

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BÜYÜK ELEKTRİK ŞEBEKELERİ İÇİN GÜÇ SALINIMI  
TANIMLAYICISI VE ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM  
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

**TEVHİD ATALIK**

DOKTORA TEZİ  
2015



**BÜYÜK ELEKTRİK ŞEBEKELERİ İÇİN GÜÇ SALINIMI  
TANIMLAYICISI VE ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM  
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI**

**POWER OSCILLATION IDENTIFIER FOR LARGE  
ELECTRICITY NETWORKS AND ITS APPLICATION TO  
FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION  
SYSTEMS**

**TEVHİD ATALIK**

Başkent Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
DOKTORA TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2015

**“Büyük Elektrik Şebekeleri için Güç Salınımı Tanımlayıcısı ve Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerine Uygulanması”** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 09/02/2015 tarihinde, **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Işık ÇADIRCI

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Üye : Doç. Dr. Hamit ERDEM

Üye : Doç. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR

Üye : Doç. Dr. Hasan OĞUL

**ONAY**

..../02/2015

Prof. Dr. M. Emin AKATA  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## TEŐEKKÖR

Bu tez alıŐması TÜBİTAK UZAY Güç Elektroniği Grubunun üstlendiği ve müşteri kurumun Türkiye Elektrik İletim A.Ő. olduğu “7D100200” kodlu proje kapsamında desteklenmiŐtir.

Bu tez çalışmasında bana kendisiyle çalışma fırsatını veren ve sürekli desteğini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Mustafa DOĞAN'a,

Lisansüstü çalıŐmalarımda hep yanımda olan değerli hocam Prof. Dr. IŞık ÇADIRCI'ya ve kariyerim boyunca bana hep destek olan Prof. Dr. Muammer ERMIŐ'e,

Tez çalıŐmam ve iş hayatım boyunca hep arkamda olan değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Burhan GÖLTEKİN, Dr. Turan DEMİRCİ ve Dr. Cem Özgür GERÇEK'e,

Bugüne kadar sürekli yanımda olan ve sabırla tez çalıŐmamı bitirmemi bekleyen aileme ve sevgili dostlarıma,

Çok teŐekkör ederim.

TEVHİD ATALIK

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 2015

## ÖZ

# BÜYÜK ELEKTRİK ŞEBEKELERİ İÇİN GÜÇ SALINIMI TANIMLAYICISI VE ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

TEVHİD ATALIK

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Türkiye Elektrik İletim Sistemi, 18 Eylül 2010 tarihinde kıta Avrupa Elektrik İletim Sistemi olan ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)'e Bulgaristan üzerinden iki adet ve Yunanistan üzerinden bir adet 380 kV hat ile bağlanmıştır. Bu bağlantı hatları ile Türkiye'den Avrupa'ya ve Avrupa'dan Türkiye'ye yaklaşık olarak 1200 MW'lık bir güç alışverişi hedeflenmiştir.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanması sonrasında kıta Avrupa ile Türkiye arasında bölgeler arası güç salınımlarının oluşacağı öngörülmüştür. Oluşması muhtemel bu salınımların tanımlanması ve sönümlendirilmesi güvenli bağlantı için gereklidir. Aksi takdirde oluşan bölgeler arası salınımlar, elektrik sisteminin dinamikleriyle sönümlenemezse ve genliği artarak devam ederse, iletim sisteminde tam (black-out) veya kısmi çökmelerin (brown-out) oluşmasına sebep olabilir. Bu yüzden bölgeler arası salınımların tespit edilmesi ve bastırılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin kıta Avrupa Elektrik İletim Sistemine bağlanması sonucunda oluşması öngörülmüş olan bölgeler arası salınımların tanımlanmasına yönelik bölgeler arası salınım tanımlayıcı bir sistemin geliştirilmesi ve geliştirilen bu sistemin Türkiye Elektrik İletim Sisteminde hali hazırda kurulu bulunan FACTS cihazlarına uygulanması anlatılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bölgeler arası salınımların tanımlanması için özgün olarak geliştirilen iki yöntem anlatılmaktadır. Birinci yöntem olan FFT Tabanlı Değiştirilmiş Kayan Pencere Algoritması (FFT-Based Modified Sliding Window Algorithm,

FBMSWA), iki farklı uzunlukta kayan pencere üzerinde Fourier analiz temeline dayanmaktadır. Kısa pencere üzerinde yapılan FFT analizi sonucunda elde edilen veriler ile bölgeler arası salınımların genliği, uzun pencere üzerinde yapılan FFT analizi sonucunda elde edilen veriler ile ise salınının fazı tespit edilir. Geliştirilen bu yöntem bir donanım üzerinde gerçek zamanlı olarak çalışacak hale getirilerek bölgeler arası salınım tanımlama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, Ankara Sincan Transformatör Merkezinde bulunan T-STATCOM ile bütünleşik bir şekilde Eylül 2010 tarihinden itibaren çalışarak bölgeler arası salınımların bastırılmasında görev almıştır.

Devreye girdiği ilk günden itibaren birçok bölgeler arası salınımı tanımlayan ve T-STATCOM'a başarıyla komutlar gönderen bu sistem, periyodik değişim göstermeyen ve anlık olarak oluşan salınımların fazını her zaman tam olarak doğru şekilde tespit edememektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Norden E. Huang tarafından geliştirilen Ampirik Kipsel Ayırıştırma (Empirical Mode Decomposition, EMD) yöntemi temeline dayalı ikinci bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntemde EMD yönteminin yapısal sorunlarından biri olan aralıklılık (intermittency) probleminin neden olduğu kiplerin karışması (mode-mixing) sorununun çözümüne yönelik özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Hedef odaklı saflaştırma adı verilen bu yöntem ile analiz edilecek sinyalde bulunan süreksiz bileşenler ve ilgilenilen frekans bandı dışındaki sinyaller ana sinyalden arındırılmaktadır. Arındırılmış sinyal daha sonra EMD yöntemi ile temel bileşenlerine ayrılmaktadır.

Hedef Odaklı Saflaştırmaya Dayalı Ampirik Kipsel Ayırıştırma Yöntemi (Target Based Refinement Empirical Mode Decomposition, TBR-EMD) adı verilen bu ikinci yöntemde ilk olarak istenmeyen bileşenler ön filtreme ve hedef odaklı saflaştırma sayesinde incelenen sinyalden arındırılır ve daha sonra arındırılmış sinyal EMD ile bileşenlerine ayrılır. Şayet arındırılmış sinyalde bölgeler arası salınımına ait kip varsa, bu kip her zaman EMD işlemi sonucunda ayrıştırılan ilk bileşende ortaya çıkar. Bu yüzden EMD işleminde analiz edilen sinyalin tüm bileşenlerinin ayrıştırılmasına gerek yoktur ve böylece iteratif bir yöntemle sahip olan EMD yönteminin işlem süresi önemli ölçüde kısalmaktadır. Hedef odaklı saflaştırmaya dayalı ampirik kipsel ayırıştırma yönteminin en önemli özelliği, bölgeler arası salınımların tanımlanması sırasında standart EMD yönteminin ayrıştıramadığı

sinyalleri EMD yöntemine göre ortalama üç kat daha hızlı ayrıştırabilmesidir. Ayrıca gerçek sinyaller ile yapılan testlerde, TBR-EMD, FBMSWA'ya göre salınımların fazını daha iyi tespit ettiği görülmüştür.

Türkiye Elektrik İletim Sistemi için geliştirilmiş bölgeler arası salınım tanımlama yöntemleri, yeni tasarım ölçütlerine göre kolayca uyarlanarak başka elektrik iletim sistemlerine de uygulanabilir. Özellikle hedef odaklı saflaştırma yöntemi genelleştirilebilir bir yöntem olup bölgeler arası salınımların tanımlanması dışında başka alanlarda da (görüntü işleme, ses işleme, biyomedikal, jeofizik, vb.) ihtiyaca göre uyarlanarak kullanılabilir. Bu yöntem sayesinde literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Bölgeler Arası Salınım, Kipsel Ayrışım Metodu, FFT, STATCOM, Hedef Odaklı Saflaştırma, Saflaştırma Eşik Seviyesi

**DANIŞMAN:** Doç. Dr. Mustafa DOĞAN, Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

**İKİNCİ DANIŞMAN:** Prof. Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü



## **ABSTRACT**

### **POWER OSCILLATION IDENTIFIER FOR LARGE ELECTRICITY NETWORKS AND ITS APPLICATION TO FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS**

TEVHİD ATALIK

Başkent University Institute of Science

Department of Electrical-Electronics Engineering

Turkish Electricity Transmission System was connected to European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), which is the European Continental Electricity Transmission Network, by means of two 380 kV lines over Bulgaria and one 380 kV line over Greece, on September 18<sup>th</sup> of 2010. Through these connection lines, an electricity commerce with a scale of 1200 MW has been targeted between Europe and Turkey.

Inter-area oscillations between Turkey and continental Europe had been foreseen, once the connection of Turkey to ENSTO-E was completed. The identification and damping of these possible oscillations are necessary for a reliable connection. Otherwise, if these inter-area oscillations cannot be damped out by the inherent dynamics of the electricity network and if their amplitudes continue to grow, they can result in black-out or brown-out events in the transmission system. Hence, it is quite important that these inter-area oscillations should be identified and damped out respectively.

In this work, the development of an inter-area oscillation identifier system and its application to already installed FACTS devices in the Turkish Electricity Transmission System in order to damp out the foreseen inter-area oscillations after the interconnection of Turkish and European Networks, is examined thoroughly.

In this research, two main methods are proposed in order to identify the inter-area oscillations. The first method, FFT Based Modified Sliding Window Algorithm, is

based on Fourier analysis with two sliding windows that have different lengths. The data obtained from the FFT analysis with the short window detects the magnitude of the oscillation, whereas the data obtained from the FFT analysis with the long window detects the phase of the oscillation. By means of this proposed method, an inter-area oscillation identifier system, which uses FFT based modified sliding window algorithm to run on hardware in real-time, embedded system is implemented. This system has been in operation for damping out the inter-area oscillations successfully, in conjunction with a type of FACTS device, which works as a T-STATCOM to regulate the bus voltage in Ankara Sincan Transformer Substation, since September 2010.

Since going into operation, although being able to identify lots of inter-area oscillations and send successful commands to T-STATCOM, this system cannot all the time properly detect the phase of the oscillations which do not exhibit periodic character and occur instantly. In order to overcome this challenge, a second algorithm based on Empirical Mode Decomposition (EMD) method, which was developed by Norden E. Huang has been built up. In this algorithm, a structural drawback of EMD method; mode-mixing problem, which is caused by intermittency is solved. By target based refinement method, signals except for the discontinuous components and out of the frequency band of interest are pruned from the main signal. This pruned signal is then decomposed into its fundamental components by means of EMD method.

In this second method, namely target based refinement empirical mode decomposition, the unwanted components in the signal inspected are pruned by means of target based refinement, and then the pruned signal is decomposed with the help of EMD. If the pruned signal contains a mode belonging to inter-area oscillation, this mode will always exist in the first component that is decomposed by means of EMD process. Therefore in the EMD process, there is no need to decompose all the signal components, and the processing time is significantly reduced for the EMD method which has an iterative solving character. The most important feature of the target based refinement empirical mode decomposition method is that it can decompose the signals which the standard EMD method cannot, during the identification of inter-area oscillations. Moreover, it can produce

efficient results within duration as three times faster than the standard EMD method. Besides, it is found out that with field data, TBR-EMD can detect the phase much better than FBMSWA.

The methods developed specifically for identifying the inter-area oscillations in the Turkish Electricity Transmission System, can be easily adapted to different electricity transmission systems. Especially the target based refinement is a method which can be generalized and can also be used in different areas other than identifying inter-area oscillations, e.g. (image processing, audio processing, biomedical, geophysics) after proper adaptation to new design criteria. Thanks to this method, a substantial contribution is made to the literature.

**KEYWORDS:** Inter-Area Oscillation, Empirical Mode Decomposition, FFT, STATCOM, Target Based Refinement, Refinement Threshold

**SUPERVISOR:** Assoc. Prof. Dr. Mustafa DOĞAN, Başkent University, Department of Electrical and Electronics Engineering.

**CO-SUPERVISOR:** Prof. Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering.

<b>İÇİNDEKİLER LİSTESİ</b>	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT .....	iv
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TASARIM ÖLÇÜTLERİ VE FREKANS ÖLÇÜMÜ.....</b>	<b>16</b>
2.1 Bölgeler Arası Salınım Tanımlayıcı Sistem Tasarım Ölçütleri.....	16
2.2 Şebeke Frekansının Ölçülmesi.....	17
<b>3. ÖN ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>20</b>
3.1 PSS Algoritması ile Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması .....	20
3.2 Bant Geçiren Filtre ile Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması .....	22
3.3 Dar Bantlı Bant Geçiren Filtre Bankalarıyla Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması .....	23
<b>4. ÖNERİLEN YÖNTEM-1: FFT TABANLI DEĞİŞTİRİLMİŞ KAYAN PENCERE ALGORİTMASI (FFT-BASED MODIFIED SLIDING WINDOW ALGORITHM, FBMSWA).....</b>	<b>25</b>
4.1 Bölgeler Arası Salınımın Genliğinin Bulunması .....	27
4.2 Bölgeler Arası Salınımın Fazının Bulunması .....	29
4.3 Sentetik Sinyal ile Test.....	31
4.4 Saha Testleri.....	38
4.5 BASTS ile Tanımlanan Gerçek Bölgeler Arası Salınımlar.....	46
<b>5. ÖNERİLEN YÖNTEM-2: HEDEF ODAKLI SAFLAŞTIRMAYA DAYALI AMPİRİK KİPSEL AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ (TARGET BASED REFINEMENT EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION, TBR-EMD).....</b>	<b>56</b>
5.1 Ampirik Kipsel Ayrıştırma Yöntemi (Empirical Mode Decomposition, EMD).....	56
5.2 EMD Yönteminin Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması için Kullanılmasını Zorlaştıran Etmenler ve Çözüm Önerileri.....	68
5.3 Önerilen Hedef Odaklı Saflaştırma.....	74
5.4 Hedef Odaklı Saflaştırma Kullanılarak EMD Tabanlı Bölgeler Arası Salınım Tanımlama Yöntemi.....	81
<b>6. SONUÇ.....</b>	<b>91</b>
<b>7. KAYNAKLAR LİSTESİ.....</b>	<b>94</b>

<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b>	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 1.1</b> 01.05.2005 tarihinde Doğu-Batı Avrupa arasında gerçekleşmiş olan bölgeler arası salınım [2].....	3
<b>Şekil 1.2</b> 14.05.2004 tarihinde Kuzey Afrika-Avrupa arasında gerçekleşmiş olan bölgeler arası salınım [6].....	4
<b>Şekil 1.3</b> Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E bağlantısından sonra oluşması muhtemel bölgeler arası salınım simülasyon verisi [6].....	5
<b>Şekil 1.4</b> Güç sistemleri ekipmanlarının düşük frekanslı bölgeler arası salınımların bastırılmasına olan etkisi [7].....	5
<b>Şekil 1.5</b> (a) 3.5 MW'lık bir frenleme direnci salınım sönümlendirme performansı, (b) 5 MW'lık bir frenleme direnci salınım sönümlendirme performansı, (c) Frenleme direnci çalışma rejimi (1: Devrede 0: Devrede değil) [4].....	8
<b>Şekil 1.6</b> Ankara Sincan TM Bank-B barasına bağlı 154 kV, ±50 MVar T-STATCOM Sistemi [14].....	9
<b>Şekil 1.7</b> T-STATCOM salınım sönümlendirme performansı [4].....	9
<b>Şekil 1.8</b> 23.04.2011 tarihinde Babaeski TM 380 kV Yunanistan hattı üzerinde bölgeler arası salınım olduğu anda gözlemlenen şebeke frekansı ve aktif güç.....	12
<b>Şekil 1.9</b> 23.04.2011 tarihinde Babaeski TM 380 kV Yunanistan hattı ve Sincan TM 154 kV Bank-B barası üzerinde bölgeler arası salınım olduğu anda gözlemlenen şebeke frekansı.....	12
<b>Şekil 2.2.1</b> Şebeke geriliminin sayısala çevrilmesi.....	18
<b>Şekil 2.2.2</b> 25.6 kHz örnekleme hızıyla sayısala çevrilmiş gerilim sinyali üzerinde yarım çevrimde bir hesaplanan şebeke frekansı.....	19
<b>Şekil 2.2.3</b> 256 kHz örnekleme hızıyla sayısala çevrilmiş gerilim sinyali üzerinde yarım çevrimde bir hesaplanan şebeke frekansı.....	19
<b>Şekil 3.1.1</b> Basitleştirilmiş PSS Blok Şeması.....	21
<b>Şekil 3.2.1</b> 0.1–0.2 Hz bandını geçiren filtreye ait genlik ve faz tepkisi.....	22
<b>Şekil 3.3.1</b> Bant geçiren 11 adet paralel filtre ile oluşturan filtre bankası blok şeması.....	24
<b>Şekil 4.1</b> FFT tabanlı değiştirilmiş kayan pencere algoritması akış şeması....	26
<b>Şekil 4.1.1</b> İki farklı d parametresi için “wash-out” filtrenin basamak sinyaline karşı tepkisi.....	28
<b>Şekil 4.1.2</b> İki farklı d parametresi için “wash-out” filtrenin 0.15 Hz'lik sinyale karşı tepkisi.....	28
<b>Şekil 4.3.1</b> Sentetik test sinyalini oluşturan bileşenler.....	32
<b>Şekil 4.3.2</b> (a) Sentetik test sinyali (b) Sentetik sinyalin 0.14 Hz frekanslı bileşeni ve FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi.....	32
<b>Şekil 4.3.3</b> 0.09 Hz frekanslı ve en büyük genliği 100 mHz olan sentetik test	

	sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	33
<b>Şekil 4.3.4</b>	0.1 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	34
<b>Şekil 4.3.5</b>	0.12 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	34
<b>Şekil 4.3.6</b>	0.14 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	35
<b>Şekil 4.3.7</b>	0.16 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	35
<b>Şekil 4.3.8</b>	0.18 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	36
<b>Şekil 4.3.9</b>	0.2 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	36
<b>Şekil 4.3.10</b>	0.21 Hz frekanslı ve en büyük genliği 250 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi.....	37
<b>Şekil 4.4.1</b>	BASTS ve GKÇ.....	38
<b>Şekil 4.4.2</b>	(a) Sentetik test sinyali (b) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (c) 154 kV baradaki aktif güç.....	40
<b>Şekil 4.4.3</b>	(a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) 154 kV baradaki $V_{AB}$ gerilimi (c) 154 kV baradaki reaktif güç.....	41
<b>Şekil 4.4.4</b>	(a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) T-STATCOM çıkışındaki reaktif güç (c) 10.5 kV baradaki $V_{AB}$ gerilimi.....	42
<b>Şekil 4.4.5</b>	(a) Sentetik test sinyali (b) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (c) 154 kV baradaki aktif güç.....	43
<b>Şekil 4.4.6</b>	(a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) 154 kV baradaki $V_{AB}$ gerilimi (c) 154 kV baradaki reaktif güç.....	44
<b>Şekil 4.4.7</b>	(a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) T-STATCOM çıkışındaki reaktif güç (c) 10.5 kV baradaki reaktif güç.....	45
<b>Şekil 4.5.1</b>	(a) 21.11.2010 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu	47
<b>Şekil 4.5.2</b>	(a) 23.04.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu	48
<b>Şekil 4.5.3</b>	23.04.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler.....	48
<b>Şekil 4.5.4</b>	23.04.2011 tarihinde (a) bağlantı hatları şebeke frekansları (b) bağlantı hatlarındaki aktif güçler (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç.....	49

<b>Şekil 4.5.5</b>	(a) 16.05.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu	49
<b>Şekil 4.5.6</b>	16.05.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler.....	50
<b>Şekil 4.5.7</b>	16.05.2011 tarihinde (a) bağlantı hatları şebeke frekansları (b) bağlantı hatlarındaki aktif güçler (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç.....	50
<b>Şekil 4.5.8</b>	(a) 07.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu	51
<b>Şekil 4.5.9</b>	(a) 10.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu	51
<b>Şekil 4.5.10</b>	10.09.2011 tarihinde (a) Bulgaristan-1 hattı şebeke frekansı (b) Bulgaristan-1 hattı aktif güç (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç.....	52
<b>Şekil 4.5.11</b>	(a) 12.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu.....	52
<b>Şekil 4.5.12</b>	12.09.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler.....	53
<b>Şekil 4.5.13</b>	12.09.2011 (a) Bulgaristan-1 hattı şebeke frekansı (b) Bulgaristan-1 hattı aktif güç (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç.....	53
<b>Şekil 4.5.14</b>	23.04.2011'de meydana gelen bölgeler arası salınımın olduğu andaki şebeke frekansı ve Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç değişimi (T-STATCOM tepkisi).....	55
<b>Şekil 5.1.1</b>	EMD yöntemi ile ayrıştırılmış sentetik sinyal ve ilgili IMF'leri [22].	58
<b>Şekil 5.1.2</b>	EMD yöntemi ayıklama işlemi (sifting) uygulanacak sinyal ve ayıklama işleminin 1., 2. ve 3. Aşamalarında elde edilen sinyaller [23].....	59
<b>Şekil 5.1.3</b>	EMD ayıklama işleminin 4. aşamasında elde edilen $p_i(t)$ sinyali [23].....	59
<b>Şekil 5.1.4</b>	(a) EMD yöntemi sınır değer problemi giderilmediği durum için AC sinyal ve zarfları (b) 1. iterasyon sonunda elde edilen hatalı $p_i(t)$ sinyali.....	60
<b>Şekil 5.1.5</b>	(a) EMD yöntemi ile analiz edilecek DC sinyal (b) EMD yöntemi sınır değer problemi giderilmediği durum için sinyalin zarfları (c) 1. iterasyon sonunda elde edilen hatalı $p_i(t)$ sinyali.....	61
<b>Şekil 5.1.6</b>	(a) Orijinal sinyal (b) Sinyalin düz ayna görüntüsünün sinyalin ucuna eklenmiş hali (c) Sinyalin ters ayna görüntüsünün	

	sinyalin ucuna eklenmiş hali [27].....	61
<b>Şekil 5.1.7</b>	Rilling [25]'in sınır değer problemini aşmak için önerdiği yöntem.....	62
<b>Şekil 5.1.8</b>	(a) Aralılık problemine sahip olan sinyal $x(t)$ (b) Standart EMD yöntemi ile elde edilen IMF'ler (c) Deering'in önerdiği maskeleye yöntemi ile elde edilen IMF'ler [29].....	63
<b>Şekil 5.1.9</b>	Oktav problemine sahip $x(t)$ sinyali [24].....	64
<b>Şekil 5.1.10</b>	$x(t)$ sinyalinin standart EMD ile elde edilmiş IMF'leri [24].....	64
<b>Şekil 5.1.11</b>	$x(t)$ sinyalinin maskeleye yöntemi uygulanarak EMD ile elde edilmiş IMF'leri [24].....	67
<b>Şekil 5.1.12</b>	(a) "Cubic-spline" interpolasyon yöntemi ile sinyalin zarfları (b) "Akima" interpolasyon yöntemi ile sinyalin zarfları [30].....	69
<b>Şekil 5.2.1</b>	EMD işlemi öncesi "pre-filtering" aşamasına giren ve çıkan sinyaller.....	70
<b>Şekil 5.2.2</b>	(a) Sınır değer problemini aşmak için sinyale ayna görüntüsünün eklenmiş hali (b) Sinyal ile ayna görüntüsünün birleşim yerinin yakınlaştırılmış hali.....	71
<b>Şekil 5.2.3</b>	(a) Standart EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal $x_1(t)$ (b) Standart EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>1</sub> ve $x_1(t)$ sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Standart EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>2</sub> ve $x_1(t)$ sinyalinin 0.3 Hz'lik sentetik bileşeni.....	72
<b>Şekil 5.2.4</b>	(a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal $x_1(t)$ (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>1</sub> ve $x_1(t)$ sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>2</sub> ve $x_1(t)$ sinyalinin 0.3 Hz'lik sentetik bileşeni.....	72
<b>Şekil 5.2.5</b>	(a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal $x_2(t)$ (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>1</sub> ve $x_2(t)$ sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>2</sub> ve $x_2(t)$ sinyalinin 0.3 Hz'lik sentetik bileşeni.....	73
<b>Şekil 5.2.6</b>	(a) Standart EMD ile bileşenlerine ayrılacak gerçek sinyal (b) Standart EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>1</sub> (c) Standart EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>2</sub> (d) Standart EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>3</sub> .....	73
<b>Şekil 5.2.7</b>	(a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak gerçek sinyal (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>1</sub> (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF <sub>2</sub> .....	74
<b>Şekil 5.3.1</b>	(a) Sincan TM 154 kV Bank-B barasında 23 Nisan 2011'de kayıt edilmiş frekans değişimi (b) Sinyalin zarfları (c) İlk ayıklama işlemi sonucunda elde edilen IMF.....	76
<b>Şekil 5.3.2</b>	(a) Sincan TM 154 kV Bank-B barasında 16 Mayıs 2011'de kayıt edilmiş frekans değişimi (b) Sinyalin zarfları (c) İlk ayıklama işlemi sonucunda elde edilen PMF.....	76



<b>Şekil 5.3.3</b>	(a) 23 Nisan 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaştırma 1. iterasyon 1. aşama (c) Saflaştırma 1. iterasyon 4. aşama (sanal ve gerçek uç değerlere göre sinyalin zarfı).....	79
<b>Şekil 5.3.4</b>	(a) Saflaştırma 5. iterasyon 4. aşama (b) Saflaştırma 9. iterasyon 4. aşama (c) Saflaştırma 13. iterasyon 4. aşama.....	79
<b>Şekil 5.3.5</b>	(a) Saflaştırma 16. (son iterasyon) 4. aşama (b) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal.....	80
<b>Şekil 5.3.6</b>	(a) 16 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaştırılmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal.....	80
<b>Şekil 5.3.7</b>	(a) 08 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaştırılmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal.....	81
<b>Şekil 5.3.8</b>	(a) 19 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaştırılmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal.....	81
<b>Şekil 5.4.1</b>	Hedef odaklı saflaştırma kullanılarak EMD tabanlı bölgeler arası salınım tanımlama yöntemi blok şeması.....	82
<b>Şekil 5.4.2</b>	(a) Sentetik test sinyali (b) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sentetik sinyalin 0.15 Hz frekanslı bileşeni (c) PF-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sentetik sinyalin 0.15 Hz frekanslı bileşeni (d) PF-EMD yöntemi IMF <sub>2</sub> .....	83
<b>Şekil 5.4.3</b>	(a) 19 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) "Pre-Filtering" aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve PF-EMD yöntemi IMF <sub>2</sub> ve IMF <sub>3</sub> .....	84
<b>Şekil 5.4.4</b>	(a) 5 Haziran 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) "Pre-Filtering" aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve PF-EMD yöntemi IMF <sub>2</sub> ve IMF <sub>3</sub> .....	85
<b>Şekil 5.4.5</b>	(a) 8 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) "Pre-Filtering" aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve PF-EMD yöntemi IMF <sub>3</sub> .....	85
<b>Şekil 5.4.6</b>	(a) 3 Ağustos 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) "Pre-Filtering" aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve PF-EMD yöntemi IMF <sub>3</sub> .....	86
<b>Şekil 5.4.7</b>	(a) 23 Nisan 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri.....	89

<b>Şekil 5.4.8</b>	(a) 7 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri.....	89
<b>Şekil 5.4.9</b>	(a) 10 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri.....	90
<b>Şekil 5.4.10</b>	(a) 12 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF <sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri.....	90

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

<b>Çizelge 4.3.1</b> FBMSWA'nın değişik frekanslı sinyaller ile yapılan test sonuçları .....	37
<b>Çizelge 5.3.1</b> Değişik sinyalleri saflaştırmak için gerekli iterasyon sayısı.....	78
<b>Çizelge 5.4.1</b> TBR-EMD ve PF-EMD yöntemleriyle bölgeler arası salınımların tanımlanması için gerekli iterasyon sayıları.....	87

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AGC	Otomatik Üretim Kontrolcüsü (Automatic Generation Control)
APF	Aktif Güç Filtresi (Active Power Filter)
AVR	Otomatik Gerilim Düzenleyicisi (Automatic Voltage Regulator)
BASTS	Bölgeler Arası Salınım Tanımlayıcı Sistem
EMD	Ampirik Kipsel Ayrıştırma (Empirical Mode Decomposition)
ENSTO-E	Kıta Avrupa Elektrik İletim Sistemi (European Network of Transmission System Operators for Electricity)
FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (Flexible Alternating Current Transmission System)
FBMSWA	FFT Tabanlı Değiştirilmiş Kayan Pencere Algoritması (FFT-Based Modified Sliding Window Algorithm)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GKÇ	Güç Kalitesi Çözümleyicisi
HVDC	Yüksek Gerilim Doğru Akım (High Voltage Direct Current)
IMF	Esas Kip Fonksiyonu (Intrinsic Mode Functions)
KAMAG	Kamu Araştırmaları Destek Grubu
PF-EMD	Pre-Filtering EMD
PMF	Ön Kip Fonksiyonu (Proto-Mode Function)
PMU	Fazör Ölçüm Sistemi (Phasor Measurement Unit)
PSS	Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer)
SED	Saflaştırma Eşik Değeri
STATCOM	Durağan Senkron Kompanzator (Static Synchronous Compensator)
SVC	Durağan Reaktif Güç Kompanzatoru (Static VAr Compensator)
TBR	Hedef Odaklı Saflaştırma (Target Based Refinement)
TCSC	Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (Thyristor-Controlled Series Capacitor)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TM	Transformatör Merkezi
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
T-STATCOM	İletim STATCOM'u (Transmission-STATCOM)
UPFC	Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolcüsü (Unified Power Flow Controller)
WAMS	Geniş Alan İzleme Sistemi (Wide-Area Monitoring System)

## 1. GİRİŞ

Elektrik iletim sistemlerinin coğrafik olarak büyümesi, bölgeler ve ülkeler arası enterkonnekte faaliyetlerin artması, bazı sistem kararlılık problemlerine sıkça rastlanmasına sebep olmaktadır. Bu problemler ciddi sonuçlar doğuran olayların tetiklenmesine neden olmakta ve problemlerin giderilememesi durumunda ise büyük maddi kayıpların yaşanması kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle güç salınımları elektrik iletim sisteminde en sık rastlanan kararlılık problemlerindendir. Bu tür salınımlar genellikle şebeke frekansı üzerindeki düşük frekanslı değişimlere sebep olmaktadır. Literatürde bu salınımlar bölgesel ve bölgeler arası olmak üzere ikiye ayrılmıştır [1]:

- 1- Bölgesel (Local) Salınımlar: Bir bölgedeki veya aynı santral içinde bulunan jeneratörlerin birbirlerine karşı göstermiş olduğu tepkiler sonucunda oluşan salınımlardır. Bu salınımların frekansları 0.7–2.0 Hz arasında değişim göstermektedir.
- 2- Bölgeler Arası (Inter-Area) Salınımlar: Bir bölgede bulunan jeneratör grubunun başka bir bölgede bulunan jeneratör grubuna karşı göstermiş olduğu tepkiler sonucunda oluşan salınımlardır. Bu salınımların frekansları 0.1–0.8 Hz arasında değişim göstermektedir.

Bölgesel ve bölgeler arası salınımların bastırılma karakteristiği (critically damped, underdamped, overdamped) güç sisteminin o anda bulunduğu denge noktasına (kararlılık noktasına) bağlıdır. Bazı durumlarda oluşan salınımlar kendiliğinden sönmülenebileceği gibi, genliği artarak devam eden yapıda da olabilir. Eğer bölgeler arası güç salınımlarının genliği artarak devam ederse iletim sistemi için tam (black-out) veya kısmi çökmelere (brown-out) sebep olabileceği düşünüldüğünde, bu salınımların bastırılmasının önemi anlaşılmaktadır.

Türkiye Elektrik İletim Sistemi, 18 Eylül 2010 tarihinde kıta Avrupa Elektrik İletim Sistemi olan ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)'e Bulgaristan üzerinden iki adet ve Yunanistan üzerinden bir adet 380 kV hat ile bağlanmıştır. Bu bağlantı hatları üzerinden Türkiye'den Avrupa'ya ve Avrupa'dan Türkiye'ye yaklaşık olarak 1200 MW'lık bir güç alışverişi hedeflenmektedir. Bağlantı öncesinde bağlantının sorunsuz gerçekleşmesi için bir

proje grubu kurularak, elektrik üretim santrallerinin rehabilitasyonu, santrallerde bulunan sistemlerdeki kontrol parametrelerinin optimize edilmesi (Otomatik Gerilim Düzenleyicisi “Automatic Voltage Regulator, AVR”, Otomatik Üretim Kontrolörü “Automatic Generation Control, AGC”, vb.) ve özellikle büyük santrallerde bulunan Güç Sistemi Dengeleyicilerinin (Power System Stabilizer, PSS) parametrelerinin optimize edilmesi gibi bir dizi faaliyetler yürütülmüştür [2]. Yürütülen bu çalışmalarda ulusal şebeke frekansındaki  $\pm 100$  mHz genlikli değişimlerin ENTSO-E ölçütü olan  $\pm 20$  mHz veya daha düşük değerlere çekilmesi hedeflenmiştir.

Proje ekibinin yürüttüğü faaliyetlerden bir tanesi de Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanması sonrasında oluşması muhtemel bölgeler arası güç salınımlarının tanımlanması ve sönümlendirilmesidir. Bölgeler arası güç salınımları:

- 1- Yükteki ani ve büyük değişimler
- 2- Büyük güçlü bir jeneratörün devreye girmesi veya çıkması
- 3- Yüklü bir hattın açılması
- 4- Elektrik sisteminde meydana gelen olaylar (örneğin faz-toprak kısa devre hataları)

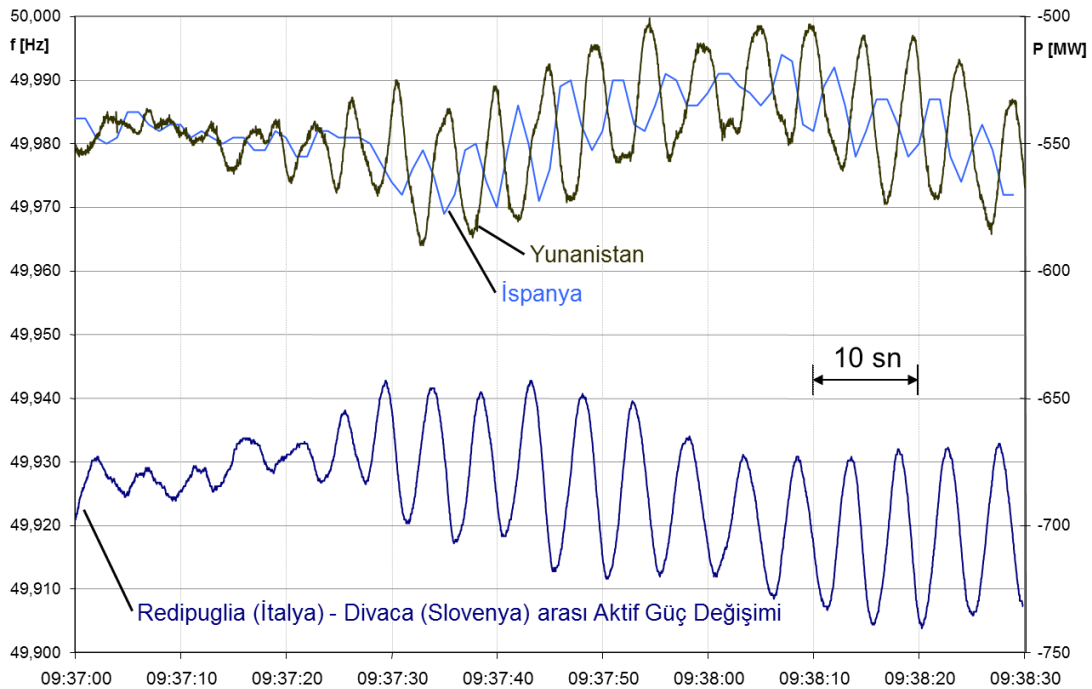
gibi nedenlerden dolayı oluşur.

Elektrik şebekesi, yapısı gereği doğrusal bir sistem değildir ve zamanla değişen yapıdadır. Bu yüzden elektrik şebekesinde meydana gelen bölgeler arası güç salınımları rastgele (stochastic) ve durağan olmayan (non-stationary) yapıdadır. Ayrıca birçok elektromekanik kip (mod) yakın frekanslarda oluşabilir. Bu yüzden bölgeler arası salınımların tanımlanması ve sönümlendirilmesi oldukça zordur.

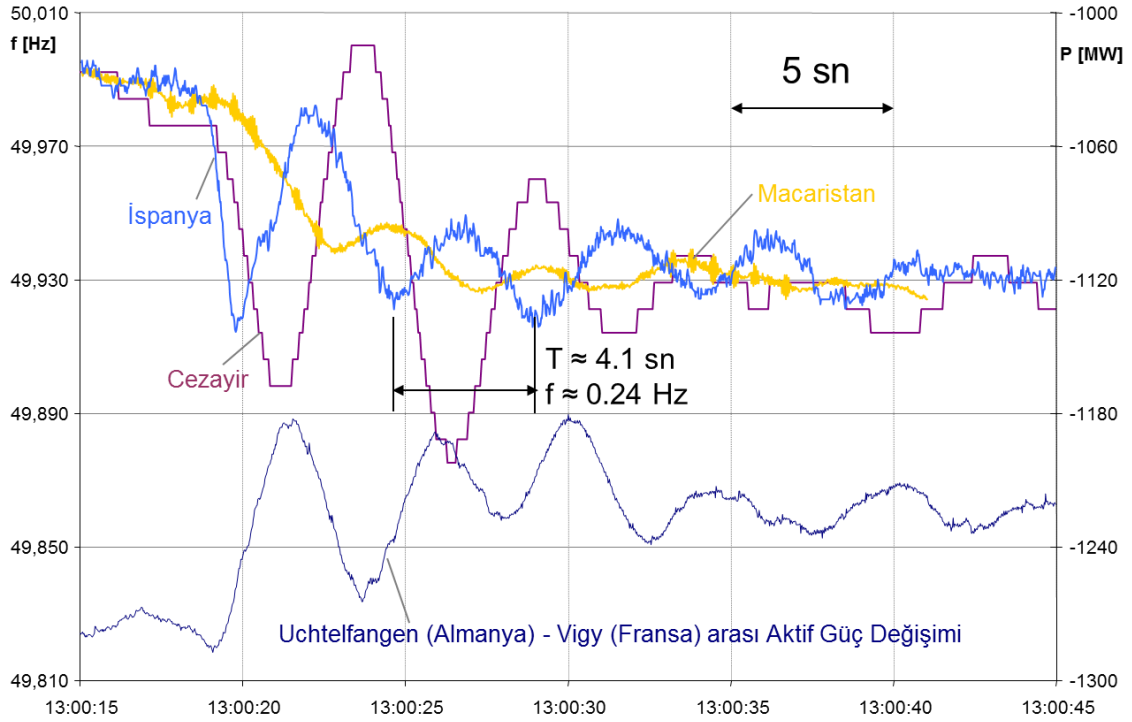
Avrupa Elektrik İletim Sisteminde, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanmasından önce frekansı 0.22–0.26 Hz aralığında değişen bölgeler arası salınımlar gözlenmiştir. Bu salınımlar PSS'ler sayesinde sönümlendirilmiştir [3]. Şekil 1.1'de verilen grafiklerde görüleceği üzere, 1 Mayıs 2005'de Doğu-Batı Avrupa arasında 0.22 Hz frekanslı bölgeler arası salınım meydana gelmiştir. Bu salınım 7–8 periyot boyunca genliği artarak devam etmiştir. Elektrik sisteminin iki uç noktası olan İspanya ve Yunanistan'dan alınan şebeke frekansı verilerinden,

bölgeler arası salınım kolaylıkla görülebilmektedir ve oluşan salınımların fazlarının birbirine göre ters olduğu anlaşılmaktadır. Aktif güç İspanya'dan Yunanistan'a doğru akarken İspanya tarafında frekans düşmektedir. Güç akışı yön değiştirdiğinde ise Yunanistan tarafında frekans düşmekte ve İspanya tarafında ise frekans artmaktadır. Bu durum İtalya-Slovenya arasında bulunan iletim hatları üzerinde hat 675 MW yüklüken tepeden-tepeye yaklaşık 75 MW'lık bir aktif güç salınımına sebep olmuştur. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi 14.05.2004 tarihinde İspanya'da bulunan 980 MW'lık bir santralin arıza nedeniyle devreden çıkması sonucunda Kuzey Afrika-Avrupa arasında 0.24 Hz frekanslı bölgeler arası salınım oluşmuştur. Bu salınım 4–5 periyot içinde sönümlendirilmiştir.

Türkiye'nin Avrupa Elektrik İletim Sistemine bağlanmasından önce yapılan dinamik analizler bağlantı sonrası oluşması muhtemel bölgeler arası salınımlarının baskın yeni bir kipinin olacağını ortaya çıkarmıştır [2, 3, 4]. Bu yeni baskın kipin, frekansı 0.14–0.16 Hz aralığında değişen bölgeler arası salınımlara sebep olacağı yapılan simülasyonlar ile görülmüştür (Şekil 1.3). Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlantısından önce Avrupa Elektrik İletim Sisteminde oluşan



**Şekil 1.1** 01.05.2005 tarihinde Doğu-Batı Avrupa arasında gerçekleşmiş olan bölgeler arası salınım [2]

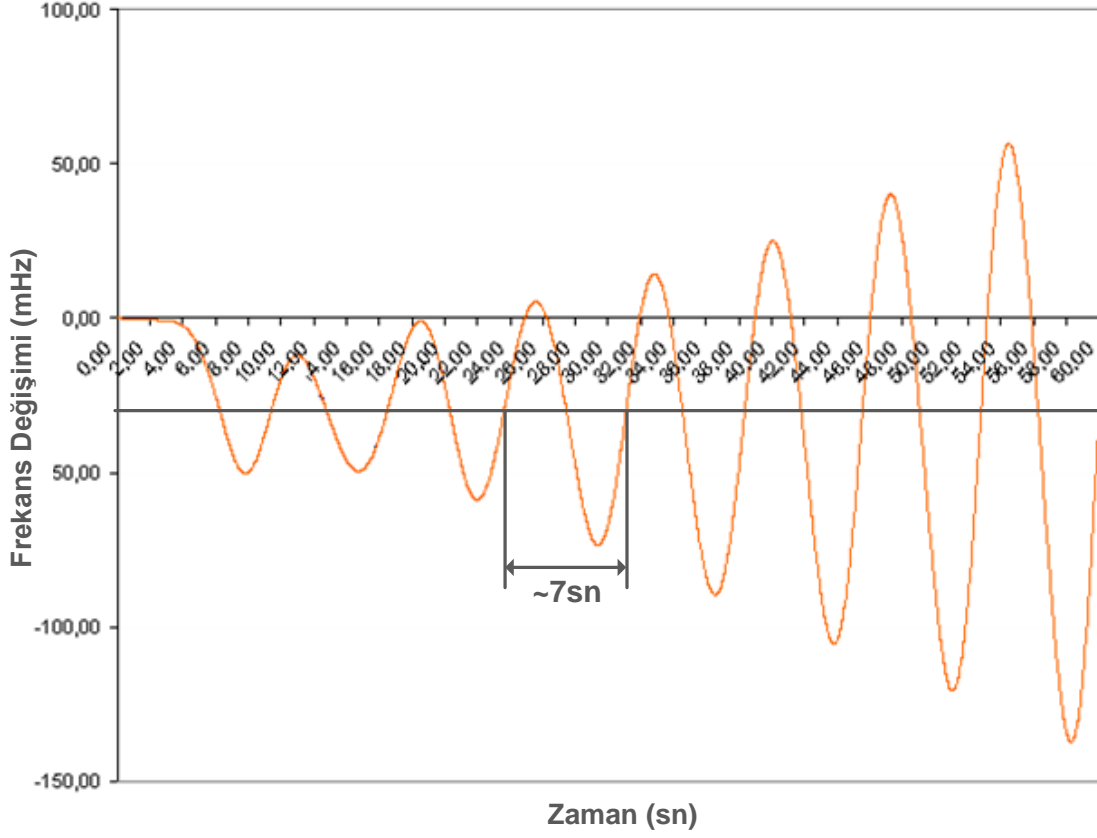


**Şekil 1.2** 14.05.2004 tarihinde Kuzey Afrika-Avrupa arasında gerçekleşmiş olan bölgeler arası salınım [6]

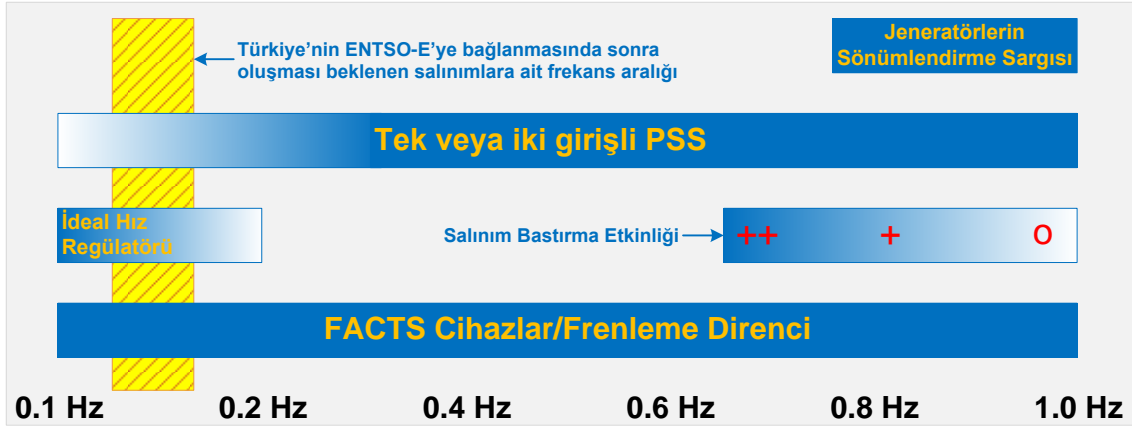
salınımlar PSS'ler tarafından sönümlendirilebilmesine karşın, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlantısından sonra oluşması muhtemel, frekansı 0.13–0.16 Hz aralığında değişecek bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesinde PSS'lerin yeterli olamayacağı öngörülmüştür. Çünkü PSS, özellikle düşük frekanslı salınımların sönümlendirilmesinde yeterince etkili değildir [5,7].

Şekil 1.4'te görüldüğü gibi Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanması sonucunda oluşması beklenen bölgeler arası salınımların frekans bant genişliği içinde PSS'lerin sönümlendirme etkisi oldukça azdır. İdeal hız düzenleyiciler (hız regülatörü) düşük frekanslı salınımların bastırılmasında etkin olmasına karşın gerçekte hız düzenleyiciler, özellikle mekanik sistemler nedeniyle bölgeler arası salınımların bastırılmasında negatif etkilere dahi sebep olmaktadır. Jeneratörlerin sönümlendirme sargıları ise 1 Hz frekanslı salınımların bastırılmasında ancak etkili olabilmektedir. 0.1–1.0 Hz frekans bandı içindeki tüm frekanslarda oluşabilecek salınımların bastırılmasında FACTS cihazlar ve frenleme dirençleri etkilidir.





