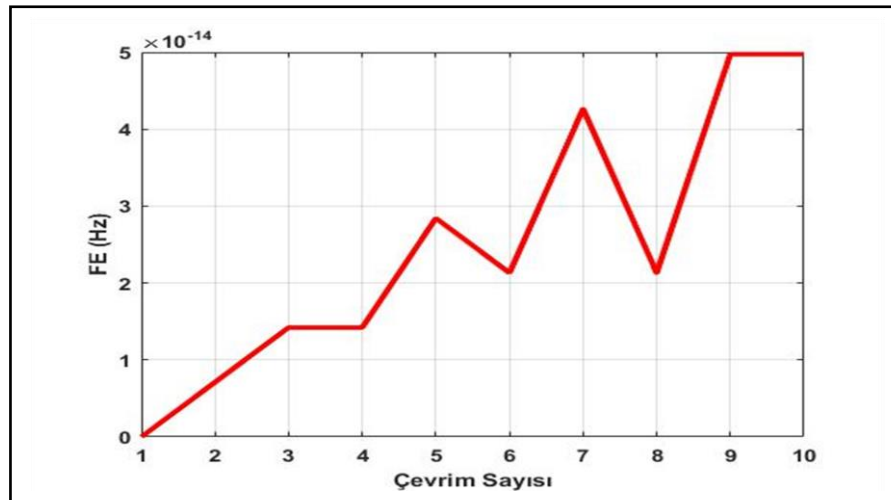
Ek 1- Şekil 18. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (49 Hz)



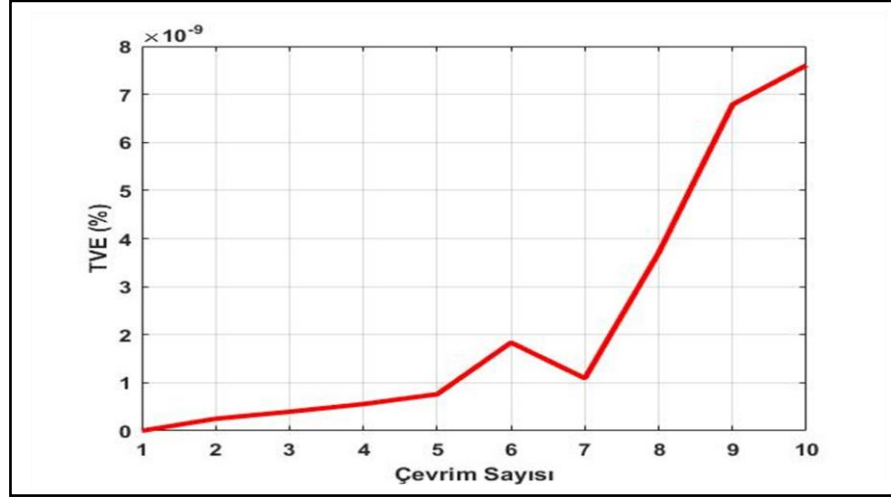
Ek 1- Şekil 19. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre FE (50 Hz)



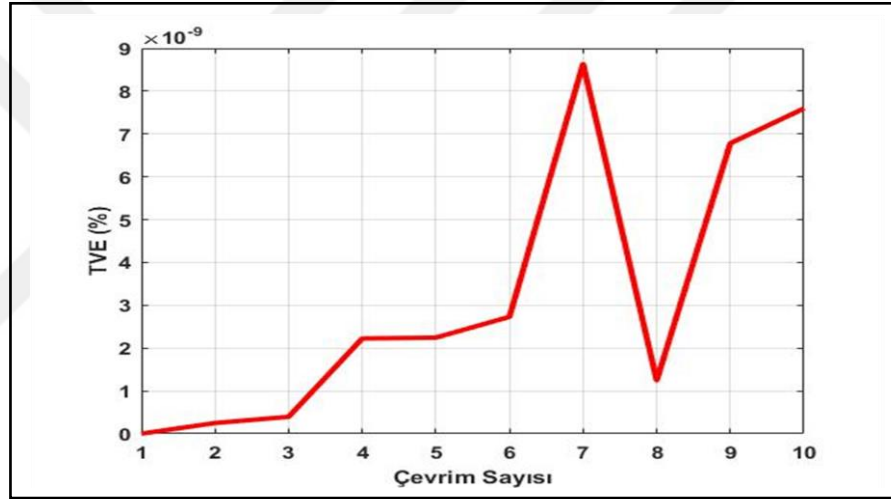
Ek 1- Şekil 20. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (50 Hz)



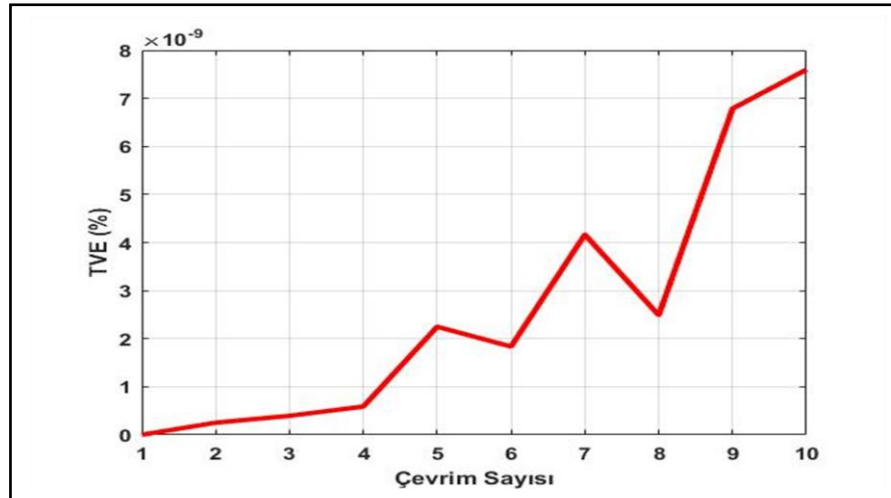
Ek 1- Şekil 21. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (50 Hz)



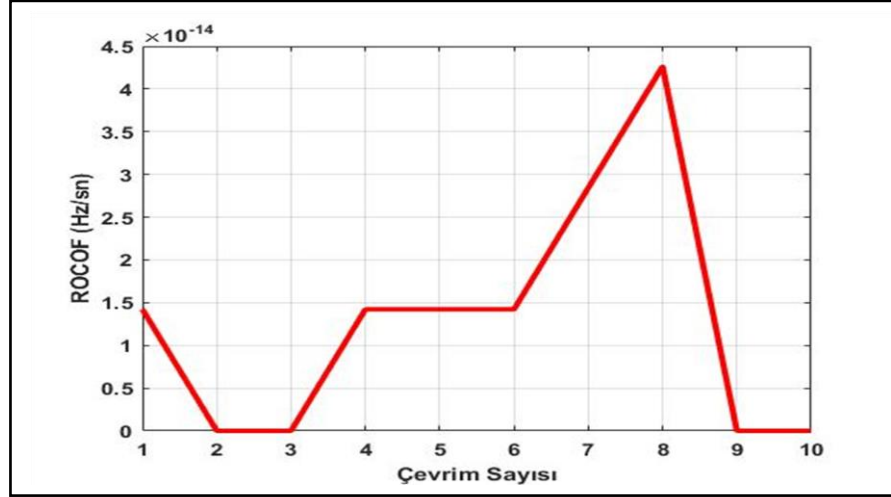
Ek 1- Şekil 22. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre TVE (50 Hz)



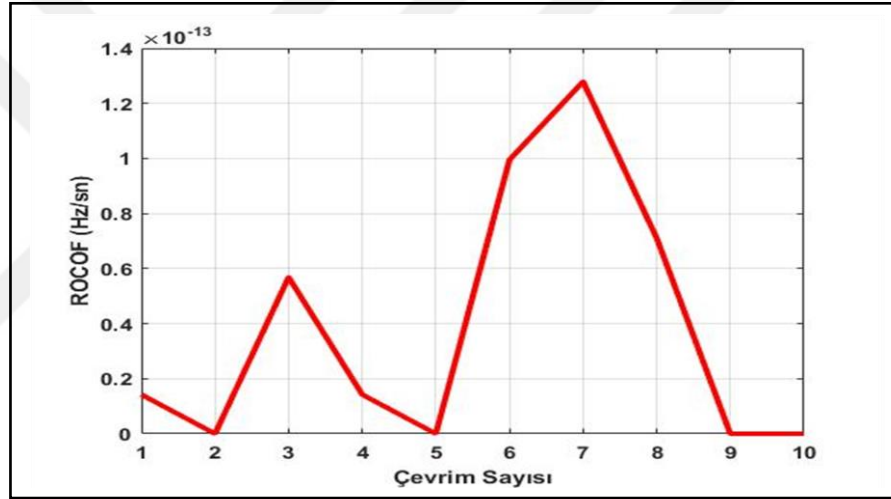
Ek 1- Şekil 23. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (50 Hz)



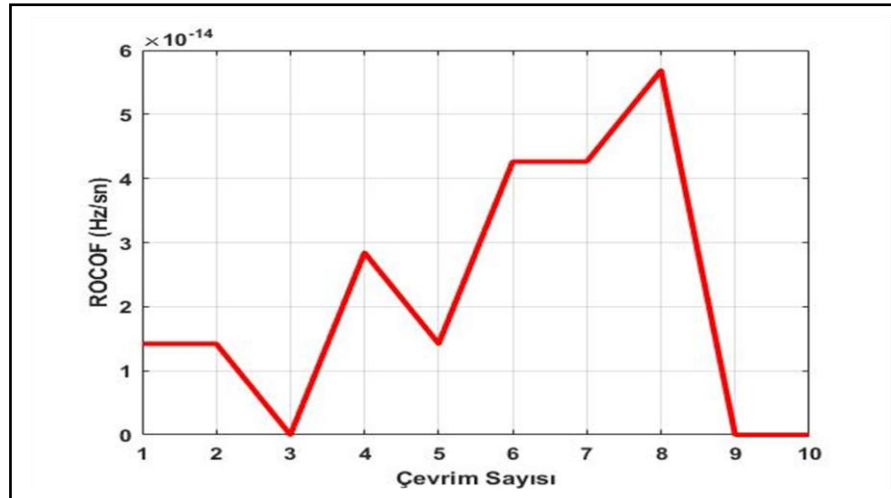
Ek 1- Şekil 24. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (50 Hz)



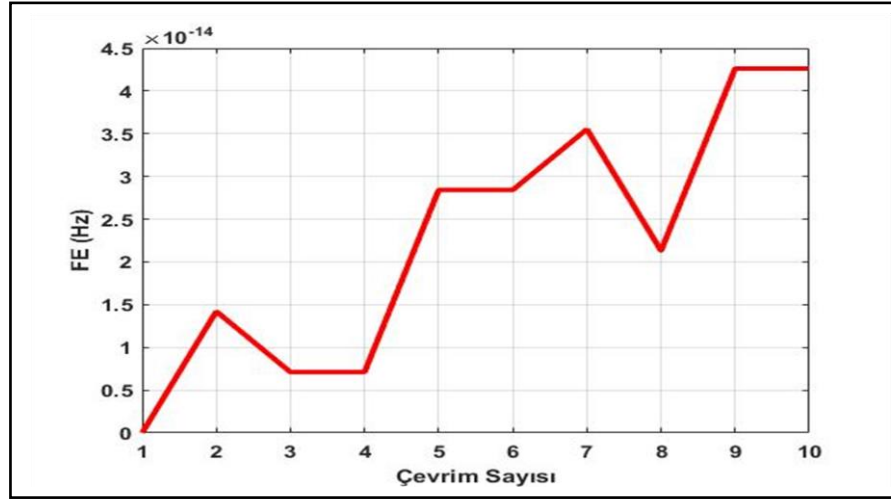
Ek 1- Şekil 25. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (50 Hz)



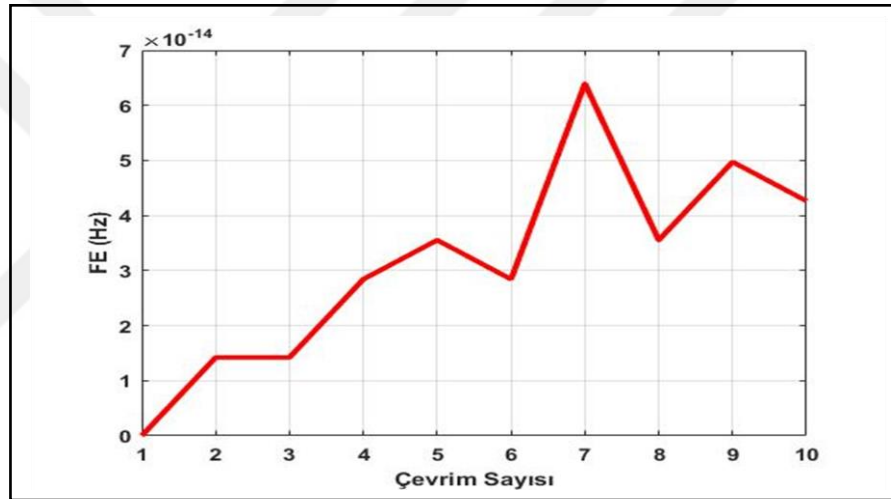
Ek 1- Şekil 26. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (50 Hz)



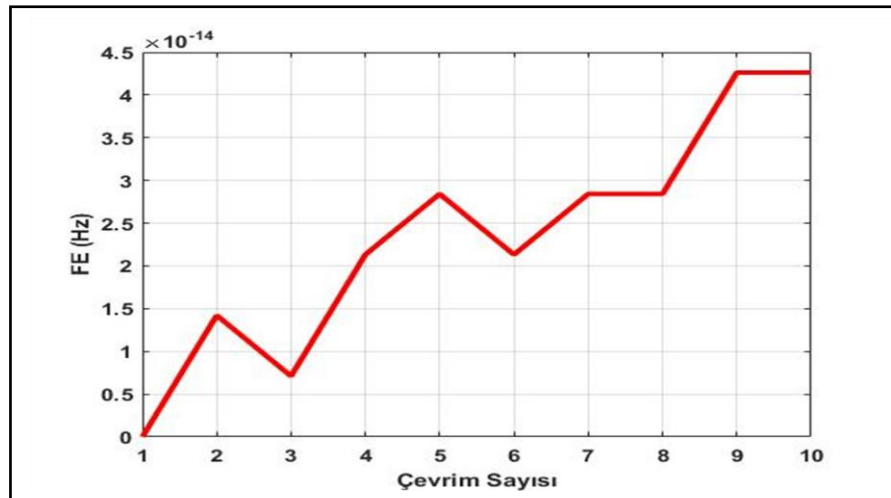
Ek 1- Şekil 27. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (50 Hz)



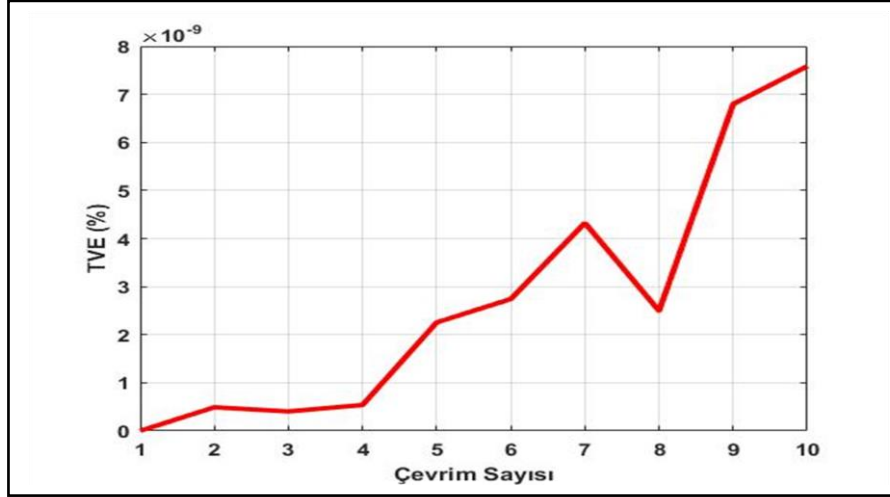
Ek 1- Şekil 28. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre FE (51 Hz)



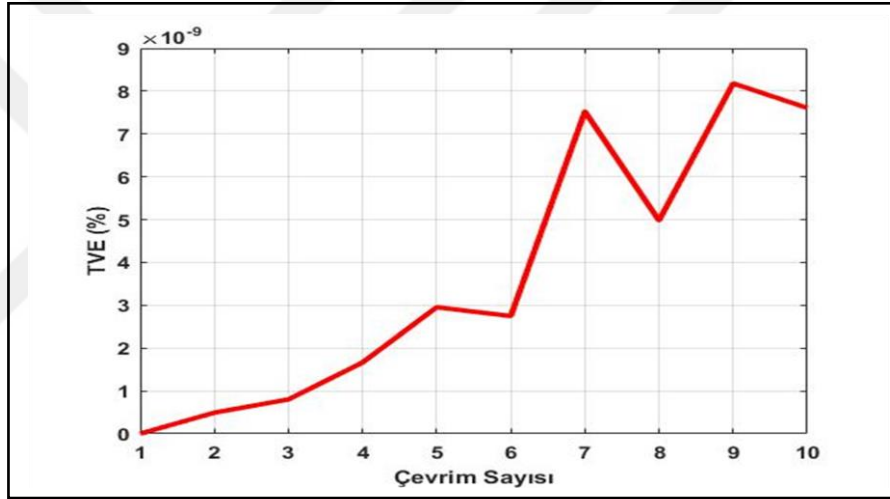
Ek 1- Şekil 29. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (51 Hz)



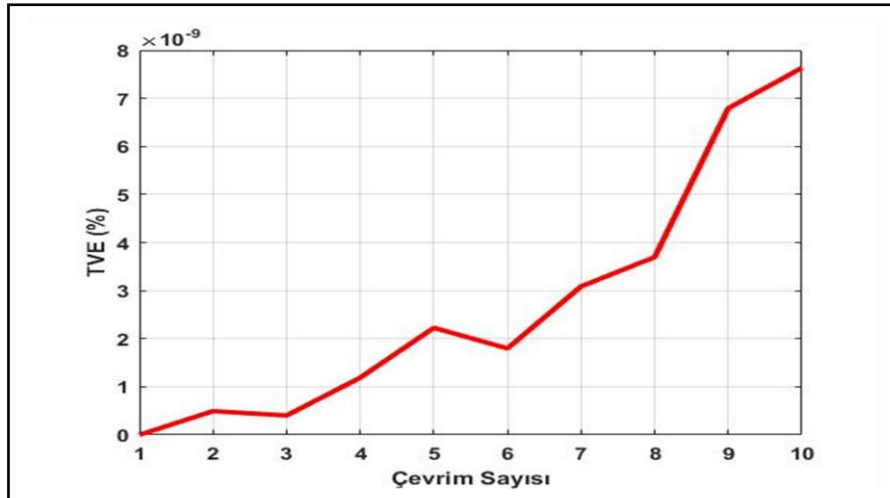
Ek 1- Şekil 30. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (51 Hz)



