

# Güç Bileşenleri Ölçümünde Goertzel Algoritması Kullanımı ve Tristör Kontrollü Reaktöre Uygulaması

## Using Goertzel Algorithm for Power Component Measurement and Application on Thyristor Controlled Reactor

Ö. Fatih KEÇECİOĞLU<sup>1</sup>, Mustafa ŞEKKELİ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi  
[msekkeli@ksu.edu.tr](mailto:msekkeli@ksu.edu.tr) , [kececioglu@ksu.edu.tr](mailto:kececioglu@ksu.edu.tr)

### Özet

*Bu çalışmada, harmonikli bir şebekede temel güç bileşenlerinin hesabı için Goertzel algoritması kullanılmıştır. Genellikle bu amaç için hızlı fourier dönüşümü algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır. Goertzel algoritması kullanılarak Hesaplanan Aktif, reaktif, görünür güç ve güç faktörü değerleri Sabit kondansatörlü tristör kontrollü bir statik kompanzasyon sistemine uygulanmıştır. Goertzel algoritması kullanımının avantajı daha az trigonometrik bağıntı içermesi ve daha az hesap gerektirmesidir. Bu çalışma hem matlab simülasyonu olarak hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.*

### Abstract

*In this study, Goertzel algorithm is used for calculation power component in the case of distorted waveforms including those containing harmonics. Generally, Fast Fourier Transform is widely utilized for this purpose. Power components which are active, reactive, apparent power and power factor calculated by using Goertzel algorithm are applied on thyristor controlled reactor and fixed capacitor compensation system. Main advantage of the utilizing Goertzel algorithm is required less trigonometric equations and minimum calculation. This study is implemented both simulation and experimentally.*

### Giriş

Reaktif güç kompanzasyonu, elektrik güç sistemlerinin planlanmasında ve işletilmesinde çok önemli bir yere sahiptir. Reaktif güç kompanzasyonu için geleneksel olarak kullanılan yöntem, şebekedeki fazla reaktif gücü şebekeye reaktör bağlayarak, şebekenin reaktif güç ihtiyacını ise kondansatör bağlayarak çözmektedir [1]. Reaktif güç kompanzasyonunu yapmanın diğer bir yolu ise Statik VAR Kompanzasyon (SVK) sistemlerini kullanmaktır. SVK sistemleri şebekenin kompanzasyonu daha hızlı ve güvenilir şekilde yapmaktadır.

Statik VAR Kompanzasyon, genellikle ark fırınları ve çelik endüstrisi gibi yük değişiminin hızlı olduğu sistemlerde kullanılırlar. Bu tip sanayi tesisleri, enerji şebekesinde harmonik bozulmaların artmasına neden olur. Şebekedeki

harmonik bozulmaların artması ise aktif ve reaktif gücün temel bileşenini ölçümlemeyi zorlaştırmaktadır. Bu problemi aşmak için ölçümlerde sinyal işleme metotları kullanılmaktadır. Genellikle yapılan güç ölçümlerinde ve hesaplamalarında hızlı fourier dönüşüm (HFD) algoritmaları kullanılmaktadır [2,3].

Bu çalışmada, SVK sisteminin güç bileşenlerinin ölçülmesi ve hesaplanmasında HFD algoritması yerine goertzel algoritması kullanılmıştır.

### 1. Statik VAR Kompanzasyon Sistemleri

Statik VAR Kompansatörler (SVK), bağlı bulunduğu sistemin anlık reaktif güç ihtiyacını hızlı ve kontrollü olarak sağlayan cihazlardır. SVK'lar enerji şebekelerinde gerilim kontrolü, sistem kararlılığının sağlanması, şebekenin iletim kapasitesinin artırılması ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak amacıyla kullanılır. SVK'lar sistemin reaktif güç ihtiyacını, ters bağlı paralel tristörlerin tetikleme açılarını değiştirerek hızlı bir şekilde karşılayabilirler veya sistemde bulunan fazla reaktif gücü soğurabilirler.