**Şekil 1.3** Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E bağlantısından sonra oluşması muhtemel bölgeler arası salınım simülasyon verisi [6]



**Şekil 1.4** Güç sistemleri ekipmanlarının düşük frekanslı bölgeler arası salınımların bastırılmasına olan etkisi [7]

Son yıllarda elektrik güç sistemlerinde FACTS cihazlar yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [8, 9, 10]. FACTS cihazları, güç sistemlerinde;

- 1- Terminal gerilim düzenlenmesi,
- 2- Güç faktörü düzenlenmesi (reaktif güç kompanzasyonu),

- 3- İletim sisteminin kapasitesinin artırılması,
- 4- Güç kalitesi parametrelerinin iyileştirilmesi,
- 5- İletim sistemlerinde güç akışı kontrolünün sağlanması,
- 6- Sistem kararlılık limitlerinin artırılması

gibi amaçlar için sıklıkla kullanılmaktadır. Güç sistemlerinde ve endüstride sıklıkla kullanılan FACTS cihazlar:

- 1- STATCOM: Durağan Senkron Kompanzator (Static Synchronous Compensator)
- 2- SVC: Durağan Reaktif Güç Kompanzatorü (Static VAR Compensator)
- 3- APF: Aktif Güç Filtresi (Active PowerFilter)
- 4- HVDC: Yüksek Gerilim Doğru Akım Sistemi (High Voltage Direct Current System)
- 5- TCSC: Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (Thyristor-Controlled Series Capacitors)
- 6- UPFC: Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (Unified Power Flow Controller)

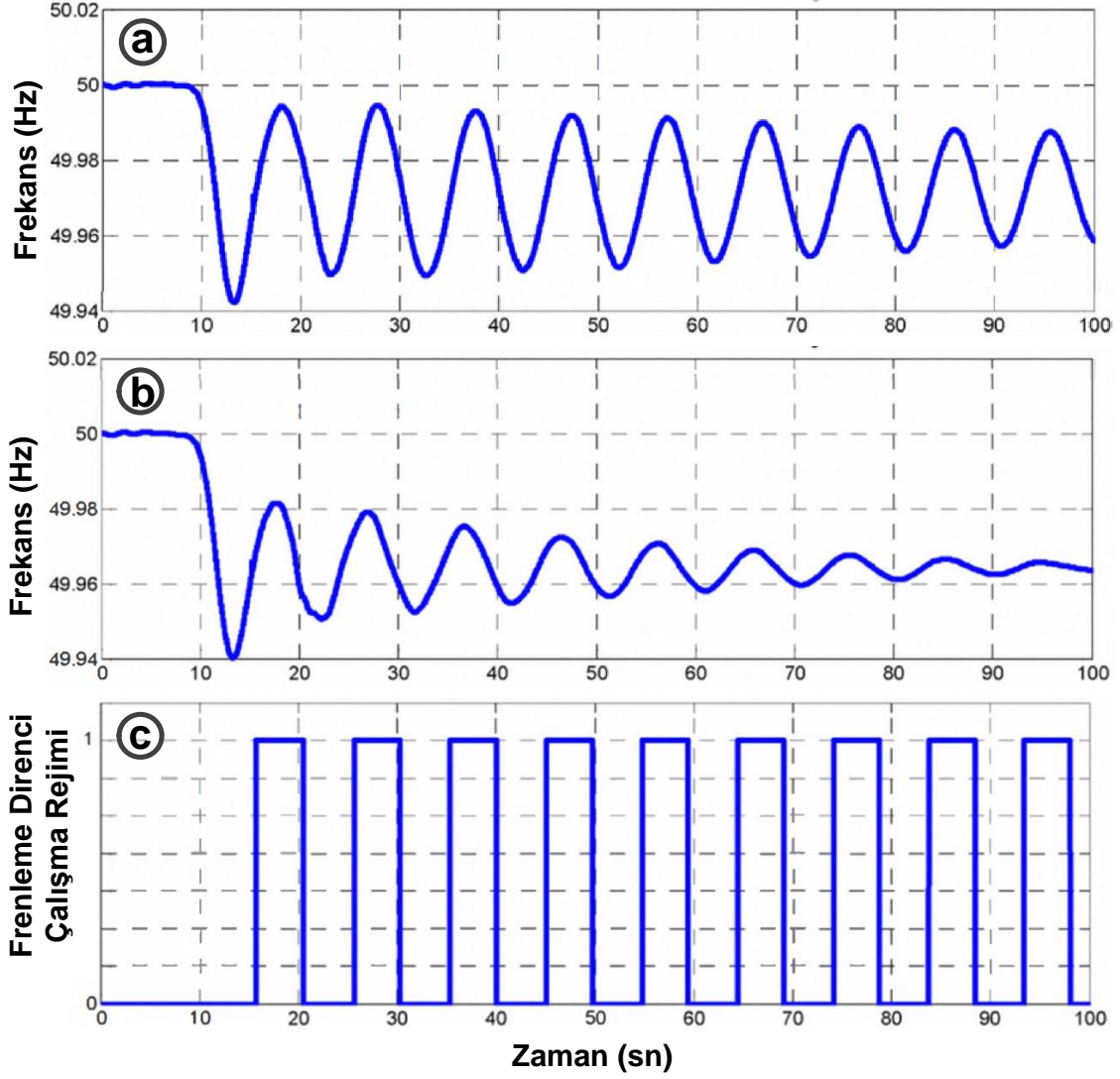
olarak sıralanabilir. FACTS cihazlar genel olarak yukarıda belirtilen kullanım alanları arasındaki ilk beş maddede ifade edilen amaçlar doğrultusunda hem güç sistemlerinde ve hem de endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak son kullanım alanı olarak belirtilen sistem kararlılık limitlerinin artırılması konusunda literatürde çok fazla çalışmaya rastlanmamaktadır. Yapılan çalışmaların çoğu simülasyon seviyesinde kalmış ve uygulaması yapılmamıştır [11,12,13].

Düşük frekanslı bölgeler arası güç salınımlarının söndürülmesi amacıyla kullanılacak diğer bir güç sistemi ekipmanı olan frenleme dirençleri yarı-iletken anahtarlar ile devreye alınan dirençten oluşmaktadır. Salınımın söndürülmesi için direnç uygun anda devreye alınır ve gerekli olduğu koşulda tekrar devreden çıkarılır. Böylece salınımlar söndürülmeye çalışılır. Ancak frenleme dirençleri bağlı olduğu iletim sisteminin gerilim seviyesine ve direnç değerine bağlı olarak yüksek miktarda aktif güç kaybının oluşmasına neden olur.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E bağlanması konusunda çalışmalar yürüten proje grubu, oluşması beklenen bölgeler arası salınımların bastırılmasında ilgili frekans bandını da göz önüne alarak FACTS cihazların ve frenleme

dirençlerinin kullanılabilceğini düşünerek bazı çalışmalar yürütmüştür [2, 4]. Yapılan simülasyon çalışmalarında 1200 MW'lık bir üretim kaybının yaşanması durumunda Türkiye ile ENTSO-E arasında ~0.13 Hz frekanslı bölgeler arası güç salınımları olduğu görülmüştür. Bu güç salınımlarının frenleme dirençleri kullanılarak sönümlendirilebildiği ve frenleme direncinin gücü ne kadar büyük olursa sönümlendirme performansının da o kadar iyi olduğu tespit edilmiştir. Şekil 1.5'te görülebileceği gibi 5 MW'lık bir frenleme direnci kullanılması durumunda salınım 100 sn içinde sönümlendirilmektedir. Oysa frenleme direnci 3.5 MW olarak seçilirse bu sonuca ulaşılamamaktadır [4]. Güç salınımlarının sinüzoidal bir değişime sahip olduğu düşünülüğünde sinüzoidal değişimin pozitif çevriminde frenleme direnci devreye girmeli ve negatif çevriminde devreden çıkarılmalıdır. Aksi takdirde frenleme direnci salınımları bastırmak yerine kuvvetlendirici etki oluşturacaktır. Bu nedenle frenleme direnci oluşan salınımın toplam süresinin yarısı kadar sürede etkin olmalıdır ve bu durum sönümlendirme süresini uzatmaktadır. Ayrıca Türkiye Elektrik Sisteminde hali hazırda bir frenleme direncinin bulunmaması, elektrik sektöründe 5 MW büyüklüğünde hazır bir ürünün temin edilememesi ve frenleme direnci devrede iken 5 MW'lık aktif güç kaybının oluşacak olması gibi nedenlerden dolayı söz konusu salınımların sönümlendirilmesinde frenleme direncinin kullanılmamasına karar verilmiştir.

Bölgeler arası salınımların bastırılmasında frenleme direncinin kullanılmayacağını kararlaştırılmasından sonra salınımların sönümlendirilmesinde FACTS cihazlarının kullanılması için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle iletim sistemleri için TÜBİTAK Kamu Araştırmaları Destek Grubu (KAMAG) tarafından desteklenen 105G129 nolu Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Güç Elektroniği Grubu tarafından Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) için geliştirilerek devreye alınan 154 kV, ±50 MVAr anma gücüne sahip T-STATCOM sisteminin, oluşması muhtemel salınımların sönümlendirilmesi için kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 1.6) [14]. Bahse konu olan T-STATCOM sistemi Ankara Sincan Transformatör Merkezi (TM) Bank-B barasına bağlıdır ve 1 Mart 2010 tarihinden itibaren bağlı bulunduğu barada gerilim düzenlenmesi için faaliyet göstermektedir.



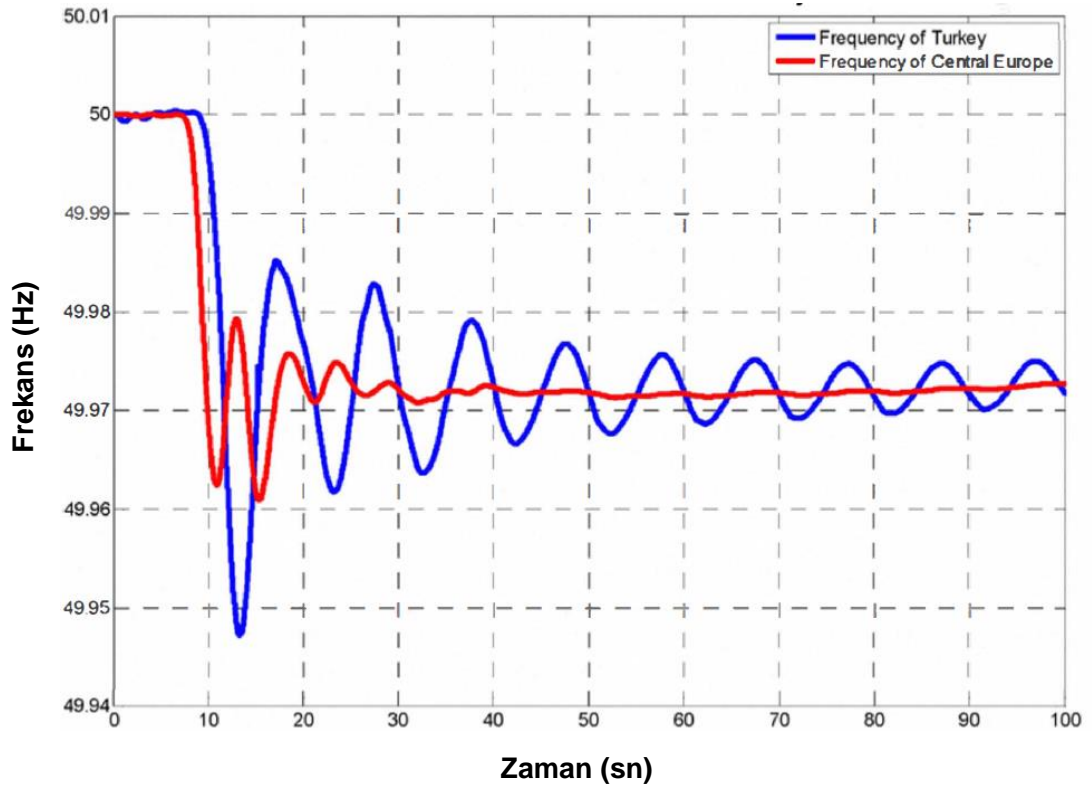
**Şekil 1.5** (a) 3.5MW'lık bir frenleme direnci salınım sönümlendirme performansı, (b) 5MW'lık bir frenleme direnci salınım sönümlendirme performansı, (c) Frenleme direnci çalışma rejimi (1: Devrede 0: Devrede değil) [4]

154 kV,  $\pm 50$  MVAR anma gücüne sahip T-STATCOM'un bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesi konusunda etkinliğinin araştırılması için simülasyon çalışmaları yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında frenleme direncinin etkisini araştırmak için oluşturulan aynı senaryo kullanılmıştır.

Buna göre 1200 MW'lık bir üretim kaybı sonucunda oluşan bölgeler arası güç salınımlarının genliği T-STATCOM tarafından 100 sn içinde ciddi oranda azaltılmaktadır (Şekil 1.7) [4]. Bu da Ankara Sincan TM'de kurulu olan T-STATCOM sisteminin oluşması muhtemel bölgeler arası salınımların bastırılmasında kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ancak salınımların bastırılma



**Şekil 1.6** Ankara Sincan TM Bank-B barasına bağlı 154 kV,  $\pm 50$  MVar T-STATCOM Sistemi [14]



**Şekil 1.7** T-STATCOM salınım sönümlendirme performansı [4]

etkisinin artırılması için T-STATCOM sisteminin yanı sıra hali hazırda kurulu olan bir başka FACTS cihazı olan SVC sistemlerinin de salınımların sönümlendirilmesinde kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla Türkiye'nin değişik bölgelerinde bulunan yüksek güçlü dört SVC sistemi belirlenmiştir. Bu SVC sistemlerinin her biri 300 MVAr gücünde olup demir çelik fabrikalarında reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılmaktadır [2, 4, 15].

Bölgeler arası güç salınımları temelde elektrik şebekesindeki arz-talep dengesinin bozulması sonucunda oluşur. Arz-talep dengesinin bozulması ile oluşan bölgeler arası salınım nedeniyle aktif güç bir bölgeden diğerine doğru akar. Bölgeler arası salınım fazına bağlı olarak aktif gücün akış yönü sürekli değişir. Aktif güç akışı, şebeke frekansı ile (özellikle Türkiye Elektrik İletim Sistemi göz önüne alındığında) doğrusal bir ilişki içindedir. Frekansın artması arzın talepten fazla olduğu, frekansın düşmesi ise talebin arzdan fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bölgeler arası salınımlar sinüzoidal dalga şeklinde oluşmaktadır. Oluşan sinüzoidal dalga şeklinin pozitif çevriminde arz talepten fazladır ve dolayısıyla frekans hedeflenen değerden büyüktür. Tam tersi durumda ise talep arzdan fazladır ve böylece frekans hedeflenen değer altına düşer. Bu yüzden FACTS cihazları, salınımın pozitif çevriminde kapasitif reaktif güç üreterek bağlı bulunduğu baradaki gerilimi yükseltip bölgesel (local) tüketimi arttıracak yönde, salınımın negatif çevriminde ise endüktif reaktif güç çekip bağlı bulunduğu baradaki gerilimi düşürmek suretiyle bölgesel tüketimi azaltacak yönde etki etmelidir.

FACTS cihazların oluşacak bölgeler arası salınımlara sönümlendirici etki yapabilmesi için salınımları algılayıcı bir algoritma/sistem geliştirilmesi gereklidir. Bu amaçla öncelikle bölgeler arası salınım olduğunun algılanması ve FACTS cihazın doğru kipte (kapasitif veya endüktif kip) çalışması için oluşan salınımın fazının da doğru şekilde tespit edilmesi gereklidir. Geliştirilecek algoritma/sistem şayet bölgeler arası salınımlarının fazını doğru tespit edemezse, FACTS cihazın salınımı artıracak yönde çalışmasına sebep olabilir. Bu yüzden salınımların hem genliği hem de fazının doğru şekilde tespit edilerek bastırılması sağlanmalıdır. Ayrıca oluşan salınımın frekansı da doğru şekilde tespit edilmeli ve bölgesel mi yoksa bölgeler arası salınım mı olduğuna karar verilmelidir.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye, iki farklı noktada bulunan üç farklı hat üzerinden bağlanması nedeniyle, hatlar eş zamanlı olarak takip edilmeli ve bilgiler bir merkezde toplanarak değerlendirildikten sonra gerekli komutlar Türkiye'nin değişik bölgelerinde bulunan FACTS cihazlarına gönderilmelidir. Fakat haberleşme gecikmeleri ve haberleşme güvenilirlik problemleri nedeniyle bu yöntem uygulanmamıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında, oluşması beklenen bölgeler arası güç salınımlarının, şebeke frekansı üzerinde güç salınımlarıyla orantılı olacak şekilde frekans salınımlarının oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Bu tespit bağlantı sonrası oluşan gerçek salınımlardan elde edilen veriler ile doğrulanmıştır (Şekil 1.8). Türkiye Elektrik İletim Sisteminin yapısı gereği şebeke frekansı tüm ülke genelinde aynıdır. Bu tespit de gerçek zamanlı ölçümler ile doğrulanmıştır [16] (Şekil 1.9). Dolayısıyla bölgeler arası güç salınımlarının olup olmadığı, FACTS cihazlarının bulunduğu yerlerdeki şebeke frekansı takip edilerek anlaşılacak ve FACTS cihazlar birbirinden bağımsız bir şekilde kumanda edilebilecektir.

FACTS cihazlara gönderilecek kumanda sinyalleri cihazların bulunduğu bölgedeki şebeke frekansının ölçülmesi ve analiz edilmesine bağlıdır. Bu amaçla literatürde sıklıkla geçen sinyal işleme yöntemleri olan [17–22] :

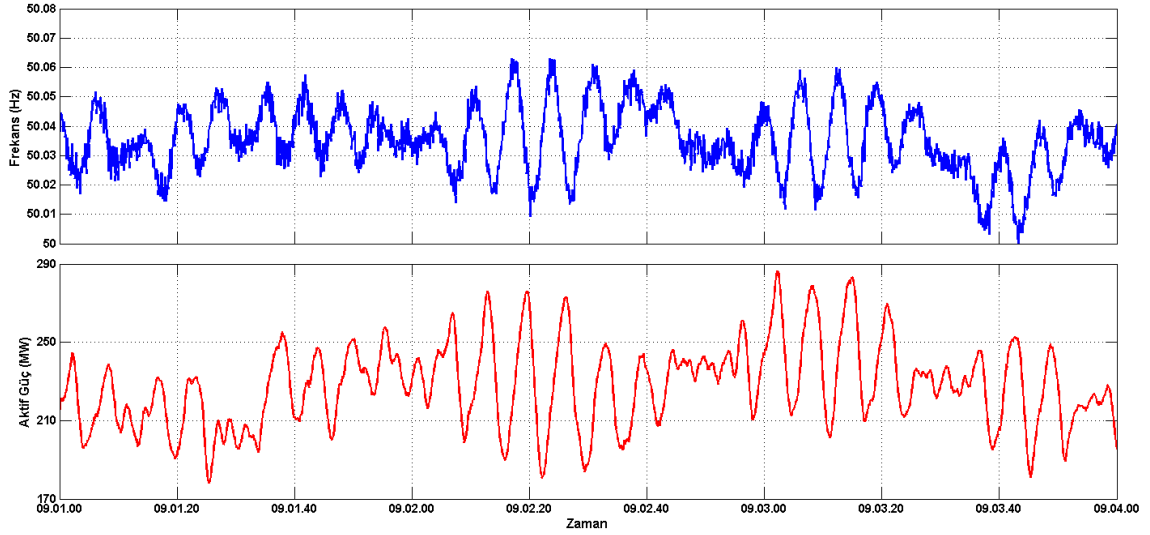
- 1- Fourier analiz
- 2- Prony analiz
- 3- Spectrogram
- 4- Wavelet (Dalgacık)
- 5- Hilbert-Huang

gibi yöntemler incelenmiştir.

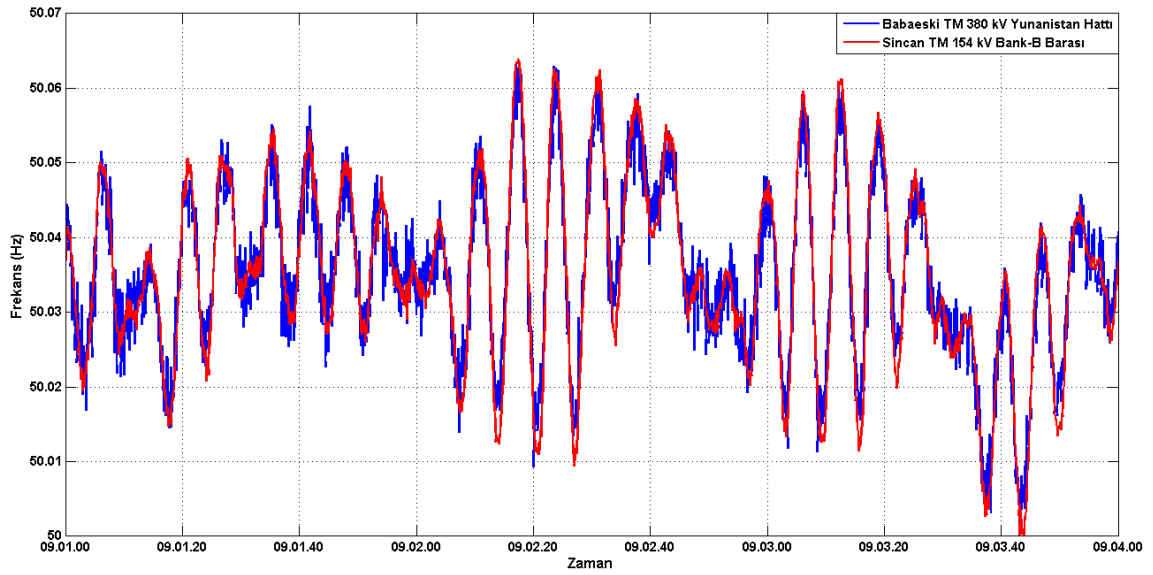
Bölgeler arası güç salınımları doğrusal yapıda olmayan elektrik şebekesi üzerinden yapılan ölçümler ile tespit edilmeye çalışılacaktır. Analizler için kullanılacak sinyaller durağan olmayan yapıda olup periyodik bir değişim göstermemektedir. Elektrik şebekesinin yapısından kaynaklanan bu zorluklar, birçok sinyal işleme yönteminin bölgelerarası salınımların tespitinde kullanılamayacağını ya da sınırlı bir kullanıma sahip olduğu gerçeğini ortaya koymaktadır.

Fourier analiz doğrusal sistemlerde frekans-enerji dağılımını elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca analiz edilecek sinyaller periyodik ve durağan olmalıdır.

Prony analiz, Fourier gibi doğrusal sistemler ve durağan sinyaller için geliştirilmiş bir eğri uydurma tekniğidir. Prony, analiz edilecek sinyali bir filtre olarak modeller



**Şekil 1.8** 23.04.2011 tarihinde Babaeski TM 380 kV Yunanistan hattı üzerinde bölgeler arası salınım olduğu anda gözlemlenen şebeke frekansı ve aktif güç



**Şekil 1.9** 23.04.2011 tarihinde Babaeski TM 380 kV Yunanistan hattı ve Sincan TM 154 kV Bank-B barası üzerinde bölgeler arası salınım olduğu anda gözlemlenen şebeke frekansı



ve sinyalde bulunan kipleri elde etmek, filtre parametrelerinin tespit edilmesine karşılık gelir. Prony analiz, uygulanan pencere genişliğinden, örnekleme sayısından ve gürültüden oldukça fazla etkilenmektedir.

Spectrogram zamanla birlikte kayan ve sınırlı uzunlukta bir pencere içinde Fourier analiz temeline dayanır. Bu sayede sinyalin genlik-frekans dağılımı elde edilir. Analiz sonucunda tespit edilen bir olayın zaman eksenindeki karşılığını bulmak için pencere genişliğinin küçük olması zorunludur. Fakat “dualite” ya da belirsizlik ilkesi gereği frekans hassasiyetini artırmak için geniş pencerelere ihtiyaç duyulur. Spectrogram, Fourier analiz temeline dayandığı için sinyalin pencere içinde durağan olduğu farz edilir. Ayrıca incelenen sistemin doğrusal olması da gerekir. Bu yöntemde pencere boyunun sabit olması ya da adaptif yapıda olmaması çözünürlük sorunlarına neden olmaktadır.

Wavelet, adaptif pencere yapısı ile yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Wavelet Spectrogram’dan farklı olarak değişken boyutlu pencereler kullanılmaktadır. Düşük frekanslı sinyaller için geniş pencere kullanılırken, yüksek frekanslı sinyaller için dar pencereler kullanılır. Ayrıca taban (basis) fonksiyonu olarak sinüs ve kosinüs fonksiyonlarından farklı taban fonksiyonları da kullanabilmektedir. Bu fonksiyonlar analiz edilecek sinyalin türüne göre belirlendiği için uyumluluk sorunlarını azaltmaktadır. Değişken pencere uzunluğuyla durağan olmayan sinyaller içinde uygulanabilen Wavelet, doğrusal sistemler için geliştirilmiştir.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin elektrik şebekesinde oluşan bölgeler arası salınımlarının tespitinde kullanılabilmelerini sınırlayacak kısıtları bulunmaktadır. Birçok yöntem doğrusal sistemler ve durağan sinyaller için geliştirilmiştir. Oysa elektrik şebekesinde elde edilen sinyaller bu iki ön şartı da sağlamamaktadır. Fourier, Prony, Spectrogram ve Wavelet gibi analiz yöntemlerinin bölgeler arası salınımların tespitinde kullanılması, elde edilecek sonuçlarda belli bir hata oranının olduğunun kabul edilmesiyle ancak mümkün olabilir. Çünkü bu yöntemler elektrik şebekesinin belli bir an için doğrusal ve sinyallerin de durağan olduğu varsayımıyla kullanılabilir.

Hilbert-Huang tekniği doğrusal olmayan sistemler için durağan olmayan sinyalleri analiz etmekte kullanılan bir yöntemdir. Sinyallerdeki geçici (temporal) frekans ve genlik değişimleri, zaman tanım bölgesinde takip edebilir. Hilbert-Huang tekniği yaygın olarak bilinen Hilbert dönüşümüyle Huang'ın ortaya attığı EMD (Empirical Mode Decomposition) yöntemlerinin birleşiminden oluşmaktadır [20]. EMD, analiz edilecek sinyaldeki farklı frekans bileşenlerini birbirinden ayırmaktadır. Bu sayede IMF (Intrinsic Mode Function) adı verilen tek frekanslı bileşenler iteratif bir şekilde elde edilmiş olur. Analiz edilecek sinyalde gürültü ve DC bileşenlerin bulunması iterasyon suresini artırmaktadır. Bu yüzden EMD yöntemi uygulamadan önce basit anlamda sinyallerin filtrelenmesi iterasyon surelerini oldukça kısaltmaktadır. Ayrıca EMD yönteminin henüz tam olarak zulememiş sonlandırma koşulu (stopping criterion), sınır değerler problemi (border effects), aralıklılık (intermittency), aynı oktavda iki frekans kipinin bulunması (two modes within an octave)" olarak bilinen yapısal sorunları bulunmaktadır [20–33].

Bu tez çalışması, bölgeler arası salınımların algılanması ve bastırılması konusunda yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde salınımların bastırılması konusunda yapılan çalışmaların birçoğu elektrik sisteminin ve salınımların bastırılmasında kullanılacak cihazların modellenmesi ve elektrik sisteminin kararlılık durumunun gözlenmesini içermektedir [34–42]. Bu çalışmalarda, bölgeler arası salınımlar, elektrik sisteminin kararlılık testi ile anlaşılmaya çalışılarak elektrik sisteminin kararsızlaşmaya başlamasıyla birlikte salınımin bastırılması için kullanılan cihazın kontrol parametreleri değiştirilip elektrik sisteminin tekrar kararlı hale getirilmeye çalışılması hedeflenmiştir. Kısacası elektrik sisteminin kutupları/sıfırları (poles/zeros) FACTS cihazlar ile değiştirilerek elektrik sistemi kararlı halde tutulmaya çalışılmaktadır. Oysa bu tez çalışmasında sistem kararlılık testine ihtiyaç olmadığı gibi FACTS cihazlar ile yapılan müdahale dolaylı olarak elektrik sistemini kararlı hale getirmektedir. Ayrıca literatürde bulunan birçok çalışmada bölgeler arası salınımları algılamak için geniş alan ölçüm sistemleri kullanılmaktadır (Wide-Area Monitoring System, WAMS) [43–46]. Elektrik sisteminin birçok noktasına yerleştirilen fazör ölçüm sistemlerinden (Phasor Measurement Unit, PMU) alınan veriler değerlendirilerek bölgeler arası salınımin başlayıp başlamadığına karar verilmektedir.

Bu çalışmada önerilen yöntemlerde sadece FACTS cihazın bulunduğu bölgedeki şebeke frekansı analizler için girdi olarak kullanılmaktadır. Bölgeler arası salınımların algılanması için şebeke frekansı yerine Türkiye Elektrik İletim Sistemi ile ENTSO-E arasında bulunan bağlantı hatlarındaki g akışları veya literatürde bahsedildiği üzere WAMS lmleri de kullanılabilirdi. Bu durumda FACTS cihaz ile ölçüm noktaları arasında güvenilir bir haberleşme ortamının tesis edilmesi zaruridir. Güvenilir haberleşme ortamını tesis etmek ve sürdürmek kolay olmadığı gibi ekonomik de olmayacaktır. Ayrıca haberleşme gecikmeleri sistemin tepki süresini geciktireceği için yanlış tepkiler verilmesine de sebep olabilir. Bu olumsuz etkileri yok etmek için ekstra bazı önlemler alınması zorunludur [47–48] .

Bahsedilen tüm gereksinimler ve kısıtlar göz önüne alınarak bu tez çalışmasında elektriksel güç sistemlerinde oluşan bölgeler arası salınımların tespiti için FFT Tabanlı Değiştirilmiş Kayan Pencere Yöntemi (FFT-Based Modified Sliding Window Algorithm, FBMSWA) ve Hedef Odaklı Saflaştırmaya Dayalı Kipsel Ayrıştırma Yöntemi (Target Based Refinement Empirical Mode Decomposition, TBR-EMD) isimli iki yeni yöntem ve uygulamaları anlatılacaktır.

## 2. TASARIM ÖLÇÜTLERİ VE FREKANS ÖLÇÜMÜ

### 2.1. Bölgeler Arası Salınım Tanımlayıcı Sistem Tasarım Ölçütleri

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanması sonucunda oluşması beklenen bölgeler arası salınımların tanımlanması ve karşı önlemler alınması elektrik şebekesinin güvenliği için oldukça önemlidir. Bu amaçla geliştirilecek olan bölgeler arası salınım algılayıcı sistem için bazı tasarım ölçütleri TEİAŞ tarafından belirlenmiştir. Bu ölçütler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

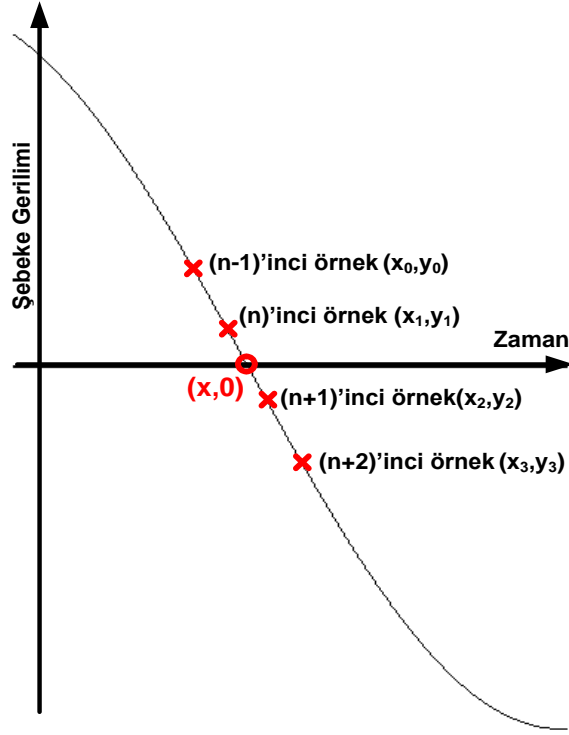
- 1- Bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistem sadece 0.1–0.2 Hz frekans bandı içinde oluşan ve genliği belirli bir eşik seviyesinin üzerinde olan frekans salınımlarını algılayarak FACTS cihazlarına gerçek zamanlı komutlar göndermelidir. Genlik algılama hata oranı en fazla  $\pm\%10$  olmalıdır. Genlik eşik seviyesi ise 7–20 mHz aralığında seçilebilmelidir.
- 2- Salınım tanımlayıcı sistem 0.1–0.2 Hz aralığının dışında kalan frekans salınımları için tepki vermemelidir. Ancak, teknik olarak ilgilenilen frekans bandının uç noktalarında keskin bir sınırlama yapmak oldukça zordur. Bu yüzden salınım algılayıcı sistem, 0.075 Hz'den küçük ve 0.25 Hz'den büyük, genliği 100 mHz olan frekans salınımları için tepki vermemelidir.
- 3- 0.1–0.2 Hz bandı içindeki frekans salınımlarının fazları en fazla  $\pm 30^\circ$  faz hatası ile tespit edilmelidir. Yani bölgeler arası salınımların tespiti için kullanılan sinyal ile analiz sonucunda elde edilen sinyal arasındaki faz farkı (faz hatası) en fazla  $\pm 30^\circ$  olmalıdır. Faz hatasının yüksek olması FACTS cihazlar ile salınımların söndürülmesini zorlaştıracak gibi salınımların genliklerinin artmasına da sebep olabilir.
- 4- Salınım tanımlayıcı sistemin, periyodik olarak değişen ve genliği durağan olan veya sürekli artan salınımları algılaması beklenmektedir. Anlık olarak oluşan salınımları algılaması beklenmektedir. Bu tür durumların oluşması halinde özel koruma sistemleri devreye girecektir [15].

Bu tez çalışmasında anlatılacak yöntemler bu dört ölçüt göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Ancak anlatılacak yöntemler genelleştirilebilir yapıda olup bazı analiz parametreleri değiştirilerek başka isterleri de karşılayacak hale getirilebilir.

## 2.2. Şebeke Frekansının Ölçülmesi

Bölgeler arası salınımlar FACTS cihazların bulunduğu yerdeki şebeke frekansının analiz edilmesi ile tanımlanacaktır. Bunun için şebeke frekansının hızlı ve hassas bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Frekans ölçümündeki hatalar salınım kiplerinin (modlarının) doğru veya hızlı bir şekilde bulunmasını zorlaştıracaktır. Literatüre bakıldığında birçok frekans ölçüm yönteminden bahsedilmektedir. Bu çalışmada, şebeke gerilim dalga şeklinin (sinüs) sıfır geçiş noktaları arasındaki sürenin hesabı ile frekans ölçümü yapılmaktadır. Öncelikle şebeke gerilim dalga şekli GPS tabanlı hassas bir örnekleme sistemi (25.6 kHz  $\pm$ 0.1 ppm örnekleme hızıyla) ile sayısala çevrilmektedir [49]. Daha sonra elde edilen sayısal sinyal, sıfır geçiş noktalarının hassas olarak bulunabilmesi için bant geçiren filtreden geçirilerek şebeke frekansının ana bileşeni dışındaki diğer tüm bileşenlerden arındırılmaya çalışılır. Burada, frekans şebeke gerilim dalga şeklinin iki sıfır geçişi arasındaki süreden hesaplanır. Ancak şebeke gerilimi sayısala çevrildiği için sıfır geçiş noktası ardışık iki örnek arasında kalabilir. Sıfır geçiş noktasının zaman eksenindeki yeri tam olarak saptanamazsa şebeke frekansı ölçümleri hatalı olacaktır.

Şekil 2.2.1'de gösterildiği gibi (n)'inci örnek ile (n+1)'inci örnek arasında sinüzoidal dalga şeklinin sıfır geçiş noktası bulunmaktadır. 25.6 kHz örnekleme hızı için iki örnek arasında  $\sim$ 40  $\mu$ sn zaman farkı bulunmaktadır ve gerçek sıfır geçiş noktasını tespit etmeden sıfır geçiş noktasının (n)'inci örnek veya (n+1)'inci örnek olarak alınması durumunda şebeke frekansı  $\sim \pm$ 100 mHz'lik bir hata ile ölçülür. Bu yüzden gerçek sıfır geçiş noktası olan (x,0) noktasının hassas olarak tespit edilmesi gereklidir. (x,0) noktasını bulabilmek için sinüzoidal bir sinyalin sıfır geçiş noktası etrafında doğrusal bir değişim gösterdiği kabul edilerek (n)'inci ve (n+1)'inci örnek noktalarından geçen doğru denklemi kullanılır. Ayrıca doğrusal (lineer) regresyon yöntemi kullanılarak ikiden fazla noktadan geçen bir doğru denklemi uydurulmaya çalışarak da (x,0) noktası bulunabilir. Bu iki yöntemin dışında [50]'de bahsedildiği gibi "Quadratic Interpolation" veya değişik kestirim algoritmaları kullanılarak da (x,0) noktası tespit edilebilir. Bu çalışmada iki noktadan geçen doğru denklemi ve (2.1)'de verilen denklem yardımıyla yedi nokta kullanılarak hesaplanan doğrusal regresyon yöntemleri kullanılarak yarım çevrimde (half-cycle) bir frekans hesabı yapılmıştır.

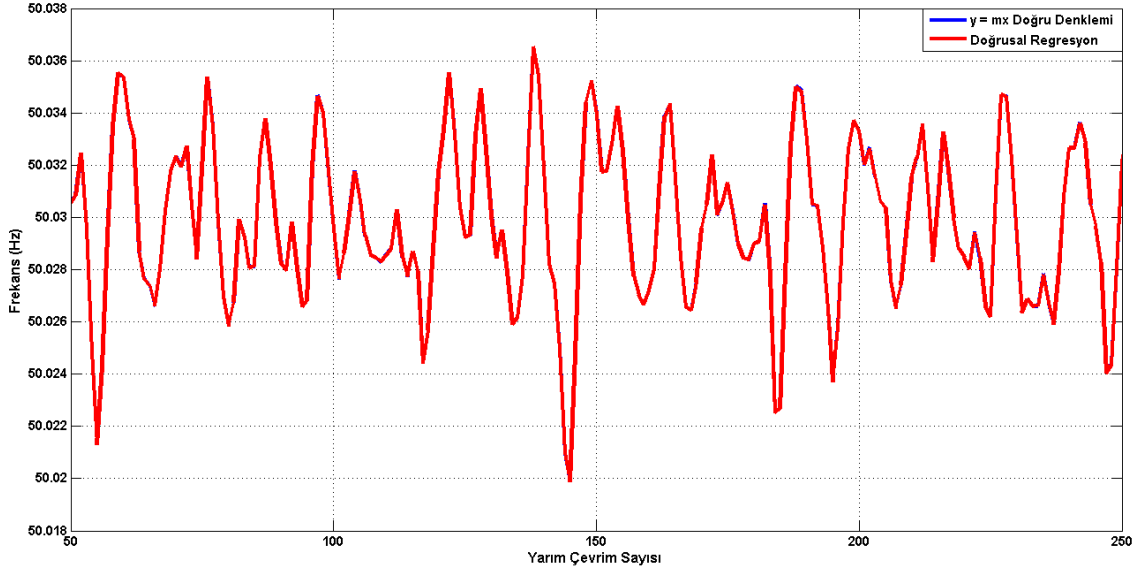


**Şekil 2.2.1** Şebeke geriliminin sayısala çevrilmesi

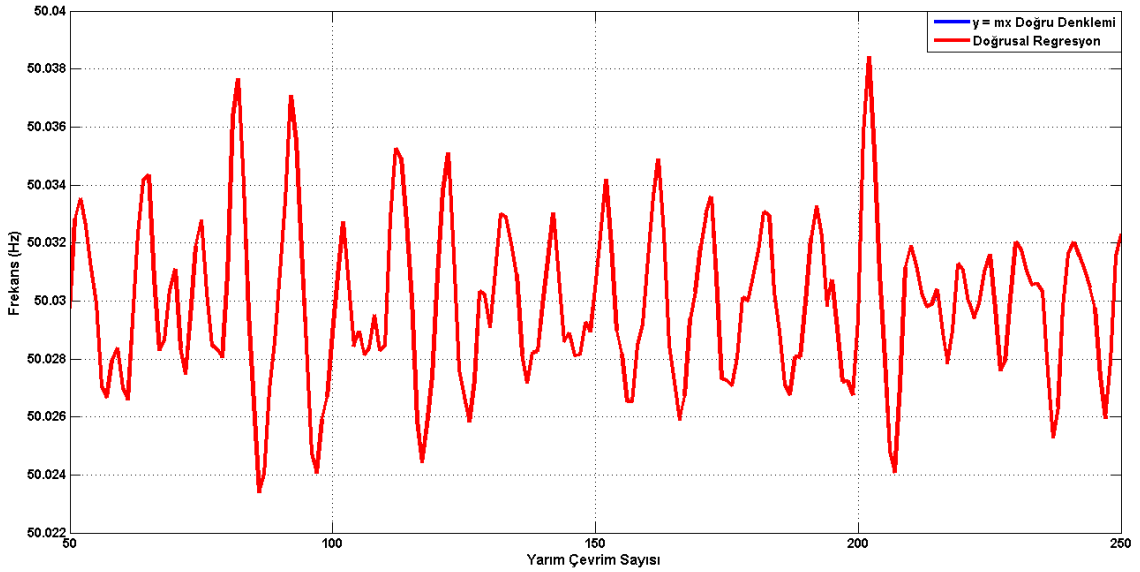
$$m(egim) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)(y_i - y)}{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (2.1)$$

Şekil 2.2.2'de görülebileceği gibi 25.6 kHz örnekleme hızıyla gerilim dalga şekli sayısala çevrildikten sonra iki noktadan geçen doğru denklemi ( $y = mx$ ) ve yedi nokta kullanılarak hesaplanan doğrusal regresyon yöntemi ile yarım çevrimde bir yapılan frekans hesapları üst üste örtüşmektedir. Bu da iki noktadan geçen doğru denkleminin sinüsün sıfır geçiş noktasını kestirmek için yeterli bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır. 25.6 kHz örnekleme hızı ve yarım çevrimde bir yapılan frekans hesabında sapma miktarı deneysel olarak  $\sim \pm 8$  mHz olarak tespit edilmiştir. Bu sapma miktarını daha da düşürmek için yani sinüsün sıfır geçiş noktasını daha iyi tespit edebilmek için örnekleme hızını 256 kHz'e yani bir önceki örnekleme hızının on katına çıkarılmasını karar verilmiştir. Bu sayede iki örnek arasındaki belirsizlik onda birine düşecektir. İşlem yükü on kat artmasına karşın frekans hesabında belirgin bir iyileşme sağlanamamıştır (Şekil 2.2.3). Bu da iki noktadan geçen doğru denklemi veya doğrusal regresyon yöntemi ile bulunan  $(x,0)$  noktasının gerçek sıfır geçiş noktasına oldukça yakın olduğunu göstermiştir.

Oluşan  $\sim\pm 8$  mHz sapma miktarı ise 10 ms bir yapılan frekans ölçümü için makul bir hata oranı olarak değerlendirilmiş ve örnekleme frekansının 25.6 kHz'de kalmasına karar verilmiştir. İki noktadan geçen doğru denklemi ile ve yedi noktadan geçen doğrusal regresyon yöntemleriyle hesaplanan frekanslar yakın çıkması nedeniyle işlem yükü daha az olan iki noktadan geçen doğru denklemi yöntemi ile yarım çevrimde bir frekans hesabının yapılması benimsenmiştir.



**Şekil 2.2.2** 25.6 kHz örnekleme hızıyla sayısala çevrilmiş gerilim sinyali üzerinde yarım çevrimde bir hesaplanan şebeke frekansı



**Şekil 2.2.3** 256 kHz örnekleme hızıyla sayısala çevrilmiş gerilim sinyali üzerinde yarım çevrimde bir hesaplanan şebeke frekansı

### 3. ÖN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında bölgeler arası salınımın tanımlanması için giriş bölümünde de belirtildiği üzere iki yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler ile bölgeler arası salınımlar ikinci bölümde bahsedilen ölçütleri sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak bu iki yöntemden de önce daha basit yöntemler üzerinde çalışılmış fakat olumlu sonuçlar alınmadığı için daha karmaşık algoritmalar ile çözüm aranmıştır. Bu bölümde, asıl çalışmalara yön veren daha önce yapılmış ön çalışmalar hakkında kısa bilgiler verilecektir.

#### 3.1. PSS Algoritması ile Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması

PSS'ler elektrik üretim santrallerinde şebekedeki güç salınımlarını algılayarak jeneratörleri bu salınımları bastırarak şekilde yönetmektedir. Bu sayede elektrik iletim sisteminin kararlılığının sağlanmasına katkıda bulunurlar. Bir FACTS cihazı olan T-STATCOM'un da dolaylı bir şekilde elektrik iletim sisteminin kararlılığını korumak için kullanılacak olması bölgeler arası salınım tanımlayıcı sisteminde PSS'ler gibi çalışabileceği fikrinin doğmasına neden olmuştur. Bu yüzden PSS'lerin salınımları nasıl algıladığı konusunda araştırmalar yapılmıştır. PSS'ler Şekil 3.1.1'de basitçe gösterildiği üzere "wash-out" adı verilen yüksek geçiren bir filtre, "lead-lag compensator" adı verilen bir faz ayarlama birimi, çıkış limitleyicisi ve kontrol bloğundan oluşmaktadır.

"Wash-out" filtre temelde basit bir yüksek geçiren filtre olup giriş sinyalindeki kararlı hali atıp geçici durumların filtreden geçmesine izin vermektedir. Kısacası "wash-out" filtre girişe uygulanan sinyaldeki DC bileşeni atarak AC bileşenin geçmesine izin verir. "Wash-out" filtrenin transfer fonksiyonu  $G(s)$ , (3.1)'de verildiği gibidir [51].

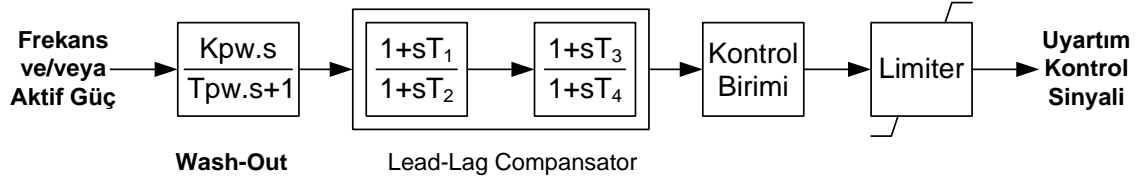
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s}{s + d} \quad (3.1)$$

Bu transfer fonksiyonun ayrık zaman (discrete-time) gösterimi şu şekildedir:

$$z(k + 1) = x(k) + (1 - d)z(k) \quad (3.2)$$

$$y(k) = x(k) - dz(k) \quad (3.3)$$





**Şekil 3.1.1** Basitleştirilmiş PSS Blok Şeması

Verilen formüllerde  $x(k)$  giriş sinyali,  $y(k)$  çıkış sinyali ve 'd' bir sabittir. Filtre, 'd' parametresinin pozitif değerleri için kararlı, negatif değerleri için ise kararsız davranmaktadır. Genel olarak 'd' parametresi istenilen kararlı hal bastırma oranına göre  $0 < d < 2$  aralığından seçilebilir. 'd' parametresi büyüdükçe filtrenin düşük frekanslı değişimleri daha iyi ve hızlı bastırdığı görülmüştür. Fakat bu durumda ilgilendiğimiz bant olan 0.1–0.2 Hz frekans bandı içindeki sinyaller de bastırılmaktadır. Bu yüzden 'd' parametresi çok büyük seçilmemelidir.