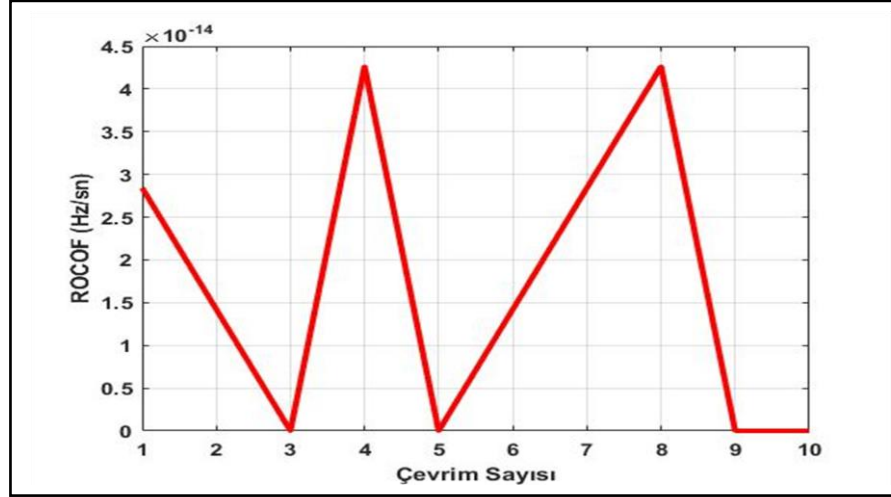
Ek 1- Şekil 31. Faz 1 - Çevrim Sayısına Göre TVE (51 Hz)



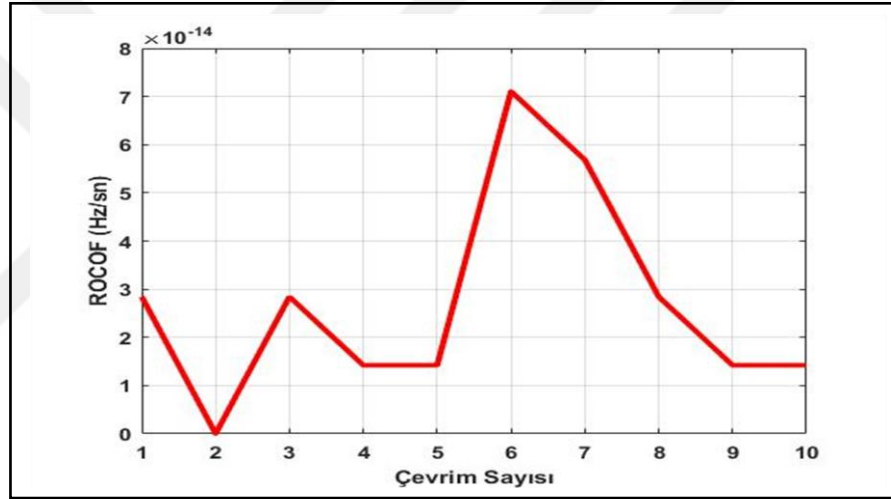
Ek 1- Şekil 32. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (51 Hz)



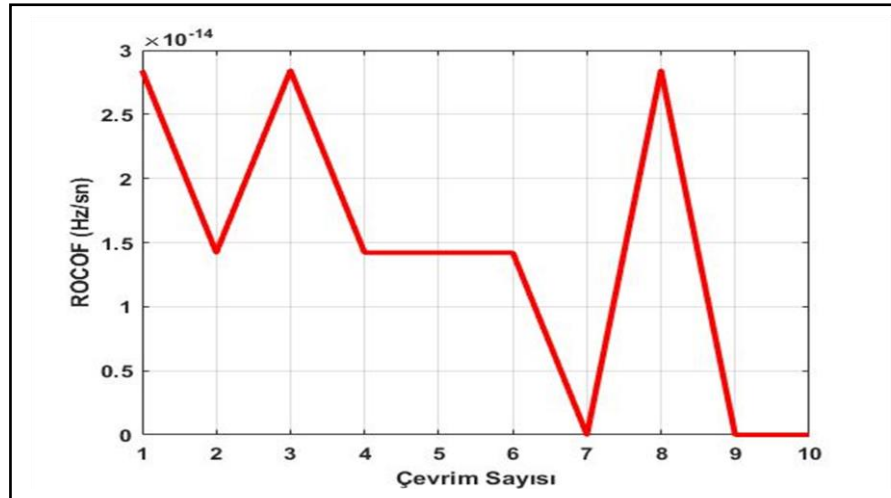
Ek 1- Şekil 33. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (51 Hz)



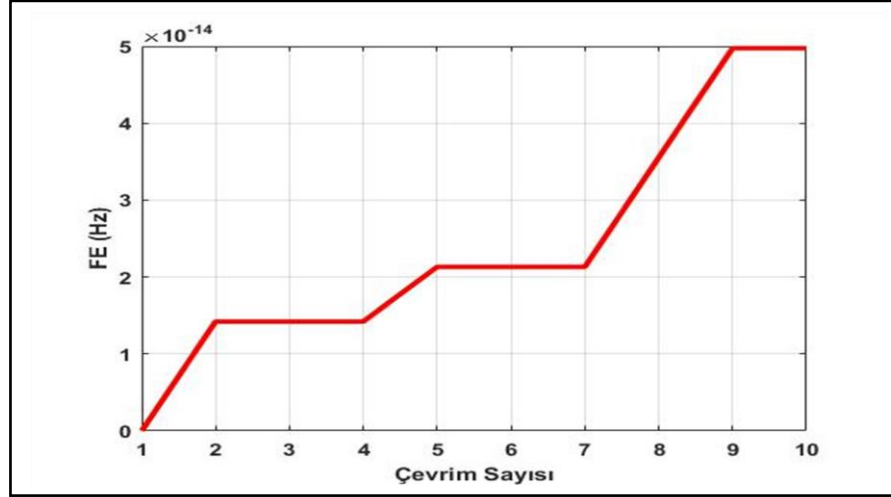
Ek 1- Şekil 34. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre ROCOF (51 Hz)



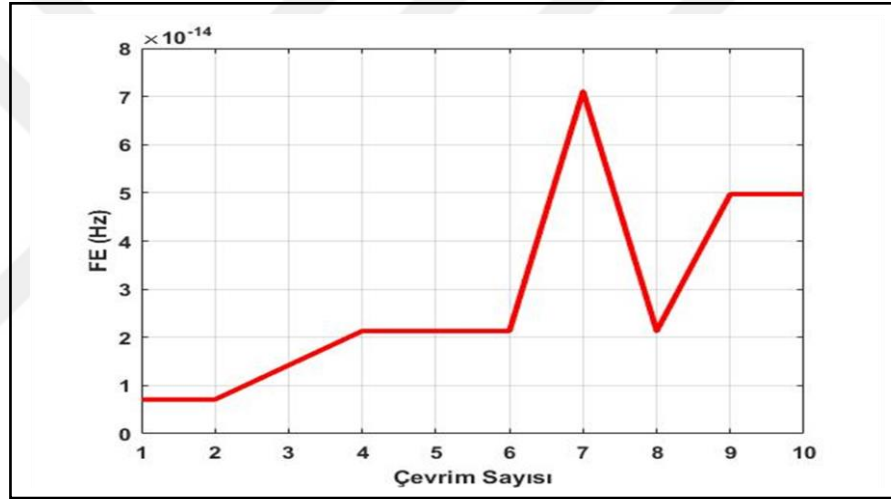
Ek 1- Şekil 35. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (51 Hz)



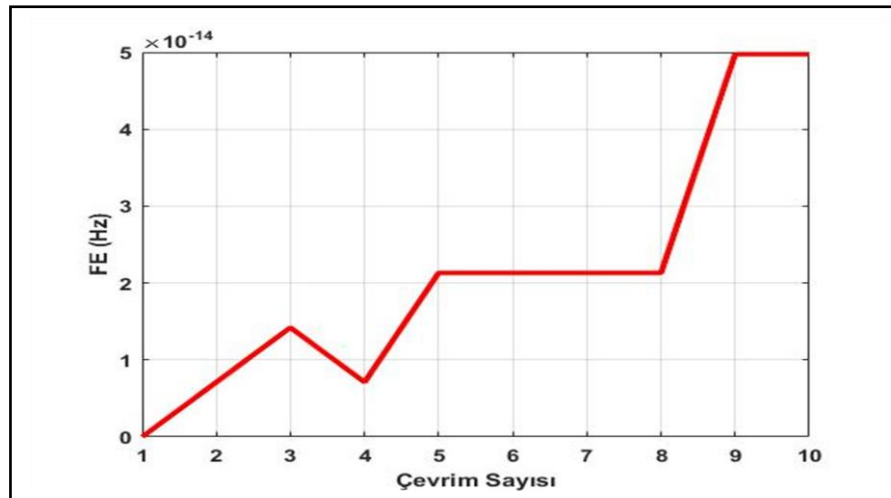
Ek 1- Şekil 36. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (51 Hz)



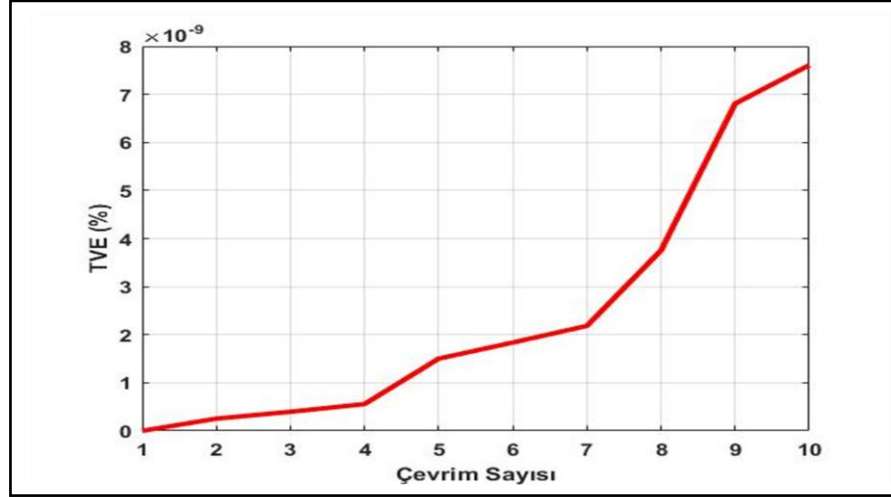
Ek 1- Şekil 37. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre FE (52 Hz)



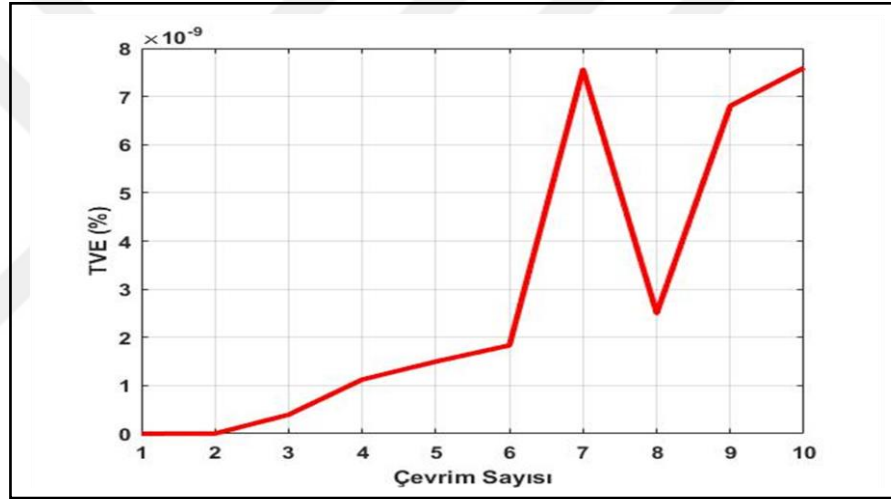
Ek 1- Şekil 38. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (52 Hz)



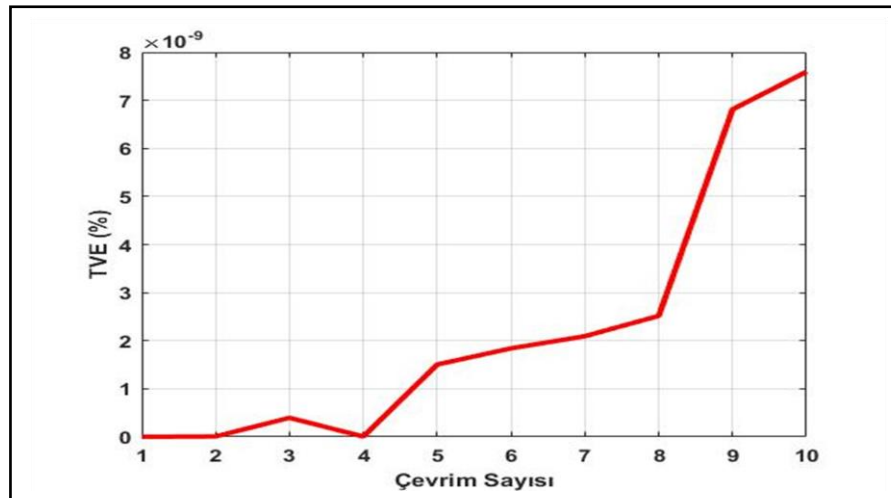
Ek 1- Şekil 39. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (52 Hz)



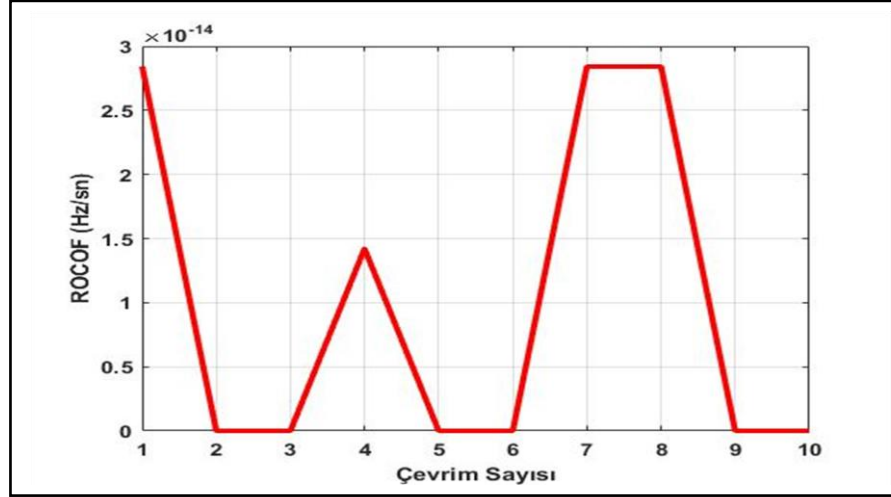
Ek 1- Şekil 40. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre TVE (52 Hz)



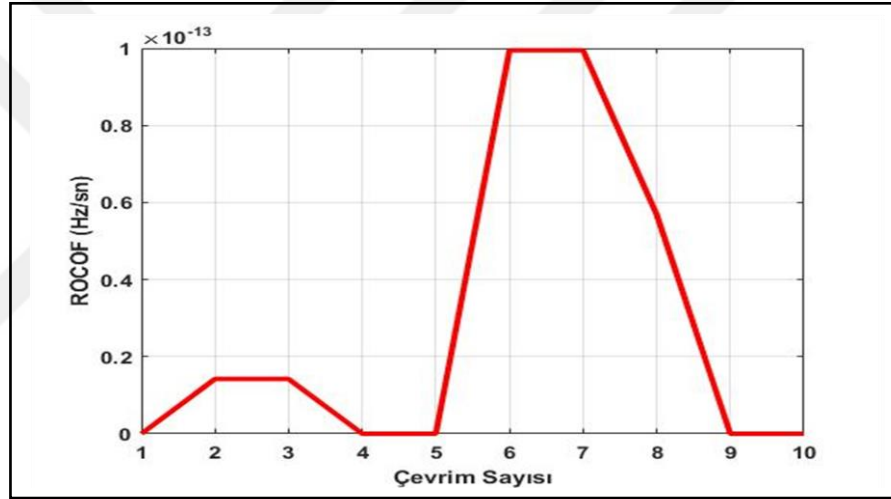
Ek 1- Şekil 41. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (52 Hz)



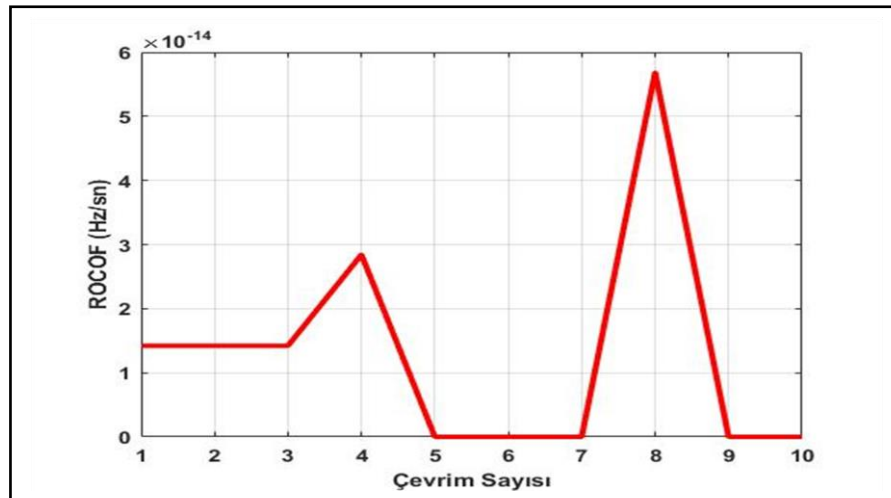
Ek 1- Şekil 42. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (52 Hz)



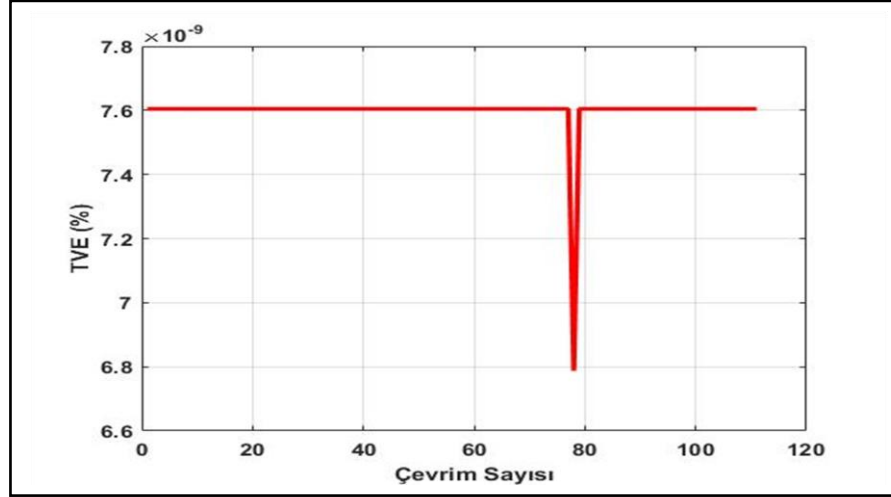
Ek 1- Şekil 43. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre ROCOF (52 Hz)