Mevcut tristör kontrollü SVK'ların temeli, sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılamak için eşzamanlı olarak anahtarlanan kapasitörler ve/veya reaktörler ile sağlanan ayarlanabilir paralel empedans oluşturmasına dayanmaktadır. Kapasitörün anahtarlanması ve reaktörün kontrolünün uygun şekilde koordinasyonu ile reaktif güç çıkışı, sistemin kapasitif ve indüktif oranları arasında sürekli olarak ayarlanabilir.

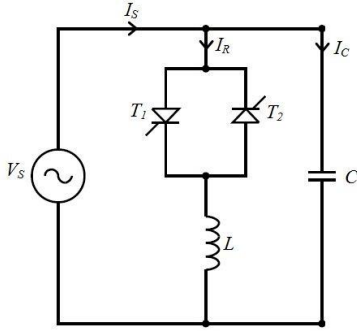
Genel olarak sistemde kullanılan SVK yapıları,

- Doymuş Reaktör,
- Tristör Kontrollü Reaktör (TKR),
- Sabit Kapasitör - Tristör Kontrollü Reaktör (SK-TKR),
- Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TAK),
- TKR ve TAK'ların aynı anda kullanıldığı yapılarıdır.

#### 1.1. SK - TKR Yapısı

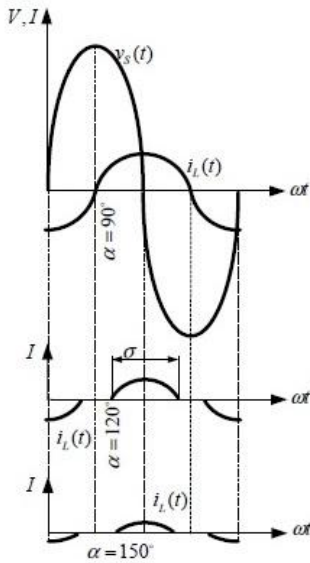
TKR'nin temel çalışma ilkesi tristörlerin tetikleme açılarını kontrol ederek reaktör akımını ayarlamaktır. TKR'nin reaktif gücü sadece soğurabilmesi özelliği reaktör akımının reaktif ve gerilimden yaklaşık 90° geride olmasından

kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bu kompanzasyon sistemlerinde, ihtiyaç olduğu anda reaktif gücü de üretebilmek için TKR ile sabit bir kondansatör birlikte kullanılır. SK-TKR tabanlı statik var kompanzasyon sistemine ait basit model Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1:SK-TKR'nin temel yapısı.

Bu model, iki ters paralel bağlanmış tristörlere ile kontrol edilebilir bir reaktör ve bunlara paralel kondansatörden oluşur. 3 fazlı uygulamalarda temel TKR elemanları yıldız bağlanır. Bu tristörlerin tetikleme açılarıyla endüktans akımının temel bileşeni ve böylece reaktif güç ayarlanabilir. Farklı tetikleme açıları altında sistemin gerilimi ve reaktör akımının dalga şekilleri Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2:Reaktör akımının farklı tetikleme açıları için dalga şekilleri.

TKR ve sabit kondansatör birlikte kullanılması, hem kapasitif hem de endüktif yüklerin kompanzasyonun yapılmasına olanak sağlar. Uygulamalarda, kondansatörün gücü, yükün endüktif reaktif gücünü tümüyle kompanze edecek şekilde seçilir. Yükün endüktif reaktif gücünde bir azalma olması durumunda kondansatör yükü kompanze etmekle birlikte, sisteme fazladan kapasitif reaktif güç verecektir. Bu durumda tristor kontrollü reaktör devreye girecek ve kompanzasyonu sağlayacaktır [3,4]

## 2. Güç Bileşenleri Ölçümü

Ölçme ünitesi, bir SVK sisteminin en önemli parçasıdır. Reaktif güç kompanzasyonunun hızlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için ölçümleme ve hesaplama işlemlerinin kesin, doğru ve gereksiz işlemlerden arındırılarak yapılmalıdır. Bir SVK sisteminde güç kaynağının ve yükün aktif, reaktif ve görünür güç bileşenleri, ölçümleme ünitesinden alınan akım ve gerilim örnekleri ile hesaplanır. Örneklenen akım ve gerilim sinyallerinin sinüzoidal olmadığı durumlarda sinyallerin temel frekans bileşenlerini belirlemek için sinyal işleme metodları kullanılır. Bu amaçla endüstriyel uygulamalarda genellikle hızlı fourier dönüşümü (HFD) algoritmaları kullanılır.