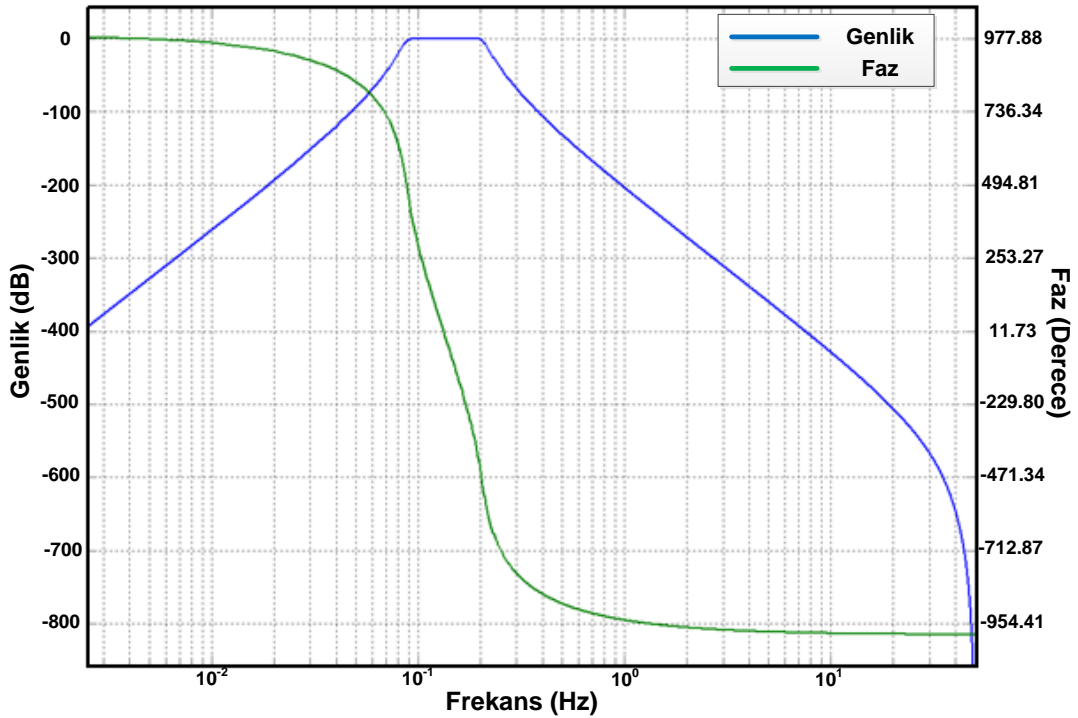
Bölgeler arası salınımların algılanması için şebeke frekansı kullanılacaktır. Frekans sabit bir 50 Hz üzerinde salınan bir yapıda olmadığı için ölçülen frekanstan 50 Hz değerini çıkarmak frekanstaki salınım kiplerini vermeyecektir. Bu yüzden "wash-out" filtre gibi yüksek geçiren bir filtre sayesinde kararlı halin analiz edilen sinyalden atılması gerekir. Fakat "wash-out" filtre ile sadece frekanstaki DC bileşenin atılıyor olması geri kalan kiplerin bölgeler arası salınımlar mı yoksa bölgesel salınımlar mı olduğunu anlamamız için yeterli değildir.

Örneğin analiz edilecek sinyal 49.92 Hz etrafında salınan belli genliklerde 0.14 Hz, 0.8 Hz ve 1.5 Hz frekanslı bileşenlerinden oluşmuş olsun. Bu sinyal "wash-out" filtreye uygulandığında x-ekseni etrafında salınan 0.14 Hz, 0.8 Hz ve 1.5 Hz frekanslı salınımların bir bileşkesi elde edilecektir. Oysa bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistem sadece 0.1–0.2 Hz bandı içindeki salınımları algılamalıdır. Ancak "wash-out" filtre DC hariç tüm bileşenleri geçirmekte ve 0.1–0.2 Hz bandını diğer yüksek frekanslı bileşenlerden ayırtıramamaktadır. Bu yüzden PSS'lerde uygulanan yöntemin doğrudan bölgeler arası salınımların tanımlanması için kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

### 3.2. Bant Geçiren Filtre ile Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması

Bir diğer yöntem olarak 0.1–0.2 Hz arası sinyalleri geçiren bir bant geçiren filtre yapısı kullanılarak bölgeler arası salınımların diğer salınımlardan ayrıştırılıp ayrıştırılamayacağı konusunda çalışmalar yapılmıştır. Tasarımı yapılacak olan filtre 100 Hz'lik (10 ms'de bir frekans hesaplanması durumunda) örnekleme frekansıyla elde edilen şebeke frekansının sadece 0.1–0.2 Hz aralığındaki değişimini geçirecektir. Yapılan tasarımda elde edilen filtrenin genlik ve faz tepkisi Şekil 3.2.1'de verilmiştir.

Tasarlanan filtrenin genlik cevabı sadece bölgeler arası salınımlara ait kiplerin süzülmesini sağlayacak şekildedir. Fakat filtrenin ilgilenilen bant içerisinde faz tepkisi oldukça keskin bir şekilde değişmektedir. Salınım tanımlayıcı sistemin 0.1–0.2 Hz aralığındaki salınımları algılamak hem genliği ve hem de fazını doğru olarak tespit etmesi gereklidir. Şayet tasarlanan filtrenin faz tepkisi 0.1–0.2 Hz bandı içindeki tüm frekanslara karşı aynı veya benzer olsaydı, gerçek sinyal ile filtre çıkışında elde edilen sinyal arasındaki faz farkı kalibre edilebilirdi.



Şekil 3.2.1 0.1–0.2 Hz bandını geçiren filtreye ait genlik ve faz tepkisi

Ancak Şekil 3.2.1'de de görüldüğü üzere 0.1 Hz frekanslı bir sinyale 253° bir faz gecikmesi getirirken 0.2 Hz'lik bir sinyali 471° ileri almaktadır. Dolayısıyla 0.1 Hz'lik bir frekans bandı için 724°'lik bir faz farkı oluşturmakta ve böylece faz farkının kalibre edilmesini imkansız hale getirmektedir. Bu yüzden bu şekilde bant geçiren bir filtrenin de bölgeler arası salınımların algılanmasında kullanılamayacağına karar verilmiştir.

### **3.3. Dar Bantlı Bant Geçiren Filtre Bankalarıyla Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması Çalışması**

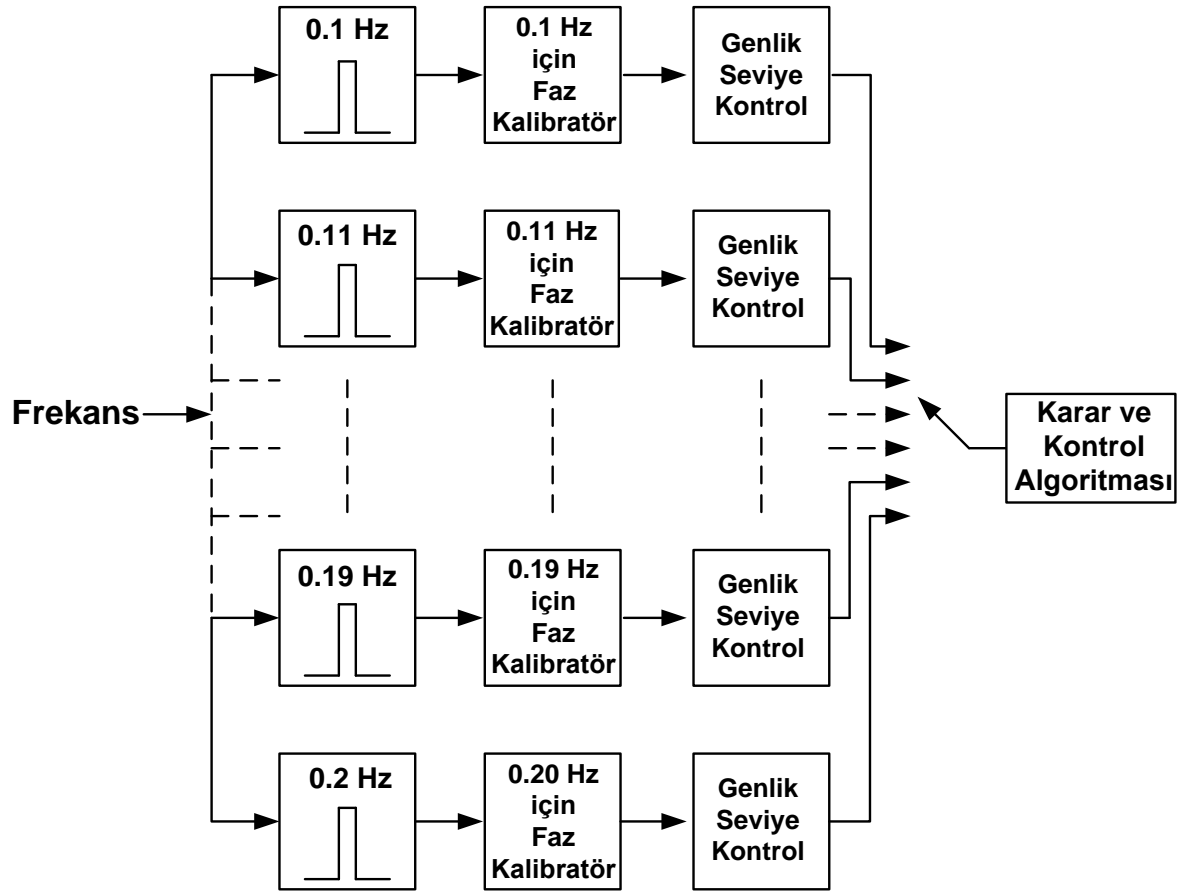
Bu yöntemde bant genişliği 0.01 Hz olan 11 adet filtre ile oluşturulacak paralel filtre bankası sayesinde salınımların algılanabilmesi amaçlanmıştır. Bu yapı ile ilk filtre 0.1 Hz'i, ikinci filtre 0.11 Hz'i ve benzer şekilde son filtre sadece 0.2 Hz'i geçirecektir. Tasarlanan paralel filtre bankasının blok şeması Şekil 3.3.1'de verilmiştir.

Bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistemin yapısında kullanılması planlanan 11 adet bant geçiren filtreden oluşan paralel filtre bankasının her bir elemanının geçirme bandı 0.01 Hz'dir. Yarım çevrimde bir ölçülen şebeke frekansı tüm filtrelere paralel bir şekilde uygulanmaktadır. Filtrelerin oldukça dar bantlı olması Bölüm 3.2'de anlatılan sorunu giderecek şekilde faz farkının kalibre edilmesine de imkân sağlayacaktır. Dar bantlı her bir filtreden geçen sinyaller filtrenin oluşturduğu faz farkının kalibre edilmesi için faz kalibratöründen geçirilmektedir. Faz hatası düzeltilen sinyaller genlik seviye kontrollünden geçirilir. Bu kontrol sayesinde salınımın olup olmadığı, varsa müdahale edilmesi gereken kadar büyük olup olmadığına karar verilmektedir. Şayet salınım genliği belirlenen eşik seviyesinin üzerinde ise genlik seviye kontrol bloğunun çıkışı aktif olmaktadır. Seçici bir algoritma, FACTS cihazların kontrolü için üretilecek sinyallerin hangi filtre çıkışına göre yapılacağına karar vermektedir. Örneğin şebeke frekansı 49.8 Hz üzerinde salınan 15 mHz genlikli 0.16 Hz'lik bir salınıma sahip olsun. Ölçülen frekans filtre bankasına uygulandığında yedinci filtre çıkışında 15 mHz genlikli bir sinyal elde edilecektir. Yedinci filtrenin giriş sinyaline uyguladığı faz farkı belli olduğu için filtre çıkışında bu hata kalibre edilerek genlik seviye kontrol bloğuna iletilecektir. Genlik eşik seviyesi 10 mHz olduğu düşünülürse bu durumda yedinci

filtre bloğuna ait genlik seviye kontrolünün çıkışı aktif olacak ve 0.16 Hz frekanslı değişimin fazına göre FACTS cihazlar için kontrol sinyalleri üretilecektir.

Kararlı durumda oldukça iyi çalışması beklenen bu yapı hızlı değişimler olduğunda salınımları algılayamamaktadır. Çünkü filtrenin anlık değişimlere verdiği tepki dakikaları bulmaktadır. Filtrenin oldukça dar bantlı olması filtre tepki süresinin kabul edilemez derecede uzamasına neden olmaktadır. Bu yüzden ilk bakışta oldukça faydalı olacağı düşünülen bu yapının salınımların algılanması için kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır.

Ön çalışmalardan sonuç alınamaması yüzünden literatürde sıklıkla karşılaşılan Spectrogram ve Hilbert-Huang yöntemlerini referans alarak bunları değiştirmek ve/veya bu yöntemlere eklemeler yapmak suretiyle özgün iki yeni yöntem geliştirilmiştir.

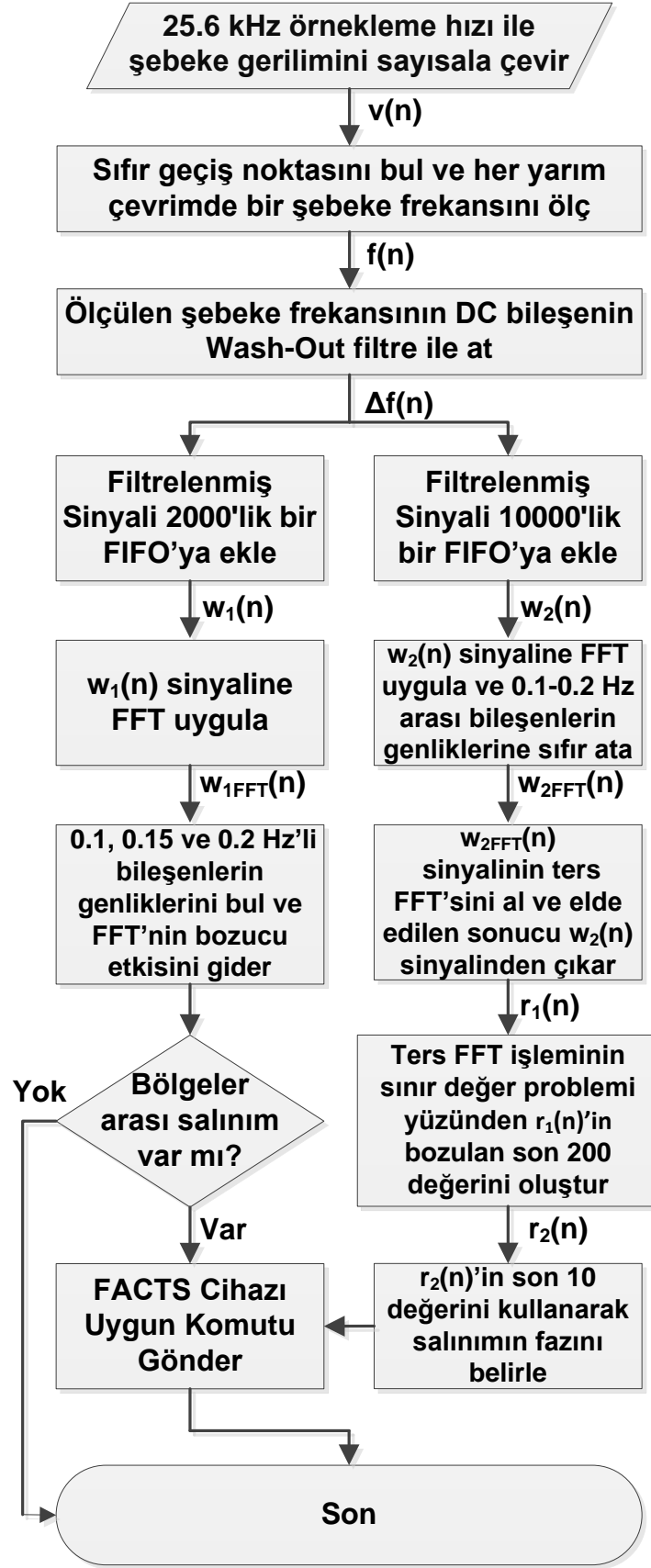


**Şekil 3.3.1** Bant geçiren 11 adet paralel filtre ile oluşturulan filtre bankası blok şeması

#### **4. ÖNERİLEN YÖNTEM-1: FFT TABANLI DEĞİŞTİRİLMİŞ KAYAN PENCERE ALGORİTMASI (FFT-BASED MODIFIED SLIDING WINDOW ALGORITHM, FBMSWA)**

FFT analiz, doğrusal sistemlerde durağan sinyallerin analizi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Fakat elektrik şebekesi yapısı gereği doğrusal olmayan bir sistemdir ve bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılacak sinyal de durağan değildir. Bu yüzden FFT işlemi yeterli uzunlukta kayan bir pencereye uygulanmaktadır. Böylece yeterli uzunluktaki pencere içindeki sinyallerin durağan olduğu varsayımı yapılmaktadır. FFT Tabanlı Değiştirilmiş Kayan Pencere Algoritması (FFT-Based Modified Sliding Window Algorithm, FBMSWA) yöntemi iki farklı uzunlukta kayan pencere üzerinde Fourier analiz temeline dayanmaktadır (Şekil 4.1). Böylece şebeke frekansının fazör-frekans gösterimi elde edilmiş olur. Bölgeler arası salınım kipleri ilgili bant içindeki FFT bileşenlerinin değerlendirilmesi sonucunda tespit edilir.

FFT, karakteristiği gereği kullanılan penceredeki sinyal bileşenlerinin genlikleri ile ilgili ortalama bir değer üretmektedir. Bununla birlikte yüksek çözünürlükte bileşen analizi yapabilmek için çok sayıda örneğe yani uzun bir pencereye ihtiyaç duymaktadır. Salınım tanımlayıcı sistem, değişken genlikli şebeke frekansı üzerinde, 0.1–0.2 Hz bandındaki sinyali gerçek zamanlı olarak algılamalı ve doğru anda tepki vermelidir. Eğer pencere boyu kısa olursa salınımlar hızlıca algılanabilecek ancak salınım fazının doğru şekilde tespit edilmemesi nedeniyle doğru anda tepki verilemeyecektir. Doğru anda tepki vermek için pencere boyutunu büyütmek gerekir ki, bu durumda salınımların algılanmasında gecikme yaşanacaktır. Bu nedenle iki farklı uzunlukta pencere üzerinden FFT analiz yapılmasına karar verilmiştir. Kısa uzunluktaki pencere üzerinden yapılan FFT analiz ile salınımın genliğinin hızlıca tespit edilmesi, uzun pencere üzerinden yapılacak FFT analiz ile salınımın fazının doğru şekilde bulunması hedeflenmiştir.

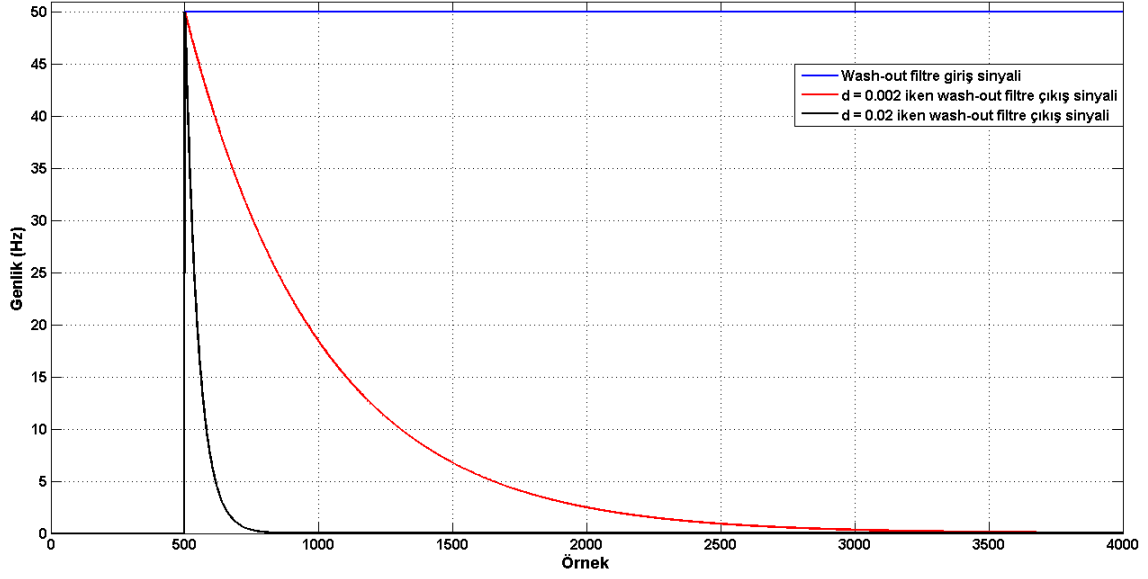


Şekil 4.1 FFT tabanlı değiştirilmiş kayan pencere algoritması akış şeması

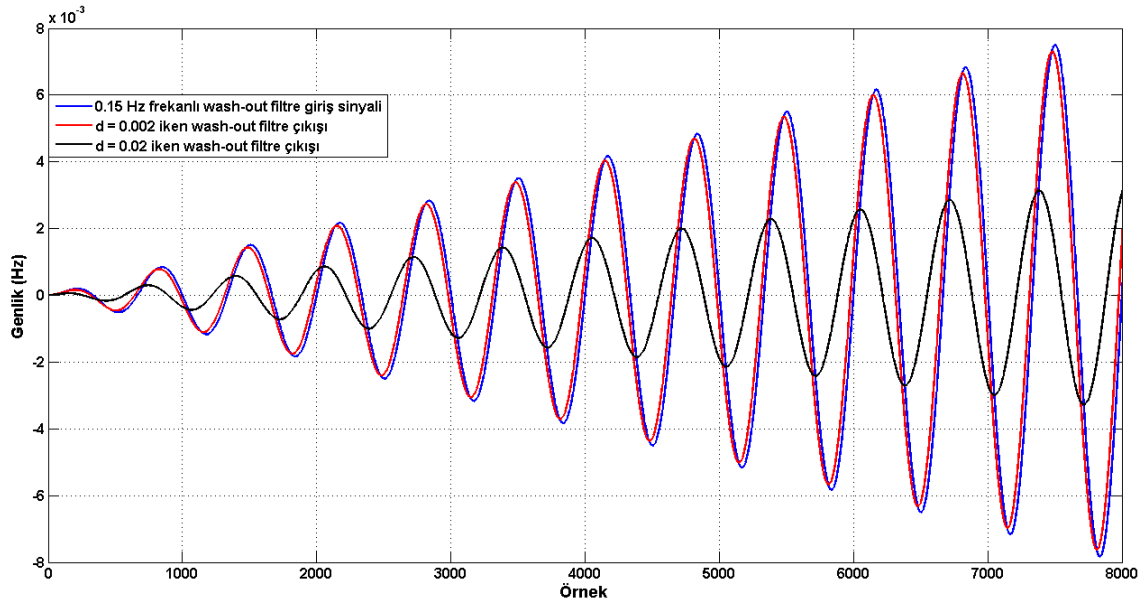
#### 4.1. Bölgeler Arası Salınımın Genliğinin Bulunması

Bölgeler arası salınımın algılanmasında kullanılan şebeke frekans sinyali yüksek genlikli DC bileşen (50 Hz temel frekans değişimi) üzerinde salınan göreceli olarak düşük genlikli salınım kiplerine sahiptir. Bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistem 0.1–0.2 Hz bandı içindeki frekans değişimlerini algılamaya çalışmalıdır. Bu düşük genlikli sinyaller DC'ye oldukça yakındır. Fourier analiz, yapısı gereği bir sinyali oluşturan bileşenleri keskin bir şekilde ayıramamaktadır. Sinyaldeki frekans bileşenleri yan bant olarak ifade edilen komşu frekans bileşenlerine etki etmektedir. Hesaplanan şebeke frekansı direk olarak Fourier analize tabi tutulursa genlikçe baskın olan DC bileşen (temel frekans 50 Hz) ilgilenilen banda ciddi şekilde etki edecek ve FFT analiz sonucunda doğru değerler elde edilemeyecektir. Bu yüzden Fourier analiz yapılmadan önce şebeke frekansının DC bileşenden mümkün olduğunca arındırılması gerekir. Bu amaçla Bölüm 3.1'de anlatılan “wash-out” filtre yapısı kullanılmıştır. “Wash-out” filtre temelde basit bir yüksek geçiren filtre olup giriş sinyalindeki kararlı hali atarak geçici durumların filtreden geçmesine izin verecektir. “Wash-out” filtreden geçirilen şebeke frekansı, Fourier analiz öncesi DC bileşenlerden büyük oranda arındırılır. Hatırlanacağı gibi “wash-out” filtrenin ayırık zaman gösterimindeki ‘d’ parametresi  $0 < d < 2$  aralığında seçilmektedir. ‘d’ parametresi büyüdükçe filtrenin düşük frekanslı değişimleri daha iyi ve daha hızlı bastırdığı bilinmektedir. Ancak ‘d’ parametresini büyütme ile ilgilenilen bant olan 0.1–0.2 Hz aralığındaki sinyallerinde zayıflatılması anlamına gelmektedir. Şekil 4.1.1’de iki farklı ‘d’ parametresi için “wash-out” filtrenin basamak sinyaline karşı tepkisi verilmiştir. ‘d’ parametresi ne kadar büyükse DC bileşeni o kadar iyi ve hızlı bastırmaktadır. Ancak Şekil 4.1.2’de gösterildiği gibi ‘d’ parametresi büyüdükçe ilgilenilen bant içindeki sinyalleri de bastırmaktadır. Bu çalışmada ‘d’ parametresi sentetik sinyaller ile yapılan testler sonucunda 0.002 olarak seçilmesine karar verilmiştir. 0.1–0.2 Hz bandı içinde “wash-out” filtrenin genlik zayıflatma oranı belli olduğu için bu oran FFT işlemi sonucunda elde edilen veriler üzerinden düzeltilecektir. ‘d’ parametresinin oldukça küçük seçilmesinden dolayı şebeke frekansı DC bileşenden tam olarak arındırılamaz.

DC bileşenlerinden büyük oranda arındırılmış şebeke frekansı kayan bir pencereye sokulur ve bu pencere içindeki sinyallerin durağan olduğu varsayımı ile



**Şekil 4.1.1** İki farklı d parametresi için "wash-out" filtrenin basamak sinyaline karşı tepkisi



**Şekil 4.1.2** İki farklı d parametresi için "wash-out" filtrenin 0.15 Hz'lik sinyale karşı tepkisi

Fourier analiz yapılarak sinyalin fazör-frekans dağılımı elde edilir. Kayan pencerenin boyutu örnekleme frekansı ile doğru orantılıdır. Yarım çevrimde bir yani 10 ms de bir frekans hesabı yapıldığı için 1000'lik bir pencere üzerinden FFT analiz yapılırsa 0 Hz (temel bileşen 50 Hz), 0.1 Hz, 0.2 Hz, 0.3 Hz, 0.4 Hz şeklinde 0.1 Hz'lik hassasiyetle şebeke frekansı bileşenleri elde edilir. 1000'lik bir pencere üzerinde yapılan FFT analiz sonunda elde edilen ilk değer DC'ye ait ve bir sonraki



değer ise 0.1 Hz'lik frekanslı bileşene aittir. 'd' parametresinin küçük seçilmesi nedeniyle "wash-out" filtre çıkışında elde edilen sinyalde DC ve DC'ye çok yakın bileşenler tam olarak yok edilemediği için, bu bileşenler FFT işlemi sonucunda 0.1 Hz frekanslı bileşene etki edecektir. Bu sorunu çözmek için 2000'lik bir pencere kullanılması uygun görülmüştür. Bu sayede FFT analiz sonucunda 0.05 Hz'lik (elde edilen bileşenler 0 Hz, 0.05 Hz, 0.1 Hz, 0.15 Hz, 0.2 Hz, 0.25 Hz, vb.) bir çözünürlük sağlanmış olacaktır. Böylece DC ve DC'ye çok yakın frekans bileşenleri en çok 0.05 Hz frekanslı bileşene etki edecektir. Dolayısıyla ilgilenilen bant içerisindeki sinyallerde oluşacak bozucu etki 1000'lik pencere kullanılması durumuna göre daha az olacaktır. 2000'den büyük pencere kullanılması durumunda bu etki daha da azalacak ancak sistem tepki süresi uzayacaktır.

2000'lik pencere üzerinde FFT analiz sonucunda elde edilen bileşenlerden ilgilenilen bant içinde kalan 0.1 Hz, 0.15 Hz, 0.2 Hz frekanslı bileşenlerin genlikleri göz önüne alınarak bölgeler arası salınımın olup olmadığı karar verilmelidir. Ancak bölgeler arası salınımın frekansının 0.13 Hz olduğu düşünülürse FFT analiz sonucunda 0.13 Hz'e karşılık gelen bir bileşen elde edilememektedir. Gerçekte 0.13 Hz'lik bir salınım olması durumunda bu salınımın ait bileşen FFT analiz sonucunda 0.13 Hz en yakın bileşenler üzerine dağılacaktır. Yani 0.13 Hz'lik salınımın ait sinyalde sanki 0.1 Hz ve 0.15 Hz frekanslarında bileşenler varmış gibi algılanmasına neden olacaktır. Bu yüzden deneysel yolla elde edilen bir yöntemle göre FFT analiz sonucunda elde edilen 0.1 Hz, 0.15 Hz ve 0.2 Hz frekanslı bileşenlerin genlikleri kullanılarak salınım olup olmadığı, varsa salınımın genliğinin kritik eşik seviyesini geçip geçmediğine karar verilmektedir. Eğer kritik eşik seviyesi geçilmişse FACTS cihazlarına bölgeler arası salınım fazına uygun şekilde komutlar gönderilmelidir.

#### **4.2. Bölgeler Arası Salınımın Fazının Bulunması**

Bölgeler arası salınımın fazının doğru bir şekilde tespit edilmesi FACTS cihazların kontrolü için çok önemlidir. Bu amaçla 0.1–0.2 Hz bandı dışındaki sinyaller FFT tabanlı, zamanda faz farkı oluşturmayacak bir filtre kullanılarak analiz edilen sinyalden arındırılmakta ve geriye kalan sinyal üzerinden salınımın fazı tespit edilmektedir. Ancak fazın hassas bir şekilde bulunabilmesi için sinyalin çok iyi

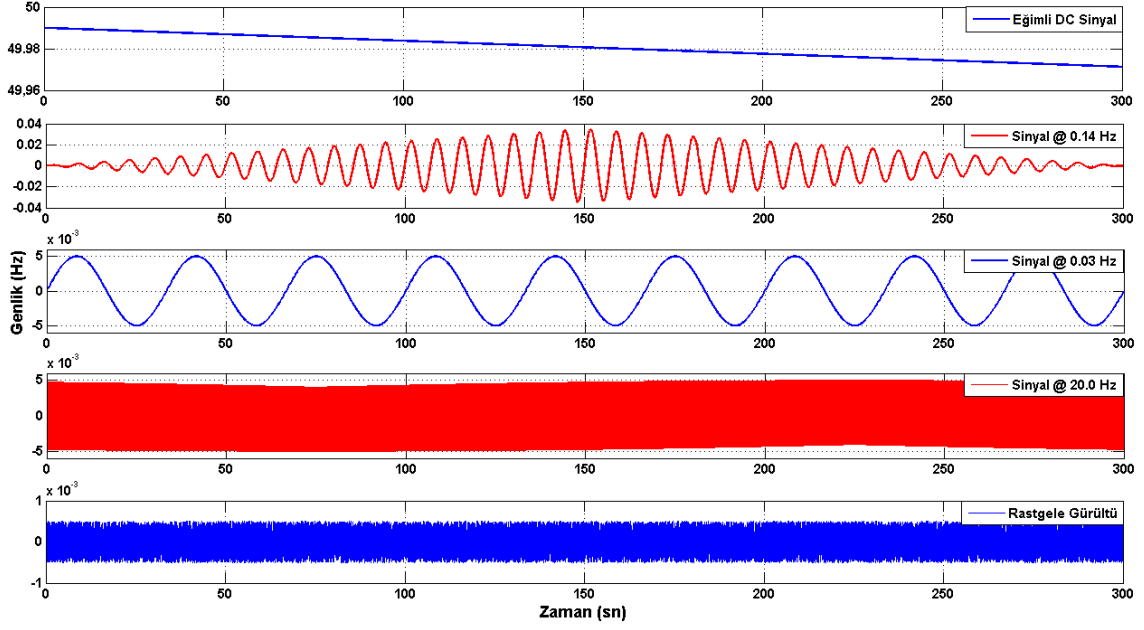
filtrelenmesi gerekir. Salınımın genliğinin tespiti için kullanılan 2000'lik pencere bu iş için yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden daha iyi bir filtreleme yapabilmek için 10000'lik ikinci bir pencere kullanılmıştır. Böylece FFT analiz sonucunda 0.01 Hz'lik bir frekans hassasiyeti sağlanmış olur. Eğer faz bulmak için de 2000'lik bir pencere kullanılsaydı bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistemin faz tespiti için tasarım ölçütü olan en fazla  $\pm 30^\circ$ 'lik hata oranı yakalanamazdı. Çünkü 2000'lik pencere sonucunda 0.1 Hz, 0.15 Hz ve 0.2 Hz frekanslı bileşenler elde edilmektedir. Oysa gerçekte 0.13 Hz frekanslı bir salınım oluşsa bu sinyal FFT analiz sonucunda elde edilemediği için bölgeler arası salınımın fazı tespit edilirken ya 0.1 Hz'lik sinyal ya da 0.15 Hz'lik sinyal referans alınacaktı. Bu durumda elde edilecek faz ile gerçekte olan bölgeler arası salınımın fazı arasında  $\pm 45^\circ$ 'den fazla faz farkı oluşacaktı. Dolayısıyla FFT analiz sonucunda frekans çözünürlüğünü artırmak için 10000'lik bir pencere kullanılması uygun bulunmuştur. Bu sayede 0.1–0.2 Hz bandı içinde FFT analiz sonucunda 11 bileşen elde edilir. Bu çözüm de aslında ideal bir çözüm değildir. Çünkü gerçekte 0.135 Hz'de bir salınım olması durumunda FFT analiz sonucunda bu salınıma karşı gelecek bir bileşen elde edilemeyecektir. Ya 0.13 Hz ya da 0.14 Hz'lik bileşenler salınımın fazının tespitinde etken olacaktır. Ancak bu durumda elde edilen faz hata miktarı  $\pm 15^\circ$ 'den daha küçük olacaktır. Bu sonuç tasarım ölçütü göz önüne alındığında kabul edilebilirdir.

10000'lik pencere ile hesaplanan FFT işlemi sonunda elde edilen genlik katsayılarından 0.1–0.2 Hz bandı içindeki 11 bileşene ait katsayılar sıfır olarak alınır ve geri kalan katsayılar kullanarak ters FFT işlemi uygulanır. Böylece 0.1–0.2 Hz bandı içindeki sinyallerden arındırılmış sinyal zaman tanım bölgesine geri döndürülür. Analiz edilen sinyal ile ters FFT sonucunda elde edilen sinyal birbirinden çıkarılarak 0.1–0.2 Hz bandı içindeki sinyallerin kalması sağlanır. Tüm bu işlemler ile faz yine de tam olarak doğru bir şekilde tespit edilememektedir. Çünkü ters FFT işleminde sınır değer (boundary) problemi bulunmaktadır. Ters FFT yöntemi 10000'lik pencerenin yaklaşık ilk 200 ve son 200 değeri için doğru sonuçlar üretememektedir. Oysa FACTS cihazlarının kontrolü için pencerenin son 10 elemanı üzerinden işlem yapılması gereklidir. FFT işleminde yaşanan sınır değer problemi fazın doğru şekilde tespit edilmesini engellemektedir. Bu sorun da salınım sinyalinin periyodik olduğunun kabulü ile aşılabılır. 10000'lik pencere içinde

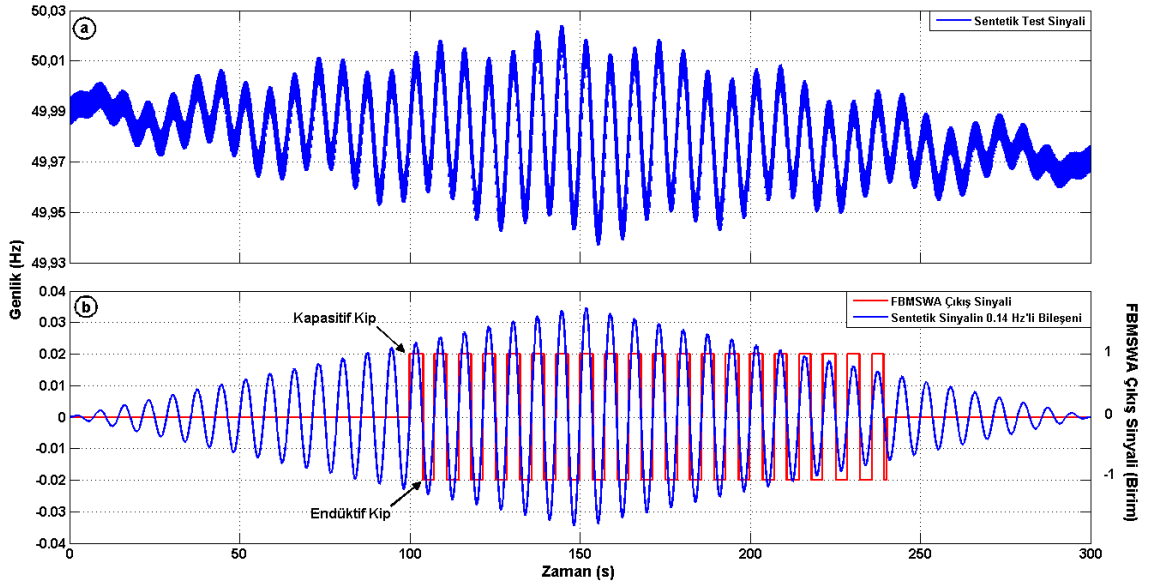
doğru olarak hesaplanabilen son sıfır geçiş noktasından geriye doğru gidilerek duruma göre iki ya da dört adet sıfır geçiş noktası bulunur ve bu bölge doğru bir Şekilde bulunan son sıfır geçiş noktasından sonra sinyale eklenir. Bu sayede pencerenin son 10 elemanına bakılarak salınımın fazı tespit edilmektedir. Şayet salınımın fazı sinyalin pozitif çevrimine karşılık geliyorsa, FACTS cihazın kapasitif kipte çalışması için gerekli komut gönderilir. Tam tersi durumda, yani salınımın fazı sinyalin negatif çevrimine karşılık geliyorsa, FACTS cihaza endüktif kipte çalışması gerektiği bildirilerek salınımlar snmlendirilmeye çalışılmaktadır.

### **4.3. Sentetik Sinyal ile Test**

Geliştirilen yöntemi test etmek için sentetik sinyaller kullanılmıştır. Şebeke frekansı 50 Hz etrafında salınan bir yapıya sahip olduğundan pozitif değerli bir eğim sinyali (ramp signal) zerine değişik frekanslarda ve genliklerde sinyaller eklenmiştir. FBMSWA, sentetik sinyalde bölgeler arası salınım olarak algılanabilecek bir frekans bileşeninin olup olmadığına, var ise bu bileşenin genliğinin belirlenen eşik seviyelerini aşıp aşmadığına ve salınım fazına karar vermelidir. Eğer sentetik sinyal içinde 0.1–0.2 Hz frekans bandı içinde bir sinyal var ise bu sinyalin genliğinin 20 mHz'den büyük olup olmadığına bakmalıdır. Eğer 20 mHz'den büyük genlikli bir bileşen var ise salınım algılayıcı sistem FACTS cihaza salınımın fazına uygun bir komut göndermelidir. Salınım başladıktan sonra eğer ilgili bileşenin genliği 12 mHz'in altına düşerse salınım algılayıcı sistem FACTS cihaza komut göndermeyi bırakmalıdır. Bu yüzden sentetik sinyal içinde genliği zamanla önce artan ve sonrada azalan 0.14 Hz frekanslı bir bileşen bulunmaktadır. FBMSWA, sentetik sinyali analiz etmeli ve 0.14 Hz'li frekans bileşenin genliğini 20 mHz'e ulaştığı yerde tepki vermeye başlamalı ve genliğin 12 mHz altına indiği yerde tepki vermeyi bırakmalıdır. Şekil 4.3.1'de sentetik sinyali oluşturan frekans bileşenleri ve Şekil 4.3.2'de sentetik sinyal ve FBMSWA'nın tepkisi 0.14 Hz frekanslı bileşen ile birlikte verilmiştir. Şekil 4.3.2'ye bakıldığında sentetik sinyal içindeki 0.14 Hz frekanslı bileşenin genliği 20 mHz'i geçtiğinde algoritma salınım fazı pozitif ise "1" negatif ise "-1" retmektedir. Salınımın genliği eşik seviyeleri dışında ise "0" retmektedir. "1" değeri FACTS cihazına salınım başladığını ve kapasitif kipte çalışması gerektiğini "-1" değeri ise yine salınım olduğunu ancak endüktif kipte çalışması gerektiğini ifade etmektedir. "0" değeri ise salınım olmadığını ve FACTS



**Şekil 4.3.1** Sentetik test sinyalini oluşturan bileşenler

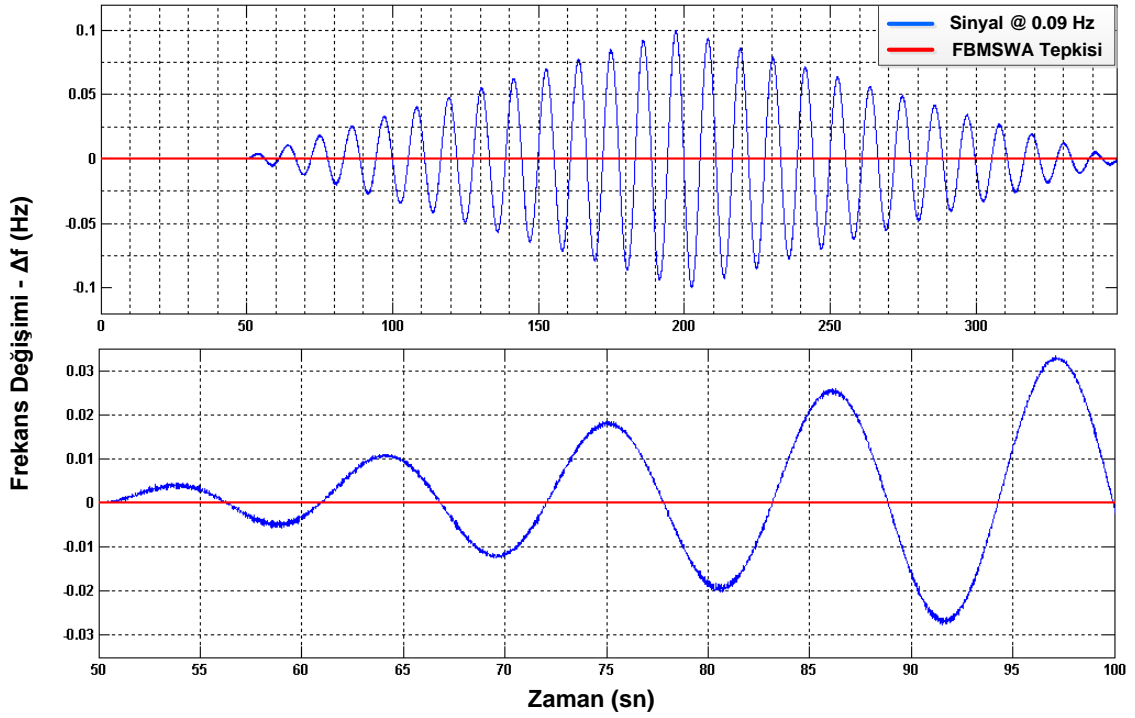


**Şekil 4.3.2** (a) Sentetik test sinyali (b) Sentetik sinyalin 0.14 Hz frekanslı bileşeni ve FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi

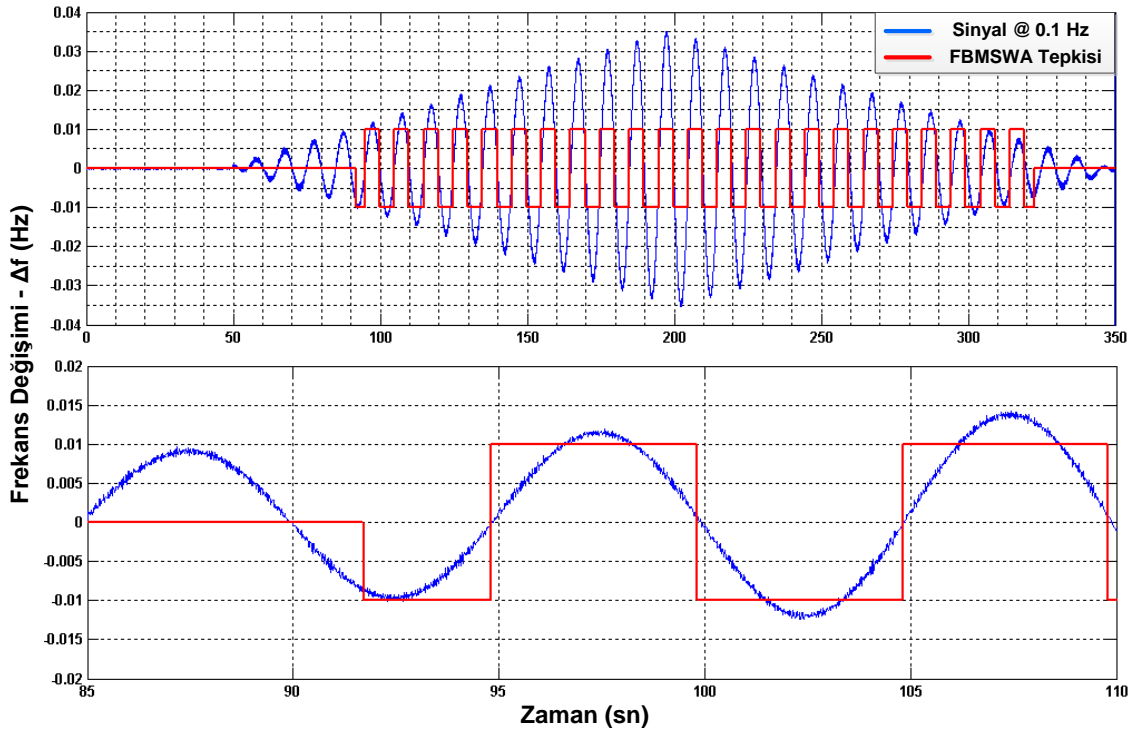
cihazın normal çalışma kipine geri dönmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Bölgeler arası salınım tanımlayıcı sistem tasarım ölçütleri göz önüne alındığında geliştirilen algoritmanın farklı frekanslı salınım kipleri için de salınıma ait faz bilgisini tasarım ölçütlerinde belirtilen limitler dahilinde tespit etmelidir. Farklı frekanslı sinyaller içinde fazın doğru şekilde tespit edilip edilemediğini görmek için

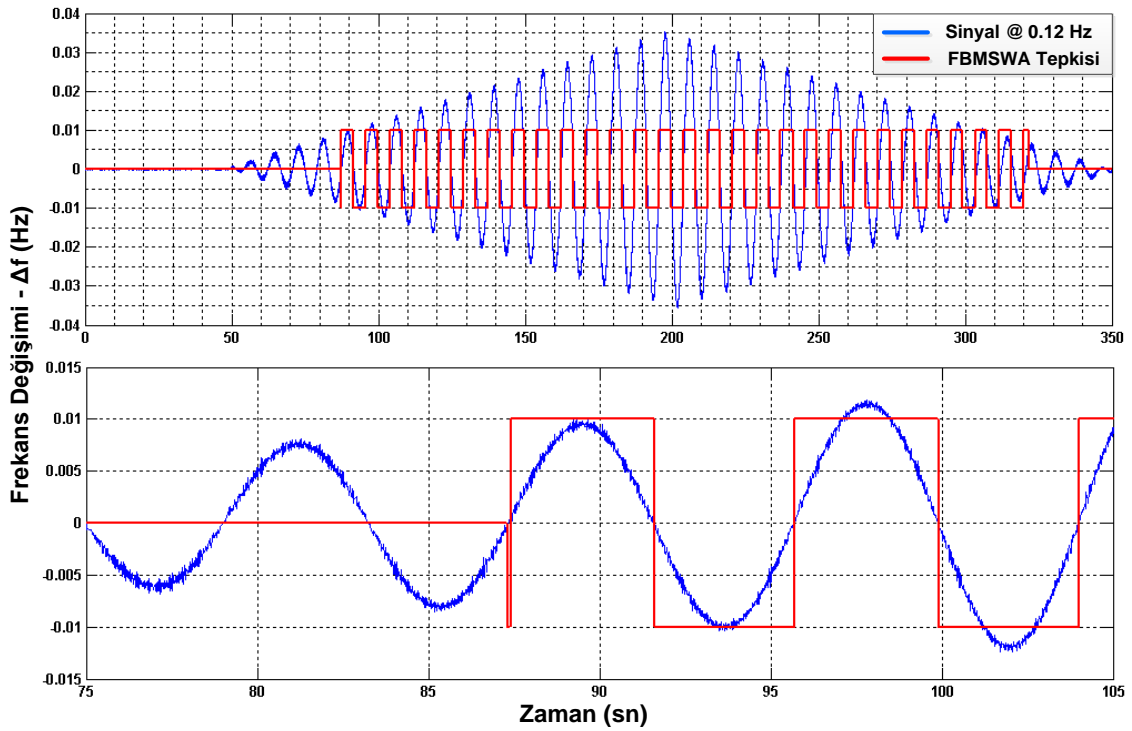
FBMSWA birçok sinyal ile teste tabi tutulmuştur. Bu sinyaller oluşturulurken tasarım ölçütleri göz önüne alınmıştır. Örneğin salınım algılayıcı sistem 0.1–0.2 Hz bandı içindeki salınımları algılamak için 0.075 Hz'den küçük ve 0.25 Hz'den büyük, genliği 100 mHz olan frekans salınımları için tepki vermemelidir. Bu ölçütlerin tamamı gözetilerek hazırlanan sentetik test sinyalleri ve bu sinyallere karşı FBMSWA tepkisi Şekil 4.3.3'ten başlayarak Şekil 4.3.10'a kadar verilmiştir. Birçok frekans için oluşturulan sentetik test sinyallerinin oluşturulma mantığı Şekil 4.3.1'de gösterildiği gibidir. Sadece bölgeler arası salınım kipine ait sinyal değiştirilmektedir. Salınım tanımlama genlik eşik seviyesi 10 mHz olarak belirlenmiştir. Salınım başladıktan sonra salınımın genliği 7 mHz'in altına düşene kadar salınım tanımlama sistemi FACTS cihazlara komut göndermeye devam edecek şekilde ayarlanmıştır.