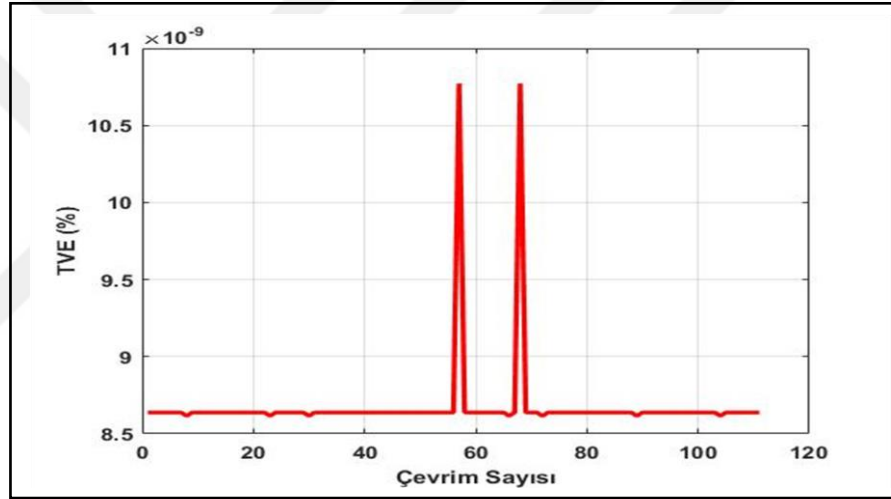
Ek 1- Şekil 44. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (52 Hz)



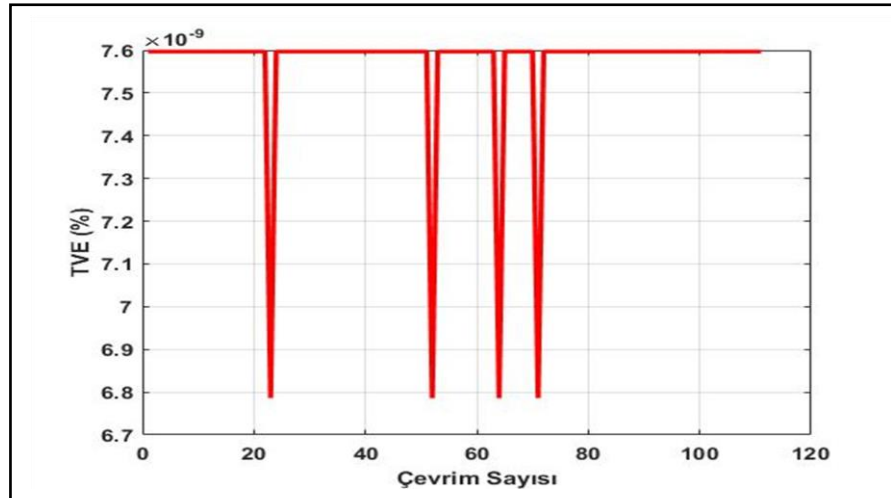
Ek 1- Şekil 45. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (52 Hz)



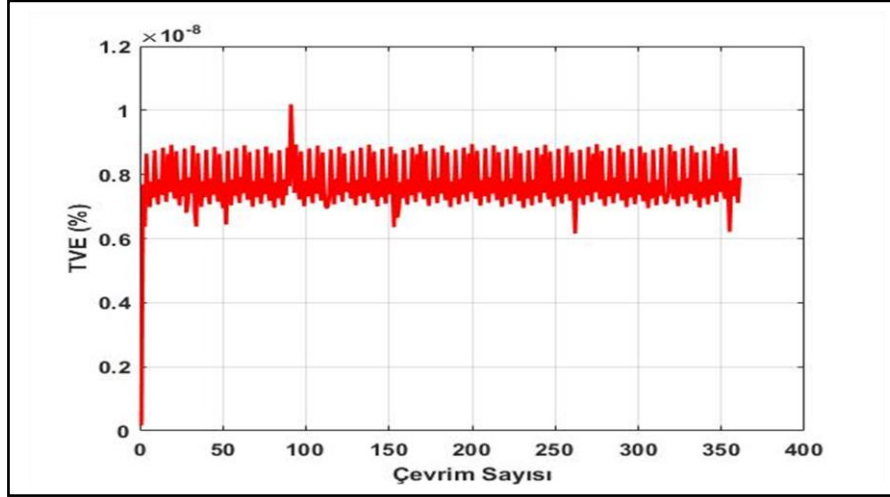
Ek 1- Şekil 46. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre TVE (Genlik Testi)



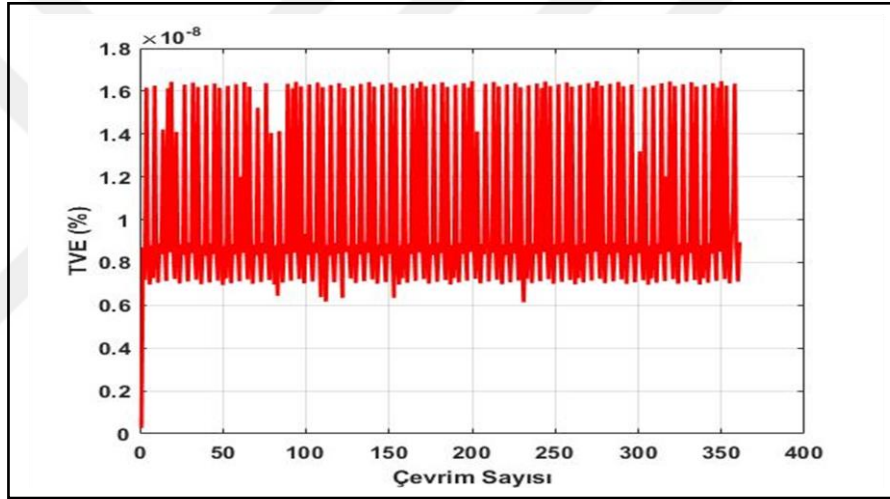
Ek 1- Şekil 47. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Genlik Testi)



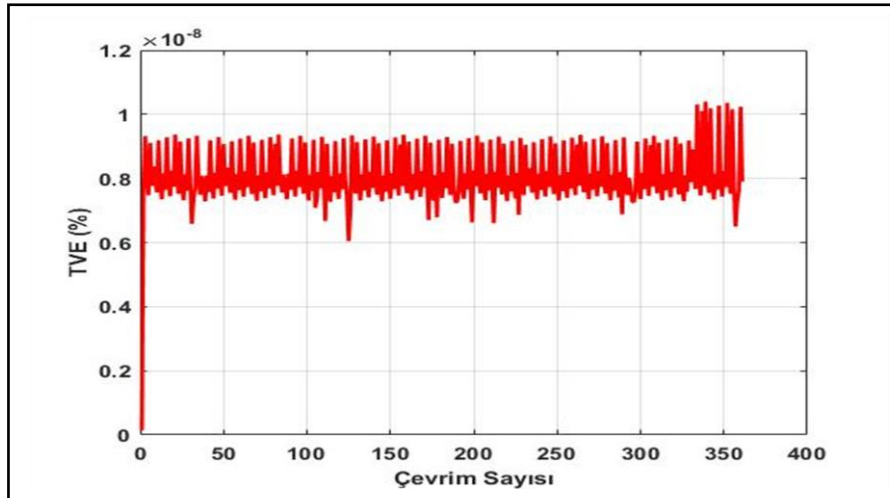
Ek 1- Şekil 48. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Genlik Testi)



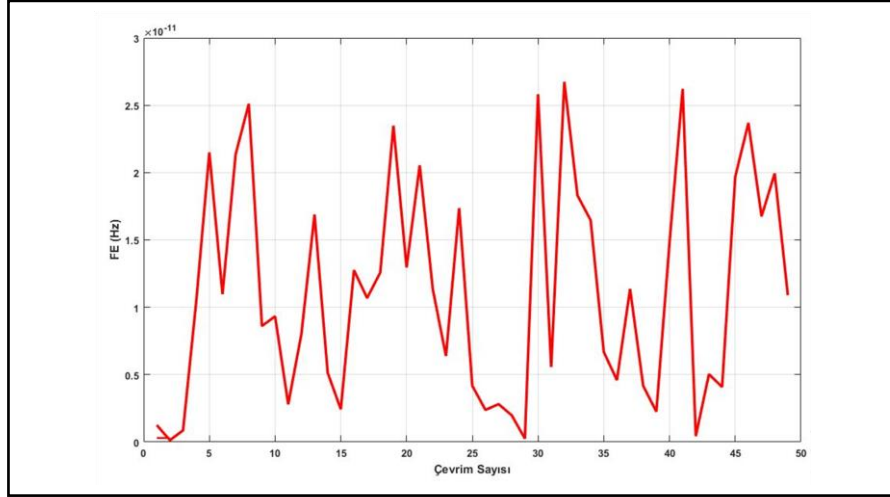
Ek 1- Şekil 49. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre TVE (Faz Açısı Testi)



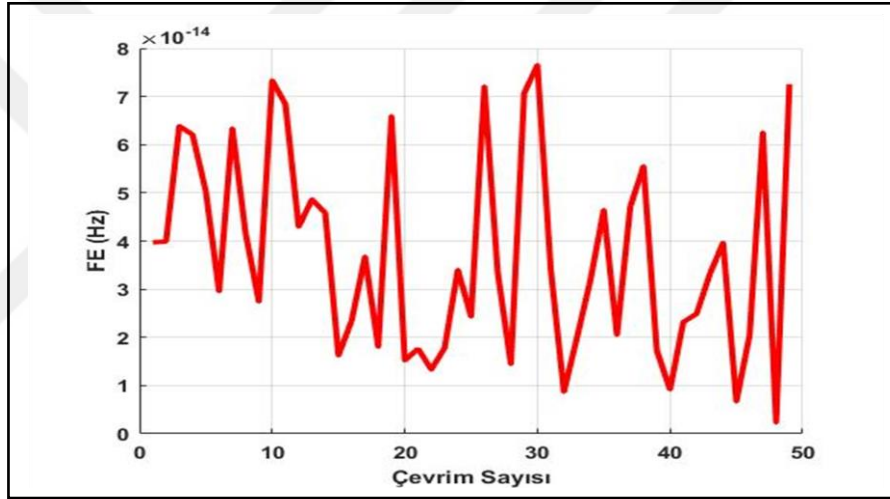
Ek 1- Şekil 50. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Faz Açısı Testi)



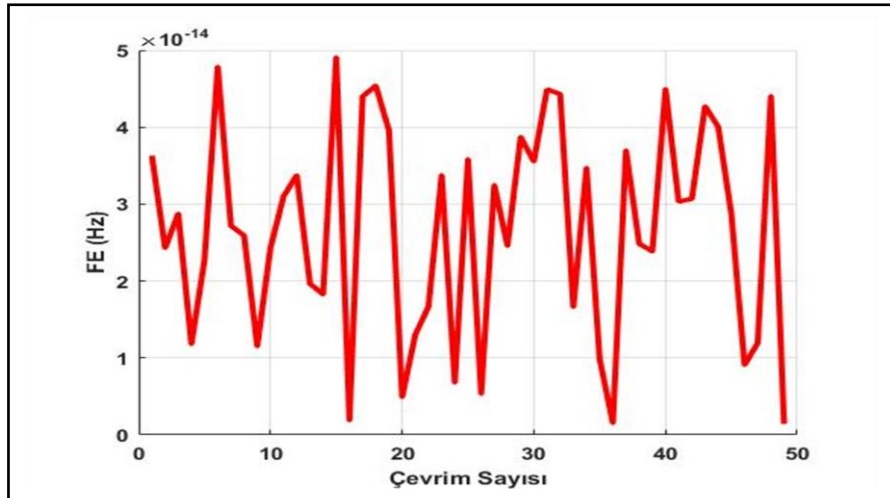
Ek 1- Şekil 51. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Faz Açısı Testi)



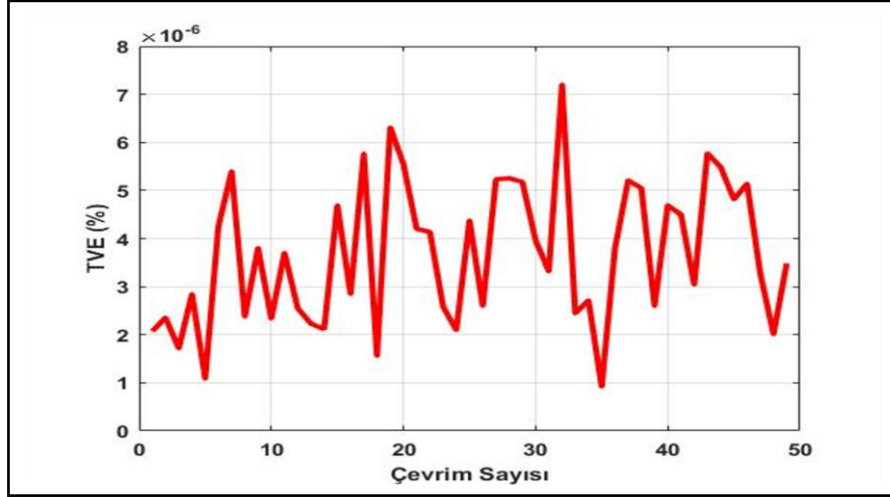
Ek 1- Şekil 52. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre FE (Harmonik Testi)



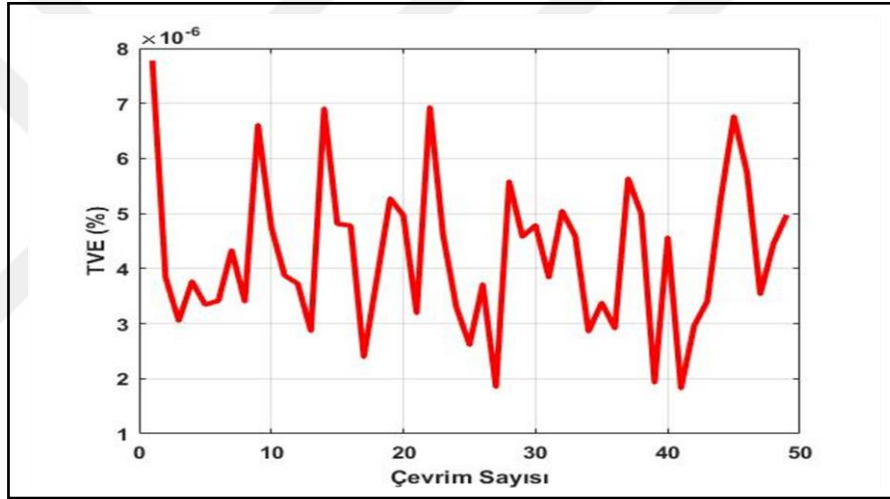
Ek 1- Şekil 53. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (Harmonik Testi)



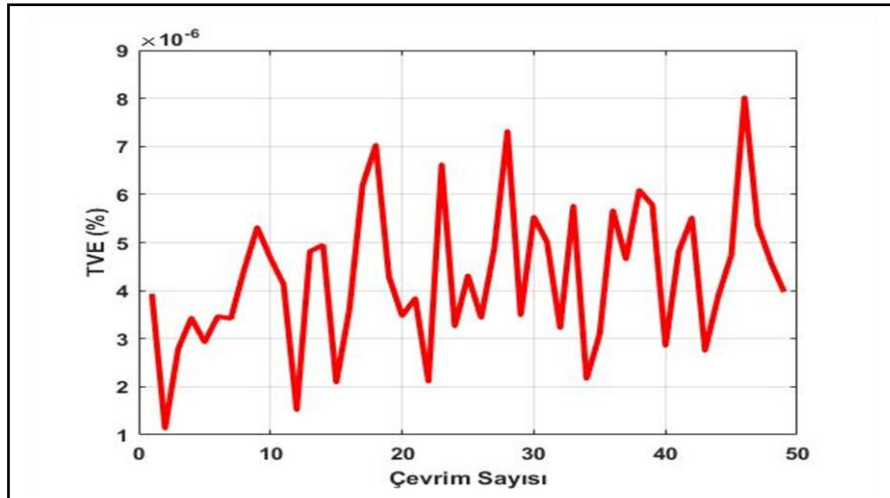
Ek 1- Şekil 54. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (Harmonik Testi)



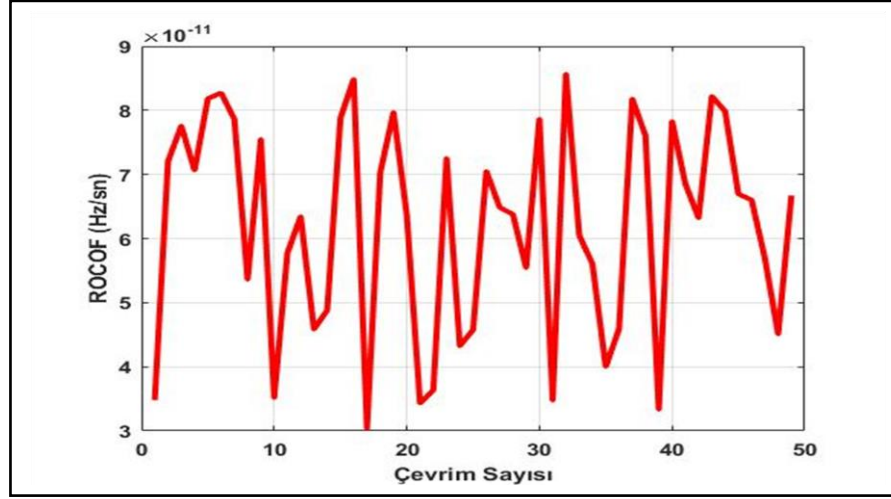
Ek 1- Şekil 55. Faz 1 TVE (Harmonik Testi)



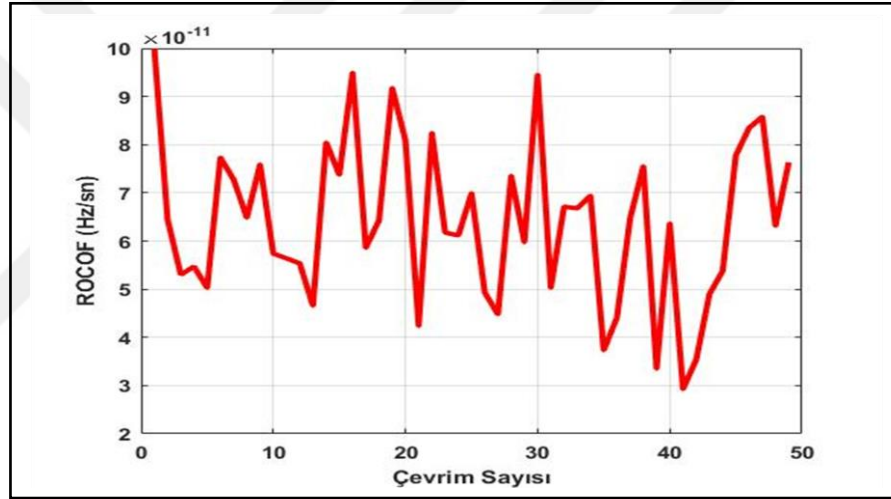
Ek 1- Şekil 56. Faz 2 - TVE (Harmonik Testi)