### 2.1. Goertzel Algoritması

HFD algoritmaları elde edilirken amaç, algoritmayı gereksiz işlem yükünden arındırmak ve bu sayede daha hızlı işlem yapabilmektir. Bahsedilen bu gereksiz işlemler, önceden hesaplanmış olan verilerin tekrar hesaplanmasıdır. Örneğin, bütün bir spektrumun dönüşümü isteniyorsa, simetrilere bağlı olarak yapılan indirgemeler, işlem sayısını yarı yarıya azaltır; ancak, tüm bir spektrumla değil de az sayıda ya da tek bir frekans bileşeni ile ilgileniliyorsa, katsayılardaki simetri işlemlerde azalmaya neden olmamaktadır. Bu nedenle Goertzel algoritması, tüm spektrum yerine belli noktalar için uygulandığında çok verimli ve kullanışlı bir algoritma haline gelmektedir. Goertzel algoritmasının en büyük avantajı HFD ve AFD algoritmalarına göre daha az trigonometrik bağıntı ve daha az hesap gerektirmesidir. [5]. Bir işaretin ayrık fourier dönüşümü Denklem 1'de ifade edilmiştir.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

Goertzel algoritması,  $W_N^{-kN}$  periyodik dizisinin hesaplama işlemlerini azaltmak için kullanılan bir algoritmadır.  $W_N^{-kN}$  ifadesinin periyodik olmasının sonucu Denklem 2 verilmiştir.

$$W_N^{-kN} = e^{j(2\pi/N)Nk} = e^{j2\pi k} = 1 \quad (2)$$

Denklem 1, periyodik  $W_N^{-kN}$  ifadesi ile çarpılırsa,

$$X[k] = e^{j(2\pi/N)kN} \sum_{r=0}^{N-1} x[r] e^{-j(2\pi/N)r} \quad (3)$$

$$X[k] = \sum_{r=0}^{N-1} x[r] e^{j(2\pi/N)r(N-k)} \quad (4)$$

elde edilmektedir. Sonuç olarak bu dizi,

$$y_k[n] = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x[r] e^{j(2\pi/N)k(n-r)} u[n-r] \quad (5)$$

şeklinde tanımlanabilir.  $n < 0$  ve  $n \geq N$  için  $x[n] = 0$  olması durumları kullanılarak, Denklem 6'da bu filtrenin  $x[n]$  girişi için;  $X[k]$ , filtre çıkışı olarak ifade edilir.

$$X[k] = y_k[n] \Big|_{n=N} \quad (6)$$

Bu filtrenin darbe cevabı ise Denklem 7'de verilmiştir,

$$e^{j(2\pi/N)kn} u[n] \quad (7)$$

Darbe cevabı bulunan bu filtrenin z dönüşümü yapıldığında, filtrenin transfer fonksiyonu Denklem 8'de ifade edilmiştir.

$$H_k(z) = \frac{1}{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}k} z^{-1}} \quad (8)$$

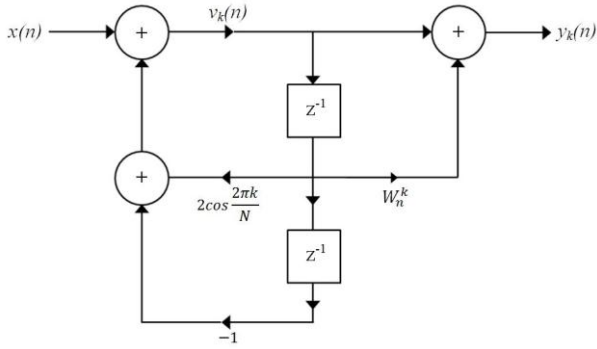
Bu transfer fonksiyonunun pay ve paydasını  $1 - W_N^k z^{-1}$  ifadesi ile çarpıldığında Denklem 9 elde edilir.