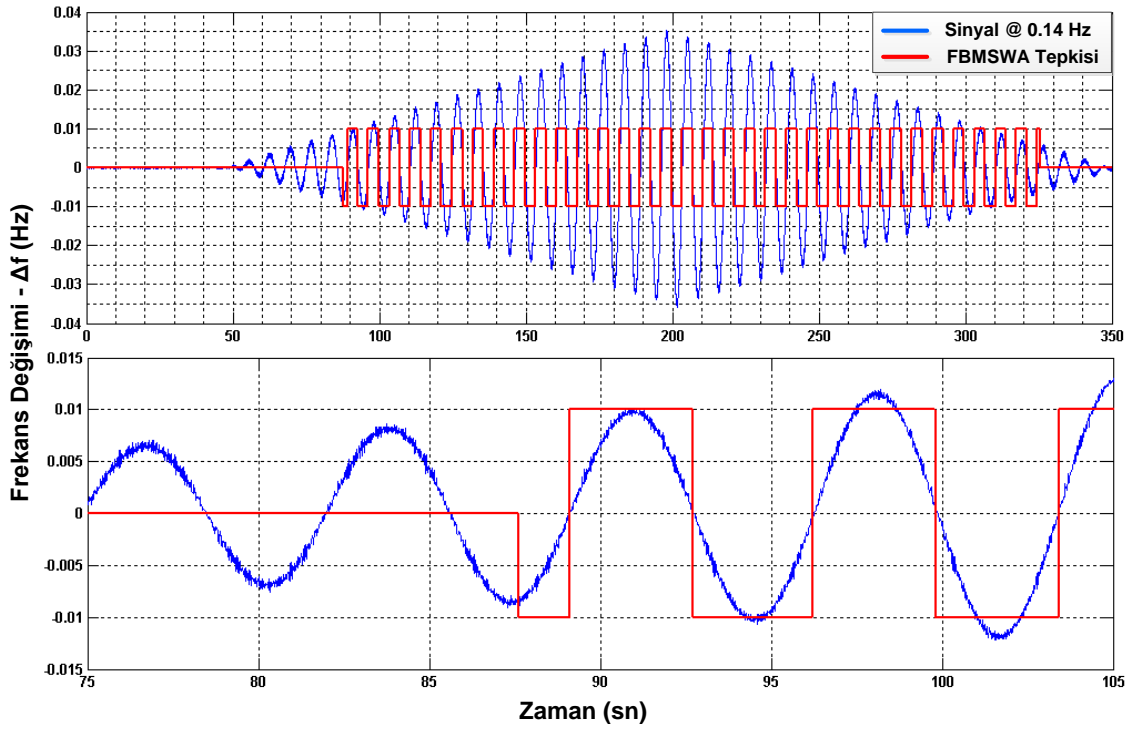
**Şekil 4.3.3** 0.09 Hz frekanslı ve en büyük genliği 100 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi



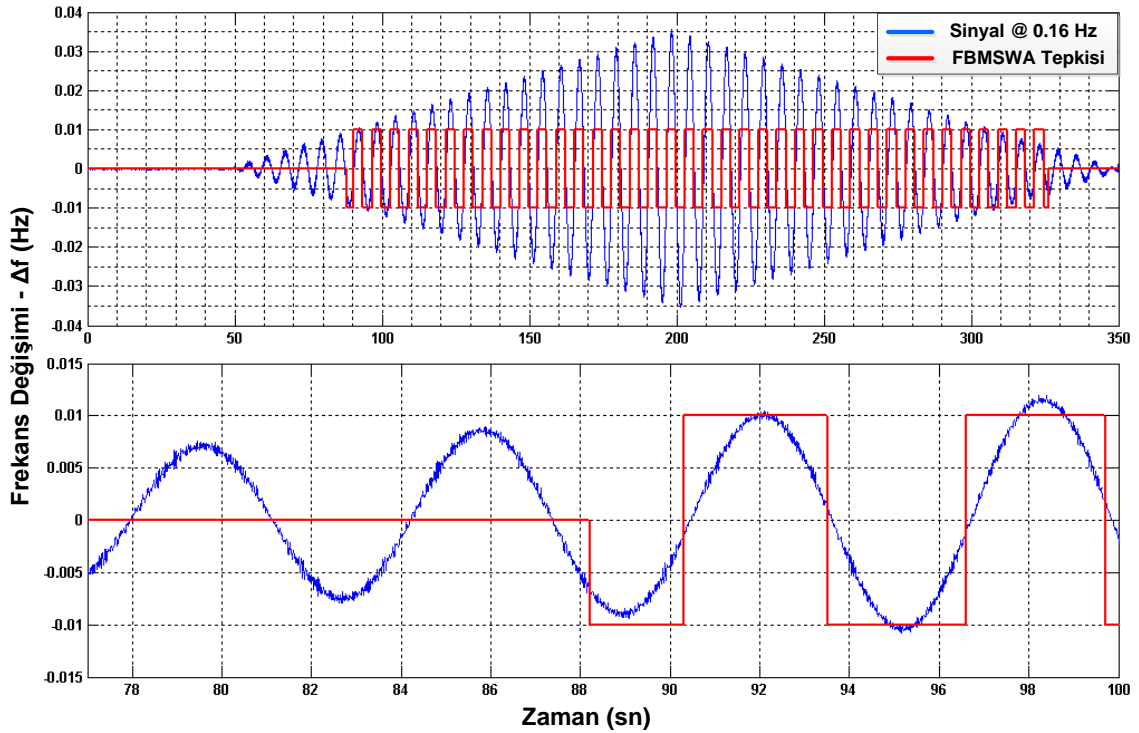
**Şekil 4.3.4** 0.1 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi



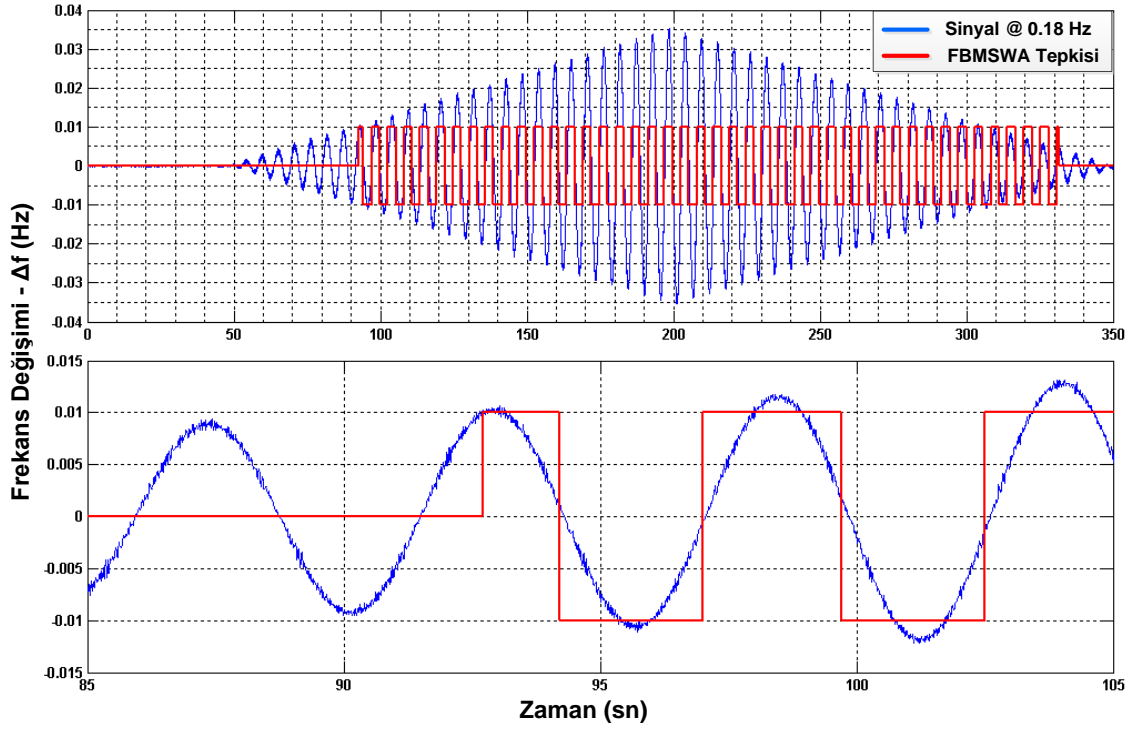
**Şekil 4.3.5** 0.12 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi



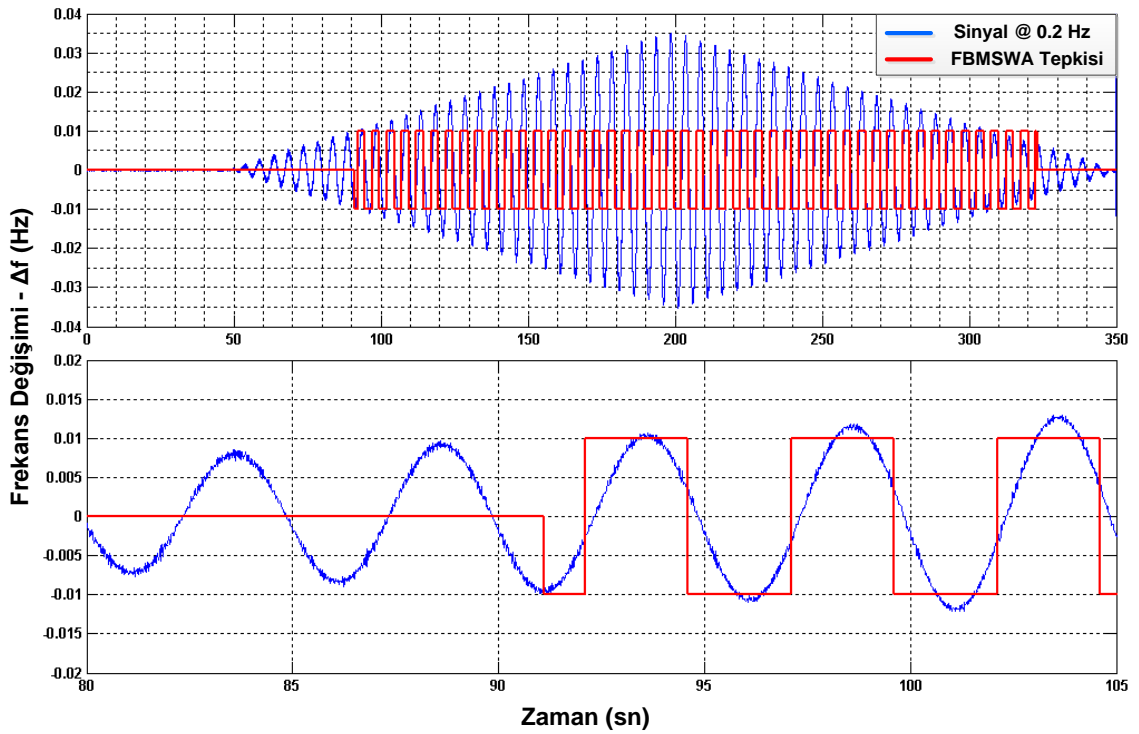
**Şekil 4.3.6** 0.14 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi



**Şekil 4.3.7** 0.16 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi

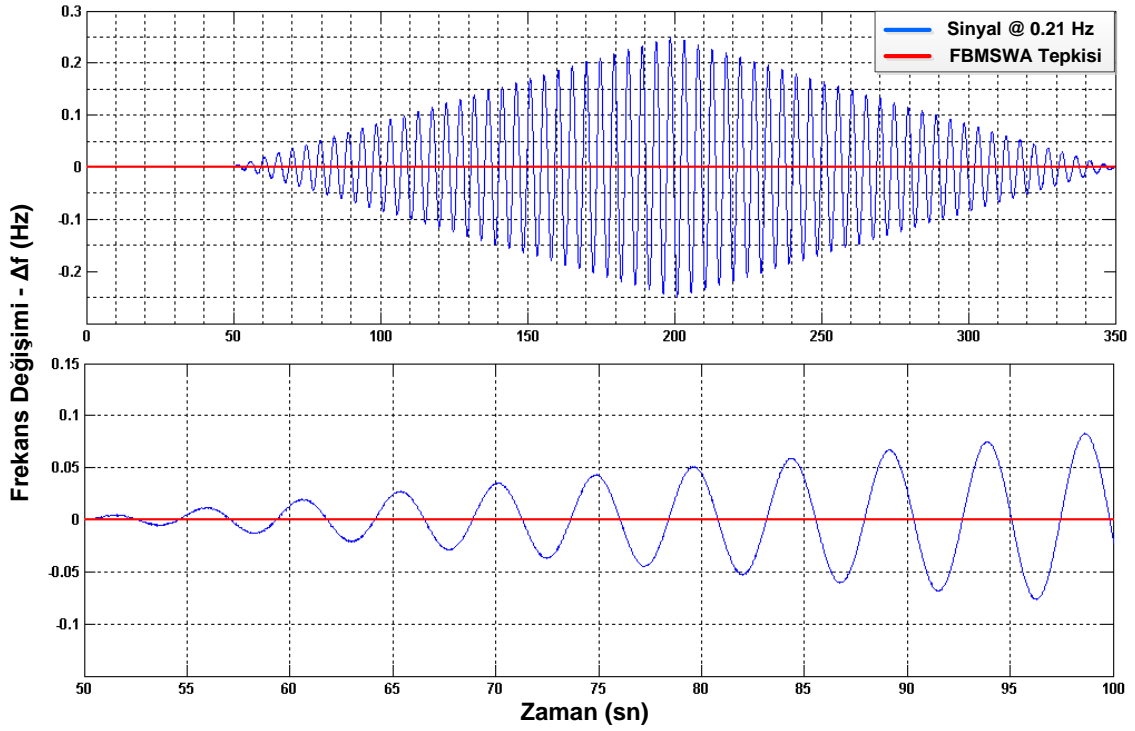


**Şekil 4.3.8** 0.18 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi



**Şekil 4.3.9** 0.2 Hz frekanslı ve en büyük genliği 35 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi





**Şekil 4.3.10** 0.21 Hz frekanslı ve en büyük genliği 250 mHz olan sentetik test sinyali ve FBMSWA'nın bu sinyale tepkisi

Çizelge 4.3.1'de özetlenen sonuçlara göre FBMSWA'nın sentetik sinyaller ile yapılan testlerde 0.1–0.2 Hz bandı dışında tepki vermediği ve ilgilenilen bant içerisinde salınımların fazını izin verilen hata oranı içinde tespit ettiği görülmüştür.

**Çizelge 4.3.1** FBMSWA'nın değişik frekanslı sinyaller ile yapılan test sonuçları

Sentetik sinyal frekansı (Hz)	En büyük genlik değeri (mHz)	Bölgeler arası salınım algılandı mı?	Pozitif çevrim için faz hatası (°)	Negatif çevrim için faz hatası (°)
0.09	100	Hayır	-	-
0.1	35	Evet	1.08	2.88
0.12	35	Evet	0.43	0.43
0.14	35	Evet	1.51	0.30
0.16	35	Evet	5.76	10.94
0.18	35	Evet	3.24	8.43
0.2	35	Evet	14.4	14.4
0.21	250	Hayır	-	-

#### 4.4. Saha Testleri

Sentetik sinyal ile yapılan testlerde FBMSWA'nın başarılı sonuçlar verdiği görüldükten sonra [49]'da anlatılan donanım üzerinde bazı değişiklikler yapılarak Bölgeler Arası Salınım Tanımlayıcı Sistem (BASTS) hem algoritma, hem yazılım hem de donanım olarak gerçekleştirilmiştir. BASTS ilk olarak T-STATCOM sistemine entegre edilerek sentetik sinyaller ile testler yapılmıştır. Bu testlerde hedeflenen şey BASTS'a gelen sinyallere göre T-STATCOM'un bağlı bulunduğu barada meydana getireceği gerilim modülasyonunun tespit edilmesidir. T-STATCOM bölgeler arası salınım bastırma kipinde iken kapasitif reaktif güç ürettiğinde bağlı bulunduğu baradaki gerilimi artıracaktır. Endüktif reaktif güç tüketirken ise baradaki gerilimi düşürecektir. Dolayısıyla bölgeler arası salınımın fazına göre gerilim artıp azalacaktır. Yükün sabit olduğu kabul edilirse aktif güç gerilim karesi ile doğru orantılıdır ve gerilimde meydana gelecek modülasyon ile aktif güç de doğru orantılı şekilde değişecektir/modüle edilecektir.

Şekil 4.4.1'de görülen cihazlardan altta bulunan cihaz BASTS'dir. Bu sistem şebeke frekansını örnekleyerek bölgeler arası salınımın olup olmadığını FBMSWA ile tanımlamaya çalışmaktadır. Şayet bölgeler arası salınım var ise T-STATCOM'a kontrol sinyalleri gönderilecektir. Aynı şekilde üstte bulunan cihaz ise Ankara Sincan TM Bank-B barasındaki elektriksel büyüklüklerin hassas bir şekilde ölçülmesinde kullanılan olan Güç Kalitesi Çözümleyicisidir (GKÇ).

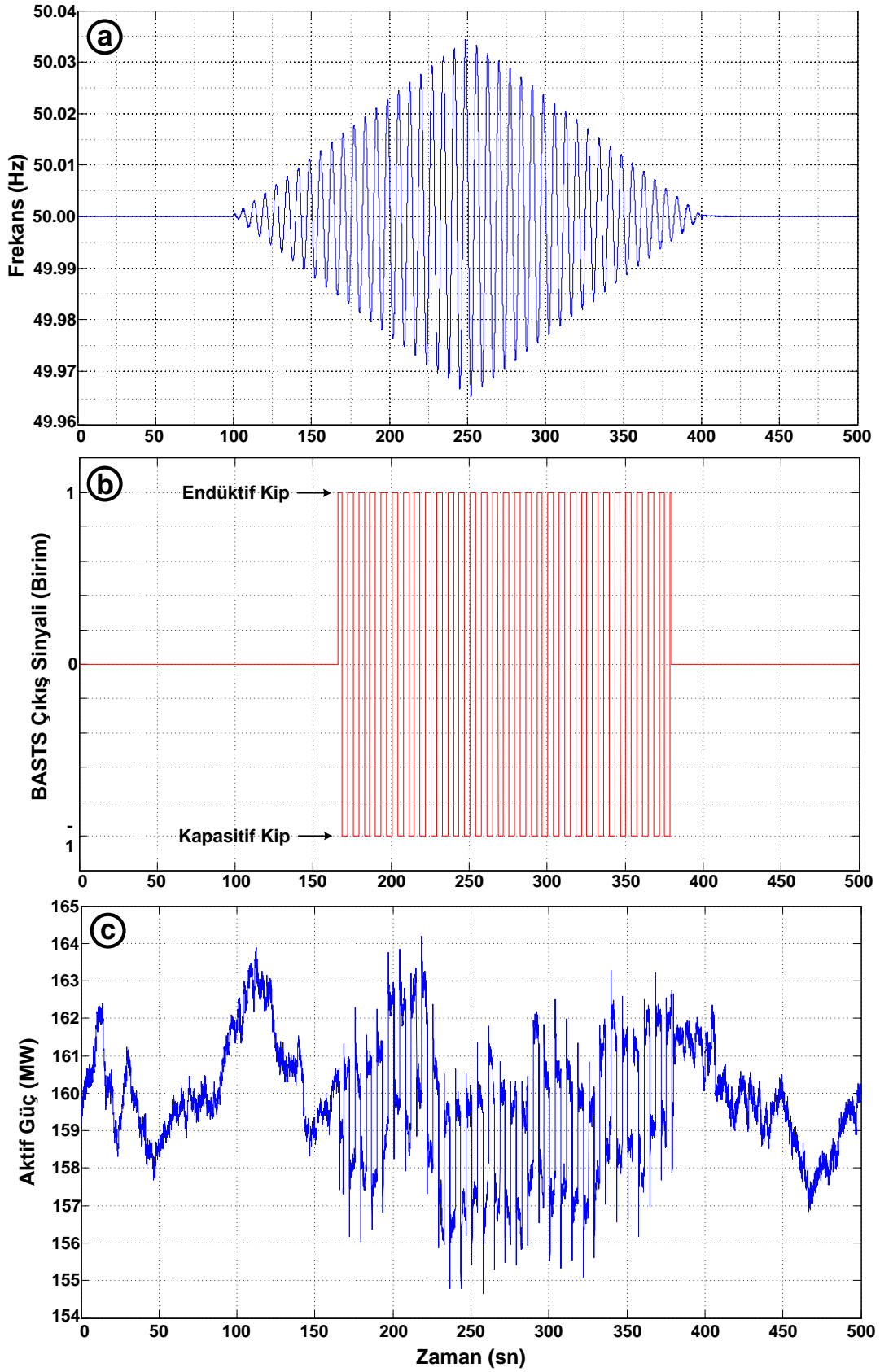


Şekil 4.4.1 BASTS ve GKÇ

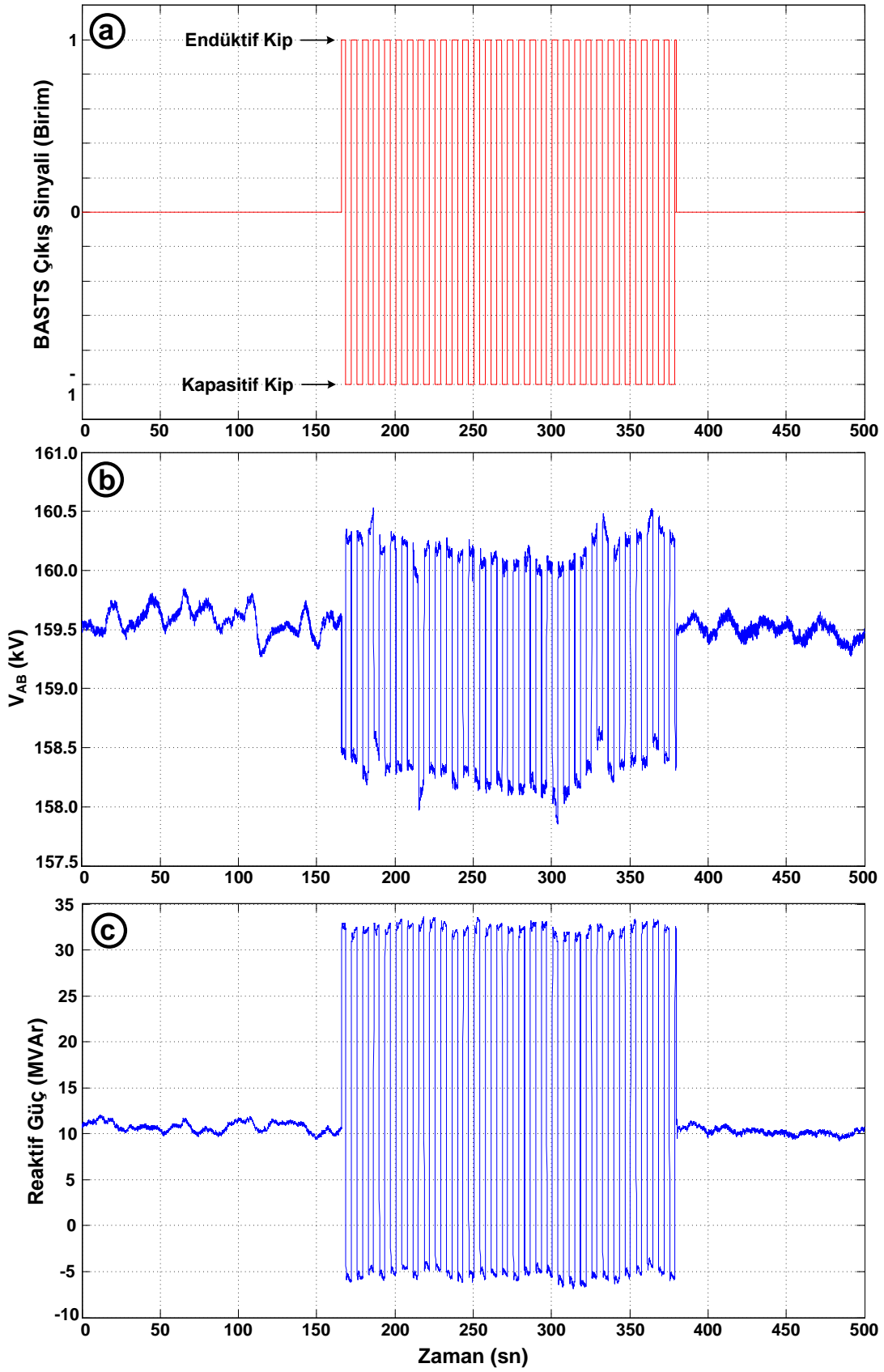
Saha testleri Ankara Sincan TM Bank-B barası üzerinde yapılmıştır. BASTS üzerinde içinde 0.14 Hz frekanslı bileşen bulunduran sentetik test sinyali FBMSWA'ye uygulanmış ve FBMSWA'nın ürettiği kontrol sinyalleri BASTS'ın sayısal çıkışlarıyla T-STATCOM'a fiziksel olarak iletilmiştir. T-STATCOM'un kontrol algoritması BASTS'tan gelen sinyallere göre endüktif kipte 47.5 MVar güç tüketecek ve kapasitif kipte 25 MVar güç üretecek şekilde programlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4.2, Şekil 4.4.3 ve Şekil 4.4.4'te gösterilmiştir. Bu şekillerde verilen grafiklerin daha iyi incelenebilmesi için yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.4.5, Şekil 4.4.6 ve Şekil 4.4.7'de verilmiştir. Verilen şekillerden de görülebileceği üzere T-STATCOM çıkış gücünü 47.5 MVar ile -25 MVar arasında değiştirmekte, buna karşılık 154 kV baradaki gerilim 158.3 kV ile 160.3 kV arasında değişmektedir. Gerilimin bu değişimine karşın barada ortalama 158 MW çekilirken aktif güç 156 MW ile 160 MW arasında değişmektedir.

Özetle, T-STATCOM 72.5 MVar'lık bir reaktif güç değişimine sebep olduğunda faz-faz gerilimi yaklaşık 2 kV değiştirebilmektedir. Bu değer T-STATCOM'un bağlı bulunduğu baranın elektriksel özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Eğer Bank-B barası daha zayıf bir bara olsaydı gerilim çok daha fazla değişirdi. Gerilimin 2 kV'luk değişimi, bara 158 MW ile yüklüken 4 MW'lık aktif güç değişimine karşılık düşmektedir. Yapılan bu testler T-STATCOM'un bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesinde aktif olarak kullanılabileceğini göstermiştir. İlerleyen zamanlarda gerekli olması durumunda T-STATCOM 47.5 MVar ile -47.5 MVar arasında bir değişime sebebiyet verecek şekilde yeniden programlanarak gerilimin daha fazla değiştirilebileceği ve dolayısıyla aktif güç değişiminin 1–1.5 MW daha artırılabilmesi de göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle T-STATCOM ve BASTS'ın birlikte çalışarak Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlanması sonucunda oluşması muhtemel bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

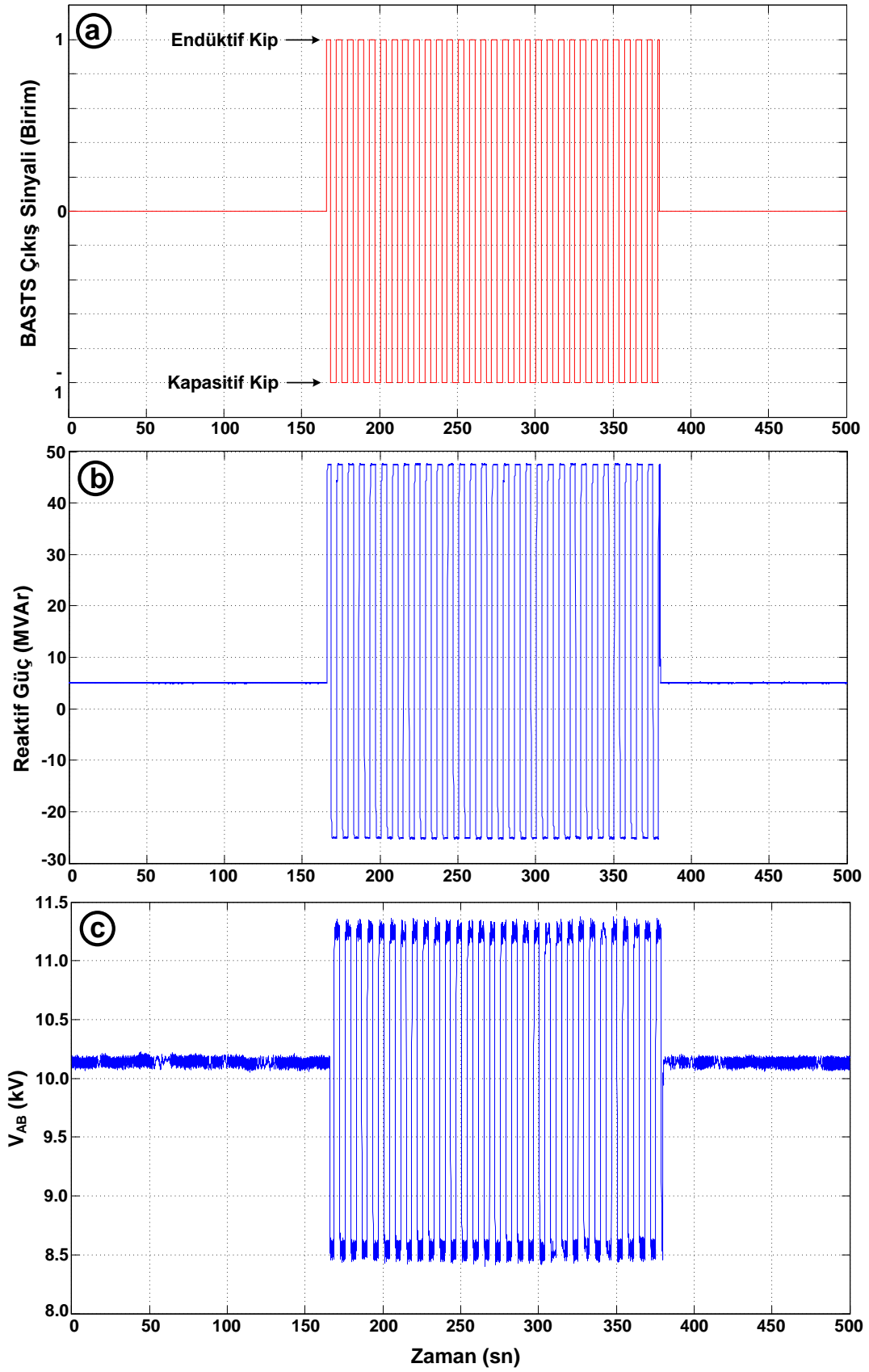
T-STATCOM'a uygulanan BASTS daha sonra coğrafi olarak farklı bölgelerde bulunan dört farklı SVC sistemine de uygulanmıştır. Burada yapılan çalışmalarda SVC'lerin yaklaşık 5 MW'lık bir aktif güç değişimine sebep olduğu görülmüştür. Dolayısıyla salınımların sönümlendirilmesi için yeterli etki oluşturulmuştur.



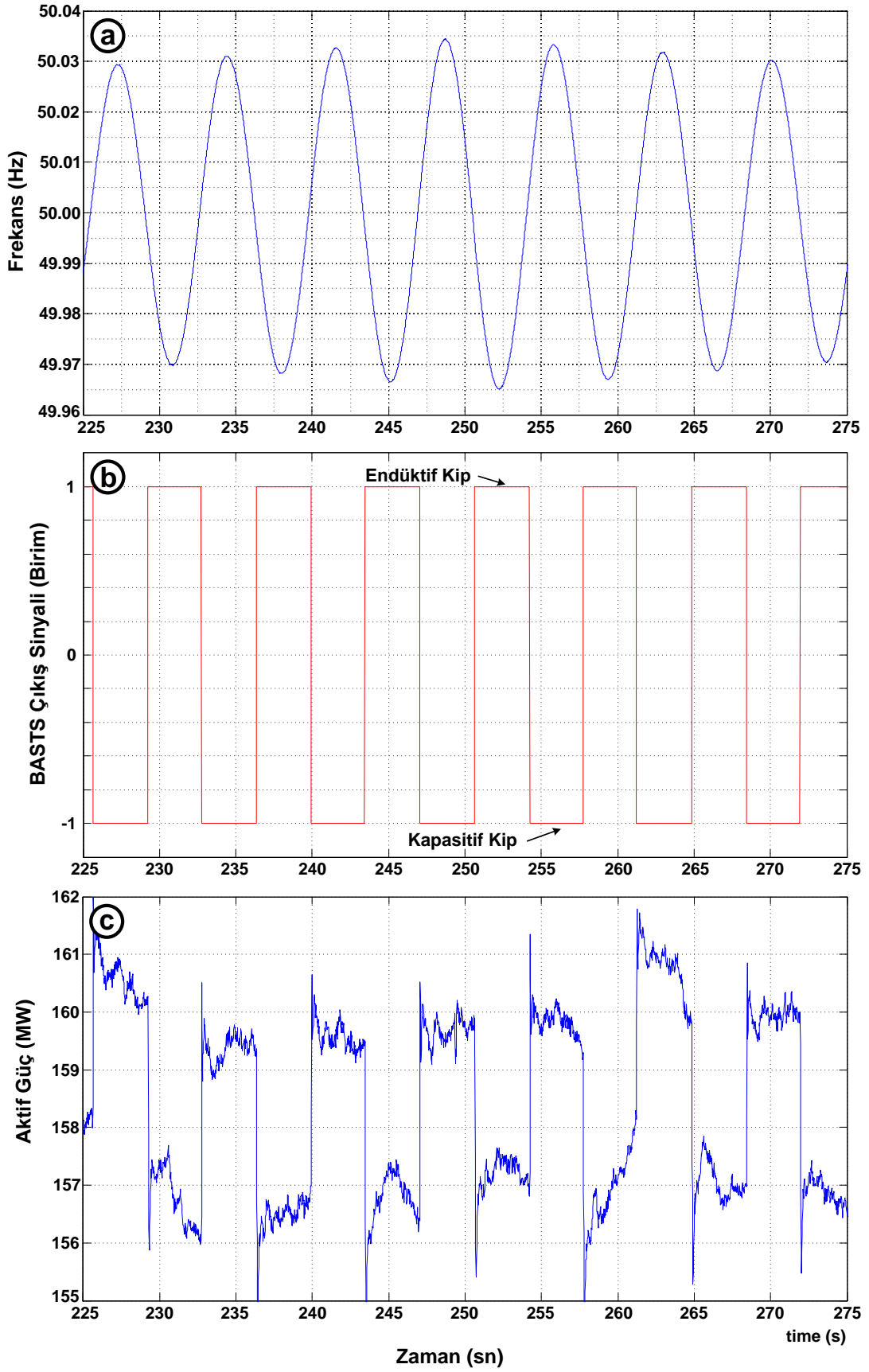
**Şekil 4.4.2** (a) Sentetik test sinyali (b) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (c) 154 kV baradaki aktif güç



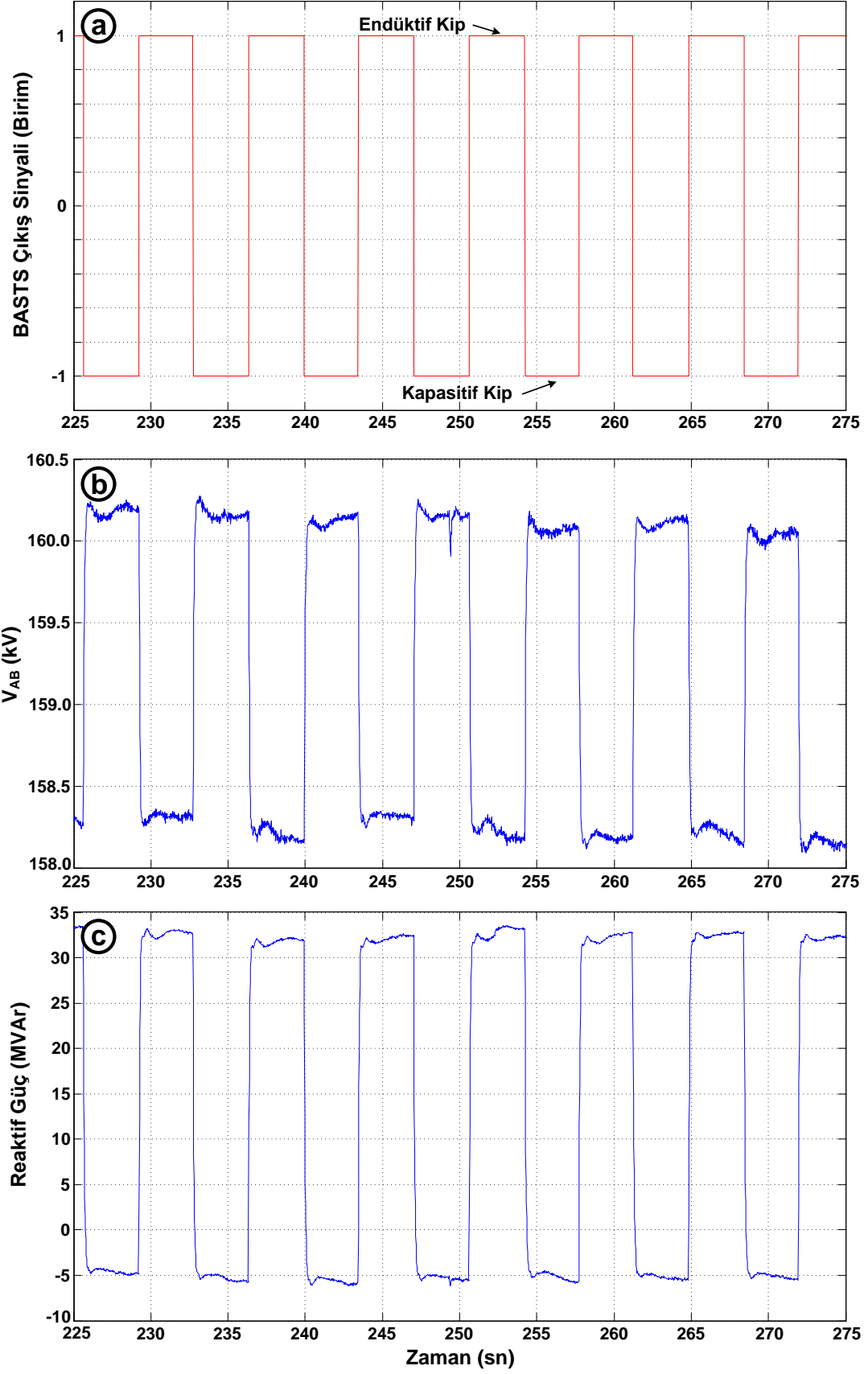
**Şekil 4.4.3** (a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) 154 kV baradaki  $V_{AB}$  gerilimi (c) 154 kV baradaki reaktif güç



**Şekil 4.4.4** (a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) T-STATCOM çıkışındaki reaktif güç (c) 10.5 kV baradaki  $V_{AB}$  gerilimi

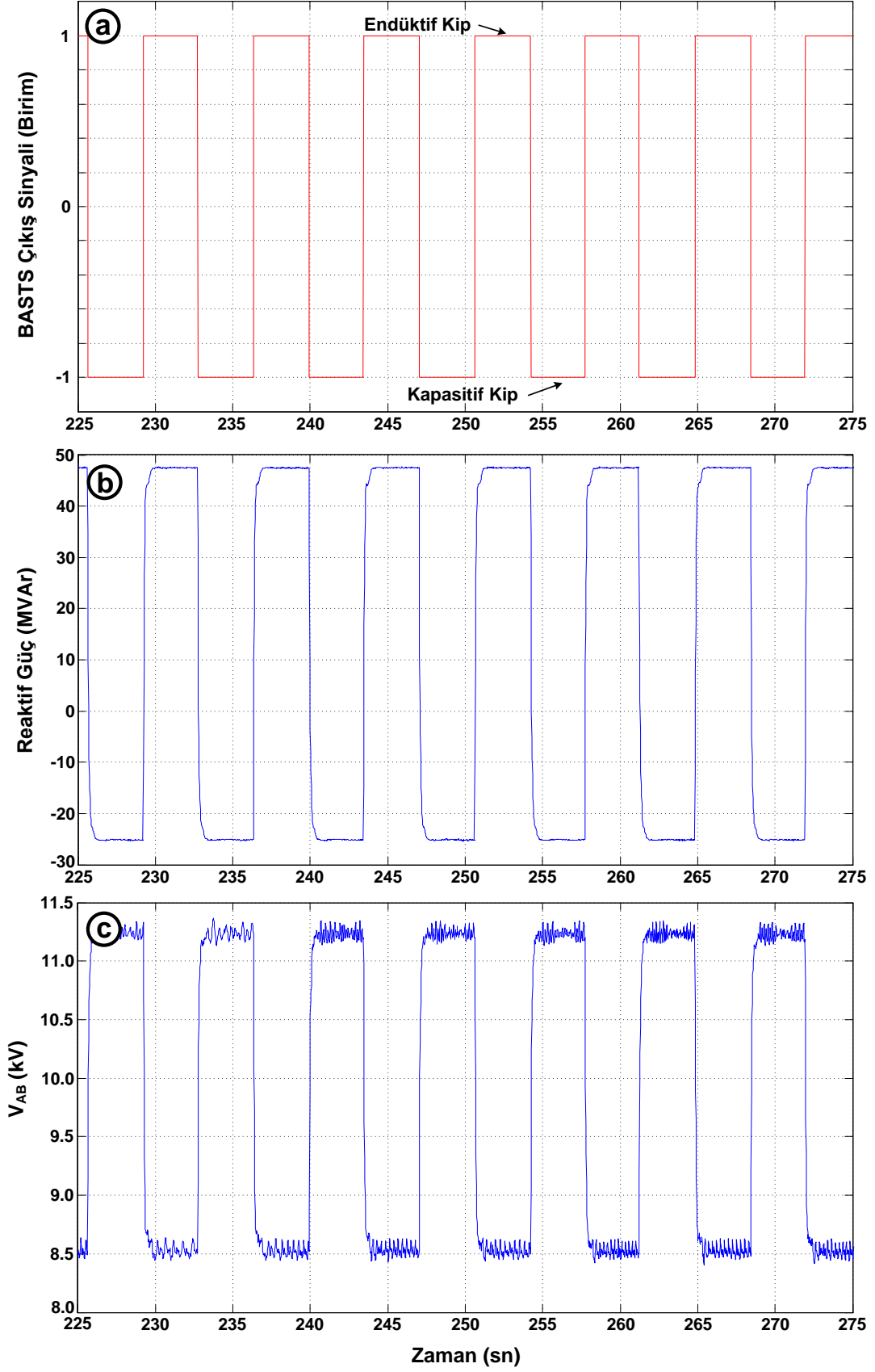


**Şekil 4.4.5** (a) Sentetik test sinyali (b) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (c) 154 kV baradaki aktif güç



**Şekil 4.4.6** (a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) 154 kV baradaki  $V_{AB}$  gerilimi (c) 154 kV baradaki reaktif güç

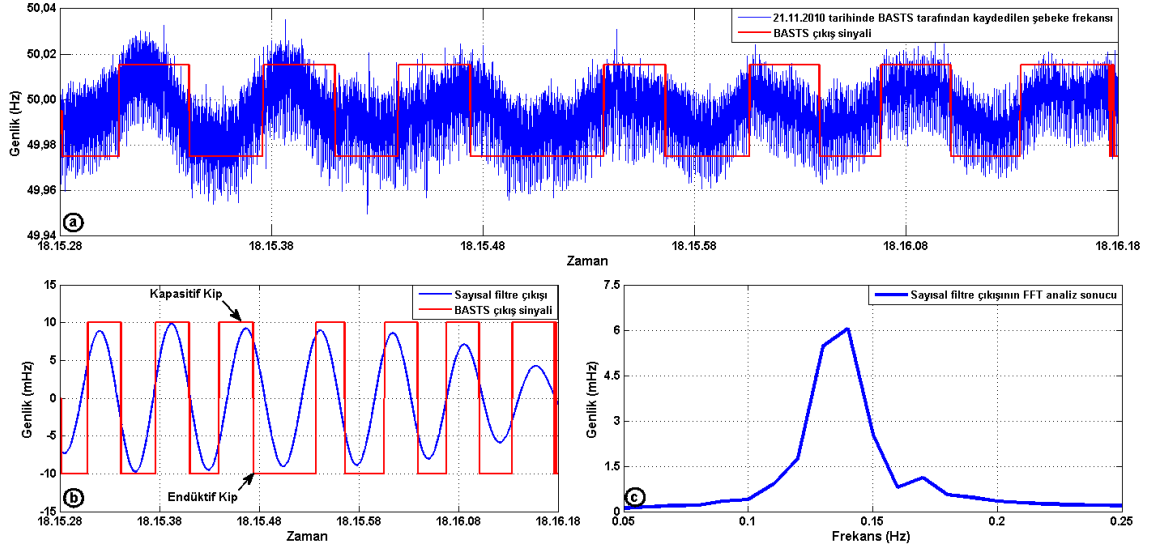




**Şekil 4.4.7** (a) FBMSWA yönteminin sentetik sinyale tepkisi (b) T-STATCOM çıkışındaki reaktif güç (c) 10.5 kV baradaki reaktif güç

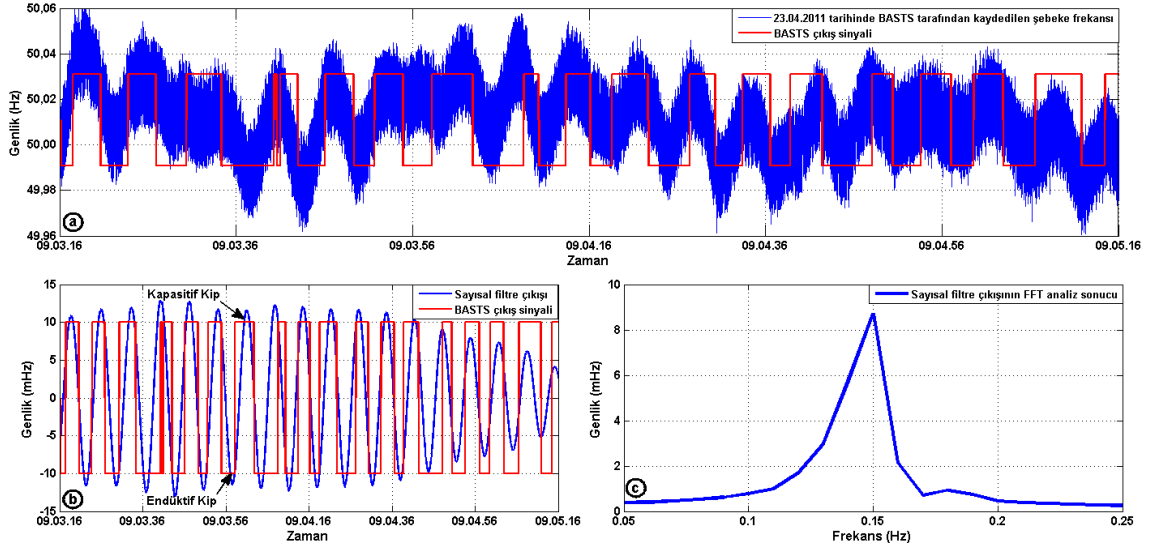
#### 4.5 BASTS ile Tanımlanan Gerçek Bölgeler Arası Salınımlar

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENTSO-E'ye bağlandığı 18 Eylül 2010 tarihinden itibaren bir senelik zaman zarfında birçok bölgeler arası salınım meydana gelmiş ve bu salınımlar BASTS tarafından başarıyla tanımlanmıştır. Oluşan bölgeler arası salınımlar bağlantı öncesi yapılan simülasyonlardan beklendiği gibi 0.1–0.2 Hz bandı içinde oluşmuştur. Salınımların bazıları 15–20 sn içinde sönümlendiği gibi bazıları 5–6 dakika boyunca devam etmiştir. Bu salınımların bazıları elektrik iletim sistemi dinamikleriyle sönümlenirken bazıları da FACTS cihazlarının katkısıyla sönümlenmiştir. Şekil 4.5.1'de 21.11.2010 tarihinde meydana gelen bölgeler arası salınımına ait grafikler verilmiştir. Burada BASTS, T-STATCOM ile bütünleşik çalışmakta ve ölçümlerini Sincan TM 154 kV Bank-B barasından almaktadır. Bölgeler arası salınım yaklaşık 50 sn kadar sürmüş ve oluşan salınım elektrik iletim sisteminin dinamikleriyle sönümlenmiştir. Bu salınım meydana geldiğinde T-STATCOM servis harici olduğundan salınımı sönümlendirmek için herhangi bir faaliyet göstermemiştir. T-STATCOM servis harici olmasına karşın BASTS bölgeler arası salınımı tanımlamış ve gerekli komutları T-STATCOM'a göndermiştir. BASTS bölgeler arası salınımı tanımladıktan sonra salınım devam ettiği sürece şebeke frekansını ve FACTS cihazına gönderdiği komutları kayıt etmektedir. Şekil 4.5.1 (a)'da BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali verilmektedir. Kayıt edilen şebeke frekansındaki bölgeler arası salınım kiplerinin görsel olarak takip edilebilmesi için 0.12–0.16 Hz arasını süzen sayısal bir bant geçiren filtre tasarımı yapılmıştır. Bu filtrenin kullanılmasının temel amacı BASTS çıkış sinyalinin yorumlanması için bir referans oluşturmaktır (Şekil 4.5.1 (b)). Tasarlanan filtre ideal bir filtre olmadığı için sinyali iyi süzememekle beraber girişindeki sinyalde meydana gelen anlık değişikliklere de tepki verememektedir. Bu yüzden filtre çıkışında elde edilen sinyal ile gerçekte olan sinyal arasında fark olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Bununla birlikte oluşan salınımların hangi frekansta meydana geldiğini kestirmek için sayısal filtre çıkışında elde edilen sinyal, FFT analize tabi tutulmuş ve frekans-genlik dağılımı elde edilmiştir (Şekil 4.5.1 (c)). Şekil 4.5.1 (b)'ye bakıldığında BASTS çıkış sinyali ile filtrenin çıkış sinyalleri genellikle örtüşmekte ve BASTS T-STATCOM'a, şebeke frekansı değişiminin pozitif çevriminde kapasitif kipte, negatif çevriminde ise endüktif kipte çalışması için gerekli komutları üretmiştir.