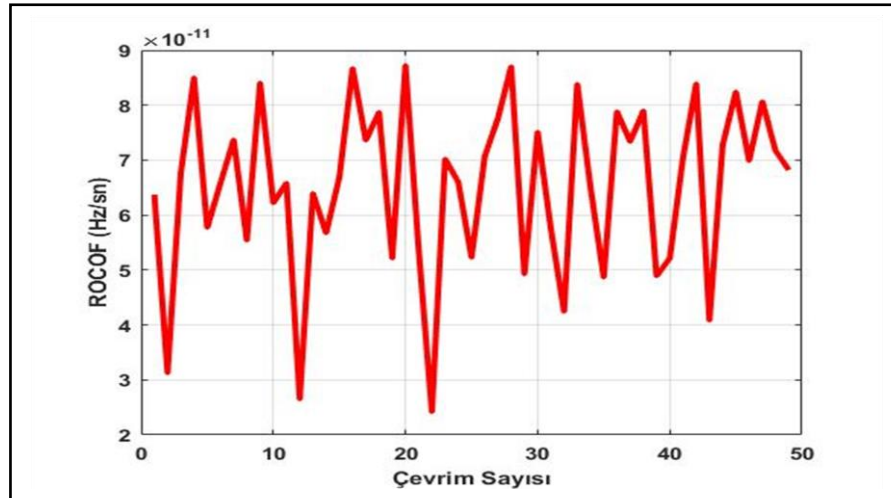
Ek 1- Şekil 57. Faz 3 - TVE (Harmonik Testi)



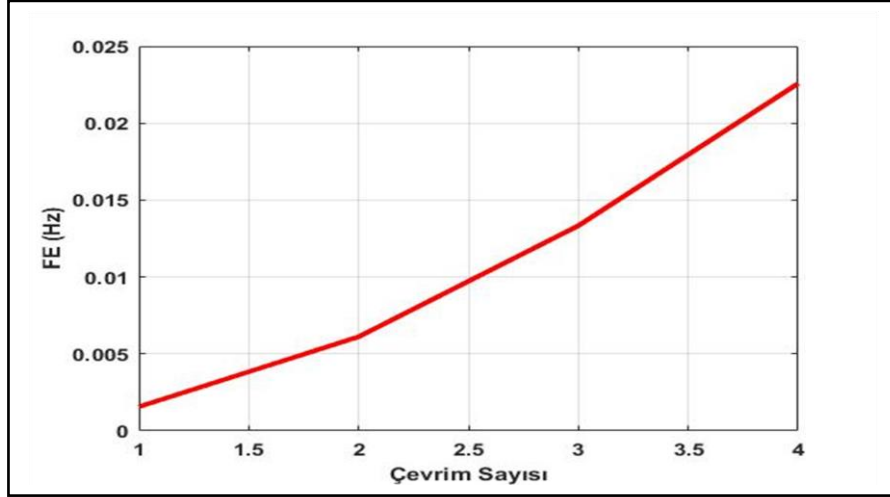
Ek 1- Şekil 58. Faz 1 ROCOF (Harmonik Testi)



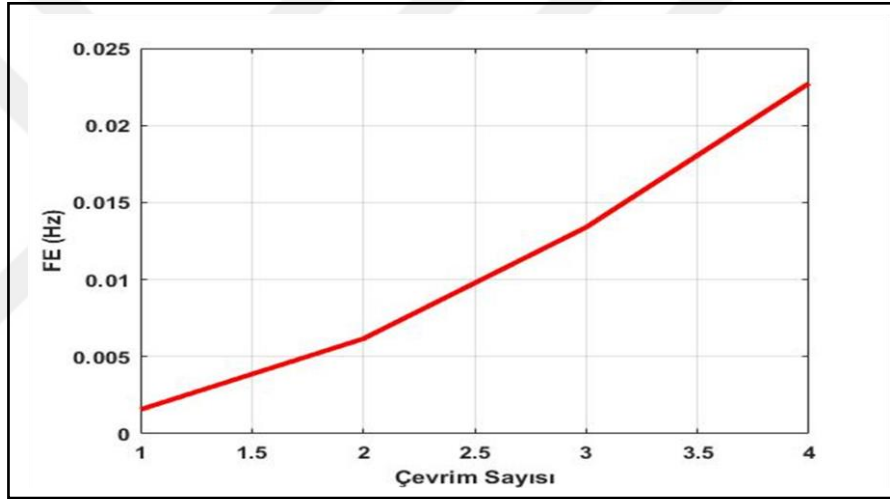
Ek 1- Şekil 59. Faz 2 - ROCOF (Harmonik Testi)



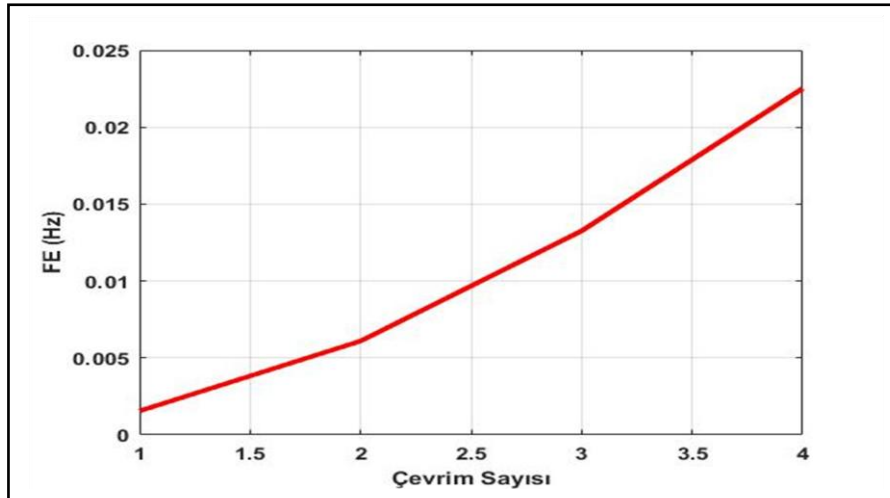
Ek 1- Şekil 60. Faz 3 - ROCOF (Harmonik Testi)



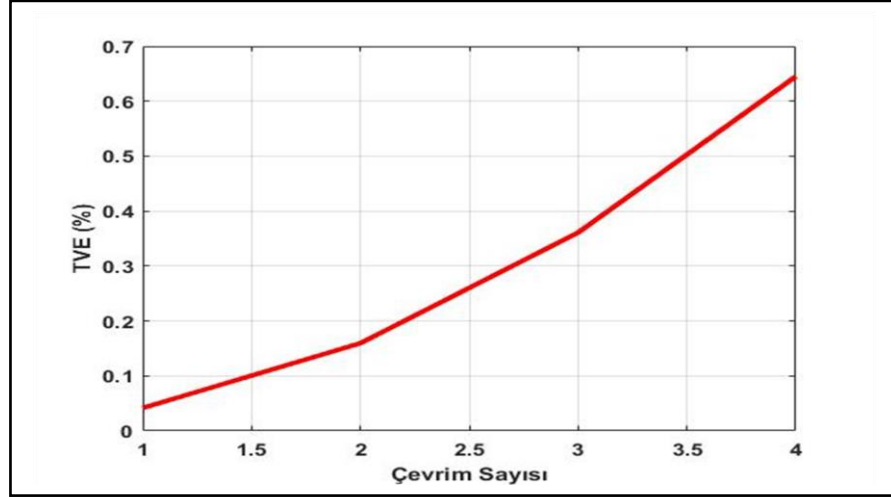
Ek 1- Şekil 61. Faz 1 FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



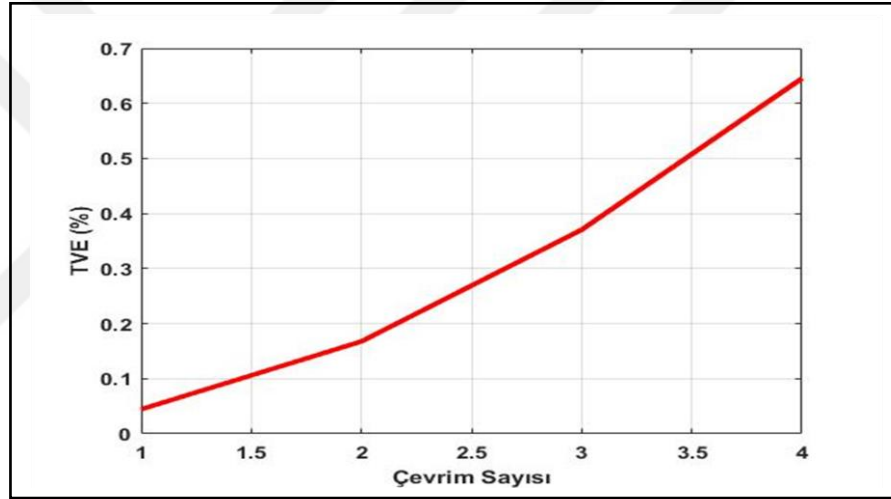
Ek 1- Şekil 62. Faz 2 - FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



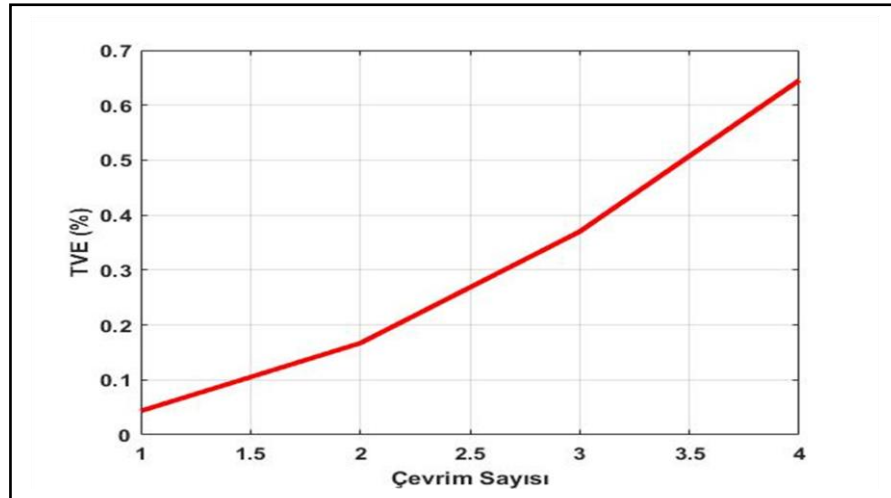
Ek 1- Şekil 63. Faz 3 - FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



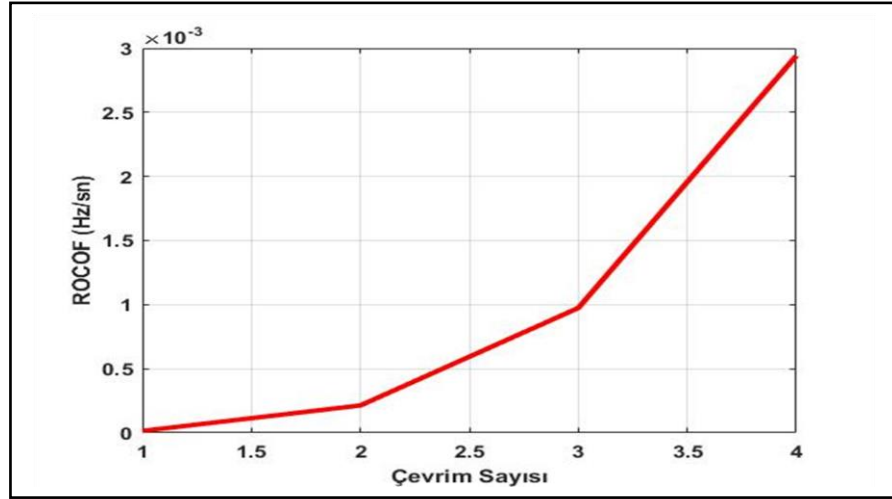
Ek 1- Şekil 64. Faz 1 TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



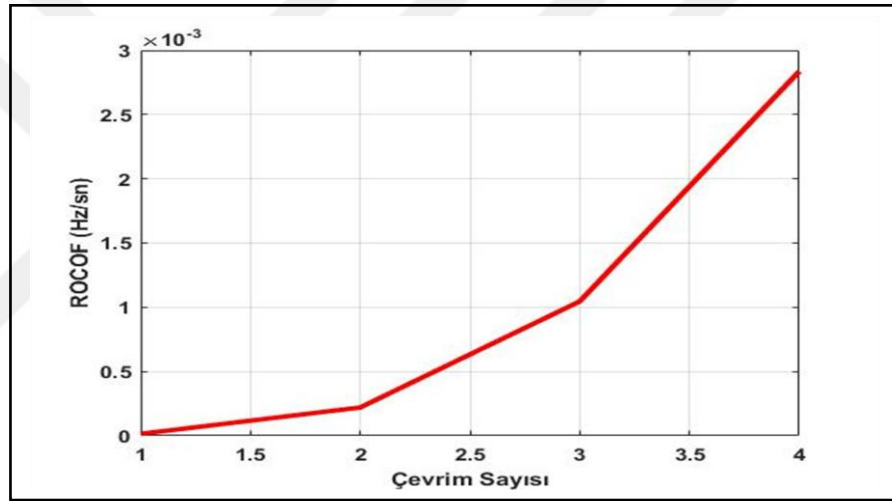
Ek 1- Şekil 65. Faz 2 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



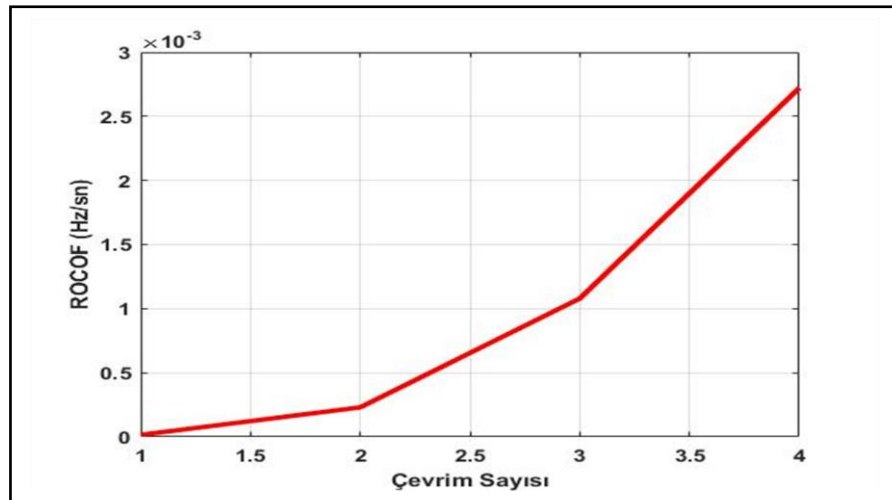
Ek 1- Şekil 66. Faz 3 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



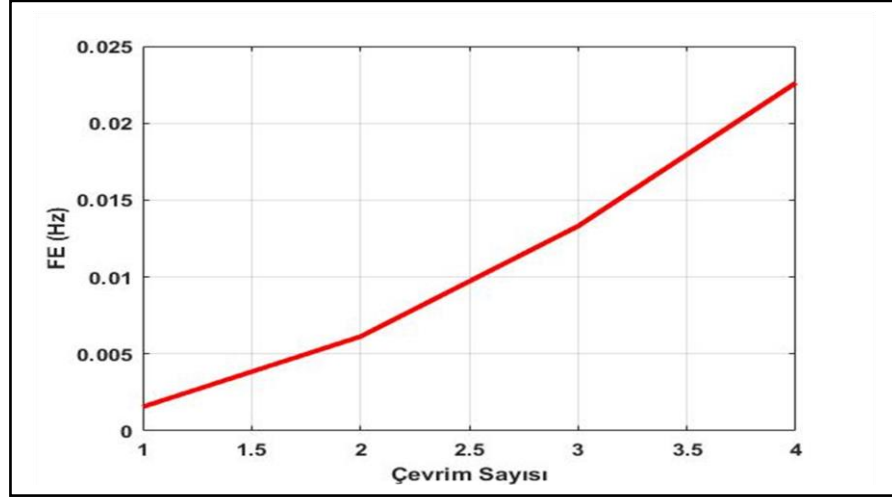
Ek 1- Şekil 67. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



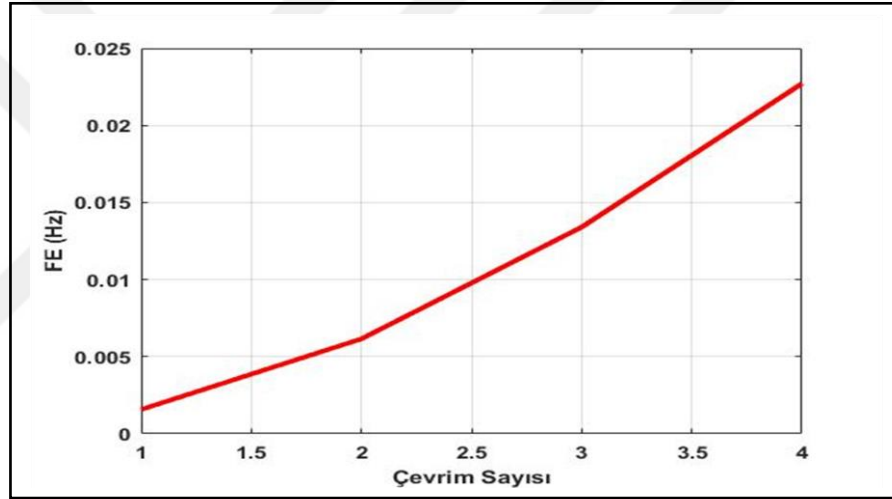
Ek 1- Şekil 68. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



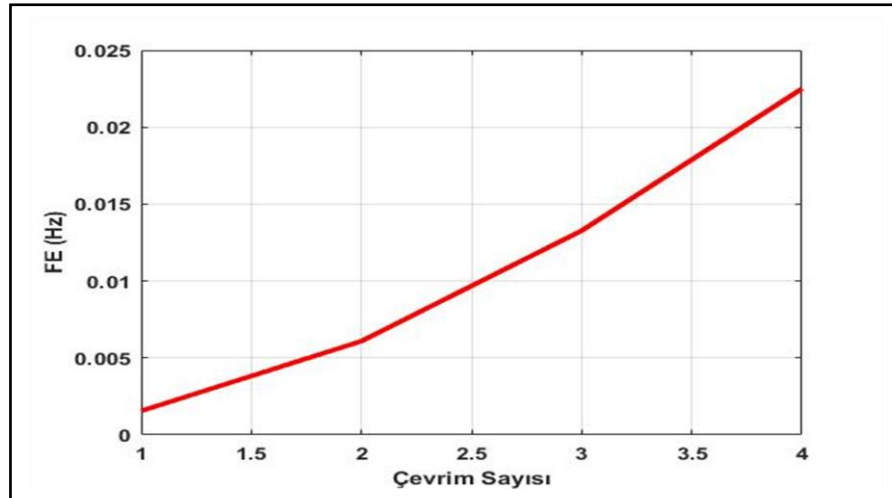
Ek 1- Şekil 69. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a=0,1$)