$$H_k(z) = \frac{1 - e^{-j\frac{2\pi}{N}k} z^{-1}}{\left(1 - e^{j\frac{2\pi}{N}k} z^{-1}\right)\left(1 - e^{-j\frac{2\pi}{N}k} z^{-1}\right)} \quad (9)$$

Gerekli matematiksel işlemler yapıldığında bu filtrenin transfer fonksiyonu, Denklem 10'da ifade edilmiştir.

$$H_k(z) = \frac{1 - e^{-j\frac{2\pi}{N}k} z^{-1}}{1 - 2 \cos \frac{2\pi k}{N} z^{-1} + z^{-2}} \quad (10)$$

Transfer fonksiyonu elde edilen bu filtrenin işaret akış diyagramı ise Şekil 3'de gösterilmiştir [6,7].



Şekil 3: Goertzel algoritması işaret akış diyagramı

### 3. Goertzel Algoritmasının SVK Sistemine Uygulanması

Goertzel algoritması, SVK'nın temel yapılarından biri olan SK-TKR yapısına uygulanmıştır. Uygulanan bu goertzel algoritmasının performansı, simülasyon ortamında ve deneysel uygulama üzerinde HFD algoritması ile karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Simülasyon Uygulanması ve Çıktıları

SK-TKR tabanlı statik var kompansement sisteminin uygulaması Matlab Simulink 7.13 programında yapılmıştır. Tasarlanan bu SVK yapısı, tek fazlı şebekede uygulanmıştır. Sistem yük olarak statik 200W omik ve 300 VAr endüktif yükleri içermektedir. Sisteme uygulanan kaynak gerilimi, 3., 5., 7., ve 11. mertebeden harmonikler içeren bozulmuş dalga formundadır. Uygulanması yapılan HFD ve Goertzel algoritmaları temel frekans güç bileşenlerini hesaplamak için kullanılmıştır. Aynı zamanda sistemin güç bileşenleri SVK'nın işletmede olduğu ve devre dışı kalması durumları içinde incelenmiştir. Bu simülasyon çalışmasının çıktıları Çizelge 1'de sunulmuştur. Çizelge 1'de kompansement öncesi ve sonrası durumları için elde edilen bu değerler ayrı ayrı incelendiğinde, HFD ve goertzel algoritmalarının hesapladığı gerilim, akım ve güç parametreleri değerlerinde herhangi bir farklılık yoktur. Güç ölçme algoritmalarının SVK sistemine ait

güç bileşenlerini hesaplama süreleri incelendiğinde bu güç bileşenlerini goertzel algoritması 0.00467 sn de, HFD algoritması ise 0.08762 sn de hesaplamıştır. Bu sonuçlara göre goertzel algoritmasının güç bileşenlerini hesaplamada HFD algoritmasından daha hızlı olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda modellemesi yapılan bu SK-TKR tabanlı SVK, sistemde bulunan yüklerin reaktif güç kompansementini başarılı bir şekilde yapmıştır.

Çizelge 1: Simülasyon Sonuçları

		Kompansement Öncesi		Kompansement Sonrası	
		Goertzel	HFD	Goertzel	HFD
<b>V</b>	V	207.00	207.00	207.00	207.00
<b>I</b>	A	1.741	1.741	0.966	0.966
<b>S</b>	VA	360.55	360.55	200.00	200.00
<b>P</b>	W	200.00	200.00	200.00	200.00
<b>Q</b>	VAr	300.00	300.00	0.00	0.00
<b>PF</b>	P.F.	0.554	0.554	1.000	1.000
<b>t*</b>	sn	0.00467	0.08762	0.00350	0.08406

\* Algoritmaların güç bileşenlerini hesaplama süreleridir.