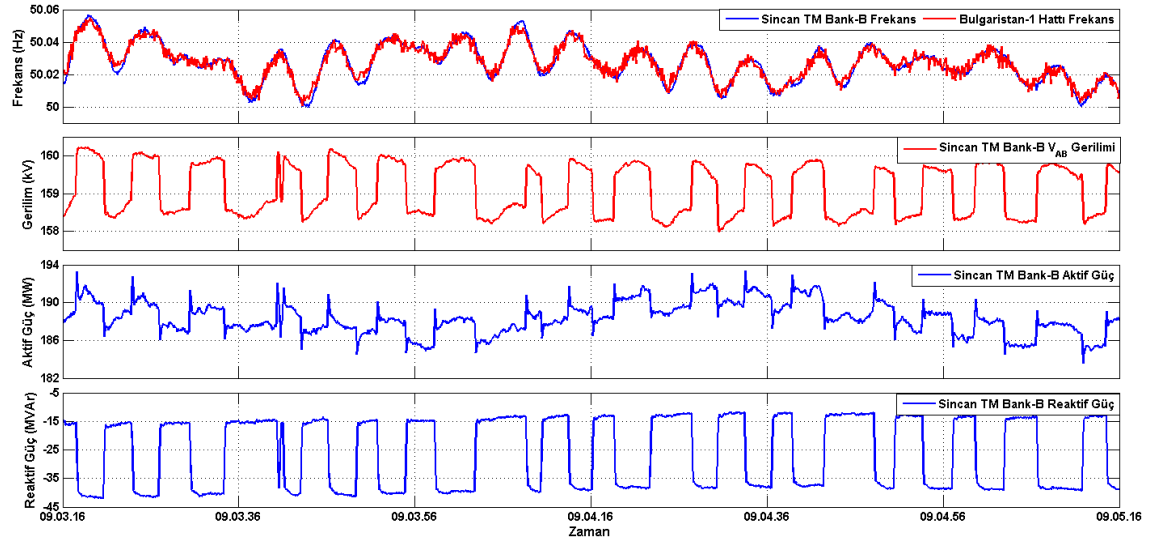


**Şekil 4.5.1** (a) 21.11.2010 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu

Benzer bir bölgeler arası salınım 23 Nisan 2011'de meydana gelmiş ve yaklaşık olarak beş dakika sürmüştür. Bu salınımın iki dakikalık kısmı Şekil 4.5.2'de verilmiştir. 0.15 Hz'de meydana gelen bölgeler arası salınım T-STATCOM'un da yardımıyla beş dakikanın sonunda söndürülmüştür. Şekil 4.5.3'te Sincan TM'de bulunan PMU'lardan alınan ölçüm sonuçları verilmektedir. T-STATCOM salınımı söndürdüremeye çalışırken 154 kV'luk Bank-B barasında faz-faz 2 kV'luk gerilim değişimine sebep olmuştur. Şekil 4.5.4'te salınım anında Türkiye Elektrik İletim Sistemi ile ENTSO-E sistemini birbirine bağlayan bağlantı hatlarında PMU'lar ile kaydedilen şebeke frekansı ve aktif güç değişim grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere Sincan TM'de kayıt edilen şebeke frekansı ile Bulgaristan ve Yunanistan bağlantı hatlarında kaydedilen şebeke frekansı aynıdır. Ayrıca bağlantı hatlarındaki aktif güç değişimi ile şebeke frekansı benzer değişim göstermektedir. Bu sonuç, salınımların tanımlanması için bağlantı hatlarındaki aktif gücün takip edilmesi yerine FACTS cihazın bulunduğu bölgedeki şebeke frekansını takip edilmesinin yeterli olduğunu göstermektedir. Türkiye Bulgaristan üzerinden elektrik alırken Yunanistan'a elektrik satmaktadır. Bu yüzden Şekil 4.5.4'te verilen aktif güç değişim grafiğinde Bulgaristan-1 hattının aktif güç değişimi (-1) ile çarpılarak verilmiştir. Böylece aynı grafik üzerinde Bulgaristan-1 ve Yunanistan hatlarının aktif güç değişimleri kolaylıkla takip edilebilmektedir.



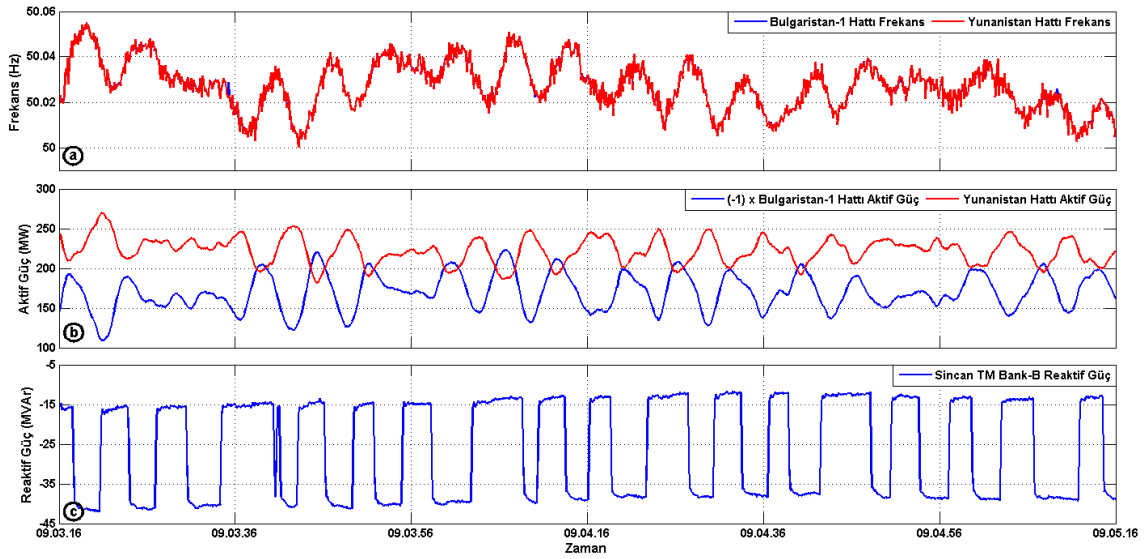
**Şekil 4.5.2** (a) 23.04.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu



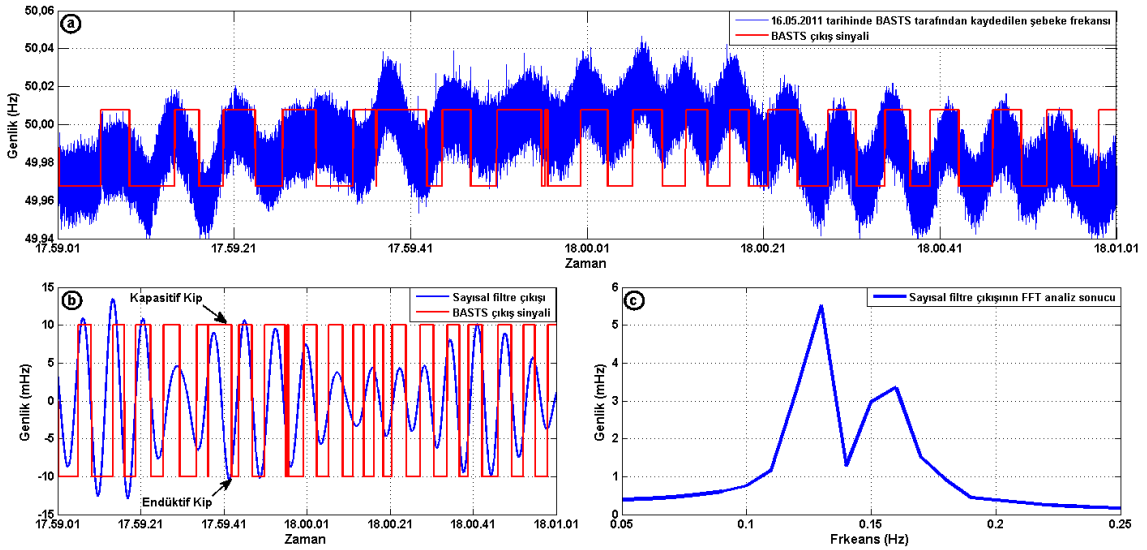
**Şekil 4.5.3** 23.04.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler

Şekil 4.5.5'te 16 Mayıs 2011 tarihinde meydana gelen 0.14 Hz frekanslı bölgeler arası salınımına ait grafikler verilmiştir. Bu salınım da T-STATCOM'un yardımıyla sönümlendirilmiştir. Ancak salınımın genliği bazı bölgelerde oldukça küçülmüştür. Bu bölgelerde (Şekil 4.5.5 (b)) BASTS'ın salınımın fazını doğru tayin etmekte zorlandığı görülmektedir. Fakat salınımın genliği büyüdüğünde ve periyodik olarak değiştiğinde BASTS doğru tepkiler üreterek T-STATCOM'u doğru şekilde

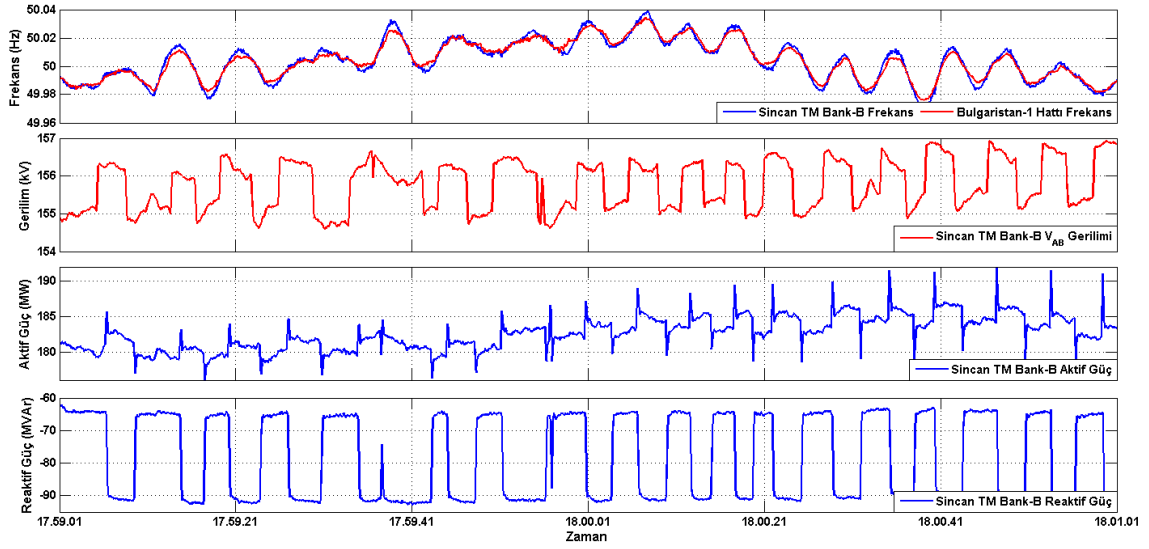
tetiklemiştir. Şekil 4.5.6 ve Şekil 4.5.7’de, meydana gelen bu salınama ait diğer veriler paylaşılmıştır.



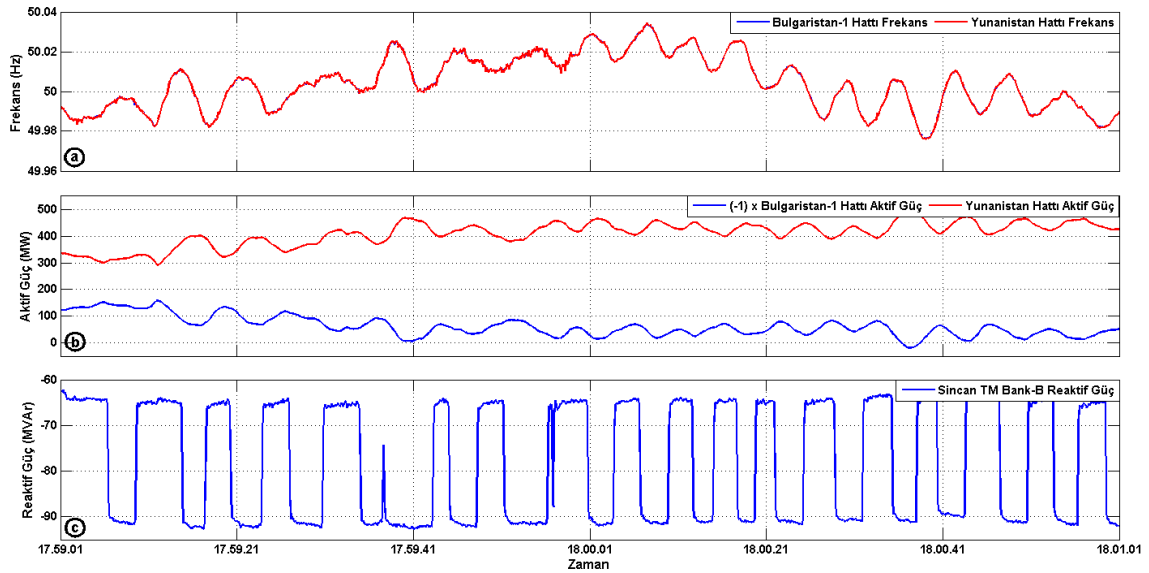
**Şekil 4.5.4** 23.04.2011 tarihinde (a) bağlantı hatları şebeke frekansları (b) bağlantı hatlarındaki aktif güçler (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç



**Şekil 4.5.5** (a) 16.05.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu



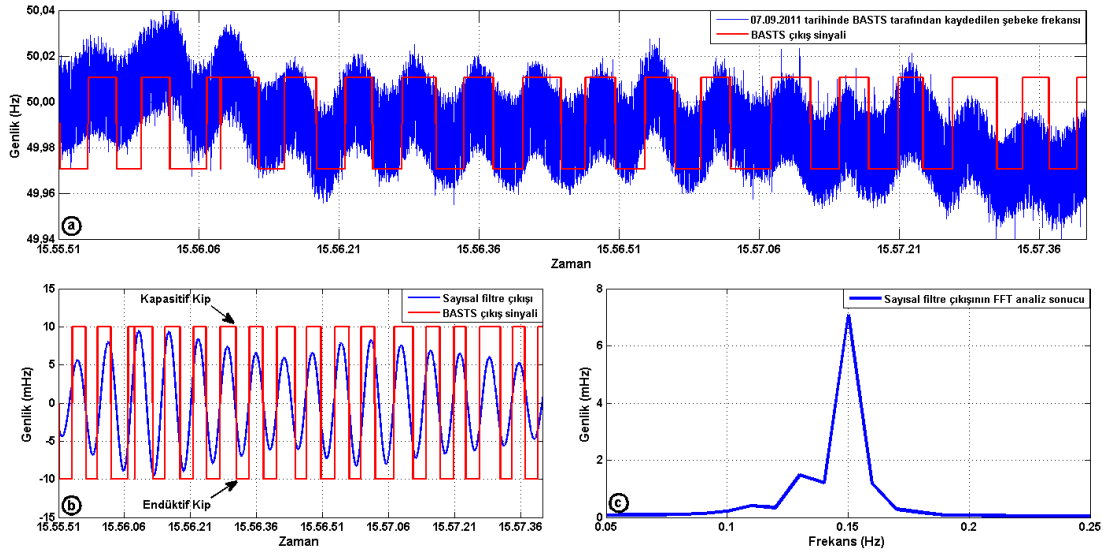
**Şekil 4.5.6** 16.05.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler



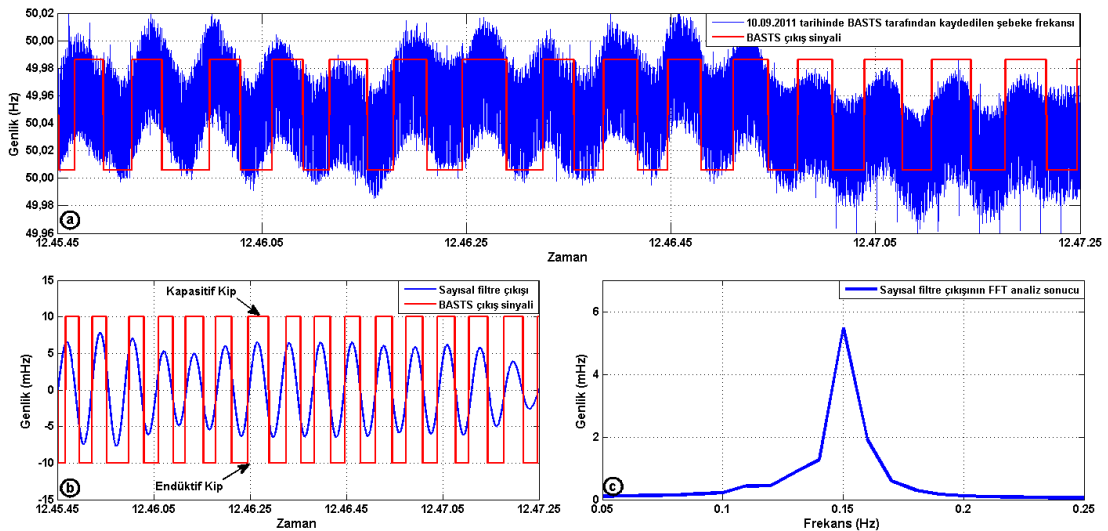
**Şekil 4.5.7** 16.05.2011 tarihinde (a) bağlantı hatları şebeke frekansları (b) bağlantı hatlarındaki aktif güçler (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç

Şekil 4.5.8’de 7 Eylül 2011 tarihinde ve Şekil 4.5.9’da 10 Eylül 2011 tarihinde oluşan 0.15 Hz frekanslı bölgeler arası salınımlara ait grafikler verilmiştir. Şekil 4.5.8 (b) ve Şekil 4.5.9 (b)’den görüleceği gibi salınım, BASTS dördüncü tasarım ölçütü olan “salınım algılayıcı sistemin periyodik olarak değişen ve genliği, durağan veya sürekli artan salınımları algılaması beklenmektedir” gereğine uygun şekilde salınım tanımlamış ve fazı doğru şekilde tespit edebilmiştir. Ancak Eylül

2011 ayı içinde T-STATCOM'un periyodik bakımda olduğundan dolayı servis harici olması nedeniyle BASTS'in üretmiş olduğu doğru komutlar T-STATCOM'da herhangi bir etkiye neden olmamış ve salınımlar elektrik sisteminin dinamikleriyle ve/veya diğer FACTS cihazlarının da katkılarıyla sönümlenmiştir. Fakat her ne kadar T-STATCOM bu salınımların sönümlendirilmesinde rol alamamış olsa da bu salınımlar BASTS'in periyodik değişikliğe sahip salınımları tanımlamaktaki başarısını gerçek veriler ile göstermektedir.

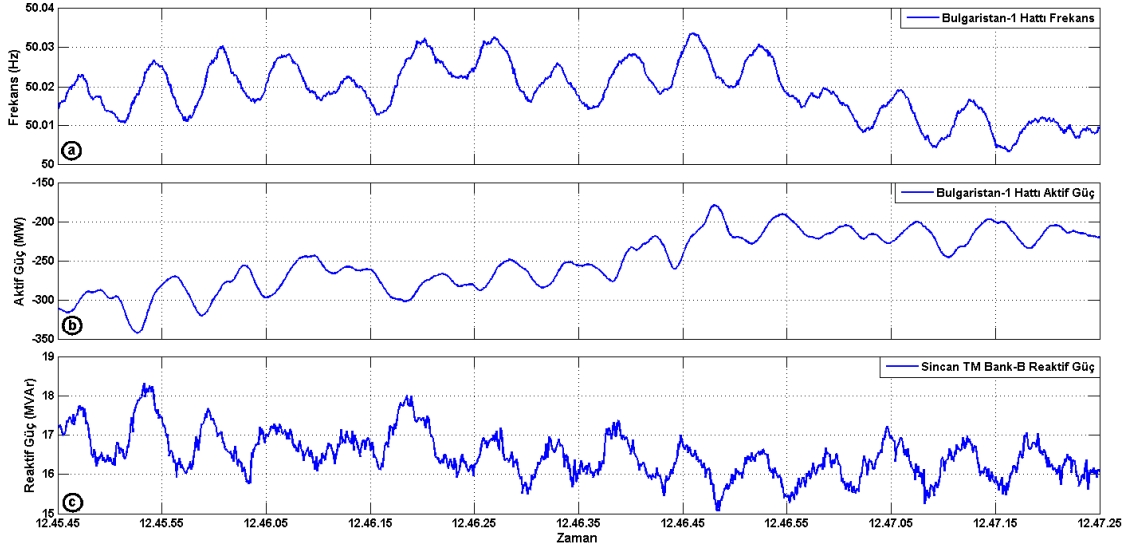


**Şekil 4.5.8** (a) 07.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu

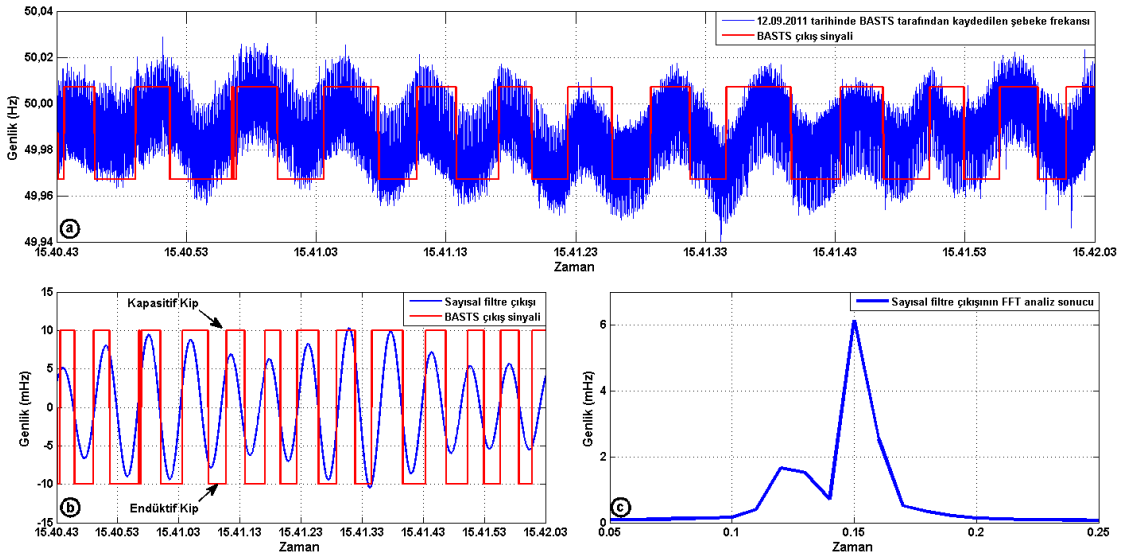


**Şekil 4.5.9** (a) 10.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu

10 Eylül 2011’de meydana gelen bölgeler arası salınım bağlantı hatlarında Şekil 4.5.10’da verilen grafiklerde görüldüğü gibi şebeke frekansı ve aktif güç değişimlerinden gözle takip edilebilmektedir. Bu salınım meydana geldiğinde Sincan TM 154 kV Bank B barasındaki reaktif güç T-STATCOM servis harici olduğu için modüle edilememiş ve yüklerin doğal ihtiyacına göre değişim göstermiştir.



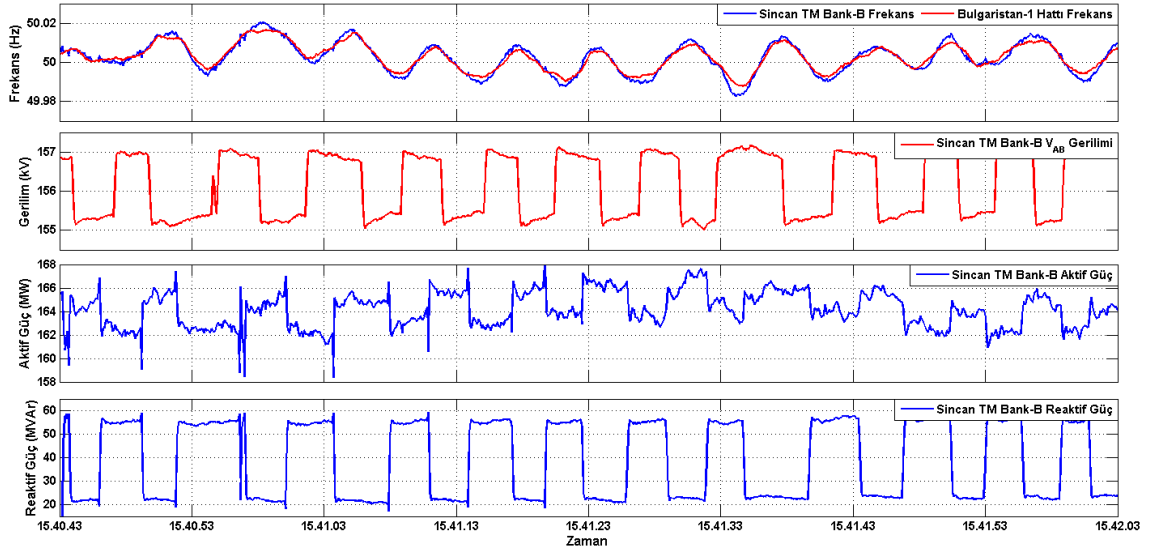
**Şekil 4.5.10** 10.09.2011 tarihinde (a) Bulgaristan-1 hattı şebeke frekansı (b) Bulgaristan-1 hattı aktif güç (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç



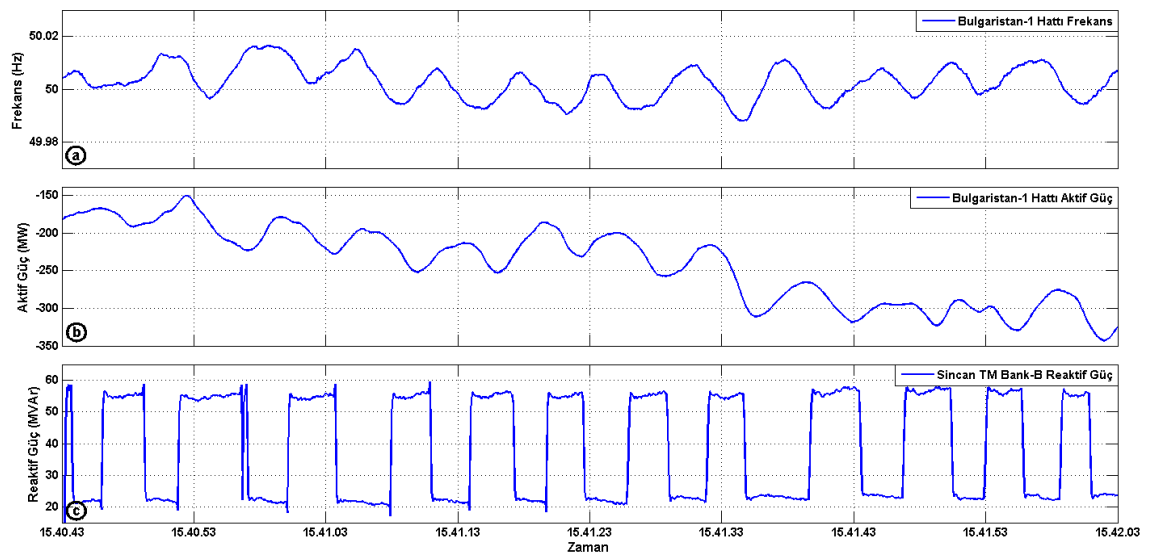
**Şekil 4.5.11** (a) 12.09.2011 tarihinde BASTS tarafından kayıt edilen şebeke frekansı ve BASTS çıkış sinyali (b) Sayısal filtre çıkışı ve BASTS çıkış sinyali (c) Sayısal filtre çıkışının FFT analiz sonucu



Şekil 4.5.11'de 12 Eylül 2011 tarihinde meydana gelen 0.15 Hz frekanslı bölgeler arası salınımlara ait grafikler verilmiştir. Bu salınım daha önceki iki salınımın aksine T-STATCOM'un da katkısıyla sönümlendirilmiştir. Şekil 4.5.12 ve Şekil 4.5.13'te bu salınımlar ile ilgili grafikler verilmiştir. Sincan TM 154 kV Bank-B barasında, T-STATCOM daha önceki salınımlarda olduğu gibi faz-faz 2 kV'luk gerilim değişimine neden olarak bara 164 MW yüklüken 3.5 MW'lık aktif güç değişimine sebep olmuştur.



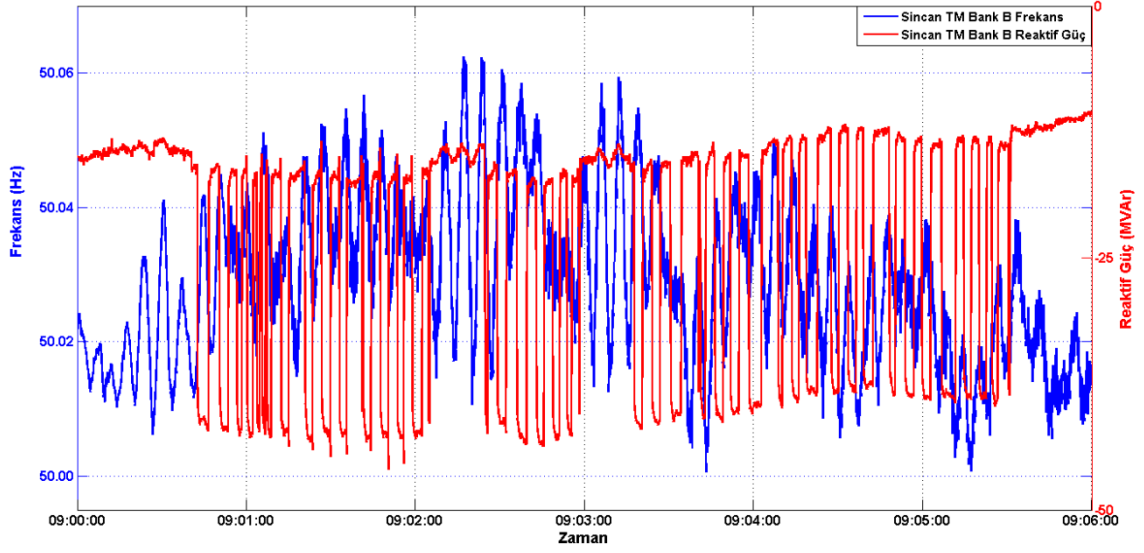
**Şekil 4.5.12** 12.09.2011 tarihinde Sincan TM Bank B barasındaki elektriksel büyüklükler



**Şekil 4.5.13** 12.09.2011 (a) Bulgaristan-1 hattı şebeke frekansı (b) Bulgaristan-1 hattı aktif güç (c) Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç

Şekil 4.5.2'de verilen 23 Nisan 2011'de meydana gelen ve yaklaşık beş dakika süren bölgeler arası salınımın tamamı Şekil 4.5.14'te verilmiştir. Bu grafikte Sincan TM 154 kV Bank-B barasından ölçülen şebeke frekansı ile reaktif güce ait veriler üst üste çizdirilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere bölgeler arası salınım genliği artan şekilde 23 Nisan 2011'de saat 09:00:42'de BASTS tarafından tanımlanmıştır. Yani salınımın genliği BASTS'ın genlik eşik seviyesini 09:00:42'de aşmış ve BASTS T-STATCOM'a komutlar göndermeye başlamıştır. Böylece salınımın genliği giderek küçülmüş ve 09:02:05 anına kadar BASTS T-STATCOM'u salınım sönümlendirme kipinde tutmuştur. 09:02:05'den sonra T-STATCOM normal çalışma kipine dönmüştür. Ancak T-STATCOM'un salınım sönümlendirme kipinden çıkar çıkmaz salınımın genliği yeniden artmaya başlamış ve BASTS 09:02:24 anında salınımı sönümlendirmek için T-STATCOM'a tekrar komutlar göndermeye başlamıştır. Bu döngü bir kaç kez tekrarlanmış ve sonuç olarak oluşan ve yaklaşık beş dakika süren bu bölgeler arası salınım 09:05:31 anında T-STATCOM'un da büyük katkısıyla sönümlendirilmiştir. Elde edilen bu veriler T-STATCOM'un salınım sönümlendirme kipine girdiğinde salınımın genliğinin küçüldüğünü ve salınım sönümlendirme kipinden çıktığı anda ise salınımın genliğinin hızlıca arttığını göstermiştir. Bu da BASTS ile T-STATCOM'un genliği artan karakteristikte olan salınımların sönümlendirebildiğini kanıtlamıştır.

Oluşan bölgeler arası salınımlar periyodik bir değişim gösteriyor ve salınımın genliği durağan ve/veya artan eğilimdeyse BASTS salınımları doğru olarak tanımlayabilmektedir. Ancak salınımın periyodik olmadığı ve/veya genliğinin çok küçük olduğu durumlarda BASTS salınımın fazını her zaman tam olarak tanımlayamamaktadır. Bunda yöntem olarak kullanılan FFT'nin etkisi büyüktür. Zira FFT yöntemi doğrusal sistemler ve durağan olan periyodik sinyallerin analizi için geliştirilmiştir. Elektrik şebekesinin doğrusal olmayan karmaşık yapısı ve periyodik olarak değişim göstermeyen sinyallerin analizi, FFT'nin doğal olarak yetersiz kaldığı durumlardandır. Özellikle FBMSWA'da yapılan ters FFT işleminde sınır değer problemi nedeniyle salınımların fazı tam olarak tespit edilememektedir. Bu yüzden yukarıdaki örneklerde bahse konu olan tüm sorunları çözebilmek için yeni bir yöntem üzerinde çalışılmıştır.



**Şekil 4.5.14** 23.04.2011’de meydana gelen bölgeler arası salınımın oluştuğu andaki şebeke frekansı ve Sincan TM 154 kV Bank B barası reaktif güç değişimi (T-STATCOM tepkisi)

## **5. ÖNERİLEN YÖNTEM-2: HEDEF ODAKLI SAFLAŞTIRMAYA DAYALI AMPİRİK KİPSEL AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ (TARGET BASED REFINEMENT EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION, TBR-EMD)**

Hedef odaklı saflaştırmaya dayalı ampirik kipsel ayrıştırma yöntemi (TBR-EMD), Norden Huang tarafından ortaya atılan ampirik kipsel ayrıştırma (Empirical Mode Decomposition, EMD) yöntemi temeline dayanmaktadır. Bu yönteme iyileştirmeler ve eklemeler yapılarak bu tez çalışmasında literatüre yeni bir yöntem kazandırılmıştır. Böylece elde edilen yeni yöntem olan TBR-EMD ile bölgeler arası salınım tanımlanmaya çalışılmıştır.

TBR-EMD yöntemine geçmeden önce EMD yönteminin nasıl çalıştığı, eksik noktalarının ne olduğu ve bu konuda literatürde geçen ne gibi çalışmalar olduğu konusunda bilgiler aktarılacaktır. Böylece literatüre yapılan katkı ve bu katkının gerekliliği vurgulanacaktır. EMD yöntemi konusunda bilgi aktarıldıktan sonra TBR-EMD yönteminin nasıl çalıştığından bahsedilecek ve gerçek bölgeler arası salınım verileri kullanılarak TBR-EMD yöntemi ile yapılan analizlerin sonuçları incelenecektir.

### **5.1. Ampirik Kipsel Ayrıştırma Yöntemi (Empirical Mode Decomposition, EMD)**

Ampirik kipsel ayrıştırma (EMD) yöntemi doğrusal olmayan (non-linear) sistemlerde durağan olmayan (non-stationary) sinyallerden oluşan tümleşik (composite) sinyallerin değişik frekanslı bileşenlerini birbirinden ayırtmak için kullanılan, Huang [20] tarafından ampirik (deneysel) olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. EMD, ortaya atıldığı ilk günden itibaren birçok araştırmacının dikkatini çekmiş, jeofizik, biyomedikal, ses-görüntü işleme ve güç sistemleri gibi birçok farklı alanda uygulanmıştır. Bu uygulama alanlarından bir tanesi de bölgeler arası salınımların izlenmesidir [24].

EMD işleminde ilk olarak bileşenlerine ayrıştırılacak sinyalin bölgesel (local) tepe ve çukur noktaları bulunur. Daha sonra tepe noktaları arasında interpolasyon yapılarak sinyalin üst zarfı, benzer şekilde çukur noktaları arasında interpolasyon

yapılarak sinyalin alt zarfı oluşturulur. Ortalama zarf değeri alt ve üst zarfın toplamının yarısı olacak şekilde elde edilerek incelenen sinyalden çıkartılır. Elde edilen bu sinyale “Proto-Mode Function (PMF)” adı verilir. Eğer PMF tek frekanslı bir sinyal ise buna “Intrinsic Mode Function (IMF)” adı verilir. Şayet PMF tek frekanslı değilse EMD işlemi elde edilen PMF için tekrarlanır. Bu işlem iteratif bir şekilde incelenen sinyal tüm bileşenlerine ayrılana kadar devam eder. Şekil 5.1.1’de sentetik bir test sinyali ve bu sinyalin EMD işlemi sonucunda elde edilen IMF’leri verilmektedir.

Bir sinyalin IMF olup olmadığını anlamak için iki koşulun sağlanması gerekir:

- 1- Sinyaldeki tepe ve çukur noktalarının toplam sayısı, sıfır geçiş (zero-crossing) sayısına ya eşit olmalı ya da aralarında en fazla bir fark olmalıdır.
- 2- Sinyalin pozitif ve negatif zarflarından elde edilen ortalama zarf değerinin sifira yakın olması gerekir. Yani sinyal x-ekseninde sıfır noktası etrafında simetrik bir şekilde salınmalıdır. Bu ölçütlerin sağlanıp sağlanmadığı test etmek için Huang [20] Standart Sapma (SD) yöntemini önermiştir. Bu yöntemde  $p_i(t)$  elde edilen IMF değerleri olmak üzere;

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|p_{i-1}(t) - p_i(t)|^2}{p_{i-1}^2(t)} \quad (5.1)$$

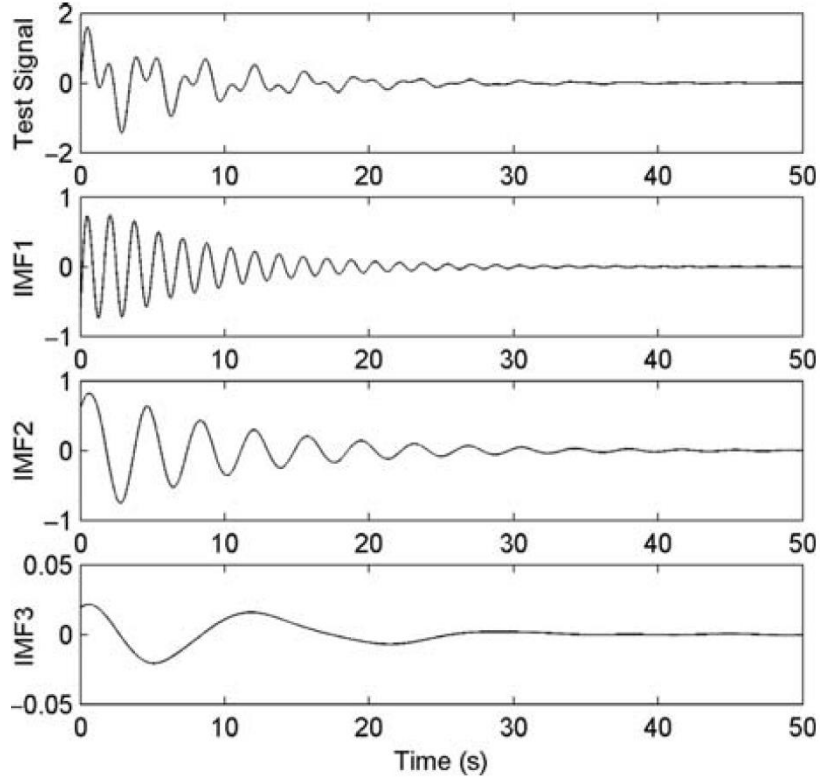
olarak hesaplanır.  $SD \leq 0.2-0.3$  olması bu ölçütün sağlanması için yeterlidir.