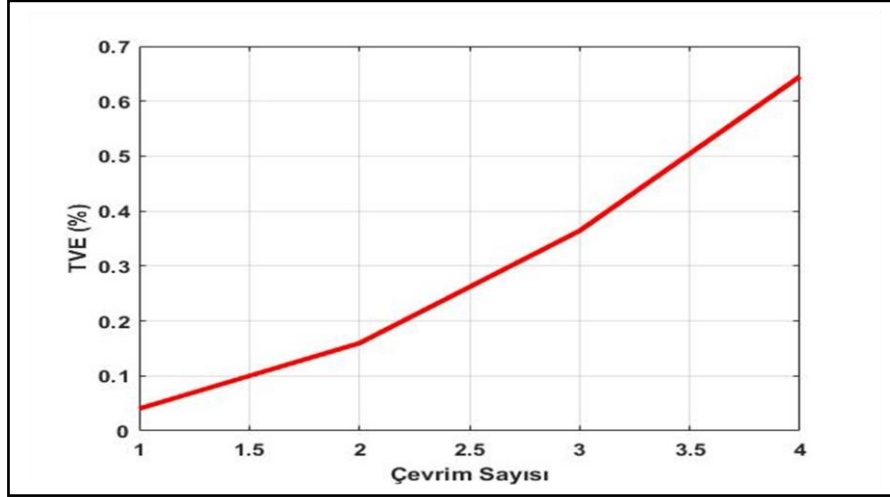
Ek 1- Şekil 70. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



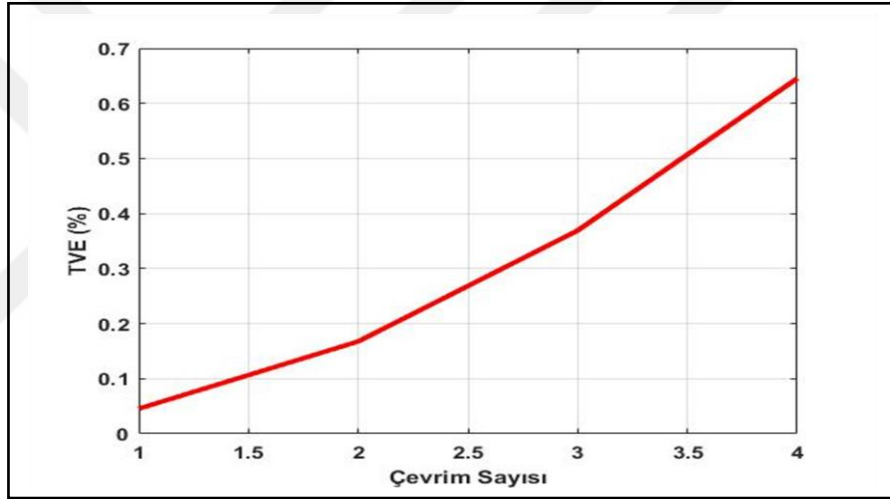
Ek 1- Şekil 71. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



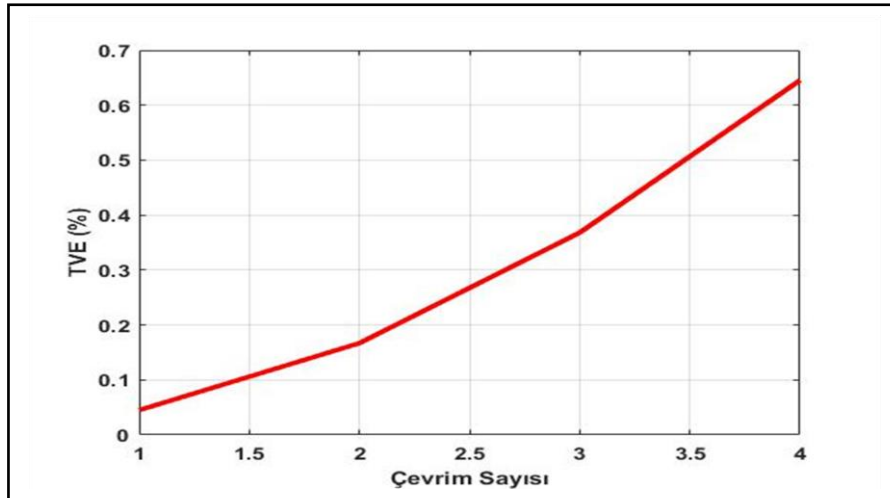
Ek 1- Şekil 72. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



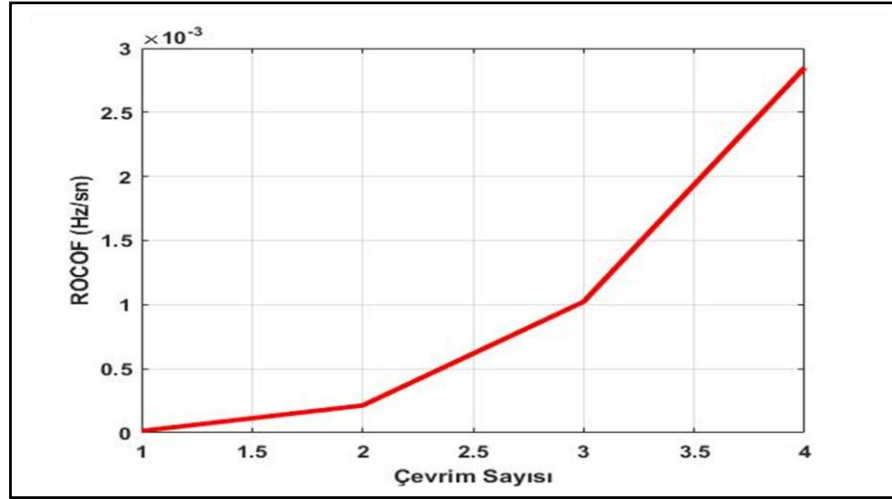
Ek 1- Şekil 73. Faz 1 TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



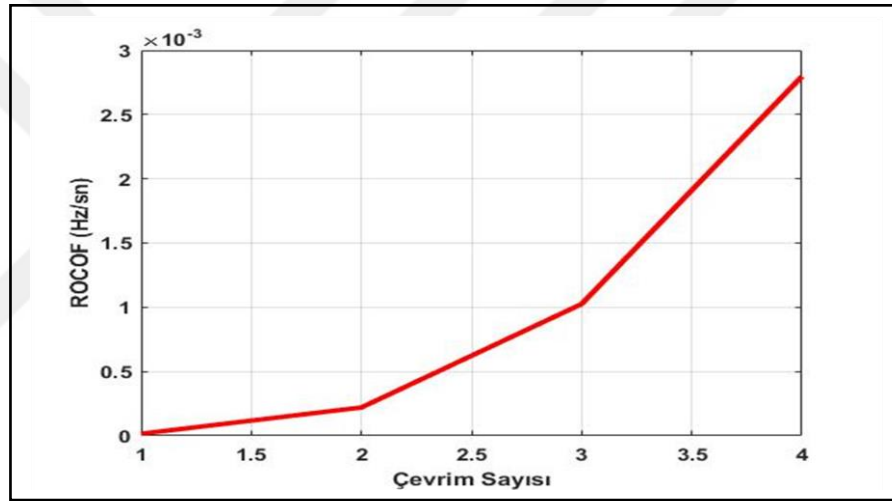
Ek 1- Şekil 74. Faz 2 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



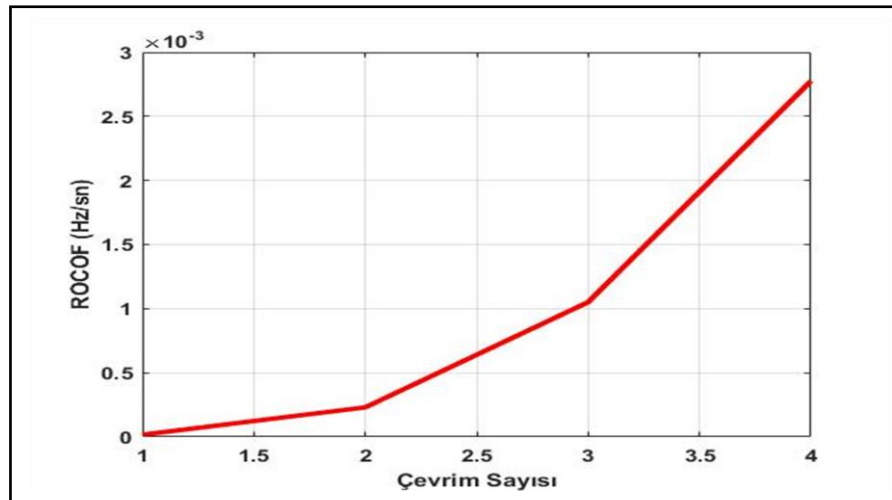
Ek 1- Şekil 75. Faz 3 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



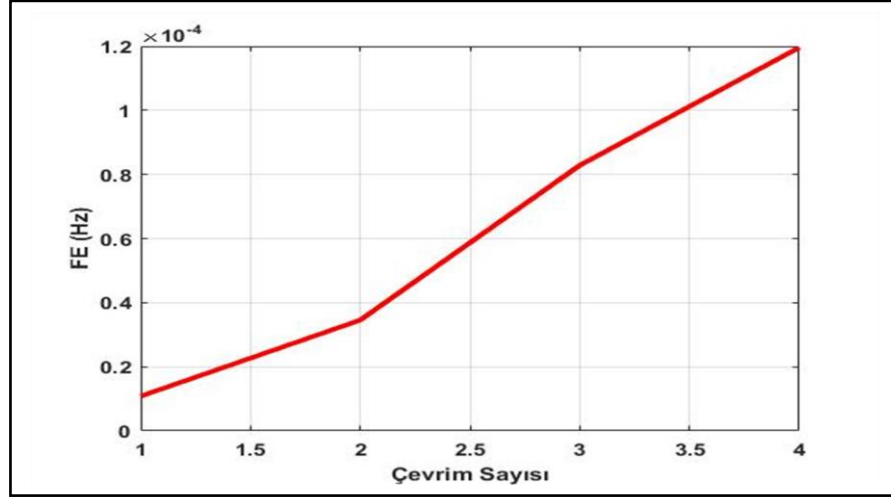
Ek 1- Şekil 76. Faz 1 ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



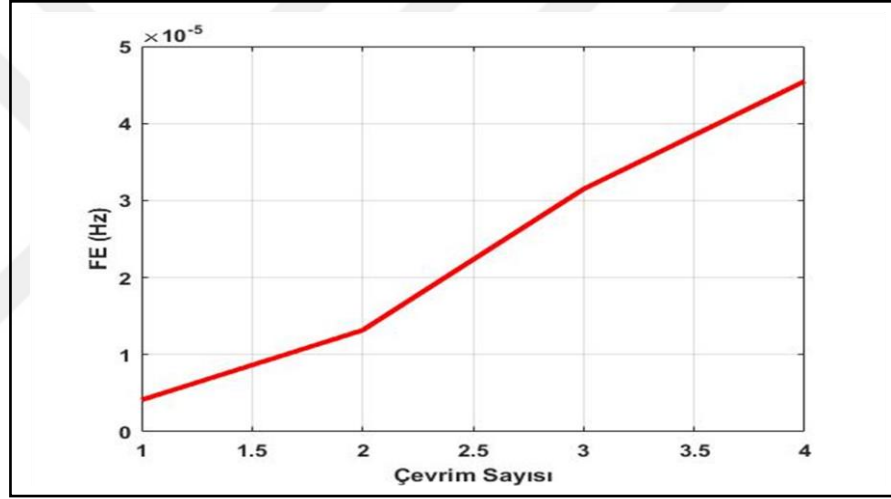
Ek 1- Şekil 77. Faz 2 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



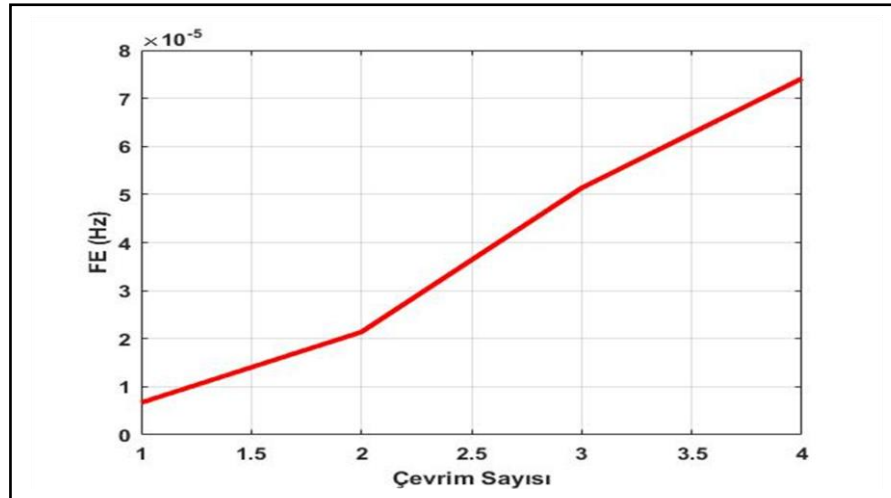
Ek 1- Şekil 78. Faz 3 - Göre ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği - $k_a = -0,1$)



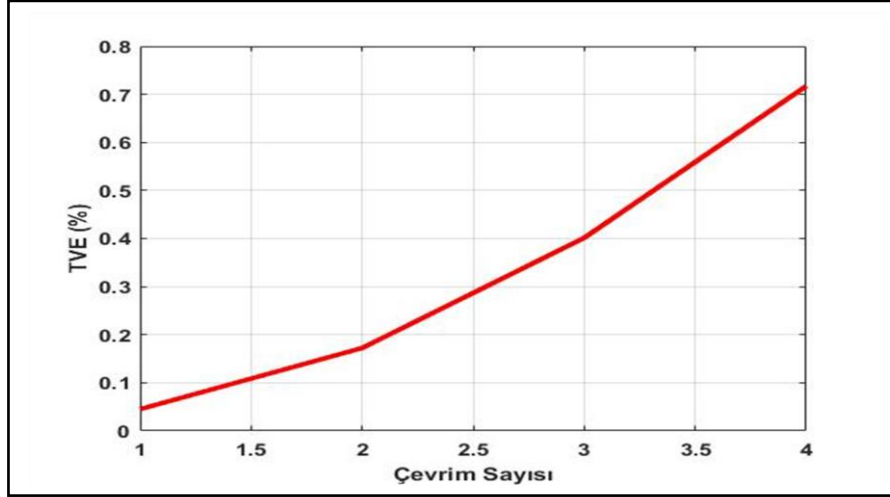
Ek 1- Şekil 79. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



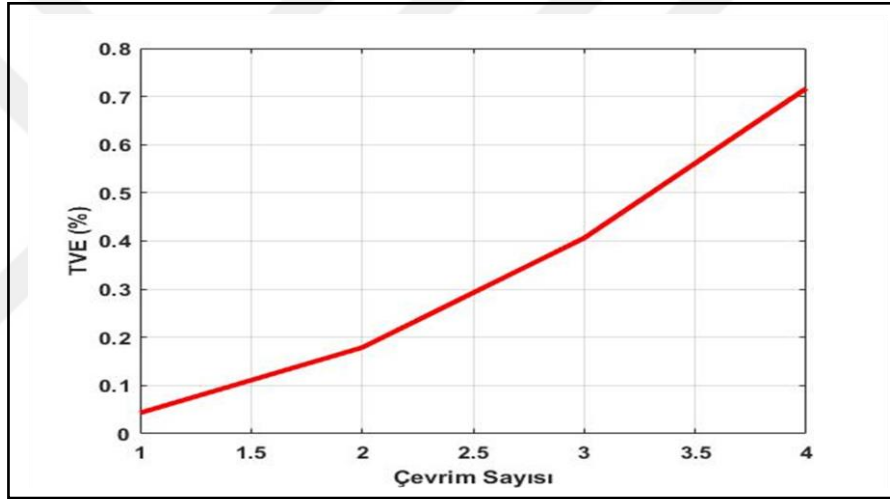
Ek 1- Şekil 80. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



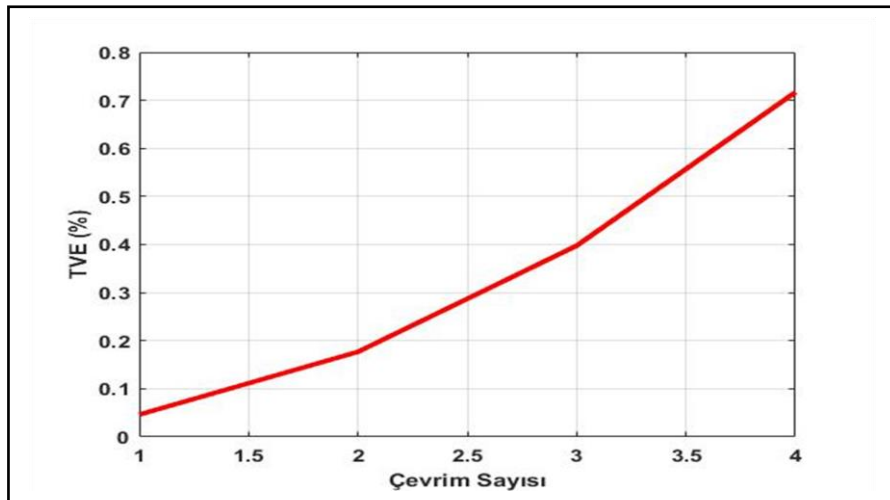
Ek 1- Şekil 81. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



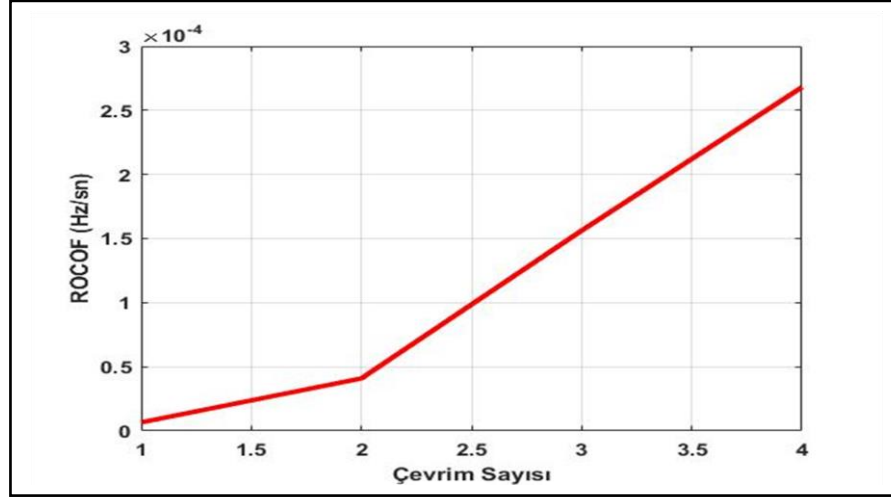
Ek 1- Şekil 82. Faz 1 Çevrim Sayısına Göre TVE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