EMD yöntemiyle bir sinyali tek frekanslı bileşenlerine ayırmak yani sinyalin IMF’lerini bulmak için ayıklama (sifting) işlemi yapılır. Ayıklama işlemi altı aşamada özetlenebilir [20, 22, 23]:

$x(t)$  gerçek değerli bir sinyal olmak üzere,  $i = 0$  alınarak;

- 1-  $x(t)$  sinyalinin tüm bölgesel tepe ve çukurları bulunur.
- 2- “Cubic-Spline” interpolasyon yöntemi ile  $x(t)$ ’nin tepe noktaları kullanılarak sinyalin üst zarfı  $e_{\max}(t)$  hesaplanır. Benzer şekilde çukur noktaları kullanılarak  $x(t)$ ’nin alt zarfı  $e_{\min}(t)$  elde edilir.
- 3- Alt ve üst zarf kullanılarak ortalama zarf değeri  $m(t)$  hesaplanır (Şekil 5.1.2).

$$m(t) = \frac{e_{\max}(t) + e_{\min}(t)}{2} \quad (5.2)$$



**Şekil 5.1.1** EMD yöntemi ile ayrıştırılmış sentetik sinyal ve ilgili IMF'leri [22]

- 4-  $i = i+1$  ve  $p_i(t) = x(t) - m(t)$  olarak bir  $p_i(t)$  sinyali elde edilir. Eğer  $p_i(t)$  sinyali IMF özelliği taşıyorsa ilk IMF,  $imf_1 = p_i(t)$  olarak alınır. Şayet  $p_i(t)$  IMF değil ise  $p_i(t)$  sinyali için 1–4 aşamaları tekrar uygulanır (Şekil 5.1.3).
- 5-  $imf_1$ 'i elde edildikten sonra  $r(t) = x(t) - imf_1(t)$  olarak artık sinyal elde edilir. Eğer  $r(t)$  tekdüze (monoton) bir sinyal ise ayıklama işlemine son verilir.  $r(t)$  tekdüze bir sinyal değil ise 1–5 aşamaları  $r(t)$  sinyali için tekrarlanır.

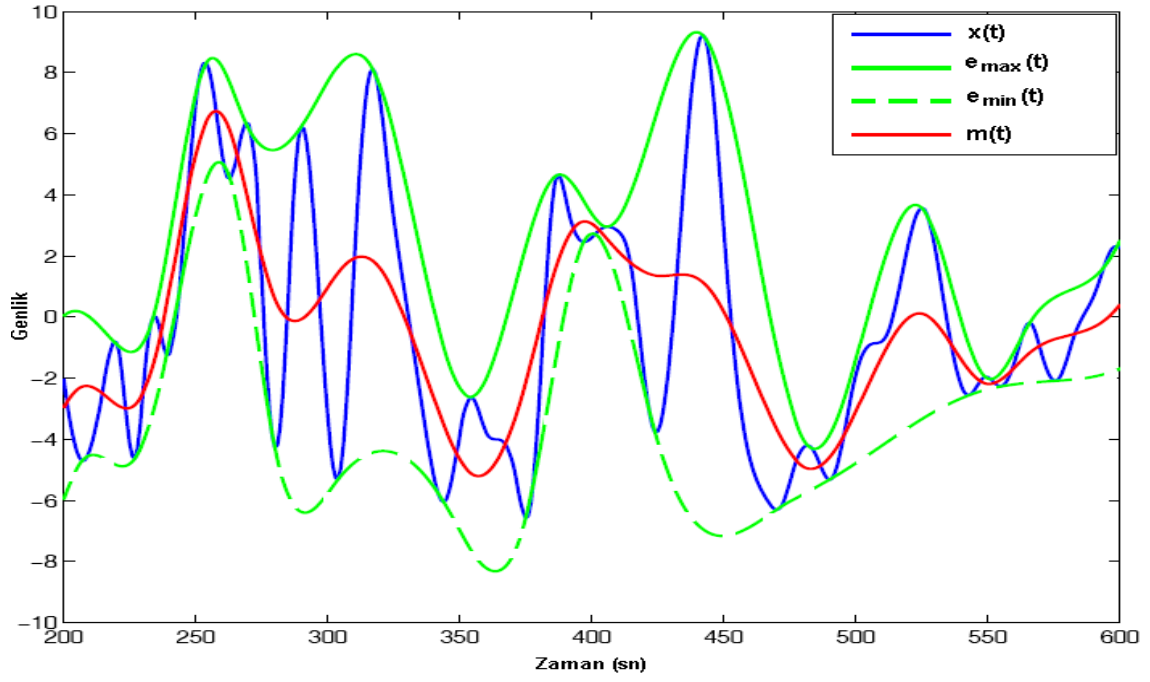
Tüm bu ayrıştırma adımları sonunda elde edilen sinyaller;

$$x = \sum_{k=1}^K imf_k + r_k \quad (5.3)$$

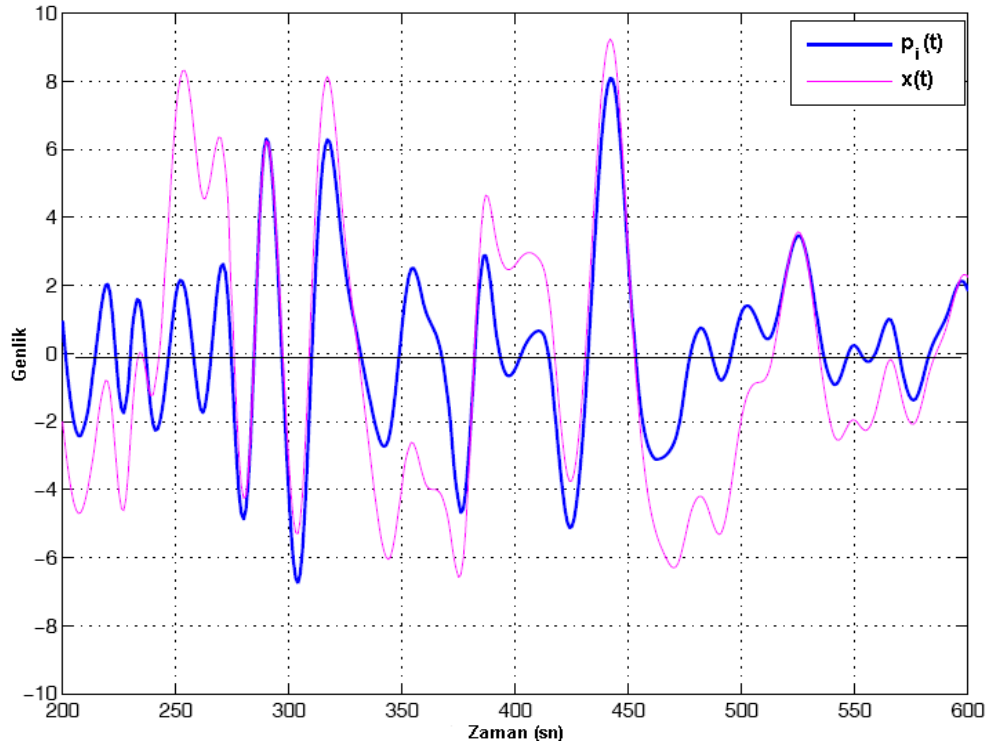
olarak gösterilebilir.

EMD yöntemi doğrusal olmayan sistemlerden elde edilen durağan olmayan sinyallere uygulanabilir olması nedeniyle Spectrogram, FFT, Wavelet, Prony gibi yöntemlere göre çok önemli bir avantaja sahiptir. Ancak ilk bakışta oldukça kullanışlı görünen EMD yönteminin de güçsüz noktaları bulunmaktadır [25, 33, 52]. Huang'ın ortaya attığı bu yöntemin güçsüz noktaları zaman içinde başka

araştırmacılar tarafından giderilmeye çalışılmıştır. EMD yönteminin başlıca dört ciddi sorunu bulunmaktadırdır:



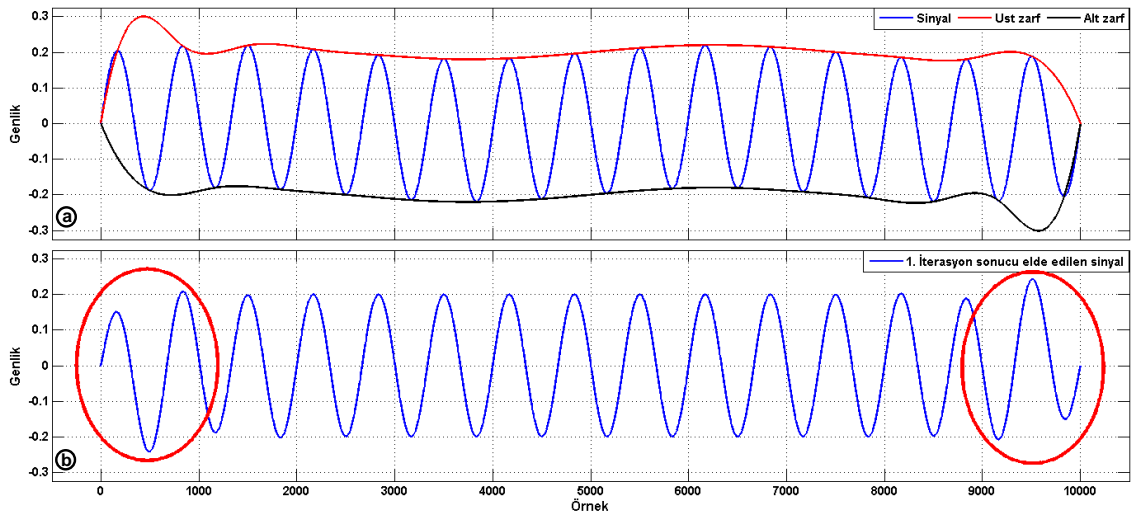
**şekil 5.1.2** EMD yöntemi ayıklama işlemi (sifting) uygulanacak sinyal ve ayıklama işleminin 1., 2. ve 3. Aşamalarında elde edilen sinyaller [23]



**şekil 5.1.3** EMD ayıklama işleminin 4. aşamasında elde edilen  $p_i(t)$  sinyali [23]

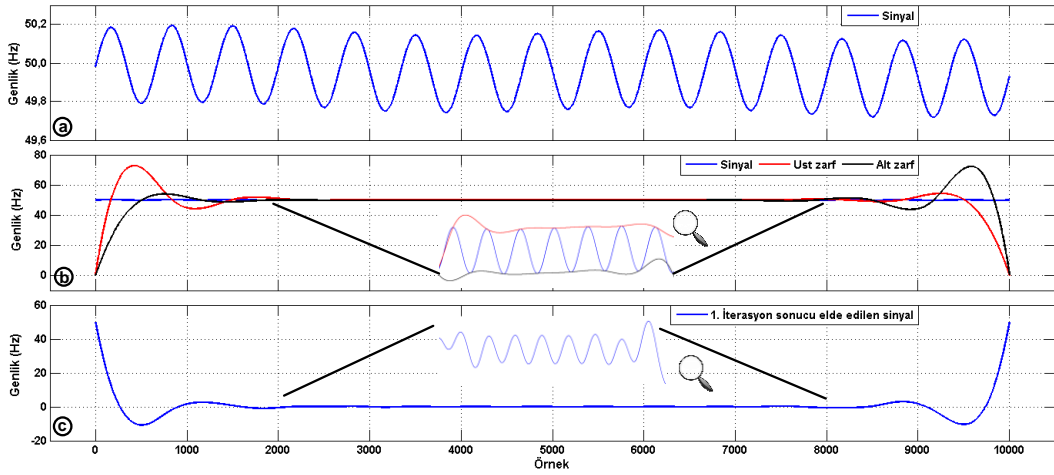
**1- Sınır Değerler Problemi (Boundary Effect) :** EMD yöntemi incelenen sinyalin alt ve üst zarflarını bulurken “cubic-spline” yöntemi ile interpolasyon yapmaktadır. Örneğin sinyal içindeki n. tepe değeri ile (n+1). tepe değeri arasında bir eğri uydurularak sinyalin üst zarfı elde edilmeye çalışılır. Fakat sinyalin ilk bölgesel tepe/çukur değeri kendinden önce herhangi bir tepe/çukur değer olmadığı için tepe/çukur olmayan bir nokta ile birleştirilir. Bu da sinyalin zarfının doğru şekilde belirlenememesine neden olur. Benzer şekilde son bölgesel tepe/çukur ile sinyalin sonunda tepe/çukur olmayan bir nokta arasına bir eğri uydurulur. Şekil 5.1.4 (a)'da verilen AC sinyalin zarfı sinyalin başlangıç ve bitiş noktalarında sıfır noktası ile birleştirilmektedir. Bu yüzden sinyalin zarfı sınır bölgelerinde hatalı olarak elde edilir. Dolayısıyla birinci iterasyon sonunda elde edilen  $p_i(t)$  sinyali de hatalı olarak ayıklanır (Şekil 5.1.4 (b)).

Analiz edilecek sinyal DC değere sahip ise bu durumda elde edilen IMF'ler AC sinyale göre daha büyük hata oranı ile ayrıştırılır. Şekil 5.1.5 (a)'da verilen 50 Hz ofset üzerinde salınan bir sentetik sinyale ait zarflar Şekil 5.1.5 (b)'de verildiği gibidir. Sinyalin ilk/son tepe ve çukur noktaları 50 Hz civarında olduğu için sıfır noktası ile yapılan interpolasyonlar yüzünden sinyalin sınır noktalarındaki zarfı büyük hata oranı ile elde edilmektedir.



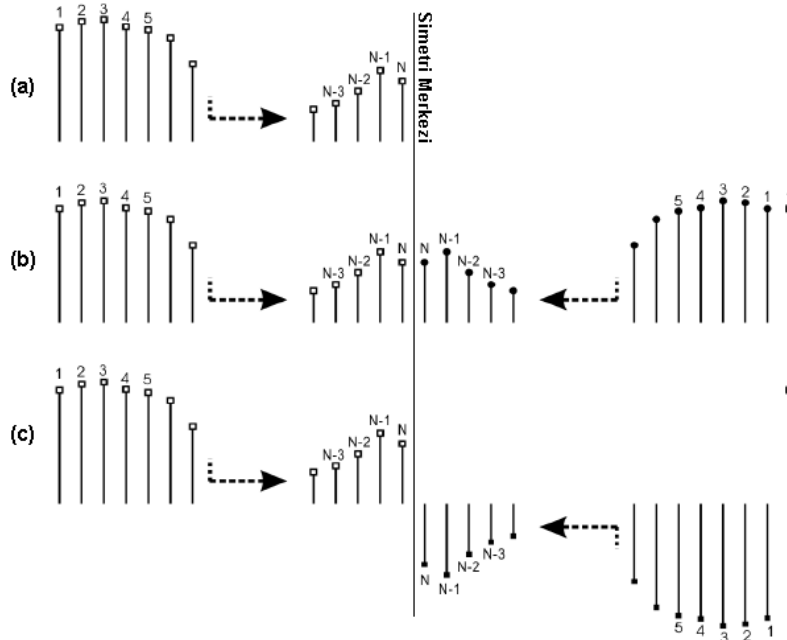
**Şekil 5.1.4** (a) EMD yöntemi sınır değer problemi giderilmediği durum için AC sinyal ve zarfları (b) 1. iterasyon sonunda elde edilen hatalı  $p_i(t)$  sinyali





**Şekil 5.1.5** (a) EMD yöntemi ile analiz edilecek DC sinyal (b) EMD yöntemi sınır değer problemi giderilmediği durum için sinyalin zarfları (c) 1. iterasyon sonunda elde edilen hatalı  $p_i(t)$  sinyali

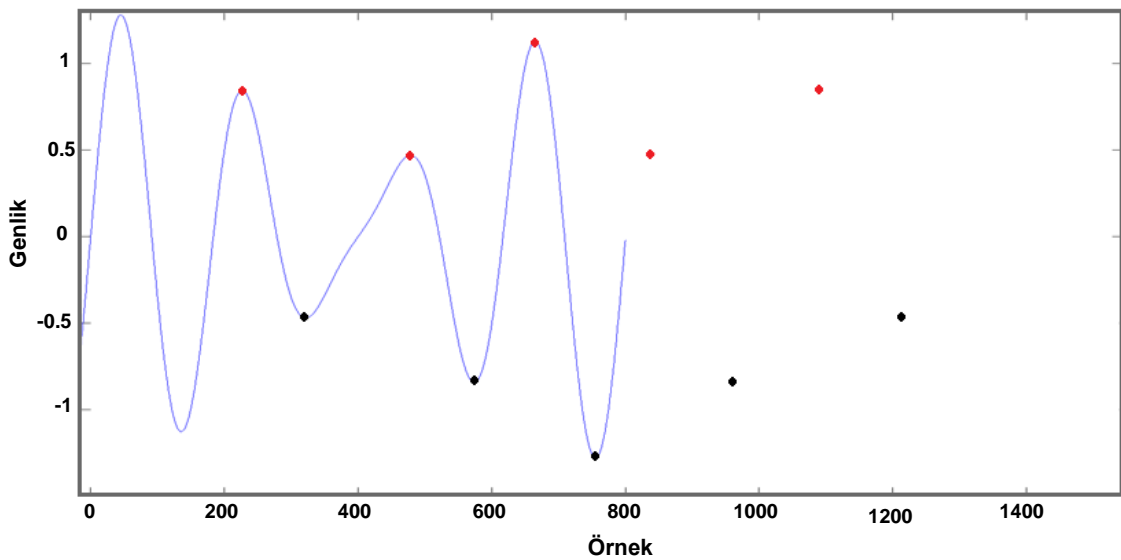
Dolayısıyla sınır değerler problemi yüzünden IMF'lerde doğru olarak bulunamamaktadır (Şekil 5.1.5 (c)). Bu sorunun analiz edilecek sinyalin ayna görüntüsü (mirror) alınarak sinyalin sonuna eklenmesiyle giderilebileceği yönünde literatürde çalışmalara rastlanmaktadır (Şekil 5.1.6) [26, 27].



**Şekil 5.1.6** (a) Orijinal sinyal (b) Sinyalin düz ayna görüntüsünün sinyalin ucuna eklenmiş hali (c) Sinyalin ters ayna görüntüsünün sinyalin ucuna eklenmiş hali [27]

Rilling [25] ise sinyalin kendisinin ayna görüntüsünü alarak değil de sinyalin tepe ve çukur noktalarının ayna görüntüsünü alarak bu yeni tepe ve çukur noktalarını interpolasyon işleminde kullanmasıyla bu sorunu aşmaya çalışmıştır (Şekil 5.1.7). Böylece sinyalin zarfının sahip olduğu eğilim değişmemekte ve sinyalin sınır bölgelerinde hatalı bir şekilde ayrıştırılmasının önüne geçilmektedir.

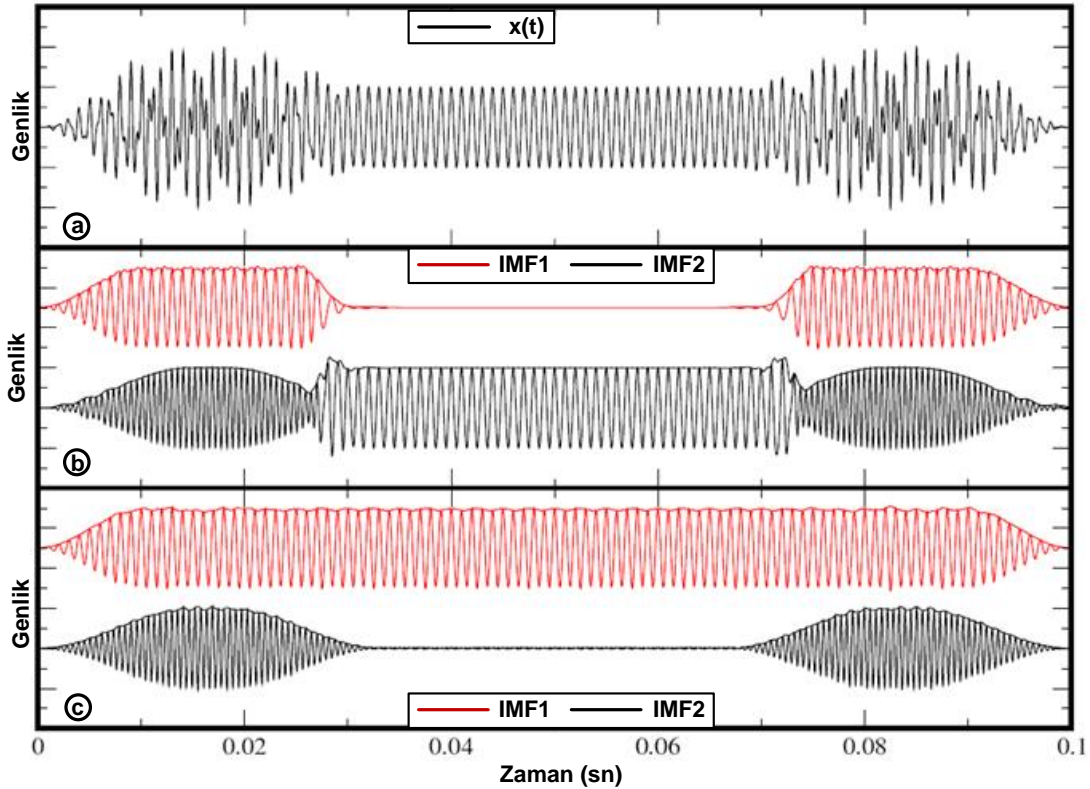
**2- Aralıklılık (Intermittency) :** Birden fazla frekans bileşenine sahip bir sinyalde bulunan herhangi bir frekans bileşeni, incelenen pencere içerisinde belli aralıklarla var ise elde edilen IMF'lerde bölgesel olarak farklı frekans bileşenleri (kiplerin karışması, "mode-mixing") görülür. Bu problemi ilk olarak Huang [28, 53] dile getirmiştir. Sorunun çözümü için Huang [28]'de bir yöntem önermiş olsa da, Deering [29] önerdiği maskeleye adı verilen yeni bir yöntem ile bu problemi ortadan kaldırmaya çalışmıştır. Deering, önerdiği yöntemi anlatmak için Şekil 5.1.8'de verilen sinyali kullanmıştır. Buna göre  $x(t)$  sinyali 1776 Hz ve 1000 Hz'lik iki sinüs sinyalinin toplamı şeklindedir. 1776 Hz'lik bileşen 0.033–0.067 sn aralığında bulunmamaktadır. Bu sinyal Huang'ın ortaya attığı standart EMD yöntemi ile ayrıştırıldığında elde edilen iki IMF Şekil 5.1.8 (b)'de görüldüğü gibidir. İlk IMF'de bulunması gereken 1000 Hz'lik sinüs sinyali 0.033–0.067 sn aralığında ikinci IMF'de görülmektedir. Deering'in geliştirdiği maskeleye



**Şekil 5.1.7** Rilling [25]'in sınır değer problemini aşmak için önerdiği yöntem

yöntemiyle elde edilen sonuç ise Şekil 5.1.8 (c)'de verilmiştir. Böylece aralıklılık problemi nedeniyle elde edilen IMF'lerdeki kiplerin karışması sorunu giderilmiştir. Deering'in önerdiği maskeleye yöntemi daha sonra başka araştırmacılar tarafından daha sistematik hale getirilmiş ve bazı geliştirmeler de yapılmıştır. Bunların ayrıntısı ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir.

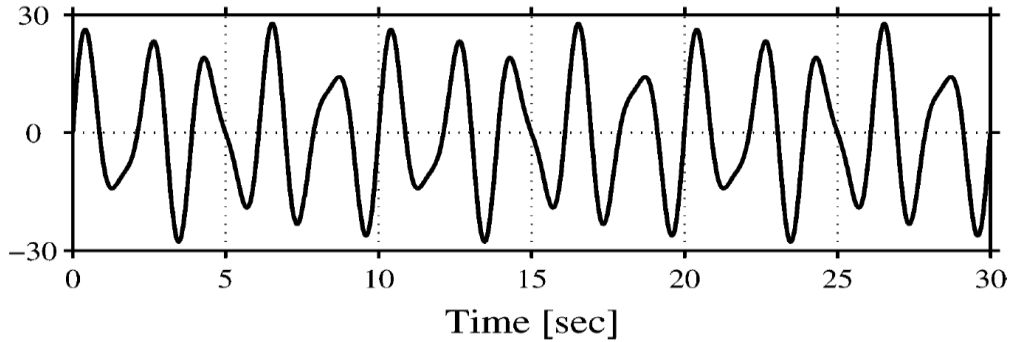
**3- Frekans Olarak Yakın Kiplerin Ayrıştırılamaması (Octave):** EMD yönteminin en önemli dezavantajlarında biri de oktav (octave) olarak bilinen bir sinyalin frekansının yarısı veya iki katı frekans bant genişliği içindeki sinyallerin EMD yöntemiyle birbirinden ayrılamamasıdır. Örneğin 0.45 Hz ile 0.6 Hz aynı oktavı paylaşırken 0.35 Hz ile 0.8 Hz farklı oktavlarda yer almaktadır. Literatürde oktav problemi değişik maskeleye yöntemleri kullanılarak aşılmaya çalışılmıştır. Örnek olarak analiz edilmek istenen sinyal  $x(t) = 8 \times \sin 1.6 \pi t + 20 \times \sin \pi t$  olsun (Şekil 5.1.9).  $x(t)$ 'yi oluşturan sinyallerin frekansları 0.8 Hz ve 0.5 Hz'dir. Aynı oktavı paylaşan bu iki



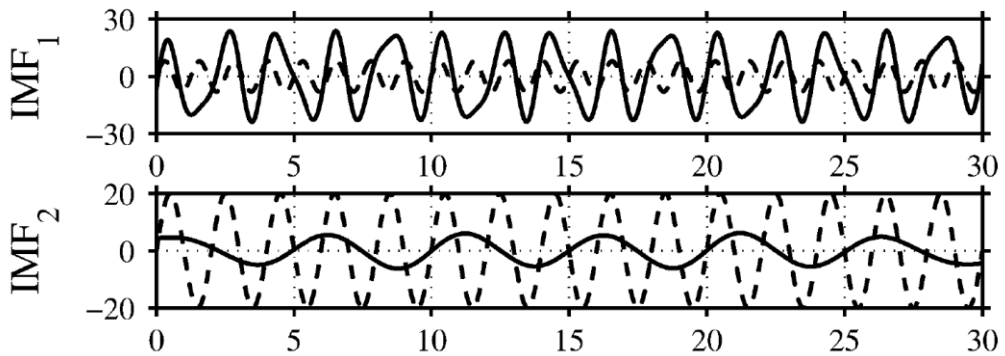
**Şekil 5.1.8** (a) Aralıklılık problemine sahip olan sinyal  $x(t)$  (b) Standart EMD yöntemi ile elde edilen IMF'ler (c) Deering'in önerdiği maskeleye yöntemi ile elde edilen IMF'ler [29]

sinyal standart EMD tekniği ile ayrıştırılamamaktadır. Şekil 5.1.10'da standart EMD tekniği ile elde edilmiş IMF'ler görölmektedir. Kesikli çizgi ile ifade edilen sinyaller teorik olarak elde edilmesi gereken sonuçlardır. Şekildeki grafikten kesikli çizgiler ile sürekli çizgilerin örtüşmediği açıkça görölmektedir. Standart EMD tekniği ile ayrıştırılamayan sinyaller değişik maskeleme yöntemleri uygulanarak bileşenlerine ayrılabilir. İlk maskeme yöntemini Deering [29] aralıklılık probleminin çözümü için sunmuştur. Deering'in yöntemi daha sonra Senroy [31] tarafından daha sistematik şekilde tanımlanarak güç kalitesi analizlerinde kullanılmıştır.

Oktav problemi, aralıklılık problemiyle benzer bir sorundur ve çözüm yöntemleri de benzerdir. Aynı oktavdaki sinyallerin maskeleme yapmaksızın EMD yöntemiyle ayrıştırılması sonucunda elde edilen IMF'ler tek frekanslı olmamaktadır. Bu yüzden bu problemde literatürde kiplerin karışması (mode-mixing) olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 5.1.9** Oktav problemine sahip  $x(t)$  sinyali [24]



**Şekil 5.1.10**  $x(t)$  sinyalinin standart EMD ile elde edilmiş IMF'leri [24]

Maskele yöntemi Senroy [31] tarafından altı aşamada özetlenmiştir. Buna göre EMD ile bileşenlerine ayrıştırılacak sinyal  $x(t)$  olmak üzere;

- i.  $x(t)$  sinyali FFT işlemine tabi tutulur. FFT işlemi sonucunda sinyali oluşturduğu tahmin edilen frekans bileşenleri  $f_1 < f_2 < \dots < f_n$  olacak şekilde sıralanır.

$x(t)$ 'yi oluşturan frekans bileşenleri elde edildikten sonra maskelemede kullanılacak sinyaller oluşturulur. Maskelemeye en yüksek frekanslı sinyalden başlanır. Maskeleme sinyali:

$$mask_k(t) = M_k \times \sin 2\pi(f_k + f_{k-1})t \quad (5.4)$$

olacak şekilde elde edilir. Burada  $M_k$  FFT işlemi sonucunda elde edilen ve  $f_k$  frekans bileşenine ait olan genlik değerinin '5.5' katı olarak seçilir. Bu değer kesin bir değer olmamakla birlikte tecrübeye dayalı seçilmiştir.

- ii. Maskeme sinyali kullanılarak iki farklı sinyal elde edilir. Bu sinyaller:

$$x_+(t) = x(t) + mask_n(t) \quad (5.5)$$

$$x_-(t) = x(t) - mask_n(t) \quad (5.6)$$

Elde edilen bu yeni iki sinyale standart EMD yönteminin 1–4 basamakları uygulanır. Bu işlemler sonunda elde edilen ilk IMF değerleri  $p_{1+}$  ve  $p_{1-}$  olarak adlandırılır. Bu iki IMF'den;

$$p_1(t) = \frac{p_{1+}(t) + p_{1-}(t)}{2} \quad (5.7)$$

şeklinde  $x(t)$  sinyalinin ilk IMF'i elde edilmiş olur.

- iii. Daha sonra ilk artık değer  $r_1(t) = x(t) - p_1(t)$  olacak şekilde elde edilir.
- iv.  $x(t)$  sinyalinin ilk IMF'i elde edildikten sonra iii–iv aşamaları benzer şekilde yeni elde edilen  $r_k(t)$  sinyalleri için tekrarlanır. Bu sayede  $f_2, f_3, \dots, f_n$  sinyalleri ayrıştırılmış olur. Son artık sinyal olarak elde edilen  $r_n(t)$  içerisinde,  $f_1$  frekansını barındırır.
- v.  $r_n(t)$  sinyaline standart EMD yönteminin 1–5 basamakları uygulanır. Bu sayede  $f_1$  frekansı ve artık sinyal elde edilir.

Senroy'un [31], basamaklar halinde anlattığı maskeleme yöntemini daha sonraları Laila [24], bölgeler arası salınımların tanımlanması için geliştirerek

kullanmıştır. Laila bölgeler arası salınımların 0.1–1.0 Hz bandı içinde oldukça düşük frekanslarda olduğuna dikkat çekerek mevcut maskeleme yönteminin performansını iyileştirici adımlar atmıştır. İki durum tanımlayan Laila, Durum-1'in sağlanması halinde kendi önerdiği maskeleme yönteminin uygulanması gerektiğini, aksi takdirde Durum-2 olarak Senroy'un [31] tanımladığı yöntemin kullanılmasının faydalı olacağını belirtmiştir. Buna göre;

**Durum-1** : $R_{21} = 1.1$ ,  $R_1 = 1.5$ ,  $R_2=2$ ,  $R_{22}=2$  ve  $R_{23} = 0.5$  deneysel katsayılar olmak üzere;

- i-  $f_n \leq 1$  ve  $M_n < R_{21}M_{n-1}$
- ii-  $f_n > 1$  ve  $f_n \leq R_n f_{n-1}$
- iii-  $f_n > 1$  ve  $R_1 f_{n-1} < f_n < R_{n-1} f_{n-1}$  ve  $M_n < R_{22}M_{n-1}$
- iv-  $f_n > 1$  ve  $f_1 \geq R_2 f_{n-1}$  ve  $M_n < R_{23}M_{n-1}$

bu dört koşuldan herhangi birisi sağlanıyorsa Durum-1 sağlanmış demektir.

Bu durumda:

- a- Tüm EMD işlemi boyunca  $f_n$  frekans bileşeninin ayrıştırılması için üretilen maskeleme sinyali kullanılır.

$$mask_1(t) = M_n \times \sin 2\pi(f_n + f_{n-1})t \quad (5.8)$$

- b-  $x^+(t) = x(t) + mask_1(t)$  ve  $x^-(t) = x(t) - mask_1(t)$  olacak şekilde iki sinyal oluşturulur ve standart EMD yönteminin 1–4 basamakları uygulanarak tüm IMF'ler  $p_i^+(t)$  ve  $p_i^-(t)$  ile artık sinyaller  $r_n^+(t)$  ve  $r_n^-(t)$  olarak elde edilir.

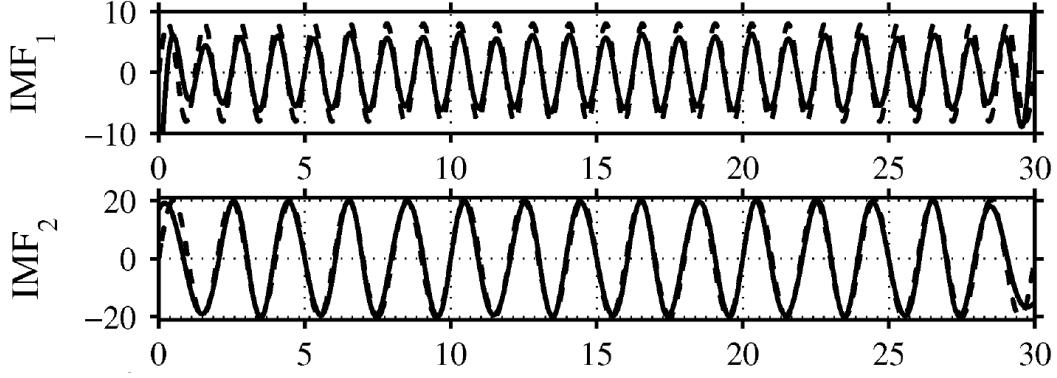
- c- IMF sinyalleri ve artık sinyaller;

$$p_i(t) = \frac{p_i^+(t) + p_i^-(t)}{2} \quad (5.9)$$

$$r_n(t) = \frac{r_n^+(t) + r_n^-(t)}{2} \quad (5.10)$$

şeklinde hesaplanır.

Laila [24], önerdiği yöntemi Şekil 5.1.9'da verilen sinyal için uygulamış ve elde ettiği sonuç Şekil 5.1.11'de verilmiştir. Bu grafikte maskeme yapılarak EMD işlemi sonucunda elde edilen IMF'lerin teorik sonuçlara oldukça yakın



**Şekil 5.1.11**  $x(t)$  sinyalinin maskeleye yöntemi uygulanarak EMD ile elde edilmiş IMF'leri [24]

olduğu gözlenmektedir.

**4- EMD İşlemi Durdurma Ölçütü (Stopping Criteria):** Huang [20], bir sinyalin IMF olarak tanımlanması için iki ölçütün sağlanması gerektiğini ifade etmiştir. Bu ölçütlerden bir tanesi sinyalin üst ve alt zarflarından elde edilen ortalama zarf değerinin sıfıra çok yakın olması gerektiğidir. Huang bu ölçütün sağlanıp sağlanmadığını standart sapma (SD) hesabına göre karar vermektedir.

Burada sıfıra yakın olma yani sinyalin ortalama zarfının ne kadar küçük olduğu göreceli bir kavramdır. Bu değer ilgililenen sinyalin genliğine göre çok küçük seçilmesinin, fazladan iterasyonlar yapılarak sinyalin gereksiz yere ayrıştırılmasına neden olduğu Rilling [25] tarafından dile getirilmiştir. Rilling, fazla ayrışımı engelleyecek yeni bir ölçüt tanımlamıştır. Rilling'e göre  $m(t)$ ,  $a(t)$  ve  $\sigma(t)$ ;

$$\text{i.} \quad m(t) = \frac{e_{\max(t)} + e_{\min(t)}}{2} \quad (5.11)$$

$$\text{ii.} \quad a(t) = \frac{e_{\max(t)} - e_{\min(t)}}{2} \quad (5.12)$$

$$\text{iii.} \quad \sigma(t) := \left| \frac{m(t)}{a(t)} \right| \quad (5.13)$$

olacak şekilde tanımlanır. Rilling, T analiz edilen sinyalin toplam süresi olmak üzere  $(1-\alpha).T$  süresi boyunca  $\sigma(t) < \theta_1$  ve geri kalan süre boyunca da  $\sigma(t) < \theta_2$  şartı sağlanana kadar EMD yönteminde ayrıştırma işlemine devam etmektedir. Burada  $\alpha \approx 0.05$ ,  $\theta_1 \approx 0.05$  ve  $\theta_2 \approx 10.01$  olarak alınmaktadır.

Rilling'in önerdiği bu yöntem, daha sonra başka araştırmacılar tarafından da ilgi görmüş ve SD yerine kullanılmaya başlanmıştır [32, 33, 52].

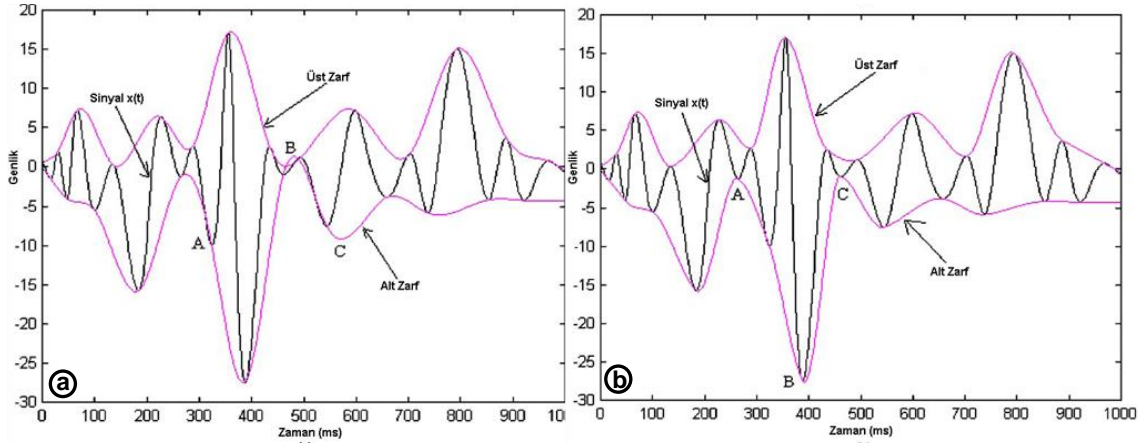
Bahsi geçen bu dört problem EMD yönteminin herhangi bir sinyal için uygulanabilir olmasını zorlaştıran etmenlerdir. Bunun dışında, EMD yönteminin performansını etkileyen ölçütlerde bulunmaktadır. EMD yönteminde alt ve üst zarfların doğru bir şekilde elde edilebilmesi için tepe ve çukur noktalarının tam olarak belirlenebilmesi gerekmektedir. Düşük örnekleme frekansına sahip sayısal sinyaller üzerinde yapılacak işlemlerde EMD yönteminin performansı düşmektedir. Performansı iyileştirmek için daha fazla örnek alınması gerekir. Bu sayede tepe ve çukur noktaları daha iyi belirlenmiş olacaktır. Ayrıca sinyalin zarfının belirlenmesinde kullanılan interpolasyon yöntemi EMD performansı açısından büyük öneme sahiptir. Huang [20] ve Rilling [25] "cubic-spline" yönteminin diğer interpolasyon yöntemlerinden (doğrusal veya polinomik interpolasyon) daha iyi olduğunu ifade etmektedir. "Cubic-Spline" dışındaki diğer yöntemlerin iterasyon sayısını artırdığı ve sinyalin fazla ayrıştırıldığından da bahsedilmektedir. Huang ve Rilling en iyi interpolasyon yöntemi olarak "cubic-spline" yöntemini önermesine karşın bazı araştırmacılar bu yöntem ile belirlenen zarfların "overshoot" ve "undershoot" oluşturduğundan bahsetmektedir. Bu araştırmacılardan bir tanesi de Qin [30]'dir. Qin, yeni bir zarf bulma yöntemi önermekte, bu yöntemin "cubic-spline" interpolasyon yönteminden daha iyi olduğunu iddia etmektedir. Qin, çalışmasında yer verdiği bir grafiğe göre "Akima" interpolasyon yönteminin "cubic-spline" yönteminden daha iyi olduğu sonucuna varmaktadır (Şekil 5.1.12).

Şekil 5.1.12'de görüldüğü gibi, "cubic-spline" yöntemi A, B ve C noktalarında "overshoot"lar oluşturmaktadır. Bu "overshoot"ların EMD yönteminin performansı üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu, Qin tarafından iddia edilmektedir.

## **5.2. EMD Yönteminin Bölgeler Arası Salınımların Tanımlanması için Kullanılmasını Zorlaştıran Etmenler ve Çözüm Önerileri**

Bölgeler arası salınım algılayıcı sistem gerçek zamanlı olarak çalışmalıdır. Bu yüzden salınım tanımlayıcı algoritma hızlı çalışmalı ve tüm işlemler belli bir işlem periyodunda bitmelidir. İteratif (recursive) tabanlı olan EMD'de, sinyalde bulunan





**Şekil 5.1.12** (a) “Cubic-spline” interpolasyon yöntemi ile sinyalin zarfları  
(b) “Akima” interpolasyon yöntemi ile sinyalin zarfları [30]

bileşenlerin durumuna göre iterasyon sayısı değişmekte, sinyal içinde yüksek frekanslı çok sayıda bileşen bulunması durumunda işlem süresi çok artmaktadır. Bu haliyle EMD, gerçek zamanlı bir uygulamada kullanmak için ideal bir yöntem değildir. Ayrıca EMD yönteminin tam olarak çözüm bulunamamış olan durdurma ölçütü (stopping criteria), sınır değerler problemi (boundary effects) ve kiplerin karışması (mode-mixing) problemleri de EMD'nin bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, EMD yönteminin gerçek zamanlı bir sistem için uygulama zorluklarını en az aza indirmek adına bazı yöntemler geliştirilmiştir. Öncelikle incelenecek sinyal ön filtreleme (pre-filtering) işlemine tabi tutularak EMD işleminin iterasyon sayısının önemli miktarda azaltılması hedeflenmiştir. İlgilenen frekans bandının 0.1–0.2 Hz aralığı olduğu göz önüne alındığında, düşük frekanslı bileşenler Bölüm 3.1’de anlatılan ve FBMSWA’da da kullanılan “wash-out” filtre ile ve yüksek frekanslı bileşenler ise kesim (cut-off) frekansı 1.2 Hz olan alçak geçiren bir filtre kullanılarak sinyalden atılmıştır. Bu sayede hem EMD işlemi sonucunda elde edilecek kip (mod) sayısı hem de sinyaldeki uç değer (extreme) sayısı azalmış, dolayısıyla EMD işleminde iterasyon sayısı da azaltılmıştır (Şekil 5.2.1). Böylece EMD gerçek zamanlı bir uygulama için daha uygun hale getirilmiştir.

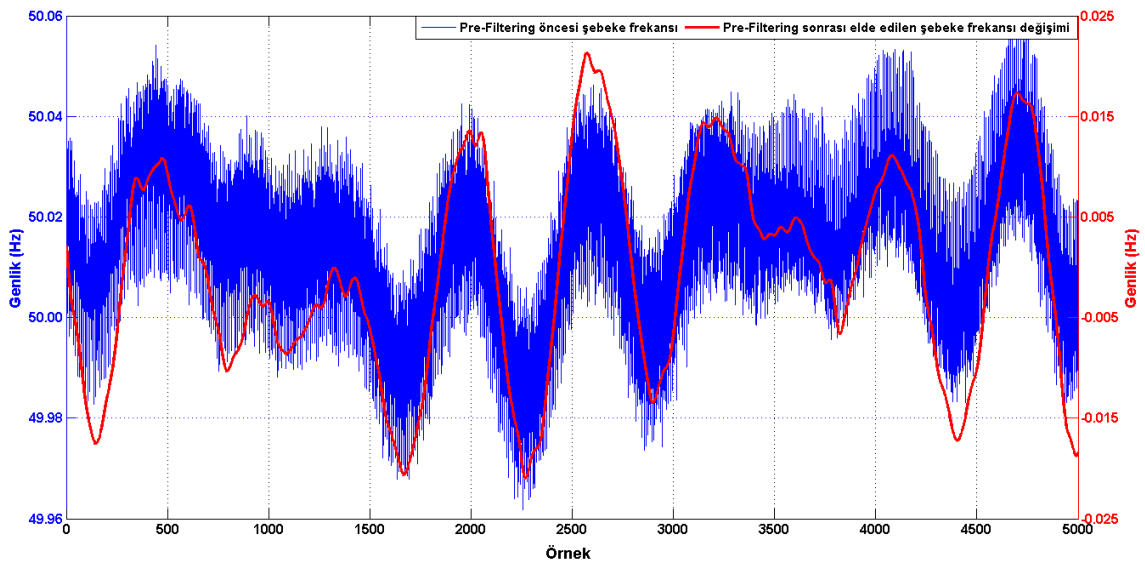
EMD yönteminin bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılmadan önce durdurma ölçütüne karar verilmelidir. Durdurma ölçütü sinyallerin ayrıştırılmaması

veya aşırı ayrıştırılması gibi istenmeyen sonuçlara sebep olmaktadır. Bu yüzden bu tez çalışmasında Rilling [25] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Huang [20]'ın önerdiği standart sapmaya dayalı durdurma ölçütünün aşırı ayrışmaya sebep olduğu birçok araştırmacı tarafından da dile getirildiği için tercih edilmemiştir.

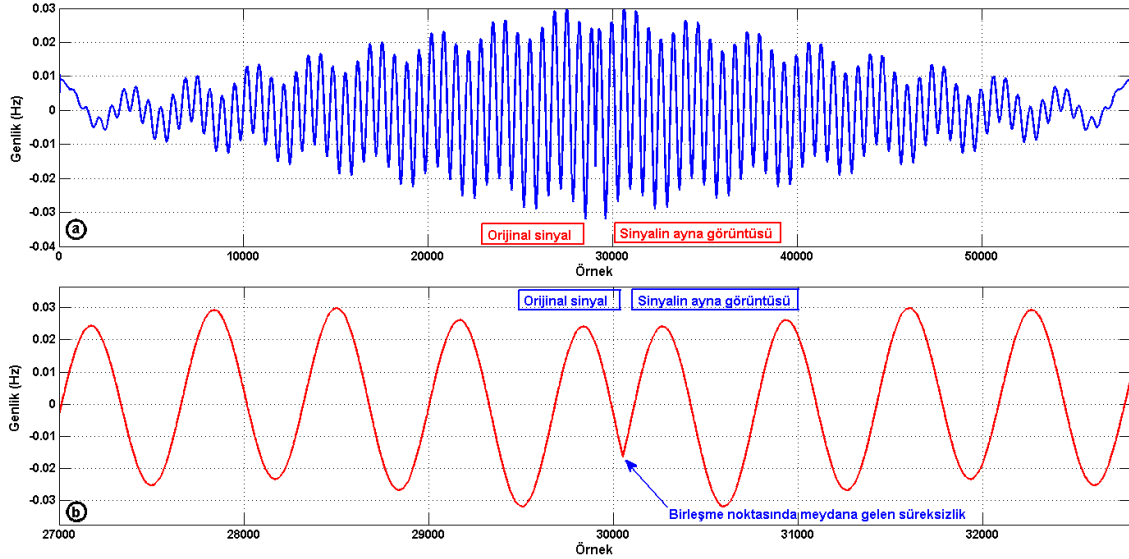
EMD'nin kullanılmasında diğer bir zorluk sınır değerler problemidir. Bu sorunun Zeng [27]'in önerdiği şekilde sinyalin ayna görüntüsünü sinyalle ekleyerek çözüleceği düşünülmüştür. Ancak bu yöntemin, yeni elde edilen sinyalde süreksizliklere yol açtığı ya da sinyalin karakteristiğini bozduğu için orijinal sinyalde olmayan kiplerin ayrıştırılmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 5.2.2).