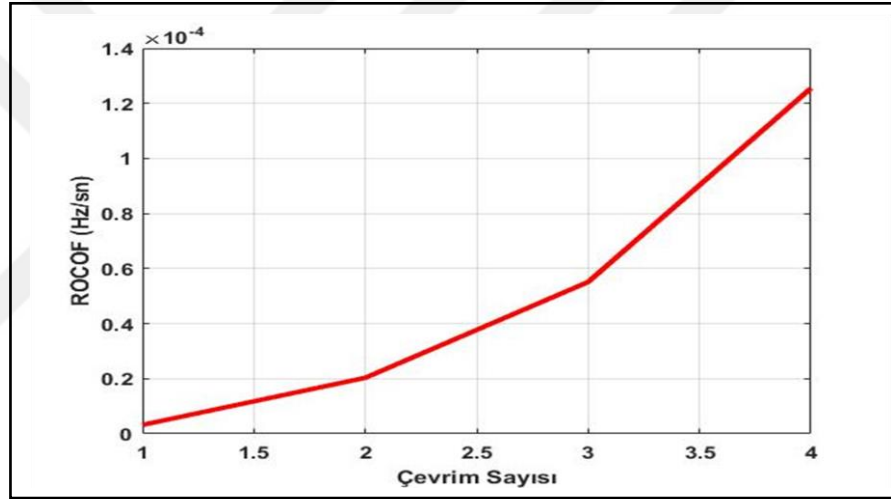
Ek 1- Şekil 83. Faz 2 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



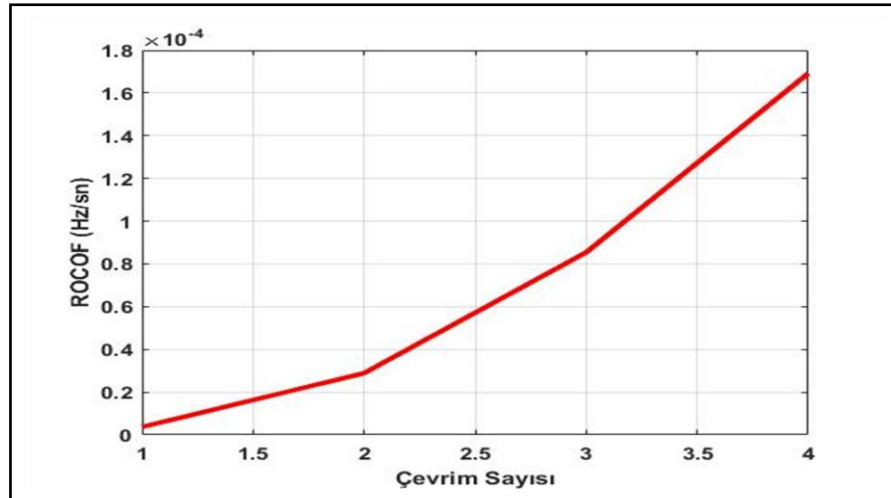
Ek 1- Şekil 84. Faz 3 - Çevrim Sayısına Göre TVE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



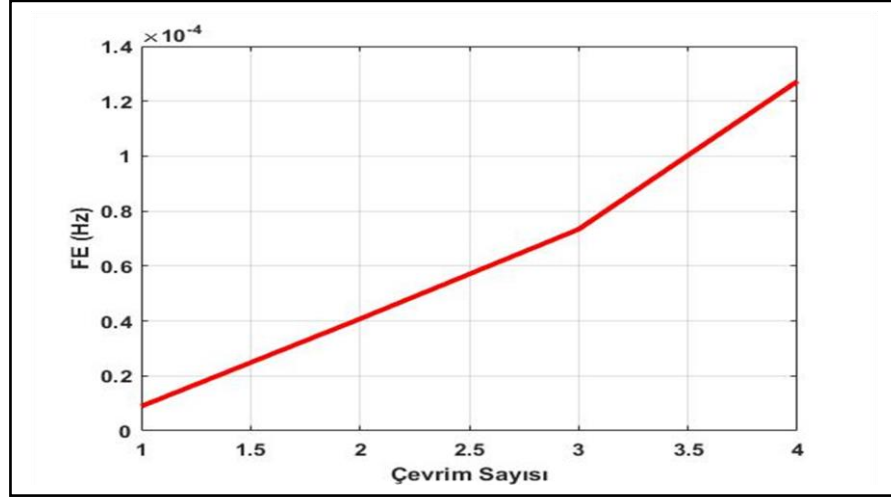
Ek 1- Şekil 85. Faz 1 ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



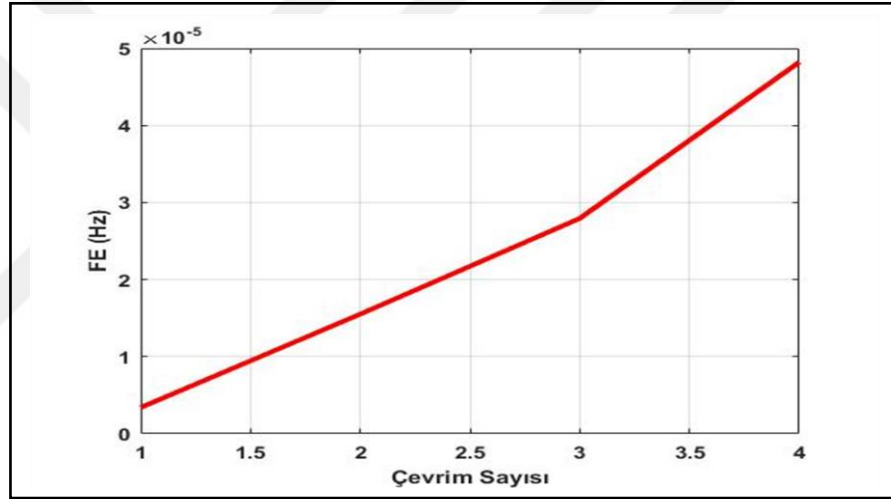
Ek 1- Şekil 86. Faz 2 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



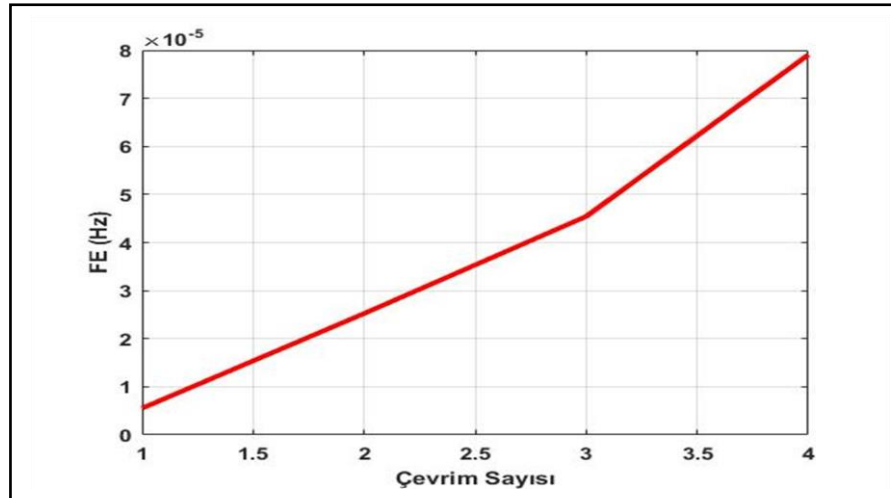
Ek 1- Şekil 87. Faz 3 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x=0,1$)



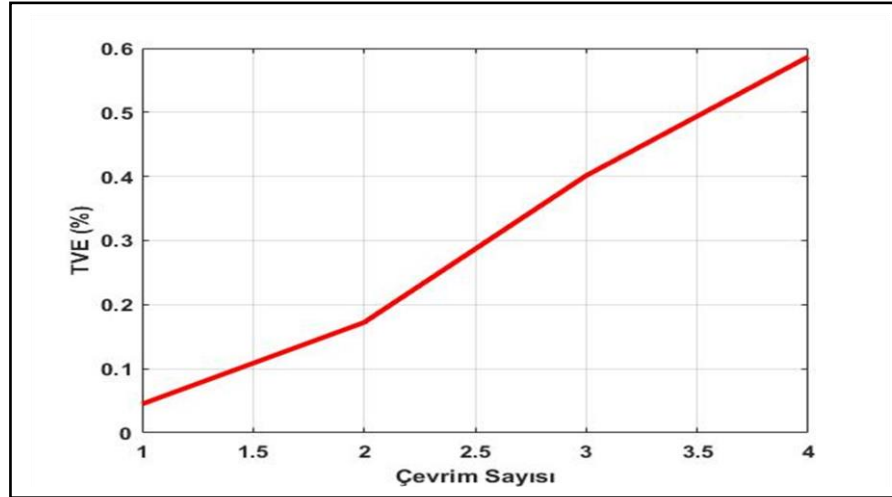
Ek 1- Şekil 88. Faz 1 FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



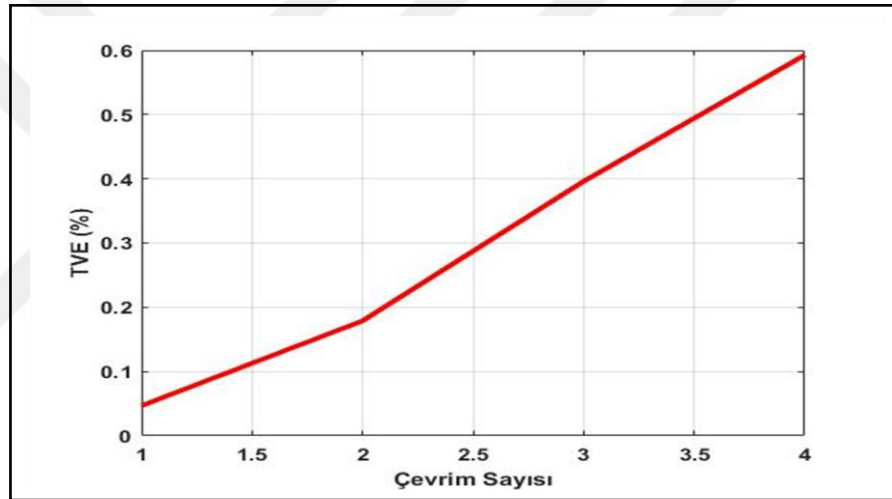
Ek 1- Şekil 89. Faz 2 FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



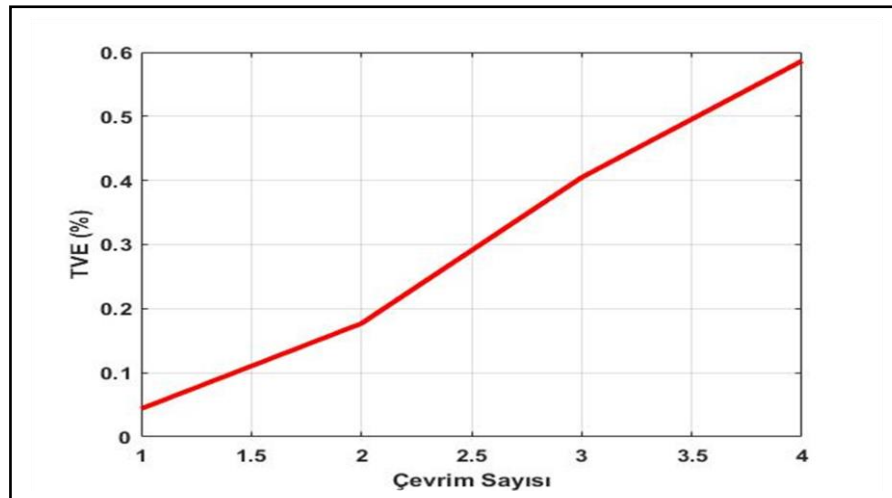
Ek 1- Şekil 90. Faz 3 - FE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



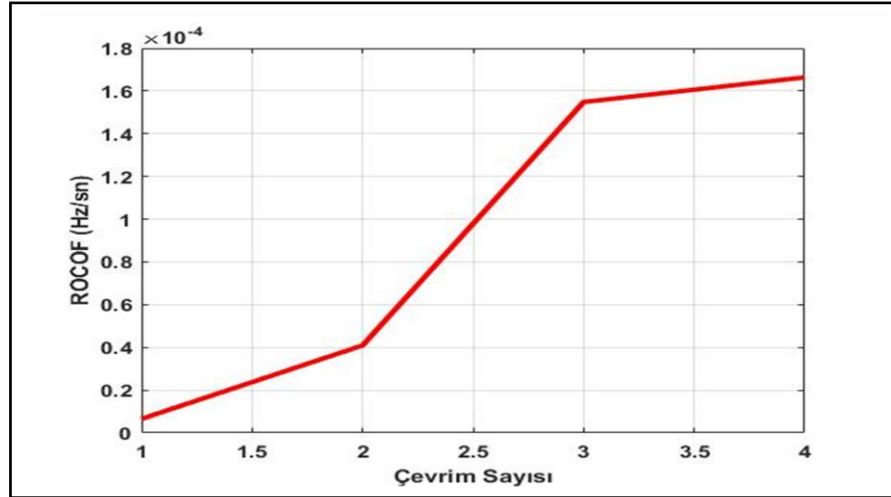
Ek 1- Şekil 91. Faz 1(Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



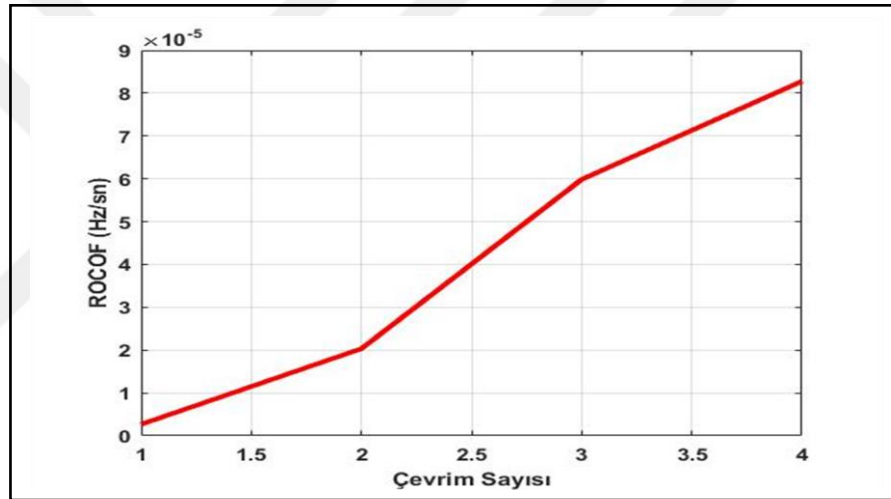
Ek 1- Şekil 92. Faz 2 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



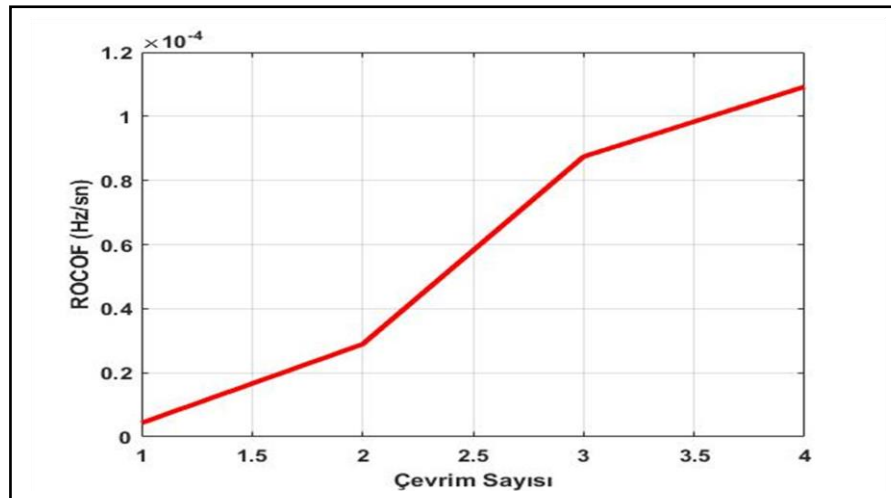
Ek 1- Şekil 93. Faz 3 - TVE (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



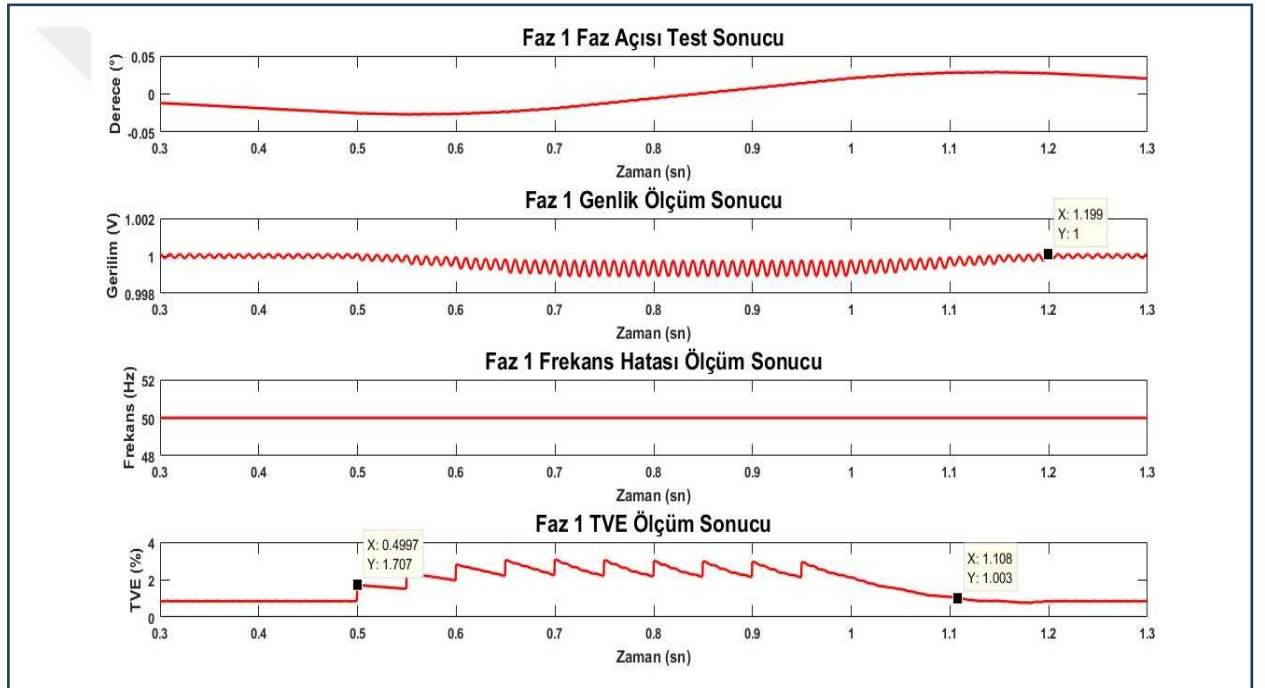
Ek 1- Şekil 94. Faz 1 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