Şekil 5.2.2 (b)'de sinyal ile ayna görüntüsünün birleştiği yerdeki süreksizlik gösterilmiştir. Bu yüzden bu sorunun çözümü için Şekil 5.1.7'de gösterilen Rilling [25]'in önerdiği yöntem kullanılmıştır.

Kiplerin karışması (mode-mixing) problemi EMD yönteminin bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılmasını zorlaştıran diğer bir etmendir. Kiplerin karışması aralıklılık veya oktav problemleri nedeniyle oluşabilir. Genellikle elektrik iletim şebekesinde birbirine çok yakın iki farklı bölgeler arası salınım kipinin aynı anda gerçekleşmesi beklenmemektedir. Eğer elektrik şebekesinde üst üste olaylar



**Şekil 5.2.1** EMD işlemi öncesi “pre-filtering” aşamasına giren ve çıkan sinyaller

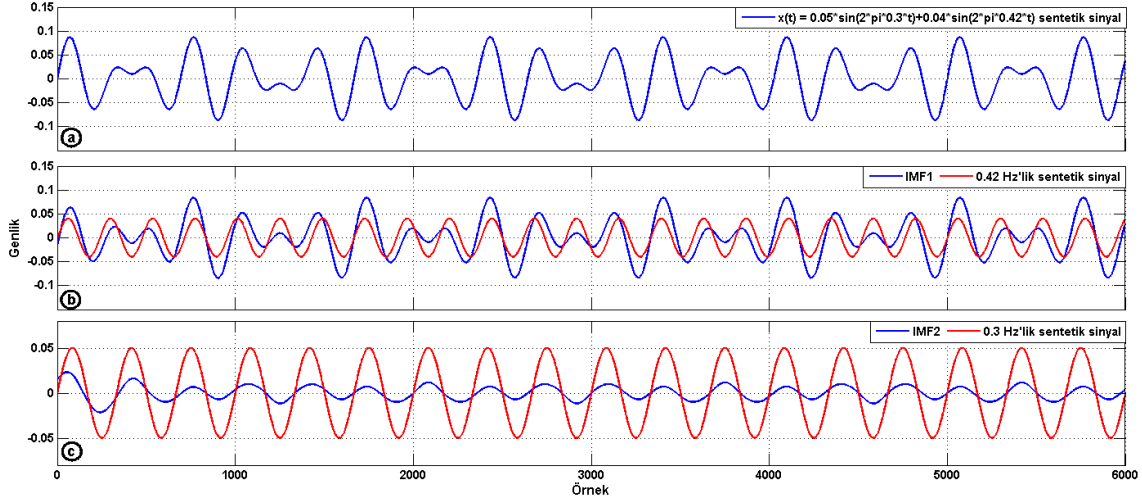


**Şekil 5.2.2** (a) Sınır değer problemini aşmak için sinyale ayna görüntüsünün eklenmiş hali (b) Sinyal ile ayna görüntüsünün birleşim yerinin yakınlaştırılmış hali

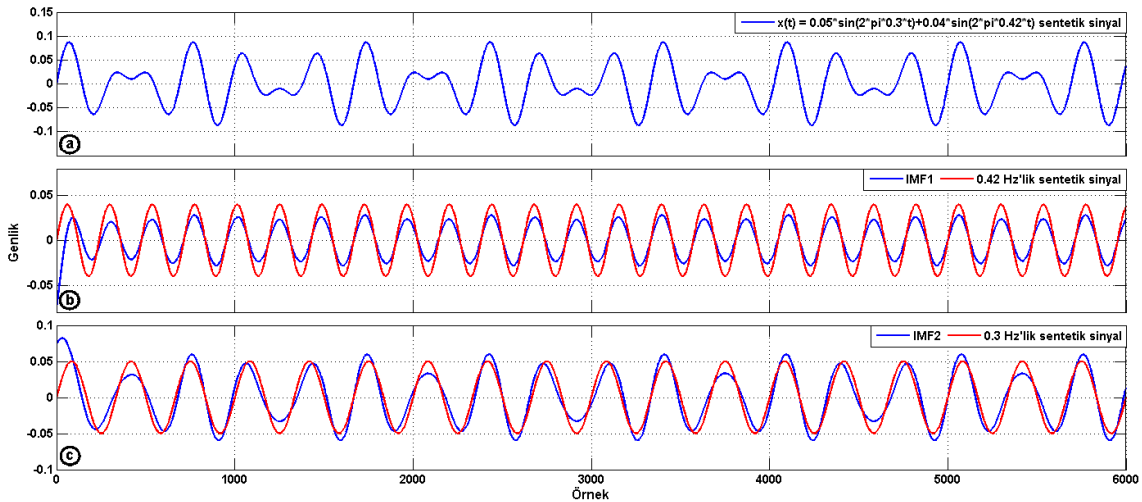
meydana geliyorsa salınımın frekansı değişmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada kiplerin karışması probleminin aralıklılık sorunundan kaynaklanacağı düşünülmektedir. Bu sorunun çözümü için Deering'in öncülük ettiği maskeleme yönteminin [29] kullanılabileceğine karar verilmiş ve daha sistematik bir yaklaşım sunduğu için Senroy'un tanımladığı maskeleme adımları [31] uygulanarak bir takım testler yapılmıştır. İlk olarak  $x_1(t) = 0.05 \times \sin 2\pi(0.3)t + 0.04 \times \sin 2\pi(0.42)t$  sinyalinin ayrıştırılması için maskeleme yöntemi test edilmiştir. Maskeleme olmaksızın EMD yöntemi  $x_1(t)$  sinyalini düzgün olarak bileşenlerine ayıramamaktadır (Şekil 5.2.3). Fakat maskeleme yöntemi kullanılarak yapılan EMD işlemi kabul edilebilir bir genlik ve faz hatası ile sinyali bileşenlerine ayrıştırabilmektedir (Şekil 5.2.4). Ancak ayrıştırılacak sinyal  $x_2(t) = 0.5 \times \sin 2\pi(0.25)t + 0.8 \times \sin 2\pi(0.2)t$  ele alındığında maskeleme yöntemi kullanılarak elde edilen IMF'ler ile orijinal sinyaller arasında hem genlik ve hem de faz olarak ciddi farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.2.5).

Deering ve Senroy'un ortaya attıkları maskeleme yöntemi yeni bir yaklaşım getirmiş olsa da sinyalleri yeterince iyi şekilde ayrıştırılamamaktadır. Hatta bazı durumlarda sinyalleri daha da bozmaktadır. Maskeleme yönteminde kullanılan katsayılar deneysel olarak bulunmuştur ve en uygun değerler değildir. Bir sinyal

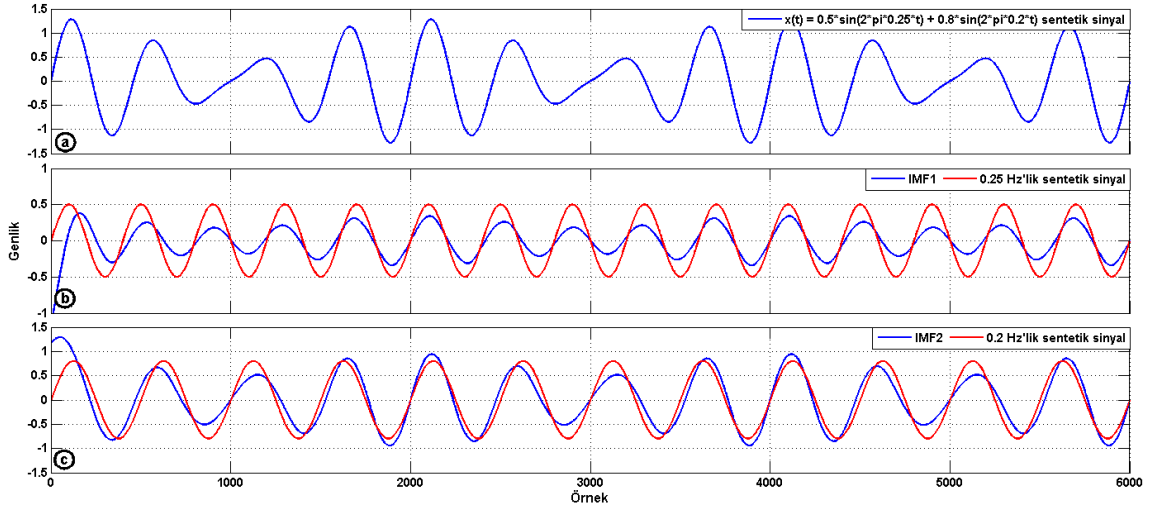
için uygun sonuçlar üreten katsayılar başka bir sinyal için oldukça hatalı sonuçların oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden maskeleye yöntemi geliştirilememektedir. Ayrıca sentetik sinyaller ile maskeleye yönteminin başarılı sayılabileceğini düşündürecek örneklerin olmasına karşın gerçek sinyaller ile bu yöntemin hiç şansının olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 5.2.6'da gerçek şebeke frekansı değişim sinyali EMD yöntemi ile kiplerine ayıramamaktadır. Bu gerçek



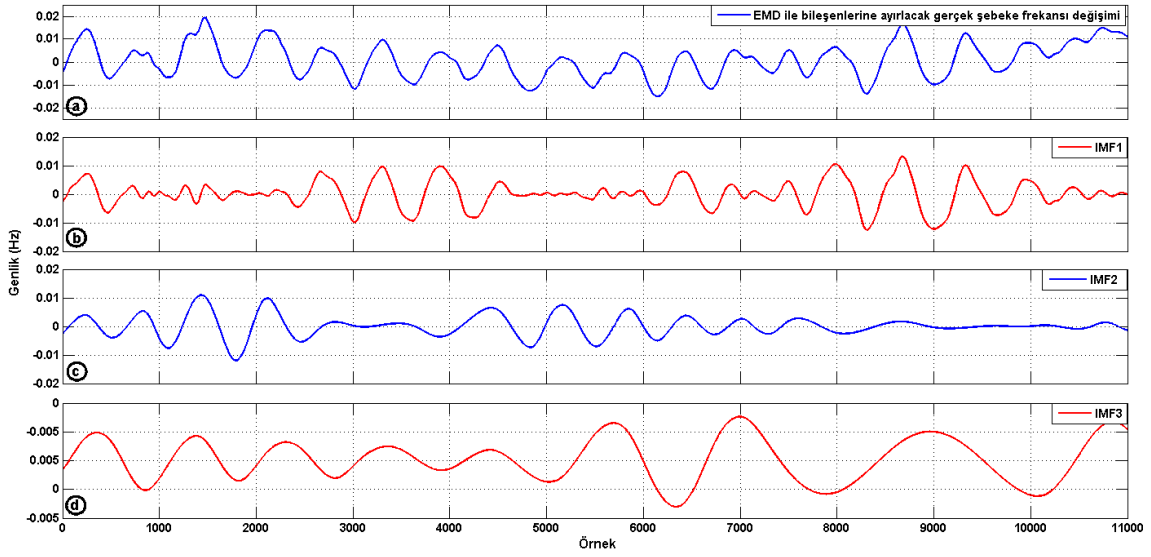
**Şekil 5.2.3** (a) Standart EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal  $x_1(t)$  (b) Standart EMD sonucunda elde edilen  $IMF_1$  ve  $x_1(t)$  sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Standart EMD sonucunda elde edilen  $IMF_2$  ve  $x_1(t)$  sinyalinin 0.3Hz'lik sentetik bileşeni



**Şekil 5.2.4** (a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal  $x_1(t)$  (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen  $IMF_1$  ve  $x_1(t)$  sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen  $IMF_2$  ve  $x_1(t)$  sinyalinin 0.3Hz'lik sentetik bileşeni



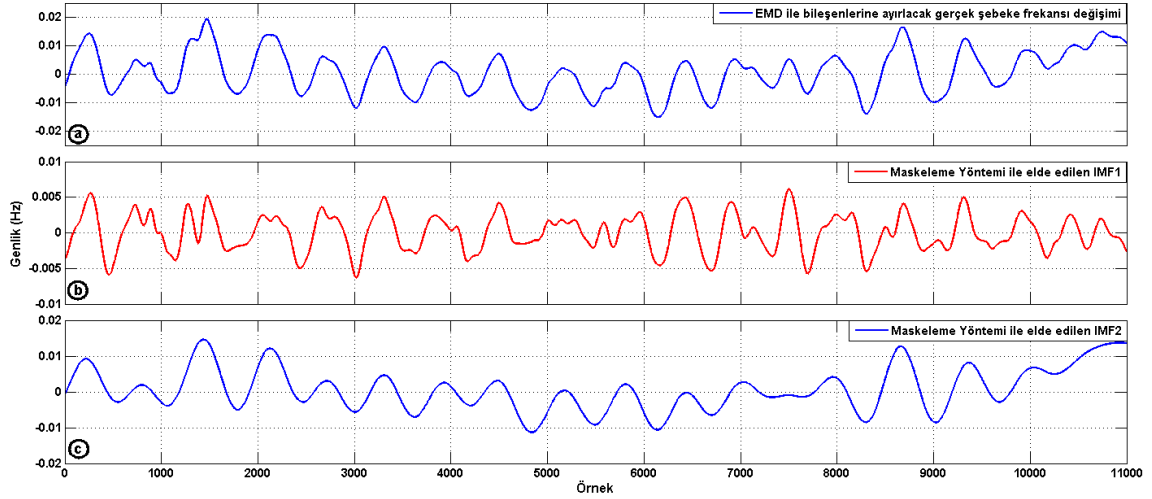
**Şekil 5.2.5** (a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak sentetik sinyal  $x_2(t)$  (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen  $IMF_1$  ve  $x_2(t)$  sinyalinin 0.42 Hz'lik sentetik bileşeni (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen  $IMF_2$  ve  $x_2(t)$  sinyalinin 0.3Hz'lik sentetik bileşeni



**Şekil 5.2.6** (a) Standart EMD ile bileşenlerine ayrılacak gerçek sinyal (b) Standart EMD sonucunda elde edilen  $IMF_1$  (c) Standart EMD sonucunda elde edilen  $IMF_2$  (d) Standart EMD sonucunda elde edilen  $IMF_3$

şebeke frekans değişim sinyaline maskeleyme uygulandığında ise sonuç değişmemekte hatta daha kötü sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 5.2.7).

Diğer bir konu ise hangi interpolasyon yönteminin kullanılacağıdır. Birçok araştırmacı tarafından kabul gören “cubic-spline” interpolasyon yöntemi doğrusal interpolasyon ve “Akima [30]” interpolasyon yöntemleri birlikte test edilmiştir. Elde



**Şekil 5.2.7** (a) Maskeli EMD ile bileşenlerine ayrılacak gerçek sinyal (b) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF<sub>1</sub> (c) Maskeli EMD sonucunda elde edilen IMF<sub>2</sub>

edilen sonuçlara göre “cubic-spline” interpolasyon yönteminin iterasyon sayılarını oldukça azalttığı ve sinyalleri daha iyi ayırttığı görülmüştür. Bu yüzden EMD ile bölgeler arası salınımların tanımlanmasında “cubic-spline” interpolasyon yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

Sonuç olarak EMD yönteminin bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılmasına engel olabilecek yukarıda sayılan birçok soruna çözümler bulunmuştur. Sadece kiplerin karışması problemi EMD'nin bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılmasının önündeki en büyük engel olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında bu problemin giderilmesi için özgün bir yöntem geliştirilmiştir.

### 5.3 Önerilen Hedef Odaklı Saflaştırma

Bölgeler arası salınım tanımlama sistemi şebeke frekansı üzerinde analizler yaparak FACTS cihazlara gerekli komutları gerçek zamanlı olarak göndermelidir. EMD iteratif bir yöntemdir ve analiz edilen sinyale göre iterasyon sayısı değişiklik göstermektedir. Bu da gerçek zamanlı çalışacak bir sistem için önemli bir problemdir. Bu sorunu en aza indirmek için sinyal, EMD işleminden önce ilk olarak yüksek geçiren ve daha sonra da alçak geçiren bir filtre ile “pre-filtering” işlemine tabi tutulmaktadır. EMD'nin bölgeler arası salınım tanımlama sisteminde

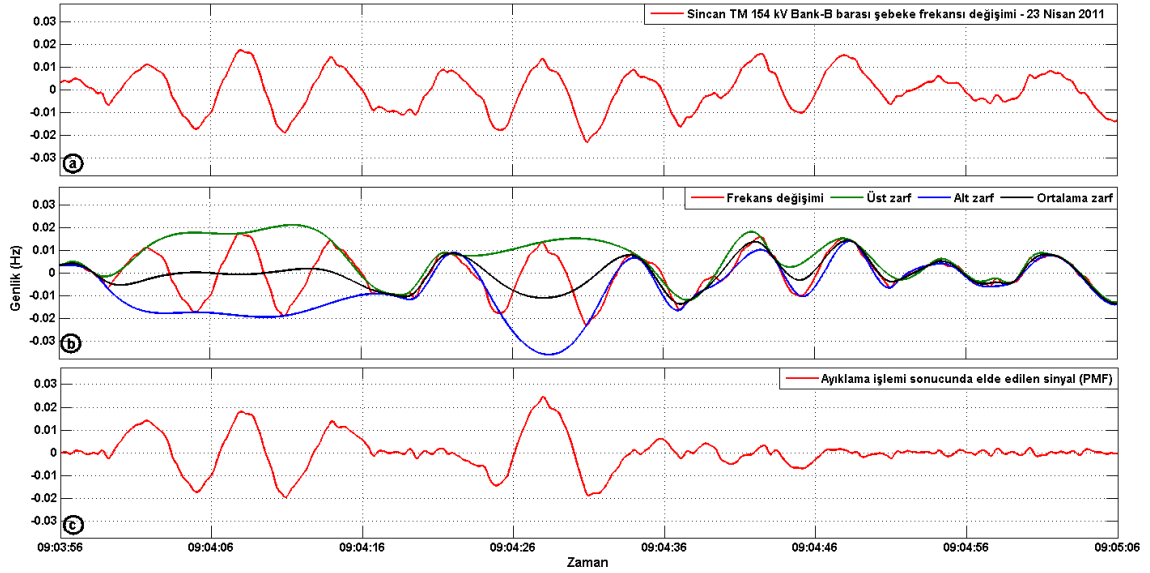
kullanılmasının önündeki sorunların birçoğu literatürde bahsedilen yöntemler ile kısmi olarak giderilebilmektedir. Ancak kiplerin karışması probleminin literatürde bahsedilen yöntemlerle genelleştirilememesi ve hatta bazen daha kötü sonuçlar doğurması bu sorunun aşılması için yeni bir yöntemin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Yapılan çalışmalarda elektrik şebekesinde ölçülen gerçek sinyallerin EMD ile bileşenlerine ayrılmaya çalışılırken meydana gelen kiplerin karışması sorununa, aralıklılık probleminin neden olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni analiz edilen sinyalde sinyalin sürekli bileşenleri üzerinde süresiz sinyal bileşenlerinin bulunmasıdır. Bu süresiz sinyal bileşenleri, sinyalin sürekli bileşenlerinin uç değer (extreme) noktalarına ilaveten bölgesel olarak fazladan uç değer noktalarının oluşmasına neden olmaktadır. Eğer bu yüksek frekanslı bileşenler sinyal içinde kesintisiz bir şekilde bulunmuş olsaydı, bu sinyallerden kaynaklı uç değer noktaları baz alınarak sinyal zarfı oluşturulmuş olacak ve EMD bu yüksek frekanslı sinyalleri IMF olarak ayrıştırabilecekti. Ancak yüksek frekanslı sinyaller süresiz ise yüksek frekanslı sinyallerin bulunduğu bölgelerde sinyal zarfı yüksek frekanslı sinyallerin eğilimini (trend) takip ederken, yüksek frekanslı sinyallerin bulunmadığı yerlerde ise ana sinyalin eğilimini takip edecektir. Ayıklama işlemi ile elde edilen ortalama sinyal zarfının ana sinyalden çıkarılması sonucu elde edilen yeni sinyalde (PMF) hem yüksek frekanslı bileşenler ve hem de sinyalin temel frekans bileşenlerinden biri aynı anda ayrıştırılmaktadır. Bu da kiplerin karışmasına sebep olmaktadır.

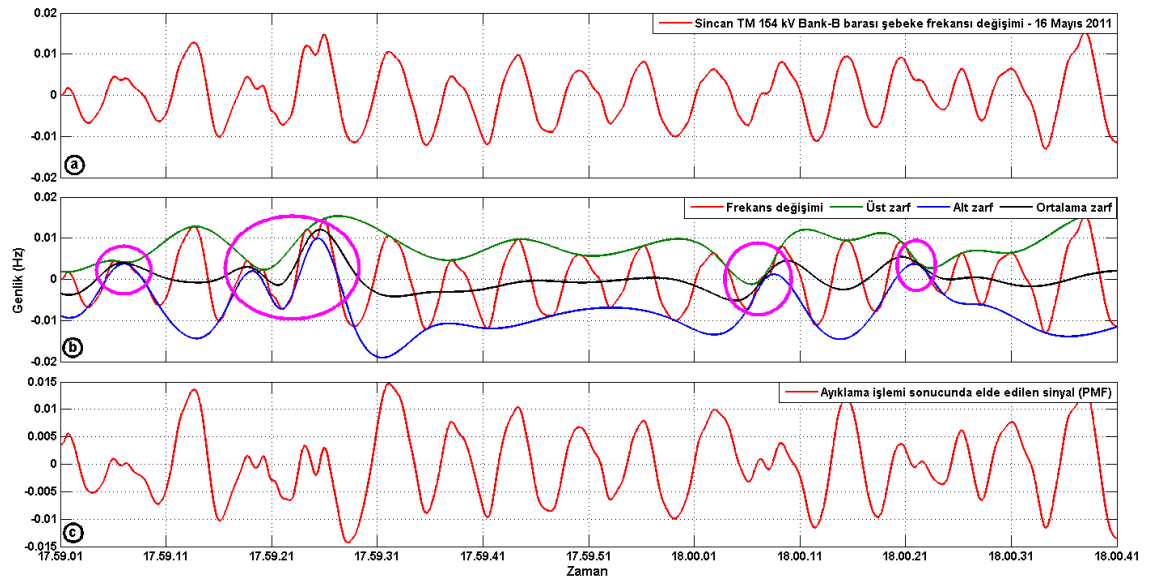
Şekil 5.3.1'de gerçek bir şebeke frekansı değişimi verilmiştir. Verilen frekans değişimi grafiğinin 09:04:36–09:05:06 zaman periyodu arasında oluşturulan sinyalin zarfı, sinyalde bulunan yüksek frekanslı süresiz bileşenlere göre oluşturulmaktadır. Oysa 09:03:56–09:04:16 zaman periyodu aralığında ise sinyalin zarfı sürekli bileşenlerine göre elde edilmektedir (Şekil 5.3.1 (b)). İlk ayıklama işlemi sonucunda elde edilen grafikte birden fazla frekans kipinin elde edildiği kolaylıkla görülmektedir (Şekil 5.3.1 (c)). Benzer şekilde süresiz kiplerden dolayı sinyalin zarfının hatalı olarak elde edildiği diğer bir örnek ise Şekil 5.3.2'de verilmiştir. Şekil 5.3.2 (b)'de daire içine alınmış bölgelerde süresiz kipler bulunmakta ve oluşturulan sinyal zarfı bu bölgelerde süresiz kipleri takip

etmektedir. Bahsedilen bu sorunu çözmek için hedef odaklı bir saflaştırma yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem bu tez çalışmasının literatüre en önemli katkısıdır.

Önerilen hedef odaklı saflaştırma yönteminde, incelenen sinyalde kiplerin karışmasına sebep olan süreksiz bileşenler arındırılacaktır. Süreksiz bileşenlerden



**Şekil 5.3.1** (a) Sincan TM 154 kV Bank-B barasında 23 Nisan 2011’de kayıt edilmiş frekans değişimi (b) Sinyalin zarfları (c) İlk ayıklama işlemi sonucunda elde edilen PMF



**Şekil 5.3.2** (a) Sincan TM 154 kV Bank-B barasında 16 Mayıs 2011’de kayıt edilmiş frekans değişimi (b) Sinyalin zarfları (c) İlk ayıklama işlemi sonucunda elde edilen PMF



arındırılan sinyal daha sonra EMD işlemine tabi tutularak sinyali oluşturan sürekli bileşenler birbirinden ayrıştırılacaktır. Böylece kiplerin karışması problemi çözüldüğü için EMD yöntemi bölgeler arası salınımların tanımlanması için kullanılabilir.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminde bölgeler arası salınımların frekansı 0.1–0.2 Hz aralığındadır. Her 10 ms’de bir şebeke frekansı hesaplandığı için, 0.1 Hz’lik bir değişim 1000 örnek ile, 0.2 Hz’lik bir değişim ise 500 örnek ile temsil edilir. Yani ilgilenilen en yüksek frekanslı sinyal için ardışık iki tepe veya iki çukur noktası arası en az 500 örnek olmalıdır. Dolayısıyla incelenen sinyalde ardışık iki tepe veya iki çukur noktası arası 500 örnekten daha az ise, sinyal içinde 0.2 Hz’den daha yüksek frekanslı bir değişimin olduğu anlamına gelir. 0.2 Hz’den yüksek frekanslı değişimler ilgilenen bant dışında olduğu için sürekli veya süreksiz olduğuna bakılmaksızın sinyalden iteratif bir şekilde arındırılır.

Önerilen hedef odaklı saflaştırma yöntemi;  $x(t)$  gerçek değerli bir sinyal olmak üzere,  $r(t) = x(t)$  olarak alınır ve daha sonra Saflaştırma Eşik Değerine (SED) karar verilir. Saflaştırma eşik seviyesi ilgilenilen bandın zaman ekseninde sağ tarafına en yakın frekansa karşılık gelen örnek sayısı olarak belirlenebilir. Böylece aşağıda maddeler halinde anlatılan iteratif saflaştırma adımları takip edilerek sinyal saflaştırılır:

- 1-  $r(t)$ 'ye ait tüm bölgesel tepe ve çukur noktaları bulunur.
- 2- Ardışık tüm tepe ve çukur noktaları arası süre örnek sayısı bazında hesaplanır. Bu sürelerden en az olan değer ( $min\_t$ ) tespit edilir. Eğer  $min\_t > SED$  ise bu durumda saflaştırmaya gerek yoktur ve 7. adıma atlanabilir. Aksi takdirde saflaştırma yapılmalıdır ve 3. adımdan saflaştırma işlemine devam edilir.
- 3- Tespit edilen tepe ve çukur noktalarında ardışık iki tepe veya iki çukur arasındaki süre  $min\_t$  değerinden büyük ise, bu iki tepe veya iki çukur noktaları arasındaki en büyük süre  $min\_t$  olacak şekilde sanal (artificial) tepe ve çukur noktaları atanır.

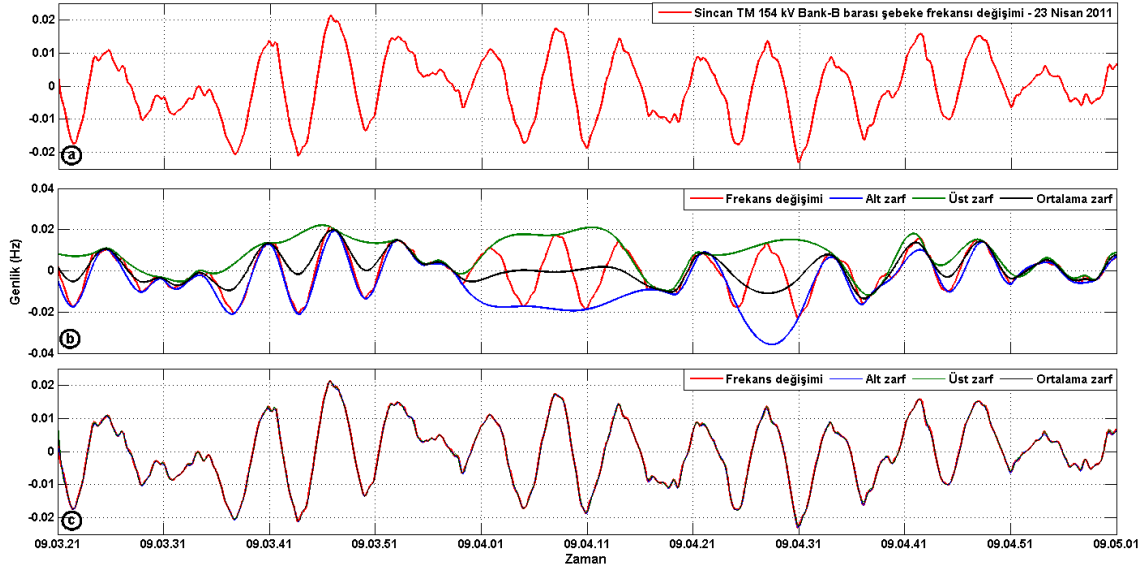
- 4- Elde edilen sanal tepe ve çukurlar ile gerçekte olan tepe ve çukur noktaları birlikte kullanılarak sinyale ait üst zarf  $e_{max}(t)$ , alt zarf  $e_{min}(t)$  ve ortalama zarf  $m(t) = (e_{max}(t) + e_{min}(t))/2$  elde edilir.
- 5-  $p(t) = r(t) - m(t)$  olacak şekilde  $p(t)$  elde edilir ve  $r(t) = p(t)$  olarak atanır.
- 6-  $min\_t > SED$  olduğu sürece 1–5 arası adımlar tekrarlanır.
- 7-  $x(t) = r(t)$  olarak atanır.

Bölgeler arası salınımların tanımlanmasında ilgilenilen bandın en yüksek frekanslı bileşeni 0.2 Hz'dir. Dolayısıyla SED olarak 0.21 Hz'e karşılık gelen 476 değeri seçilebilir. Böylelikle saflaştırma işleminde  $min\_t > 475$  olup olmadığına bakılabilir. Eğer  $min\_t$  değeri 500 seçilmiş olsaydı incelenen sinyalde 0.2 Hz'lik bileşeni de saflaştırma işlemine tabi tutularak EMD'ye girecek sinyalden atılacaktı. Bu yöntemin hedef odaklı olması SED ile ilgilidir. Şayet ilgilenilen bant 0.1–0.4 Hz arası olsaydı  $min\_t > 244$  olup olmadığı kontrol edilmeliydi. Dolayısıyla SED ilgilenilen banda göre değiştirilebilir ve bu sayede önerilen yöntem genelleştirilebilmektedir. Şekil 5.3.3–5'te 23 Nisan 2011 Sincan TM 154 kV Bank-B barasında kayıt edilmiş frekans değişimi, frekans değişiminin saflaştırma aşamaları ve saflaştırılmış hali verilmiştir.

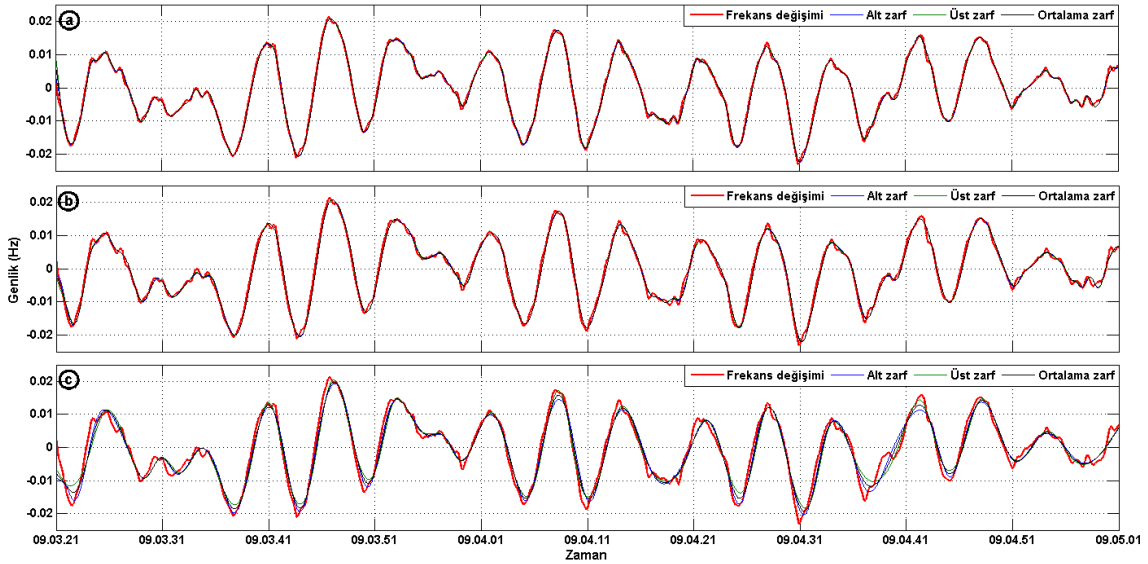
BASTS ile farklı zamanlarda tanımlanmış üç farklı bölgeler arası salınımına ait şebeke frekansı üzerinde saflaştırma işlemi yapılmış ve bunlara ait sonuçlar Şekil 5.3.6–8 arasındaki grafikler ile verilmiştir. Bu grafiklerde saflaştırmanın ne kadar etkili olduğu açıkça görülmektedir. Saflaştırma ile ilgili verilen örneklerde saflaştırma için kaç adet iterasyon yapıldığı ise Çizelge 5.3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 5.3.1** Değişik sinyalleri saflaştırmak için gerekli iterasyon sayısı

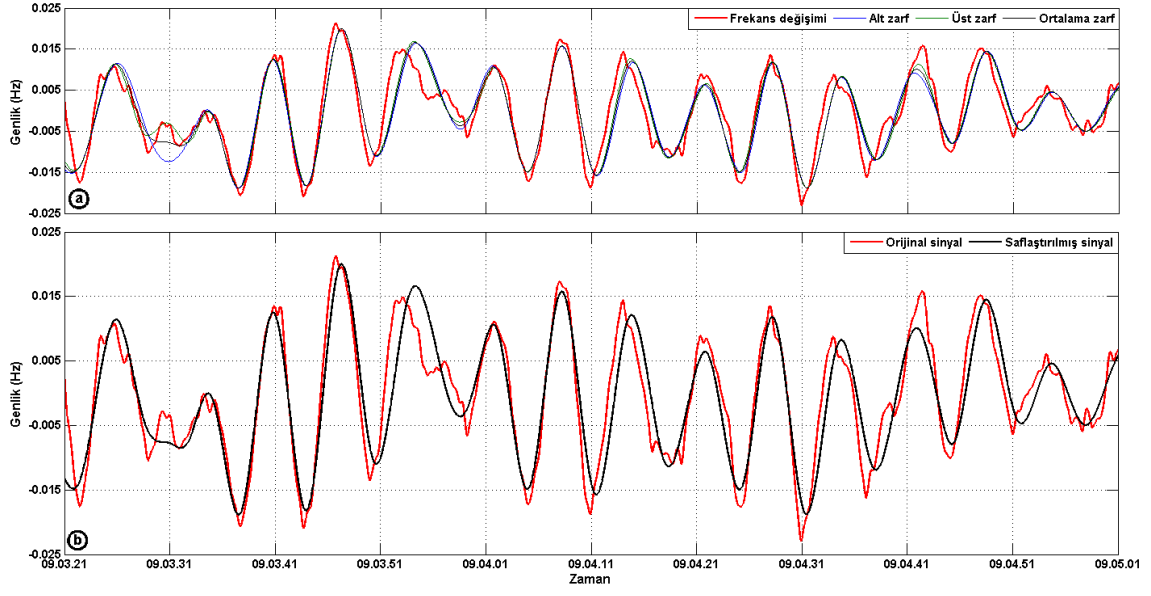
Şekil Adı	Sinyalin uzunluğu (sn)	İterasyon sayısı
Şekil 5.3.3	100	16
Şekil 5.3.6	100	21
Şekil 5.3.7	60	16
Şekil 5.3.8	50	15



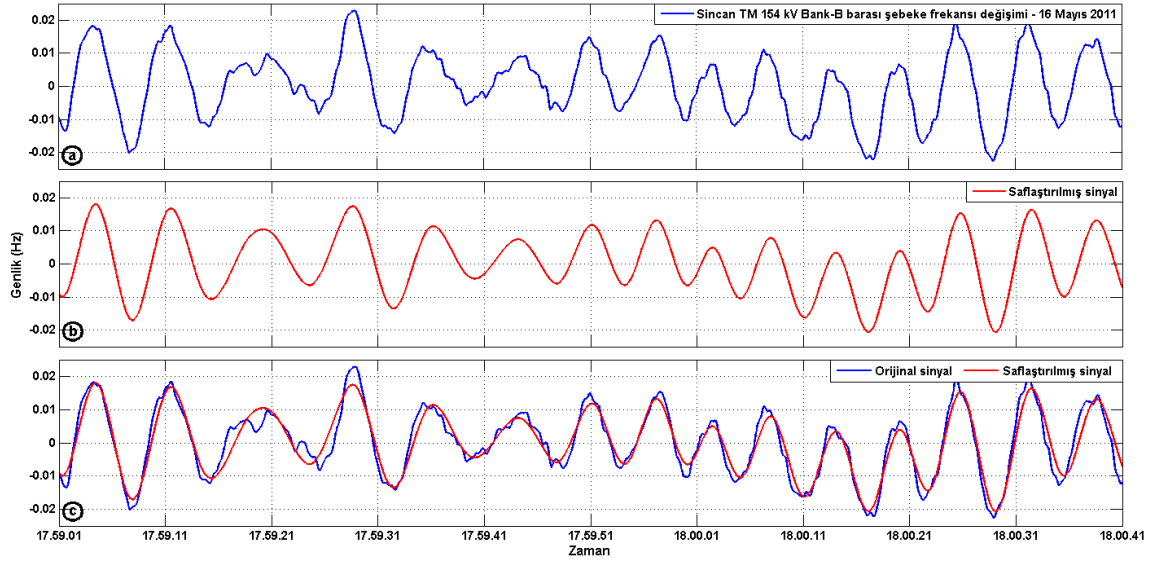
**Şekil 5.3.3** (a) 23 Nisan 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Safılaştırma 1. iterasyon 1. aşama (c) Safılaştırma 1. iterasyon 4. aşama (sanal ve gerçek uç değerlere göre sinyalin zarfı)



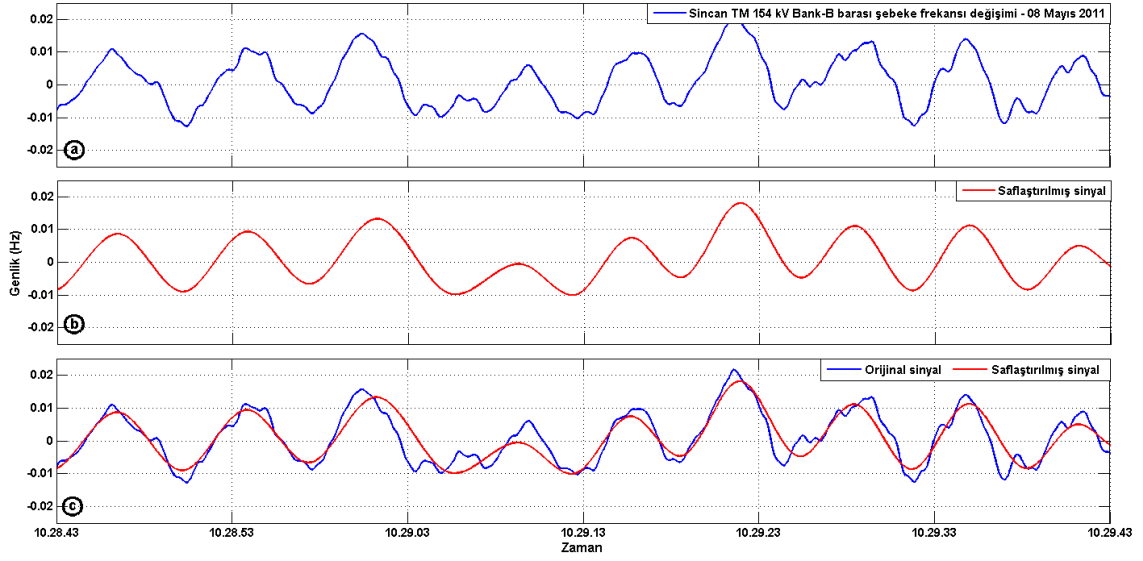
**Şekil 5.3.4** (a) Safılaştırma 5. iterasyon 4. aşama (b) Safılaştırma 9. iterasyon 4. aşama (c) Safılaştırma 13. iterasyon 4. Aşama



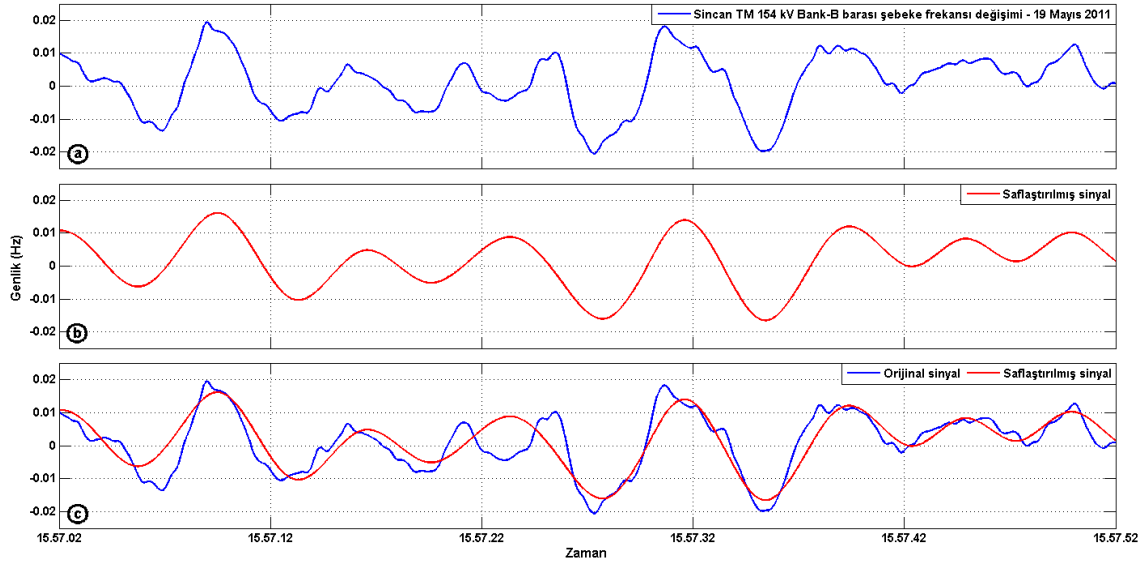
**şekil 5.3.5** (a) Saflaştırma 16. (son iterasyon) 4. aşama (b) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal



**şekil 5.3.6** (a) 16 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekans değişimi (b) Saflaştırılmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaştırılmış sinyal



**Şekil 5.3.7** (a) 08 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaşmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaşmış sinyal



**Şekil 5.3.8** (a) 19 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı değişimi (b) Saflaşmış sinyal (c) Saflaştırılacak sinyal ve saflaşmış sinyal

#### 5.4. Hedef Odaklı Saflaştırma Kullanılarak EMD Tabanlı Bölgeler Arası Salınım Tanımlama Yöntemi

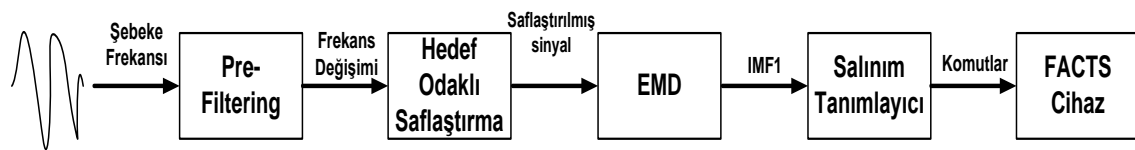
EMD yönteminin yapısal sorunlarının bir kısmı literatürde bahsedilen yöntemler ile diğer bir kısmı da bu çalışmada geliştirilen yöntemler ile giderilmiştir. Belirlenen bu

yöntemler bir araya getirilerek bölgeler arası salınımların tanımlanması için kullanılmıştır. Oluşturulan yeni bölgeler arası salınım tanımlayıcı algoritmaya ait blok şeması Şekil 5.4.1’de verilmiştir.

Elektrik iletim sisteminde ölçülen şebeke frekansı hem alçak geçiren ve hem de yüksek geçiren bir filtre ile art arda filtrelenmektedir. “Pre-filtering” adı verilen bu aşamanın ilgilenilen sinyal bandında sinyal genliğine kayda değer bir etkisi yoktur. Ancak faz açısında  $\sim 5^\circ$ ’lik bir gecikmeye sebep olmaktadır. Geleneksel filtrelerden geçen şebeke frekansı, genişliği 4000 örnek olan FIFO tipi bir pencereye girer.

Böylece ilgilenilen en düşük frekans değeri olan 0.1 Hz’lik bir bölgeler arası salınım oluşması durumunda pencere içinde salınıma ait 4 periyot gözlenebilir. Oluşturulan pencere içindeki sinyal hedef odaklı saflaştırma yöntemi ile 0.2 Hz’den yüksek frekanslı kiplerden arındırılarak EMD işlemine tabi tutulur. EMD işlemi sonucunda elde edilen ilk IMF değeri ya bölgeler arası salınım kipidir ya da daha düşük frekanslı kiplerdendir. Bunun nedeni “pre-filtering” ve hedef odaklı saflaştırma aşamalarından sonra sinyalde kalabilecek en yüksek frekanslı kipi 0.2 Hz’lik frekansa sahip olmasıdır. EMD metodunun yapısı gereği, ilk IMF her zaman en yüksek frekanslı kipi bulundurduğu için  $IMF_1$ ’in incelenmesi yeterlidir.  $IMF_1$ ’in frekansı 0.1–0.2 Hz aralığında ise ve sinyalin genliği belirlenen eşik seviyesinden büyük ise  $IMF_1$ ’in fazına göre FACST cihaza komutlar gönderilmektedir.

Geliştirilen bu yöntem hem sentetik sinyaller hem de FBMSWA yöntemi ile geliştirilen BASTS’ın kayıt ettiği gerçek bölgeler arası salınım verileri ile test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda Hedef Odaklı Saflaştırma Kullanılarak EMD Tabanlı Bölgeler Arası Salınım Tanımlama Yöntemiyle (Target Based Refinement Empirical Mode Decomposition, TBR-EMD) standart EMD yönteminin

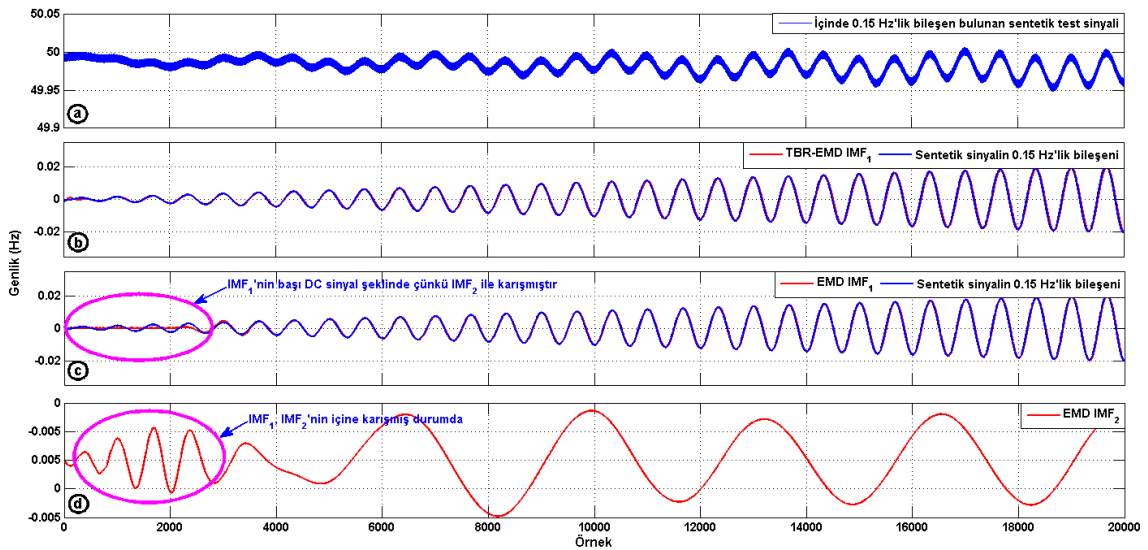


**Şekil 5.4.1** Hedef odaklı saflaştırma kullanılarak EMD tabanlı bölgeler arası salınım tanımlama yöntemi blok şeması

ayrıştıramadığı sinyallerin ayrıştırabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca FBMSWA yöntemiyle fazı tam olarak doğru bulunamayan sinyallerin fazı da daha hassas olarak elde edilebilmektedir.

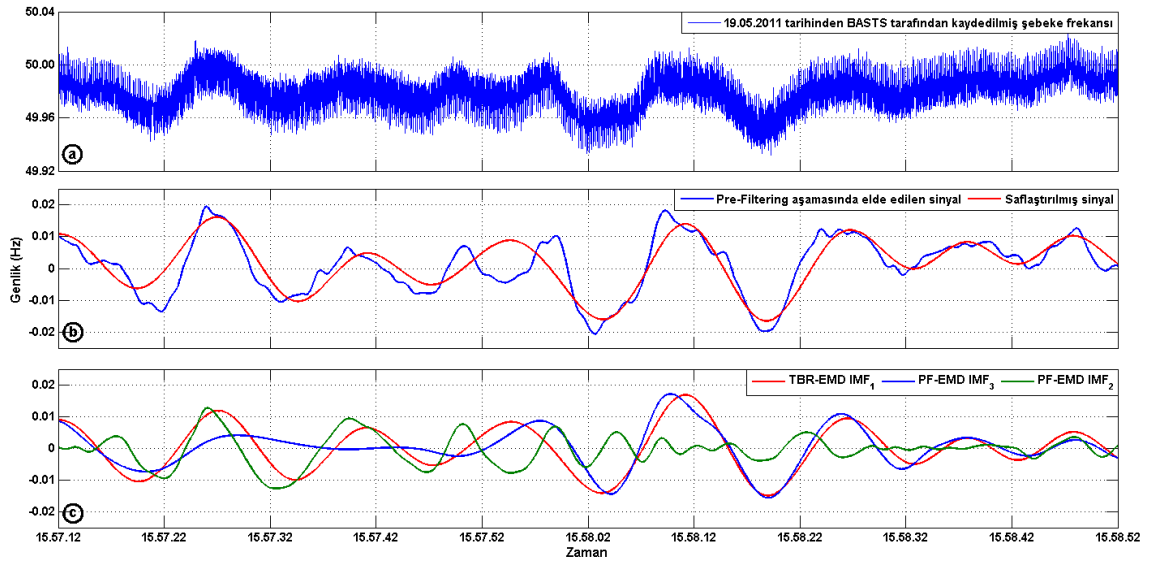
Geliştirilen yöntem ilk olarak Şekil 5.4.2'de verilen sentetik sinyal üzerinde denenmiştir. TBR-EMD yöntemi, sinyalde bulunan 0.15 Hz frekanslı salınım kipini diğer kiplerden “pre-filtering” aşamasından kaynaklanan  $\sim 5^\circ$  bir faz gecikmesiyle ayıştırmıştır. “Pre-filtering” aşamasından sonra elde edilen sinyal hedef odaklı saflaştırma işlemine tabi tutulmadan EMD yöntemi uygulanması (PF-EMD) durumunda 0.15 Hz'lik frekans bileşeni IMF<sub>1</sub>'de elde edilmektedir (Şekil 5.4.2 (c)). Ancak IMF<sub>1</sub>'in ilk 2500 örneklilik bölümü sentetik sinyalin 0.15 Hz'lik bileşeniyle örtüşmemektedir. Bunun nedeni IMF<sub>1</sub>'in, IMF<sub>2</sub>'nin içine karışmasıdır. Kiplerin karışması nedeniyle IMF<sub>1</sub> tek frekanslı değildir. IMF<sub>1</sub>'in, IMF<sub>2</sub>'ye karıştığı kısım Şekil 5.4.2 (d)'de görülmektedir. TBR-EMD yöntemi ile elde edilen IMF<sub>1</sub>'de ise herhangi bozulma veya kiplerin karışması söz konusu değildir.

Sentetik sinyal ile başarılı sonuçlar elde edilmesinin ardından BASTS tarafından Sincan TM 154 kV Bank-B barasında 19 Mayıs 2011, 5 Haziran 2011, 8 Eylül 2011 ve 3 Ağustos 2012 tarihlerinde kaydedilmiş gerçek bölgeler arası salınım sinyalleri EMD, PF-EMD ve TBR-EMD yöntemleri ile kiplerine ayrıştırılmaya



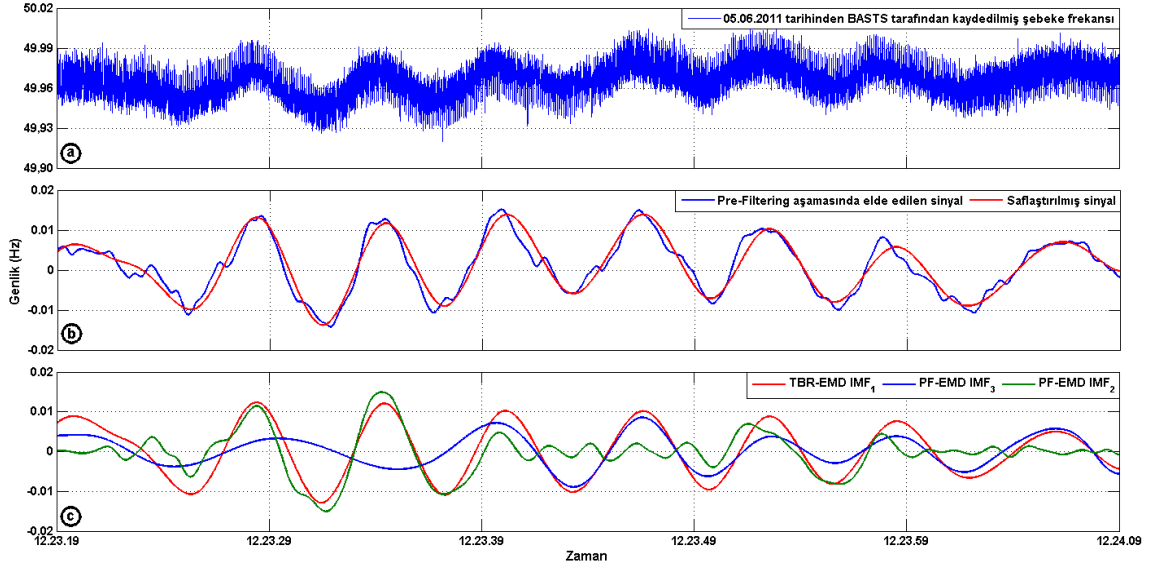
**Şekil 5.4.2** (a) Sentetik test sinyali (b) TBR-EMD yöntemi IMF<sub>1</sub> ve sentetik sinyalin 0.15 Hz frekanslı bileşeni (c) PF-EMD yöntemi IMF<sub>1</sub> ve sentetik sinyalin 0.15 Hz frekanslı bileşeni (d) PF-EMD yöntemi IMF<sub>2</sub>

çalışılmıştır. EMD yöntemi uygulanan sinyalleri doğru şekilde bileşenlere ayırtıramamaktadır. PF-EMD yöntemi ise EMD'e göre daha iyi sonuçlar üretmesine karşın kiplerin karışması problemi nedeniyle elde edilen sinyaller tek frekanslı değildir. İncelenen sinyallerdeki bölgeler arası salınımına ait kipler çoğunlukla  $IMF_3$  olarak ayırtılmıştır. İncelenen tüm sinyallerde  $IMF_3$ 'de çıkması gereken sinyalin bir kısmı kiplerin karışmasından dolayı  $IMF_2$ 'nin içinde yer almaktadır. TBR-EMD yöntemi ise analiz edilen sinyallerde bulunan bölgeler arası salınım kiplerini  $IMF_1$ 'de çıkacak şekilde ayırtabilmiştir. Bu da bölgeler arası salınımların tanımlanması için geliştirilmiş hedef odaklı saflaştırma yönteminin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. PF-EMD ve TBR-EMD yöntemleriyle elde edilen sonuçlar tarih sırasıyla Şekil 5.4.3–6'da verilmiştir.

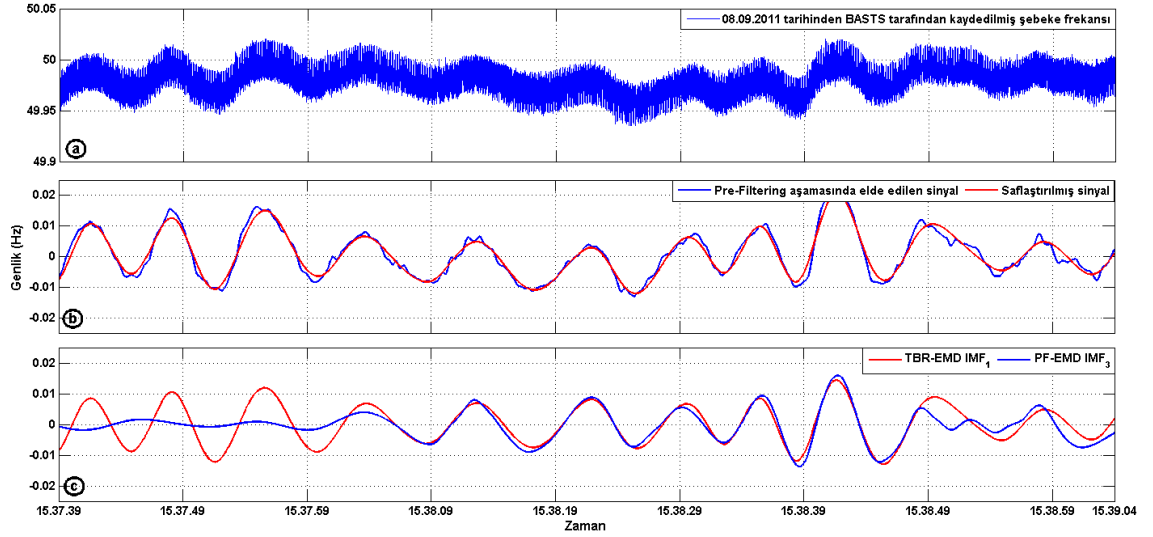


**Şekil 5.4.3** (a) 19 Mayıs 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) “Pre-Filtering” aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve PF-EMD yöntemi  $IMF_2$  ve  $IMF_3$

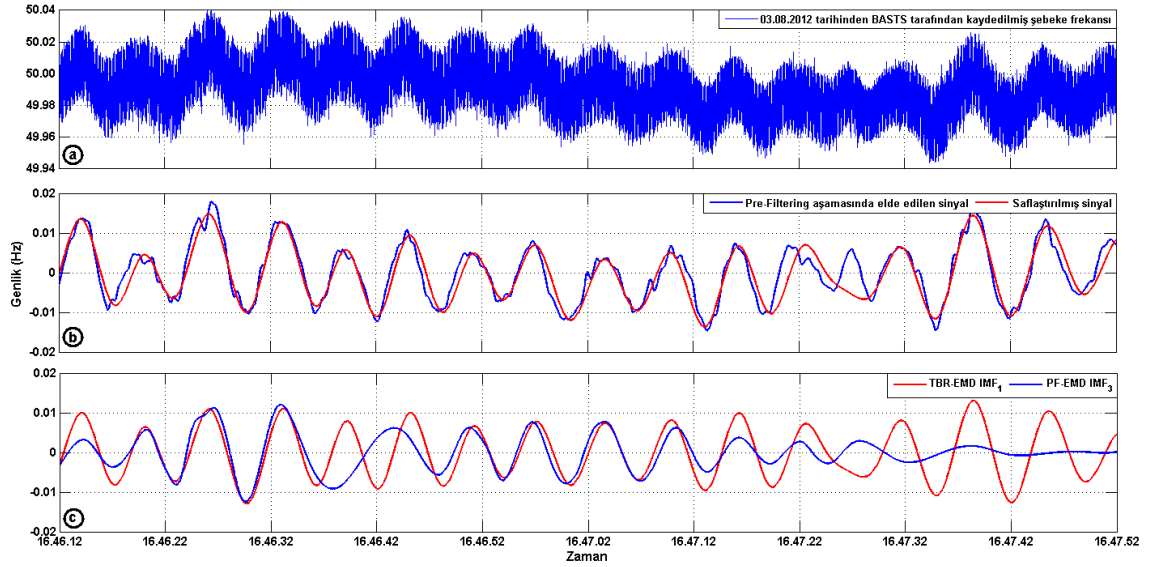




**Şekil 5.4.4** (a) 5 Haziran 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) “Pre-Filtering” aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve PF-EMD yöntemi  $IMF_2$  ve  $IMF_3$



**Şekil 5.4.5** (a) 8 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) “Pre-Filtering” aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve PF-EMD yöntemi  $IMF_3$



**Şekil 5.4.6** (a) 3 Ağustos 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) “Pre-Filtering” aşaması ve hedef odaklı saflaştırma sonucunda elde edilen sinyaller (c) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve PF-EMD yöntemi  $IMF_3$

İlk bakışta TBR-EMD'nin, hedef odaklı saflaştırma fazı için ek iterasyonlara ihtiyaç duyması nedeniyle, bölgeler arası salınımların tanımlanması için gerekli işlem süresinin EMD işlemine göre daha uzun süreceği ve dolayısıyla TBR-EMD yönteminin gerçek zamanlı bir uygulama için uygun olmadığı düşünülebilir. Ancak yapılan hedef odaklı saflaştırma, EMD işlem süresini ciddi oranda azaltmaktadır. Şebeke frekansı direk olarak EMD işlemine tabi tutulursa çoğunlukla kiplerin karışması problemi nedeniyle sinyal kiplerine doğru şekilde ayrıştırılamamaktadır. Ayrıca eğer sinyalde bölgeler arası salınım kipleri var ise bu kiplerin hangi IMF'de çıkacağı da bilinmemektedir. Bu yüzden ya EMD işlemi son IMF'i bulunana kadar yapılmalıdır, ya da her bulunan IMF için salınım kipi olup olmadığına bakılarak EMD işlemi sonlandırılmalıdır. Oysa önerilen yöntemde “pre-filtering” ve hedef odaklı saflaştırma yöntemleri nedeniyle incelenen sinyalde salınım kipi varsa bu kip her zaman  $IMF_1$ 'de çıkmaktadır. Yani TBR-EMD yönteminde tüm kiplerin ayrıştırılmasına gerek yoktur. Sadece  $IMF_1$ 'in bulunması yeterlidir. Böylece TBR-EMD, EMD yöntemine göre çok daha az işlem süresine ihtiyaç duyarak gerçek zamanlı olarak çalışmaya daha uygun hale gelmiştir.

TBR-EMD ve PF-EMD yöntemlerinin Şekil 5.4.3–6 arasında verilen sinyallerin ayrıştırılması için gerekli olan iterasyon süreleri Çizelge 5.4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.4.1’de verilen değerlerde “efektif iterasyon sayısı” TBR-EMD yöntemi için saflaştırma işlemi ve IMF<sub>1</sub>’in bulunması için gerekli toplam iterasyon sayısını ifade etmektedir. Elde edilen bu sonuçlar TBR-EMD yönteminin, PF-EMD yönteminden ortalama üç kat daha hızlı çalıştığı ve PF-EMD’nin doğru şekilde ayrıştıramadığı sinyalleri ayrıştırdığını gösterilmiştir.

TBR-EMD yönteminin geliştirilen hedef odaklı saflaştırma yöntemi sayesinde kiplerin karışması problemini ortadan kaldırarak EMD ve PF-EMD yöntemine göre daha hızlı ve daha iyi çalıştığı görüldükten sonra bu tez çalışması kapsamında bölgeler arası salınımların tanımlanması için geliştirilmiş iki yöntem olan FBMSWA ve TBR-EMD yöntemleri birbirine göre kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama BASTS tarafından tanımlanan sırasıyla 16 Mayıs, 23 Nisan, 10 Eylül ve 12 Eylül 2011 tarihlerinde kaydedilmiş gerçek bölgeler arası salınıma ait şebeke frekans ölçümleri kullanılarak yapılmıştır. Hatırlanacağı üzere FBMSWA yöntemi bölgeler arası salınımları tanımlarken salınının genliğinin tespitinde iyi sonuçlar üretmesine karşın salınım fazını bulurken her zaman en iyi performansı sergileyememektedir.

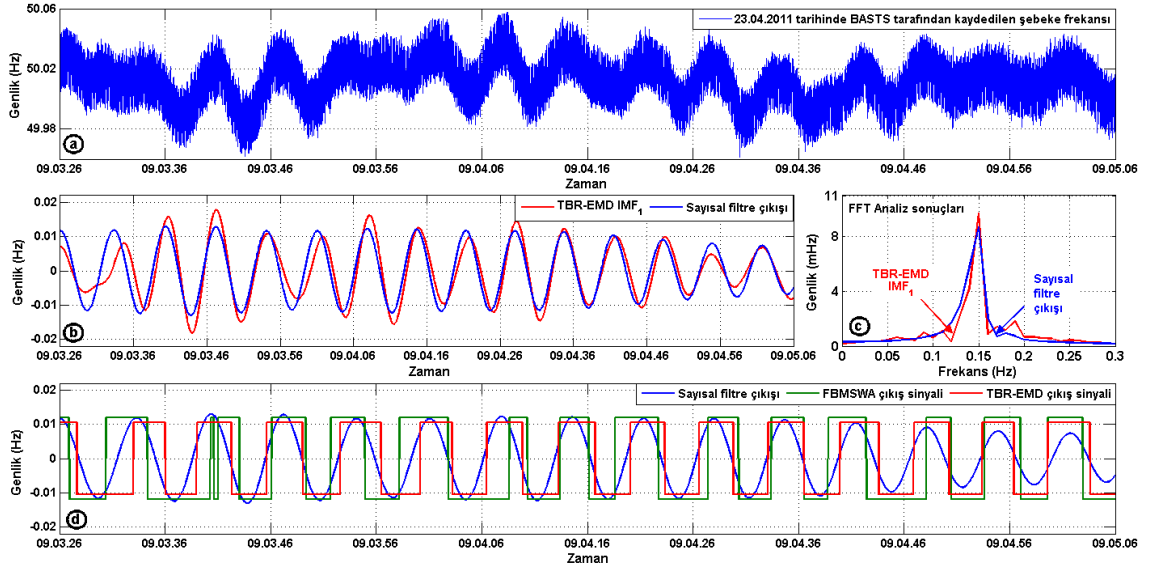
FBMSWA ve TBR-EMD yöntemlerinin salınının fazını tespit etme performanslarını karşılaştırmak için 0.12–0.16 Hz arası geçirme bandına sahip, Bölüm 4.5’te de kullanılan sayısal bant geçiren filtre kullanılmıştır. Sayısal bant geçiren filtre, yapısı

**Çizelge 5.4.1** TBR-EMD ve PF-EMD yöntemleriyle bölgeler arası salınımların tanımlanması için gerekli iterasyon sayıları

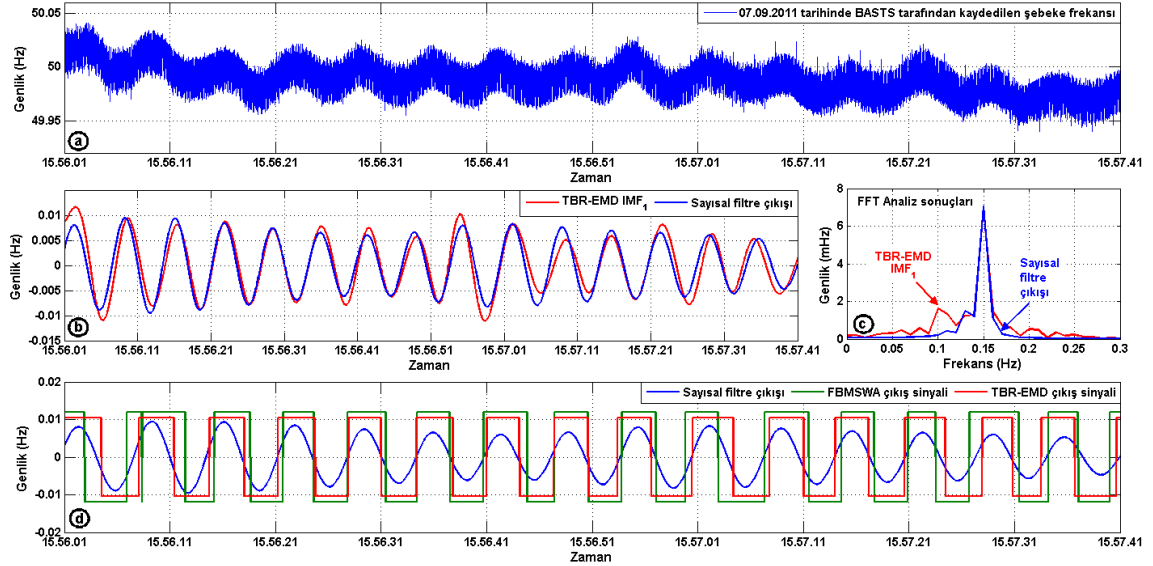
İlgili şekil	Yöntem	Ayrıştırılan toplam IMF sayısı	Saflaştırma için gerekli iterasyon sayısı	Tüm IMF’lerin ayrıştırılması için gerekli iterasyon sayısı	Efektif iterasyon sayısı
Şekil 5.4.3	TBR-EMD	4	15	13	17
	PF-EMD	6	-	59	-
Şekil 5.4.4	TBR-EMD	3	17	6	20
	PF-EMD	6	-	34	-
Şekil 5.4.5	TBR-EMD	4	14	15	16
	PF-EMD	6	-	74	-
Şekil 5.4.6	TBR-EMD	5	17	12	19
	PF-EMD	7	-	61	-

gereği sinyalin başında ve sonunda doğru tepkiler üretmemekte, ayrıca sinyal genliğini bir miktar bozmaktadır. Bu nedenlerden dolayı gerçek zamanlı bir uygulamada kullanıma uygun olmamakla beraber, kararlı hal durumunda sinyalin fazını göreceli olarak doğru bir şekilde bulmak amacıyla kullanılabilir. Filtrenin kararlı hal durumunu elde edilebilmek için sinyalin daha uzun bir bölümü filtreye uygulanmaktadır. Ancak verilen şekiller sinyalin başından ve sonundan 10 sn'lik kısımlar atılarak çizdirilmiştir.

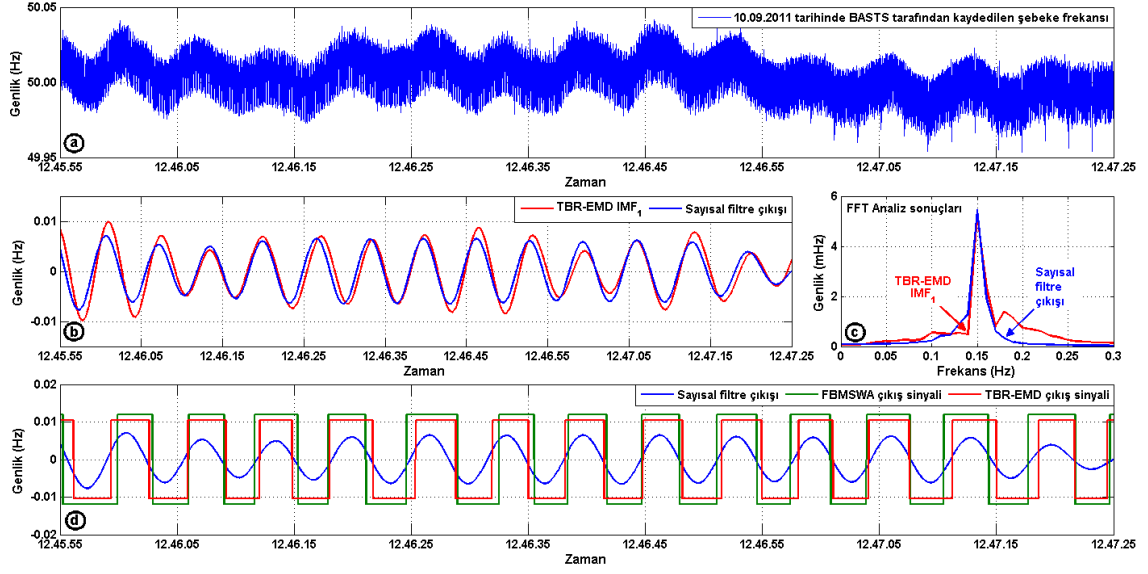
Söz konusu tarihlere ait grafikler şekil 5.4.7–10'da verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde TBR-EMD yönteminin bölgeler arası salınım kipine ait fazı FBMSWA yöntemine göre daha iyi tanımladığı görölmektedir. Bunun en önemli nedeni TBR-EMD yönteminin zaman tanım alanında işlem yapıyor olmasıdır. FBMSWA yöntemi frekans tanım alanında işlem yapmakta, ancak sinyalin fazını bulmak için zaman tanım alanına geri dönerken oluşan hatalar nedeniyle hızlı değişimlerde salınım kipine ait fazı hassas olarak bulamamaktadır. Grafiklerde ayrıca TBR-EMD yöntemiyle elde edilen  $IMF_1$  değerine ait FFT analiz sonucu da paylaşılmıştır. FFT sonuçları,  $IMF_1$ 'in her dört salınım olayı için de, sadece 0.15 Hz frekansına sahip olduğunu herhangi bir frekansın  $IMF_1$ 'e karışmadığını, TBR-EMD yönteminde kiplerin karışması probleminin ortadan kaldırıldığını göstermektedir. TBR-EMD yöntemi bu salınım olayları haricinde, 30'dan fazla gerçek bölgeler arası salınım verisi üzerinde de çalıştırılmış ve bütün durumlarda salınım kipinin  $IMF_1$ 'de çıkacak şekilde ayrıştırıldığı görölmüştür.



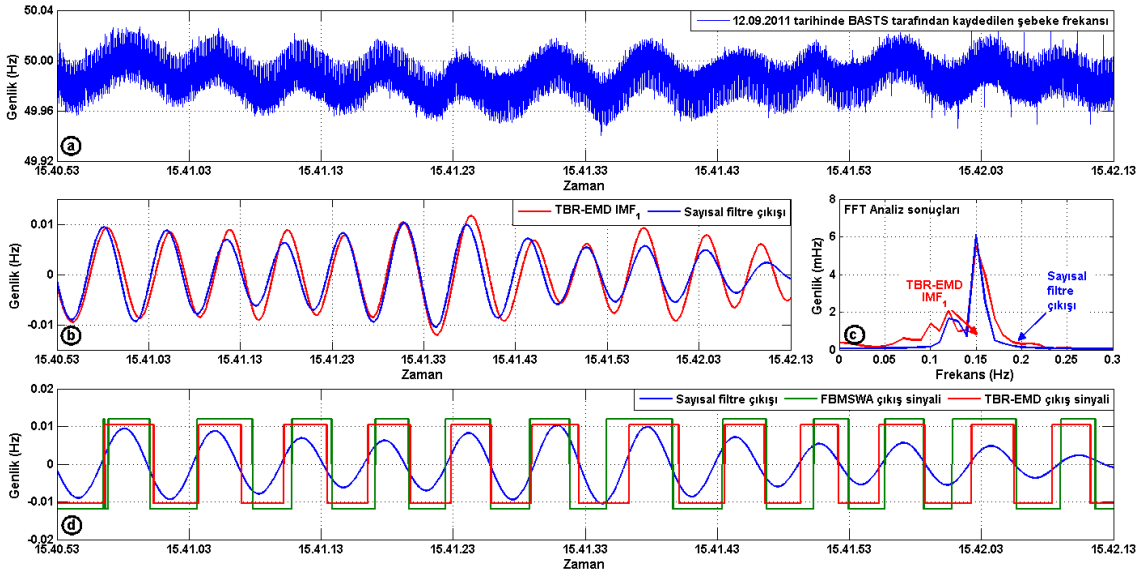
**Şekil 5.4.7** (a) 23 Nisan 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri



**Şekil 5.4.8** (a) 7 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi  $IMF_1$  ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri



**Şekil 5.4.9** (a) 10 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF<sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri



**Şekil 5.4.10** (a) 12 Eylül 2011 tarihinde Sincan TM 154 kV Bank-B barası şebeke frekansı (b) TBR-EMD yöntemi IMF<sub>1</sub> ve sayısal filtre çıkışı (c) (b)'deki sinyallerin FFT analiz sonuçları (d) Sayısal filtre çıkışı, TBR-EMD ve FBMSWA yöntemlerinin FACTS cihazlar için ürettiği çıkış sinyalleri

## 6. SONUÇ

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin ENSTO-E bağlantısından sonra beklenildiği gibi çoğunlukla 0.14 Hz civarındaki frekanslarda olmak üzere birçok bölgeler arası salınım gözlenmiştir. Bu bölgeler arası salınımların bastırılması için ilk olarak bağlı bulunduğu barada gerilim düzenlemesi amacıyla hali hazırda faaliyet gösteren 154 kV,  $\pm 50$  MVar T-STATCOM sistemi görevlendirilmiştir. Oluşması muhtemel bölgeler arası salınımların bastırılabilmesi için bu salınımların tanımlanması gereklidir. Bu amaçla bir araştırma projesi olarak başlayan ve bu tez çalışmasının da konusunu oluşturan FBMSWA yöntemiyle BASTS'i geliştirilmiştir. Geliştirilen BASTS ilk olarak T-STATCOM'a daha sonra ise Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki ark ocaklarında reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kurulmuş olan diğer FACTS cihazlara uygulanmıştır.

Bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesinde görevlendirilen BASTS ve T-STATCOM'dan oluşan bütünleştirilmiş sistem, gerçekleşen bölgeler arası salınımların sönümlendirilmesinde başarıyla görev almıştır. Böylelikle Türkiye ile ENSTO-E arasında güvenilir bir bağlantı oluşturulmasına katkı sağlanmıştır. Ancak FBMSWA yöntemi bazı durumlarda oluşan bölgeler arası salınımların fazını tam olarak doğru şekilde algılayamamaktadır. Bu yüzden zaman tanım bölgesinde kalarak bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılabilecek yeni bir yöntem olan TBR-EMD geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni yöntem ile bölgeler arası salınının fazı "pre-filtering" ve hedef odaklı saflaştırma aşamalarının katkılarıyla FBMSWA yöntemine göre çok daha iyi tanımlanabilmektedir.

TBR-EMD, hedef odaklı bir yöntemdir ve SED'i değiştirilip birçok sorunlu uygulamaya uyarlanarak çözüm üretilebilir. TBR-EMD yönteminin en önemli özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- 1- Sinyalleri ayrıştırmak için zaman tanım bölgesinde kalmaktadır.
- 2- Analiz edilecek sinyallerin türünden ve sinyallerin elde edildiği sistemden bağımsız olarak çalışabilir.
- 3- EMD yönteminin ayrıştıramadığı sinyalleri hedef odaklı saflaştırma yöntemi sayesinde ayrıştırmak mümkündür.

- 4- EMD'den ortalama üç kat daha hızlı sonuç üretmesi nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygundur.
- 5- İncelenen sinyalde bölgeler arası salınım varsa, bu her zaman ilk kip olan  $IMF_1$ 'de çıkar.

Bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen FBMSWA ve TBR-EMD yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- 1- FBMSWA, FFT analiz temeline dayanan bir yöntemdir. FFT analiz doğrusal sistemlerde durağan sinyallerin analizi için geliştirilmiştir. TBR-EMD ise EMD tabanlı bir yöntem olup doğrusal olmayan sistemlerde durağan olmayan sinyallerin analizi için geliştirilmiştir. Bu yüzden TBR-EMD bölgeler arası salınımların tanımlanması için daha uygun bir yöntemdir.
- 2- FBMSWA ile bölgeler arası salınımları tanımlamak için iki adet pencere kullanılır. Pencere boyutu bölgeler arası salınımların doğru tanımlanabilmesi için kritiktir. TBR-EMD ise tek pencere üzerinden işlem yapar ve pencere boyutu kritik değildir. En düşük frekanslı salınımın 3-4 periyodu pencere içinde kalacak şekilde pencere boyutunun seçilmesi yeterlidir.
- 3- FBMSWA sinyali analiz ederken, frekans tanım bölgesi üzerinde işlem yapmaktadır. Ancak bölgeler arası salınımların fazını bulmak için ters FFT işlemiyle tekrar zaman tanım bölgesine geri dönmektedir. Frekans tanım bölgesi ile zaman tanım bölgesi arası geçişlerde bilgi kaybı yaşanmaktadır. TBR-EMD ise analiz yaparken hep zaman tanım bölgesinde kalmakta ve bilgi kaybı yaşanmamaktadır.
- 4- TBR-EMD iteratif bir yöntemdir ve işlem süresi incelenen sinyalden sinyale değişmektedir. Gerçek zamanlı çalışacak bir sistem için işlem süresinin tanımlı olması gerekir. FBMSWA'da ise işlem süresi sinyale bağlı değildir.
- 5- TBR-EMD, bölgeler arası salınımların fazını ve genliğini FBMSWA'ya göre çok daha iyi tespit edebilmektedir. Bu da salınımların sönümlendirilmesi için oldukça önemlidir.



Bu tez çalışması kapsamında:

- 1- Bölgeler arası salınımların tanımlanması için iki yeni yöntem geliştirilmiştir.
- 2- FBMSWA yöntemi, Türkiye Elektrik İletim Sistemine uygulanma şansı bulmuş ve bu yöntem ile geliştirilen BASTS ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- 3- TBR-EMD yöntemi zaman tanım bölgesinde kalarak doğrusal olmayan sistemler üzerinden alınan durağan olmayan sinyalleri ayrıştırabilmektedir.
- 4- TBR-EMD yöntemi, EMD yönteminin ayrıştıramadığı sinyalleri ayrıştırabilmekte ve toplamda daha az iterasyona ihtiyaç duymaktadır.
- 5- TBR-EMD, bölgeler arası salınımların tanımlanması dışında birçok değişik uygulama için uyarlanarak genelleştirilebilir bir yöntemdir.
- 6- Geliştirilen hedef odaklı saflaştırma yöntemi ile literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıntılı bir şekilde anlatılan ve bölgeler arası salınımların tanımlanmasında kullanılan FBMSWA ve TBR-EMD yöntemleri, [54]'de özet şekilde verilmektedir.

## **GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR**

TEİAŞ'ın talep etmesi durumunda FBMSWA ile oluşturulan BASTS, TBR-EMD yöntemi çalışacak hale getirilerek bölgeler arası salınımların daha başarılı bir şekilde tanımlanabildiği gerçek zamanlı olarak da gösterilebilir.

Bu tez çalışmasında Türkiye Elektrik İletim Sistemine için geliştirilmiş bölgeler arası salınım tanımlama yöntemleri, yeni tasarım ölçütlerine göre kolayca uyarlanarak (pencere uzunluğu, “wash-out” filtre katsayıları, saflaştırma eşik seviyesi, vb. değiştirilerek) başka elektrik iletim sistemlerine de uygulanabilir.

## 7. KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., ANDERSON, G., BOSE, A., CANIZARES, C., HATZIARGYRIOU, N., HILL, D., STANKOVIC, A., TAYLOR, C., CUTSEM, T., VITTAL, V., Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Trans. on Power Syst., vol.19, no.3, s.1387–1401, 2004.
- [2] AL-ALI, S., NASSAR, I., WEBER, H., Interconnection of the European ENTSO-E-CE System with the Turkish System Investigation of the Expected Inter-Area-Oscillations Behavior, in Proc. 17<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference (PSCC), Stockholm, vol.1, s.853–858, 2011.
- [3] BREULMANN, H., GREBE, E., LÖSING, M., WINTER, W., WITZMANN, R., DUPUIS, P., HOURY, M.P., MARGOTIN, T., ZERENYI, J., DUDZIK, J., PSE, S.A., MACHOWSKI, J., MARTÍN, L., RODRÍGUEZ, J. M., URRETAVIZCAYA, E., Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System, CIGRE Session, Paper No: 38–113, 2000.
- [4] TOR, O.B., GENCOGLU, C., YILMAZ, O., CEBECI, E., GUVEN, A.N., Damping Measures against Prospective Oscillations between Turkish Grid and ENTSO-E System, IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010.
- [5] SATTINGER, W., SCHWEIZ, L., System Behaviour after Turkey Connection, Die Dynamik des Netzes in München, 2011.
- [6] ENSTO-E Sunumları- RWE Transportnetz Strom GmbH, ETE-A-S, 2005.
- [7] Rehabilitation of the Frequency Control Performance of Turkish Power System for Synchronous Operation with UCTE, Interim Report, 2011.
- [8] EDRIS, A., FACTS Technology Development: An Update, IEEE Power Engineering Review, vol.20, no 3, s.4–9, 2010.
- [9] GOTHAM, D.J., HEYDT, G.T., Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices, IEEE Trans. on Power Syst., vol.13, no.1, s.60–65, 1998.
- [10] GALIANA, F.D, ALMEIDA, K., TOUSSAINT, M., GRIFFIN, J., ATANACKOVIC, D., OOI, B.T., MCGILLIS, D.T., Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance, IEEE Trans. on Power Syst., vol.11, no.4, s.1931–1936, 1996.
- [11] ZARGHAMI, M., CROW, M.L., Damping Inter-Area Oscillations in Power Systems by STATCOMs, IEEE 40<sup>th</sup> North American Power Symposium (NAPS), 2008.
- [12] MITHULANANTHAN, N., CANIZARES, C.A., REEVE, J., ROGERS, G.J., Comparison of PSS, SVC, and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations, IEEE Trans. on Power Syst., vol.18, no.2, s.786–792, 2003.

- [13] SEKOGUCHI, M., KONISHI, H., GOTO, M., YOKOYAMA, A., LU, Q., Nonlinear Optimal Control Applied to STATCOM for Power System Stabilization, IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, vol.1, s.342–347, 2002.
- [14] GULTEKIN, B., GERCEK, C., ATALIK, T., DENIZ, M., BICER, N., ERMIS, M., KOSE, N., ERMIS, C., KOC, E., CADIRCI, I., ACIK, A., AKKAYA, Y., TOYGAR, H., BIDECI, S., Design and Implementation of a 154kV  $\pm$ 50-MVAr Transmission STATCOM Based on 21-Level Cascaded Multilevel Converter, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol.48, no.3, s.1030–1045, 2012.
- [15] ZHANG, Z., VOLOH, I., CARDENAS, J., ANTIZA, I., ILICETO, F., Inter-area Oscillation Detection by Modern Digital Relays, IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), vol.2, s.1396–1401, 2011.
- [16] DEMIRCI, T., KALAYCIOGLU, A., KUCUK, D., SALOR, O., GUDER, M., PAKHUYLU, S., ATALIK, T., INAN, T., CADIRCI, I., AKKAYA, Y., BILGEN, S., ERMIS, M., Nationwide Real-Time Monitoring System for Electrical Quantities and Power Quality of the Electricity Transmission System, IET Magazines on Generation, Transmission & Distribution, vol.5, no.5, s.540–550, 2011.
- [17] XINWEI, D., QIAN, H., YONG, C., The Monitor of Inter-area Oscillation Based on Wide Area Measurement System, ELSEVIER Energy Procedia, vol.16, part.C, s.2033–2043, 2012.
- [18] HIYAMA, T., SUZUKI, N., FUNAKOSHI, T., On-line Identification of Power System Oscillation Modes by Using Real Time FFT, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol.2, s.1521–1526, 2000.
- [19] KOESSLER R. J., PRABHAKARA F.S., AL-MUBARAK A. H., Analysis of Oscillations with Eigenanalysis and Prony Techniques, in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [20] HUANG, N.E., SHEN, Z., LONG, S.R., WU, M.L.C., SHIH, H.H., ZHENG, Q.N., YEN, N.C., TUNG, C.C., LIU, H.H., The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis, Proceedings of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, s.903–995, 1998.
- [21] WANG, X., YAN, Z., Multiple Scale Identification of Power System Oscillations Using an Improved Hilbert-Huang Transform, in Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009
- [22] MESSINA, A.R., Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective, Springer, 275s, 2009.
- [23] HUANG, N.E., SHEN, S.S.P., Hilbert-Huang Transform and Its Applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Interdisciplinary Mathematical Sciences, vol.5, 323s, 2005.
- [24] LAILA, D.S., MESSINA, A.R., PAL, B.C., A Refined Hilbert-Huang Transform with Applications to Interarea Oscillation, IEEE Trans. on Power Syst., vol.24, no.2, s.610–620, 2009.

- [25] RILLING, G., FLANDRIN, P., GONCALVES, P., On Empirical Mode Decomposition and Its Algorithms, in Proc. IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Processing, 2003.
- [26] ZHANG Y., SU N., LI Z., GOU Z., CHEN Q., ZHANG Y., Assessment of Arterial Distension Based on Continuous Wave Doppler Ultrasound with an Improved Hilbert-Huang Processing, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.57, no.1,s.203–213, 2010.
- [27] ZENG, K, HE, M., A Simple Boundary Process Technique for Empirical Mode Decomposition, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol.6, s.4258–4261, 2004.
- [28] HUANG, N.E., SHEN, Z., LONG, S., A New View of Non-Linear Water Waves: The Hilbert Spectrum, CalTech Annual Review of Fluid Mechanics, vol.31, s.417–457, 1999.
- [29] DEERING, R., KAISER, J.F., The Use of Masking Signal to Improve Empirical Mode Decomposition, in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.4,s.485–488, 2005.
- [30] QIN, S.R., ZHONG, Y.M., A New Envelope Algorithm of Hilbert-Huang Transform, ELSEVIER Mechanical Systems and Signal Processing, vol.20, no.8, s.1941–1952, 2006.
- [31] SENROY, N., SURYANARAYANAN, S., RIBERIO, P.F., An Improved Hilbert-Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveform in Power Quality, IEEE Trans. on Power Syst., vol.22, no.4,s.1843–1850, 2007.
- [32] XUAN, B., XIE, Q, PENG, S., EMD Sifting Based on Bandwidth, IEEE Signal Processing Letters, vol.14, no.8, s.537–540, 2007.
- [33] NIANG, O., DELÉCHELLE, E., LEMOINE, J., A Spectral Approach for Sifting Process in Empirical Mode Decomposition, IEEE Trans. on Signal Processing,vol.58, no.11,s.5612–5623, 2010.
- [34] CHANG, C.S., YU, Q.Z., LIEW, A.C., ELANGO VAN, S., Genetic algorithm tuning of fuzzy SVC for damping power system inter-area oscillations, IEEE 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM), vol.2, s.509–514,1997.
- [35] CHUN, L., QIRONG, J., ZHONGHONG, W., Study of STATCOM control for power swings damping improvement, IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON),vol.1, s.535–540, 2000.
- [36] MESSINA, A.R., OLGUIN, D., RIVERA, S.C.A., RUIZ-VEGA, D., Analytical investigation of large-scale use of static VAR compensation to aid damping of inter-area oscillations, IEEE 7<sup>th</sup> International Conference on AC-DC Power Transmission, s.187–192, 2001.
- [37] CAO, G., DONG, Z.Y., WANG, Y., ZHANG, P., OH, Y.T., VSC based STATCOM controller for damping multi-mode oscillations”, IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.

- [38] KUIAVA, R., RAMOS, R.A., BRETAS, N.G., Control Design of a STATCOM with Energy Storage System for Stability and Power Quality Improvements, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2009.
- [39] ILEA, V., BERIZZI, A., EREMIA, M., Damping Inter-area Oscillations by FACTS Devices, in Proc. IEEE 44<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009.
- [40] MAGAJI, N., MUSTAFA, M.W., MUDA, Z., Signals Selection of SVC Device for Damping Oscillation, IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), s.786–789, 2010.
- [41] KE, D.P., CHUNG, C.Y., XUE, Y., An Eigenstructure-Based Performance Index and Its Application to Control Design for Damping Inter-Area
- [42] NARNE, R., PANDA, P.C., THERATTIL, J.P., Damping of Inter-area Oscillations in Power System using Genetic Optimization Based Coordinated PSS with FACTS Stabilizers, IEEE Annual India Conference (INDICON), s.853–858, 2012.
- [43] HUSEINBASIC, E., KUZLE, I., TOMISA, T., Inter-Area Oscillations Damping using Dynamic Braking and Phasor Measurements, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2009.
- [44] TABRIZI, M.A., RADMAN, G., PMU-Based Multi-Input SVC Supplementary Controller for Damping Inter-area Oscillation, IEEE North American Power Symposium (NAPS), 2010.
- [45] CHAKRABORTTY, A., Wide-Area Damping Control of Power Systems Using Clustering and FACTS-Based Redesigns, IEEE American Control Conference (ACC), s.4446–4451, 2012.
- [46] MA, J., WANG, T., WANG, Z., THORP, J.S., Adaptive Damping Control of Inter-Area Oscillations Based on Federated Kalman Filter Using Wide Area Signals, IEEE Trans. on Power Syst., vol.28, no.2, s.1627–1635, 2013.
- [47] ZABAIYOU, T., DESSAINT, L.-A., OKOU, F.-A., GRONDIN, R., Wide-Area Coordinating Control of SVCs and Synchronous Generators with Signal Transmission Delay Compensation, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [48] UHLEN, K., VANFRETTI, L., DE OLIVEIRA, M.M., LEIRBUKT, A.B., AARSTRAND, V.H., GJERDE, J.O., Wide-Area Power Oscillation Damper Implementation and Testing in the Norwegian Transmission Network, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [49] ATALIK, T., CADIRCI, I., DEMIRCI, T., ERMIS, M., INAN, T., KALAYCIOGLU, A.S., SALOR, O., Multipurpose Platform for Power System Monitoring and Analysis With Sample Grid Applications, IEEE Trans. on Instrument. and Meas., vol.63, no.3,s.566–582, 2014.
- [50] YULAN, C., CUNYANG, F., A New Method of Frequency Measurement of Power System, IEEE 2<sup>nd</sup> Conf. on Ind. Electron. and Appl.(ICIEA), s.2522–2525, 2007.

- [51] HASSOUNEH, M.A., LEE, H.-C., ABED, E.H., Washout Filters in Feedback Control: Benefits, Limitations and Extensions”, in Proc. IEEE American Control Conference, vol.5, s.3950–3955, 2004.
- [52] TSAU, E., CHO, N., KUO, C.-C.J., Fundamental Frequency Estimation for Music Signals with Modified Hilbert-Huang Transform (HHT), IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), s.338–341, 2009.
- [53] HUANG, N.E., WU, M.-L.C., LONG, S.R., SHEN, S.S.P., QU, W., GLOERSEN, P. FAN, K.L., A Confidence Limit for The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis, Proceedings of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, vol.459, no.2037, s.2317–2345, 2003.
- [54] ATALIK, T., DOGAN, M., DEMIRCI, T., Design and implementation of an identifier system for inter-area power oscillations, ELSEVIER Electric Power Systems Research, vol.122, s.86–95, 2015.