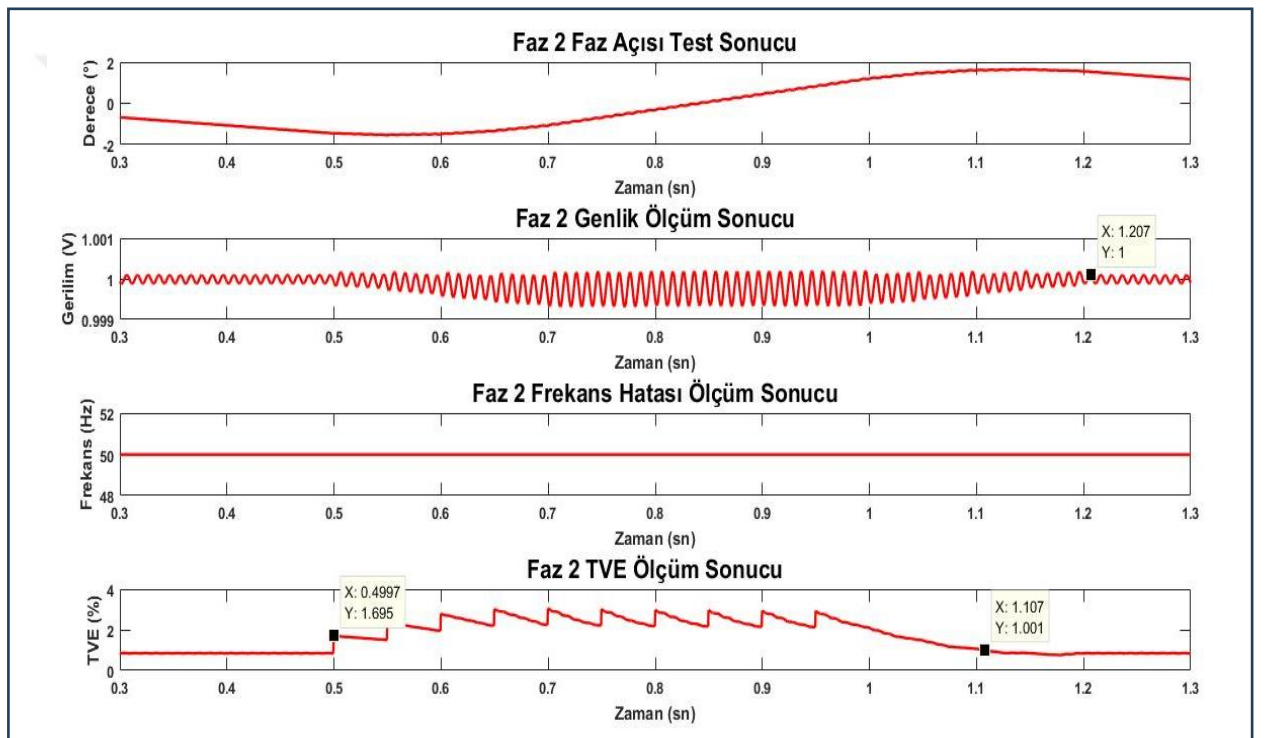
Ek 1- Şekil 95. Faz 2 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



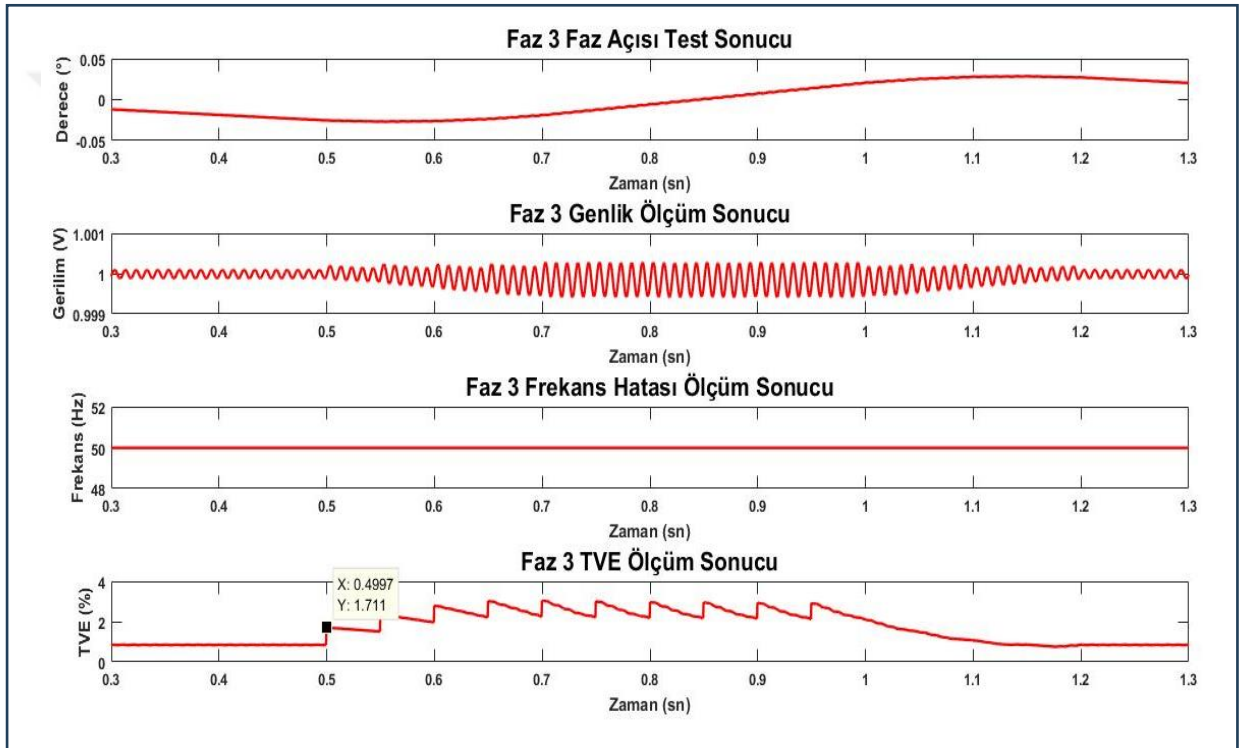
Ek 1- Şekil 96. Faz 3 - ROCOF (Ölçüm Bant Genişliği – $k_x = -0,1$)



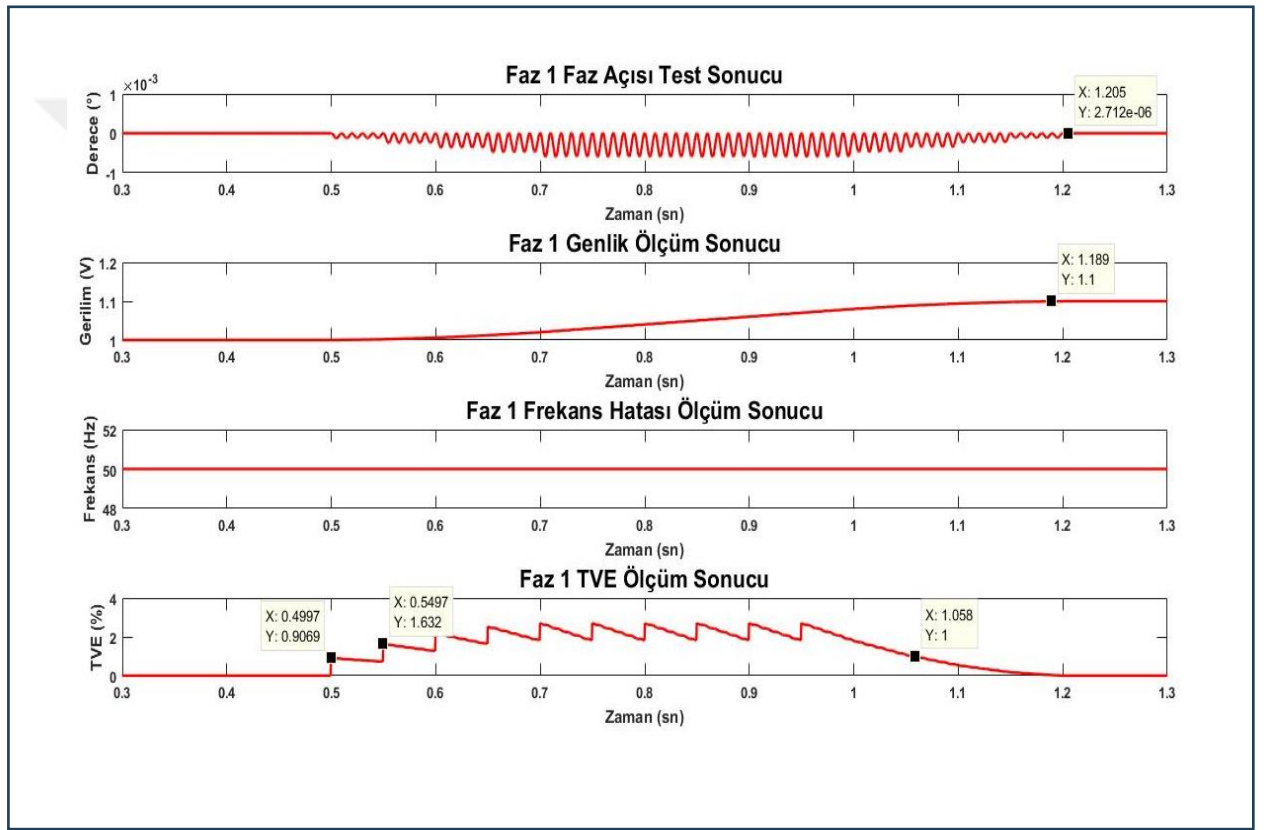
Ek 1- Şekil 97. Faz 1 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=0,1$)



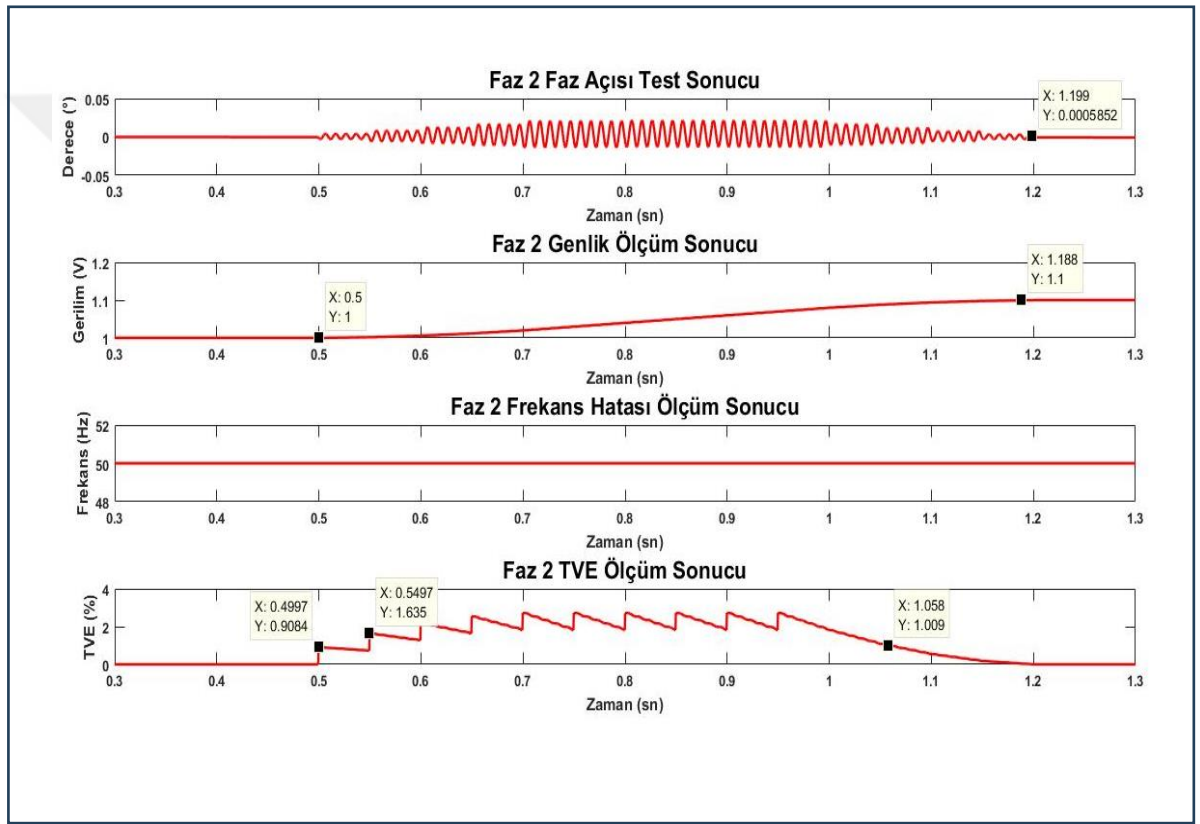
Ek 1- Şekil 98. Faz 2 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=0,1$)



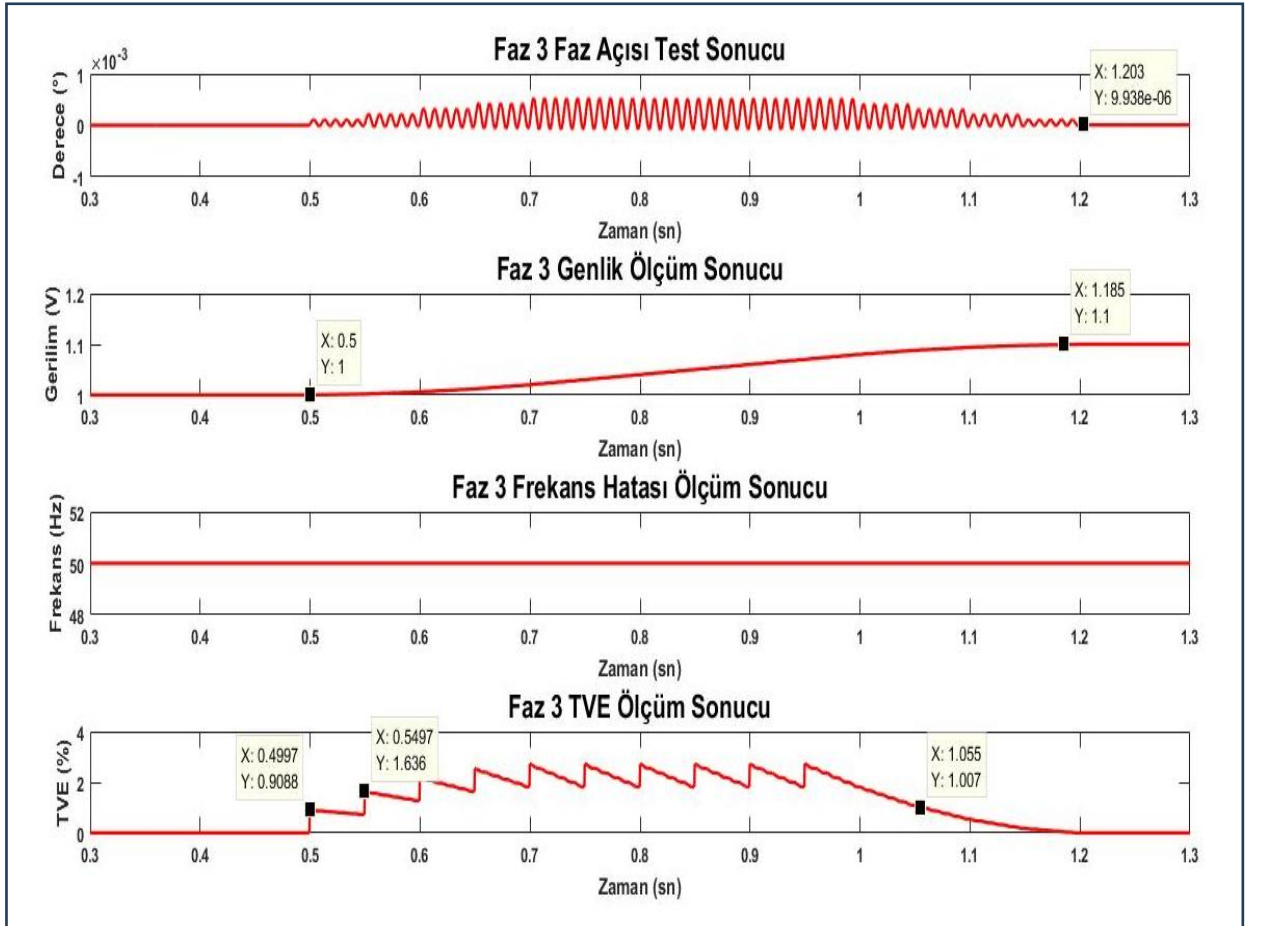
Ek 1- Şekil 99. Faz 3 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=0,1$)



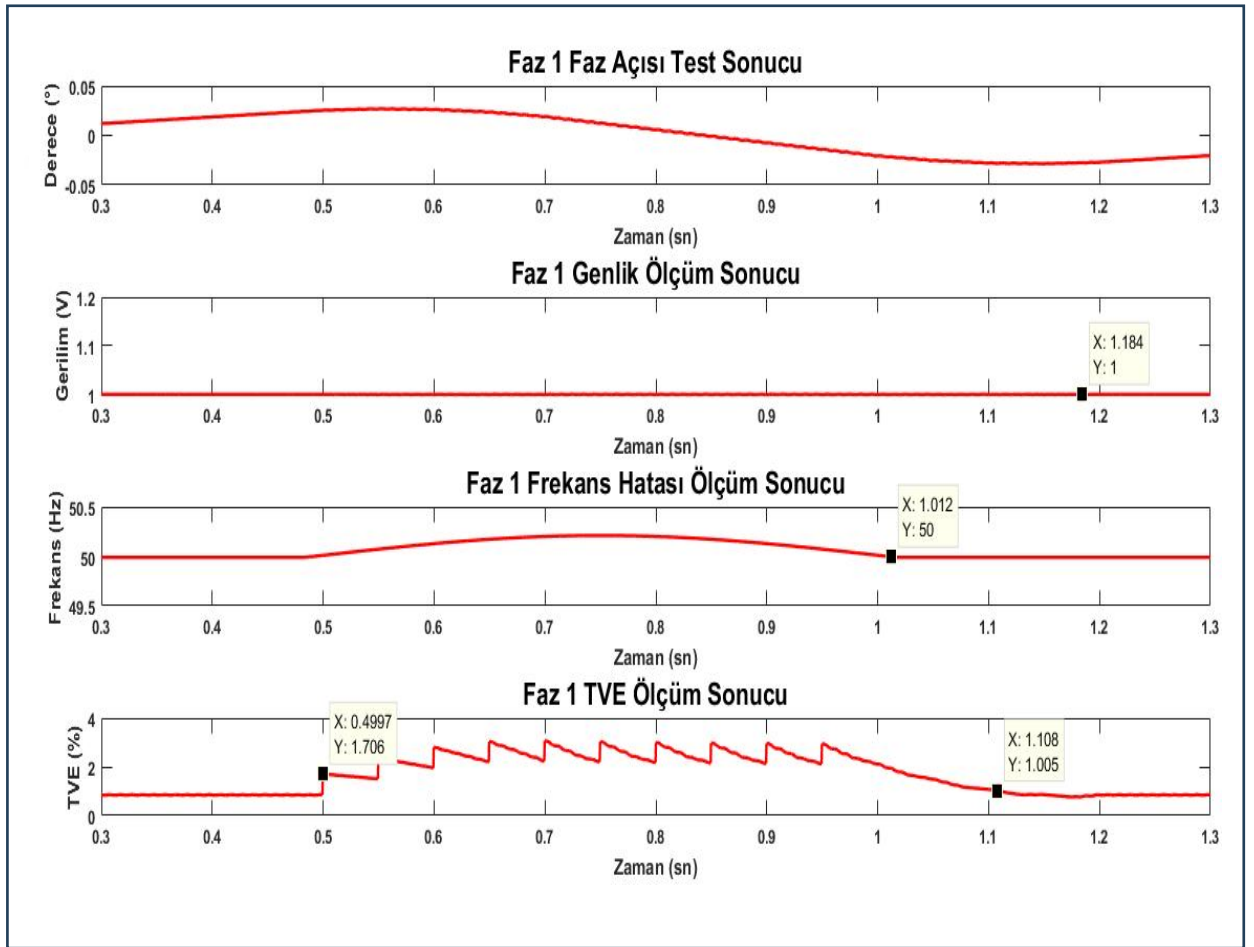
Ek 1- Şekil 100. Faz 1 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=0,1$)



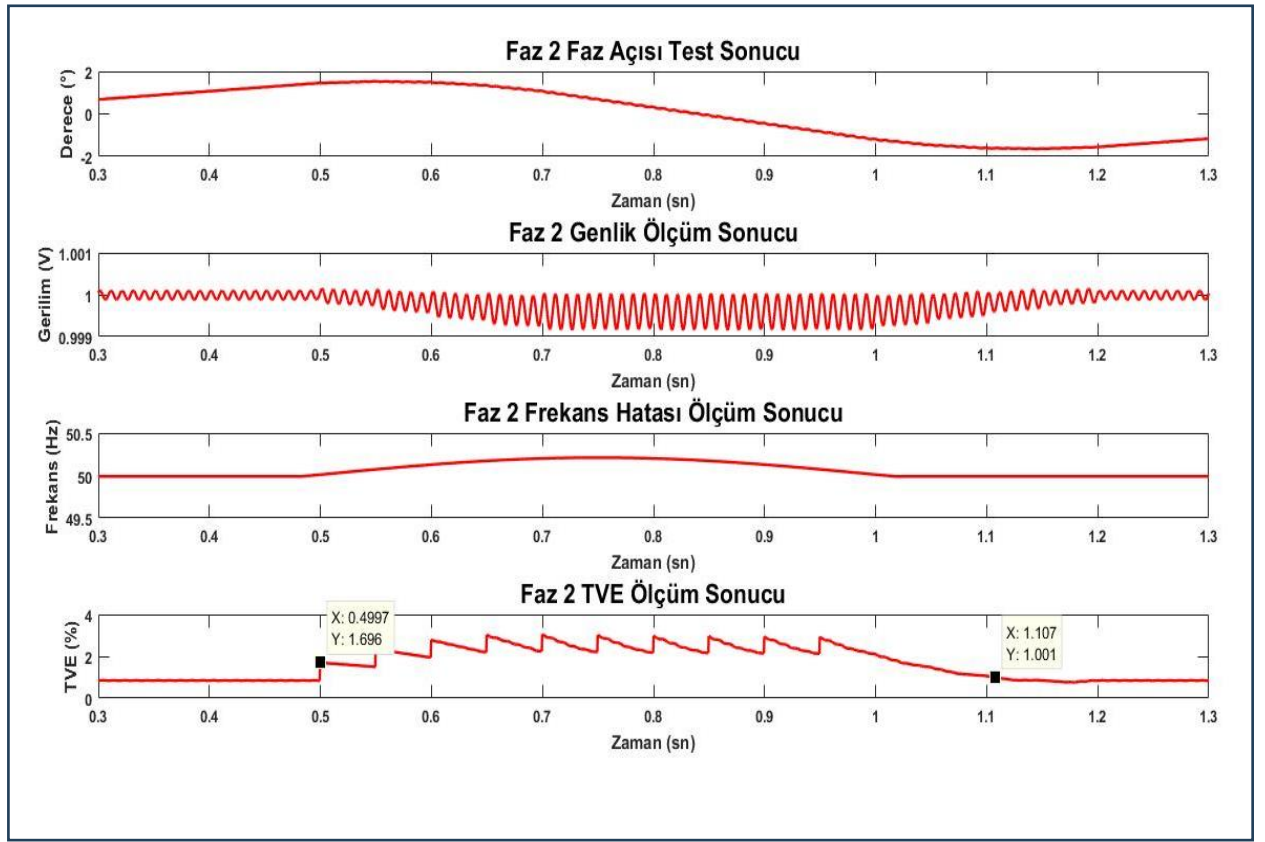
Ek 1- Şekil 101. Faz 2 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=0,1$)



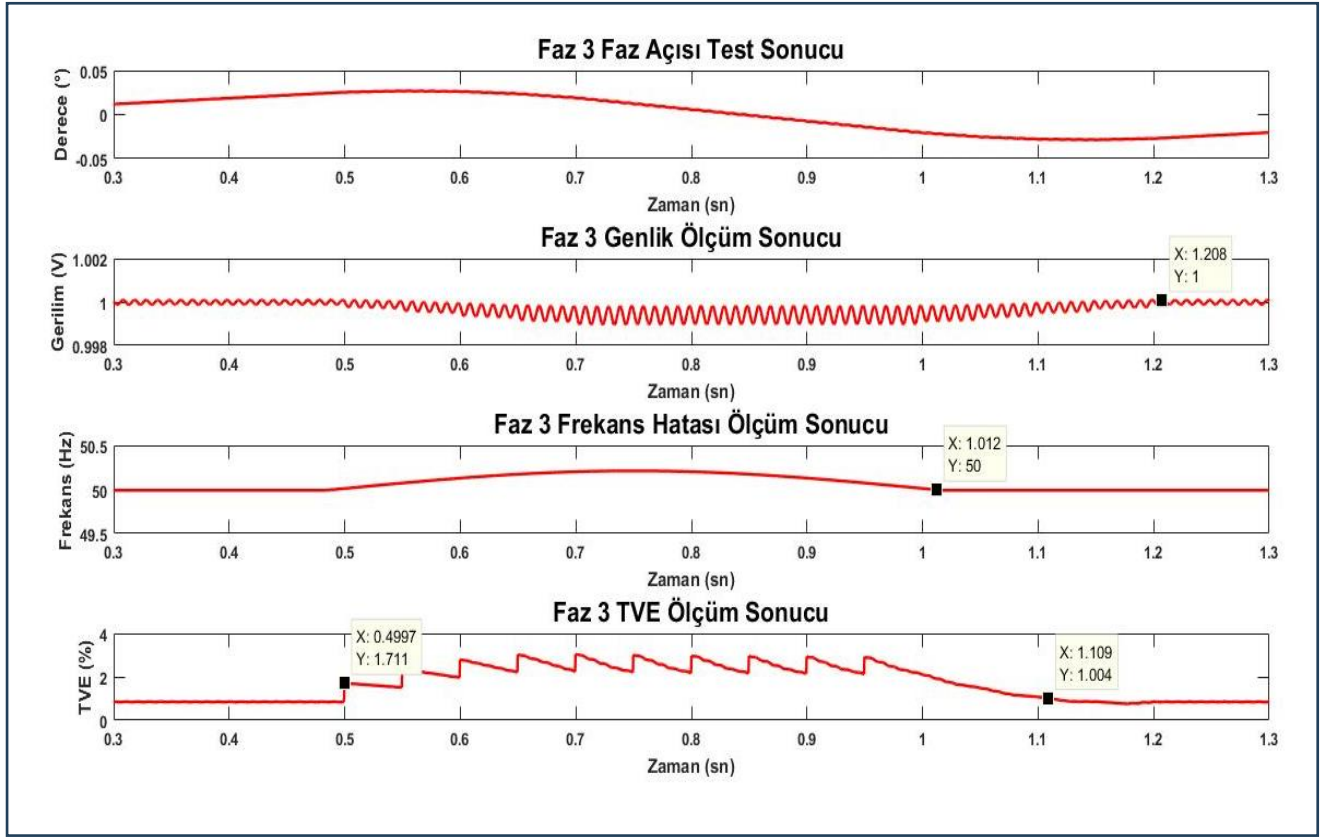
Ek 1- Sekil 102. Faz 3 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=0,1$)



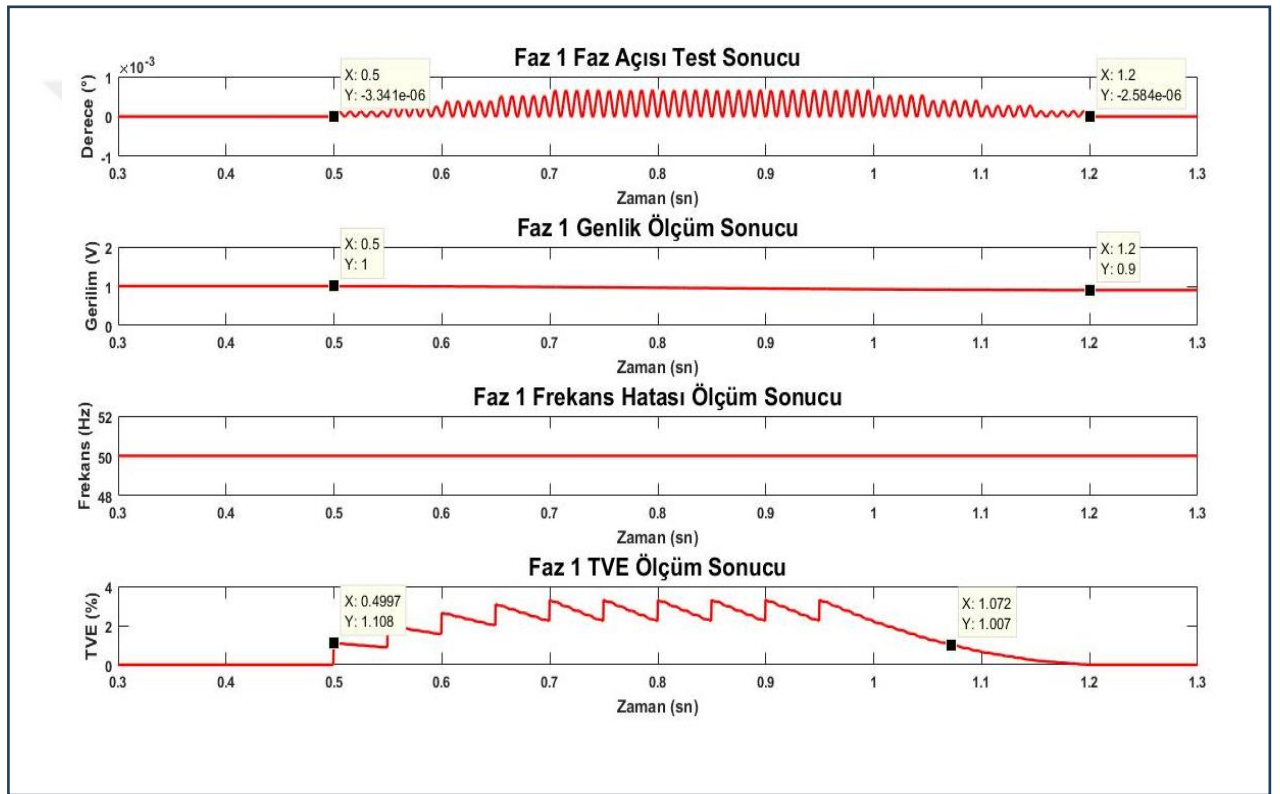
Ek 1- Şekil 103. Faz 1 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=-0,1$)



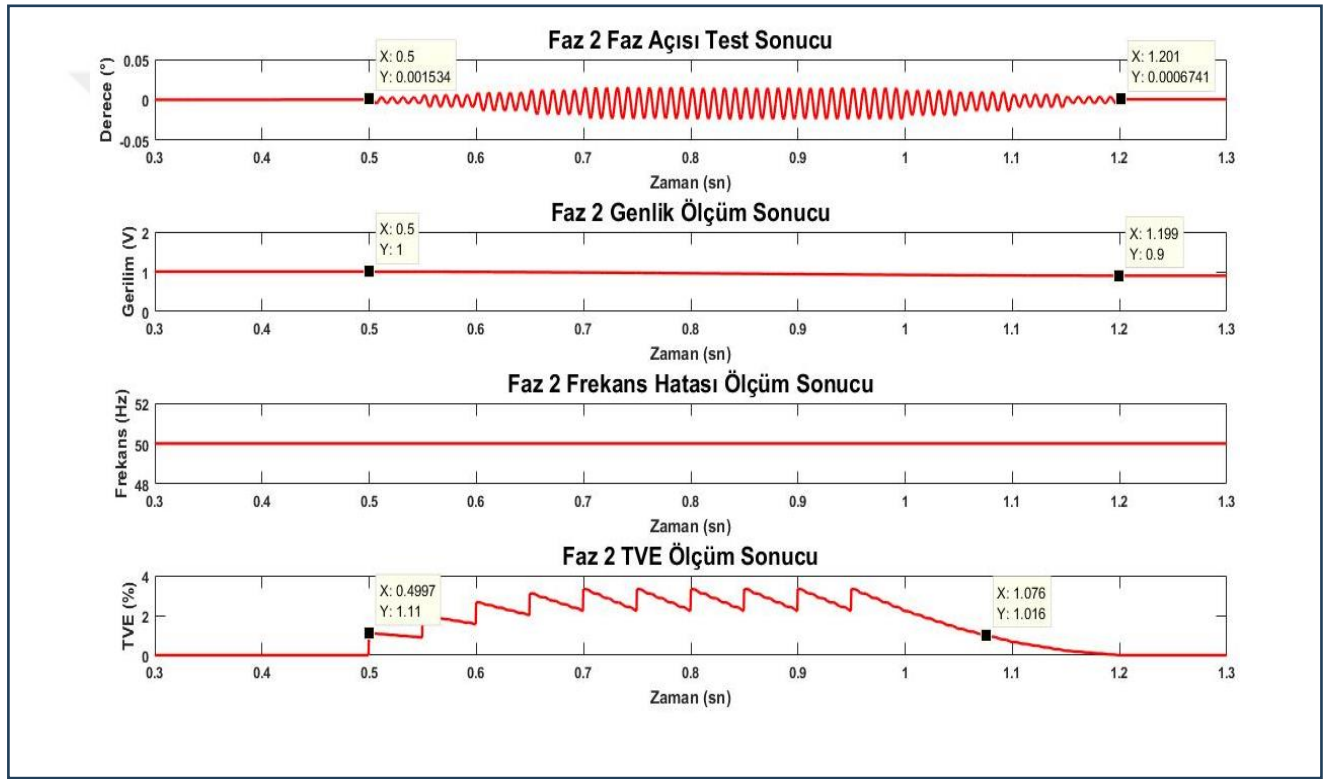
Ek 1- Şekil 104. Faz 2 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=-0,1$)



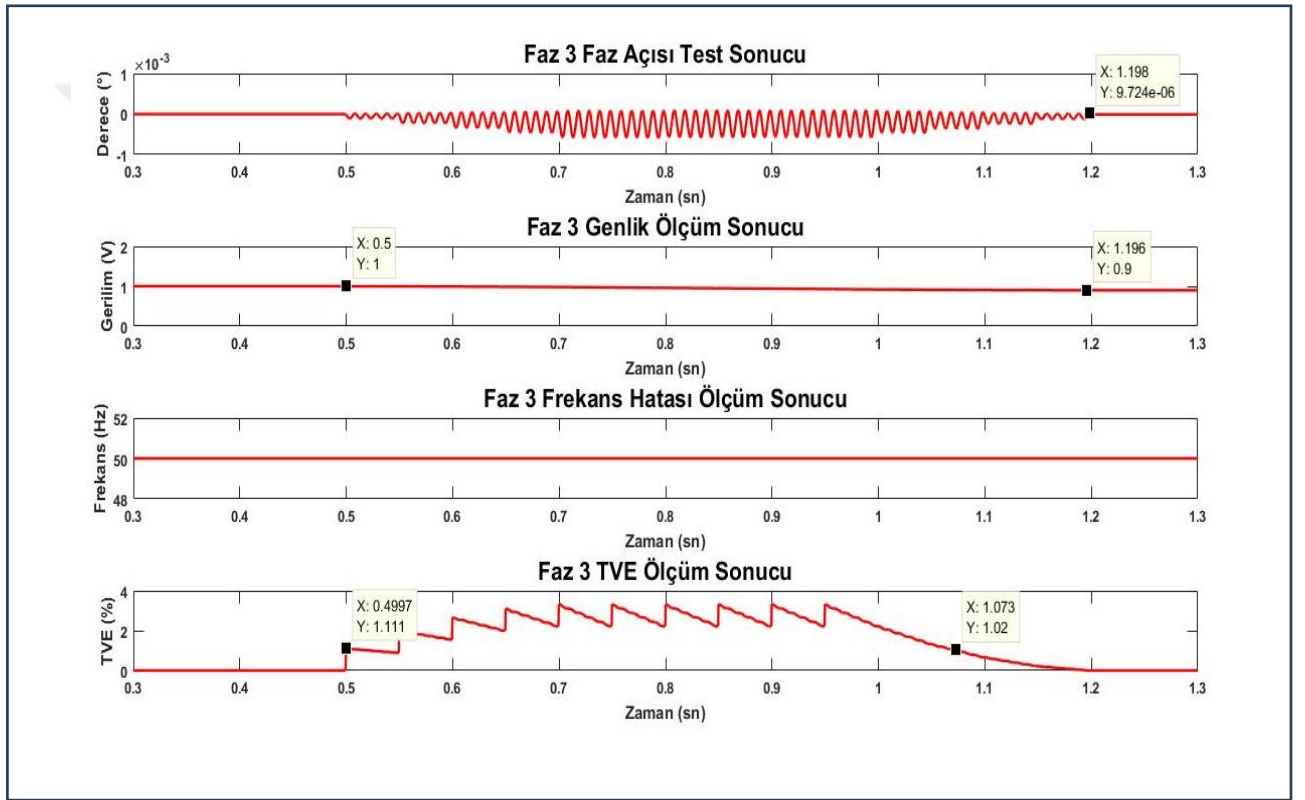
Ek 1- Şekil 105. Faz 3 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_a=-0,1$)



Ek 1- Şekil 106. Faz 1 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=-0,1$)



Ek 1- Şekil 107. Faz 2 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=-0,1$)



Ek 1- Şekil 108. Faz 3 - Birim Adım Test Sonuçları ($k_x=-0,1$)

Ek-2. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Sengul, A. and Altintasi, C. (2024), “Quadrature Amplitude Modulation-Based Synchrophasor Measurement Method”, **16th International Conference On Engineering & Natural Sciences ISPEC Institute**, Girne, 77-78