#### 3.2. Deneysel Uygulanması ve Çıktılar

Bu deneysel çalışmada, SK-TKR tabanlı SVK sistemi üzerinde reaktif güç kompansement için yeni ölçümleme algoritmasının etkisi incelenmiştir. Deneyde yük olarak paralel bağlı 300 VAr endüktif ve 200 W omik yük kullanılmıştır. Uygulanması yapılan bu SVK sistemi dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar,

- Akım ve gerilim örnekleme kartı
- TKR'yi kontrol eden mikro denetleyici kartı
- Tristörlerin bulunduğu tetikleme kartı
- Sistemin anlık değerlerinin bilgisayar üzerinden ve grafik ekrandan izlenmesini sağlayan ara yüz kartıdır.

Tasarlanan bu deneysel model Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4: Tasarlanan deneysel model

Yapılan deney sonucunda deneysel model tarafından hesaplanan SVK'nın güç bileşenleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Deneysel çalışmanın sonuçları incelendiğinde, gerilim, akım ve güç parametreleri birbirine oldukça yakındır. Aynı zamanda bu sonuçlara göre, her iki algoritma tasarlanan sistemi başarılı bir şekilde kompansement etmiştir. Bununla birlikte

deneysel model üzerinde bulunan dijital sinyal kontrolöründe (dsPIC) goertzel algoritması yüklüken, grafik ekran üzerinden elde edilen anlık değerler, SVK'nın devre dışı olması durumu için Şekil 5'te, SVK devredeyken elde edilen değerler ise Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2: Deneysel Çalışmanın Sonuçları

		Kompanzasyon Öncesi		Kompanzasyon Sonrası	
		Goertzel	HFD	Goertzel	HFD
V	V	207.64	207.68	207.64	207.68
I	A	1.669	1.669	0.950	0.950
S	VA	346.75	346.82	197.25	197.29
P	W	197.25	197.29	197.25	197.29
Q	VAr	284.46	286.59	0.00	2.07
PF	P.F.	0.56	0.56	1.00	1.00



Şekil 5: SVK devre dışıyken goertzel algoritması ile elde edilen değerler



Şekil 6: SVK devredeyken goertzel algoritması ile elde edilen değerler

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada SK-TKR tabanlı SVK sisteminin güç bileşenlerinin ölçümü için yeni metod geliştirilmiştir. Bu metod ile harmonikli şebekede akım ve geriliminin temel bileşen değerleri HFD algoritması yerine goertzel algoritması kullanarak ölçülmüş ve aktif reaktif, görünür güç ve güç faktörü değerleri hesaplanan temel bileşene göre elde edilmiştir.

Simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde HFD ile goertzel algoritmasının hesapladıkları güç bileşen değerleri birbirine çok yakındır. Ancak goertzel algoritması,

güç bileşenlerini hesaplamada HFD algoritmasına göre oldukça hızlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışma ile goertzel algoritması ilk kez SK-TKR tabanlı SVK sistemlerinin güç ölçümleri ve hesaplamalarında uygulanmıştır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Mathur, R.M. ve Varma, R.K., *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*, IEEE Press, USA, 2002.
- [2] De La Rosa F.C., *Harmonics and power systems*, CRC Press, Taylor & Francis, New York, 2006.
- [3] Jin, H., Gobs, G., ve Lopes, L., "An Efficient Switched Reactor Based Static VAr Compensator", *IEEE T. Ind. Appl.*, 30;4, 998-1005, 1994.
- [4] Rao, B.V., Kumar, G.V.N., Priya, M.R., Sobhan, P.V.S., "Implementation of Static VAR Compensator for Improvement of Power System Stability", *IEEE Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies conference*, 2009, 453-57
- [5] Oppenheim, A.V., Schafer R.W., Buck, J.R., *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1998.
- [6] Özdemir, A., Ferikoğlu, A., "Low cost mixed-signal microcontroller based power measurement technique", *IEE Proc-A*, 151; 2, 253-258, 2004.
- [7] Sheno B.A., *Introduction to digital signal processing and filter design*, JohnWiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 2006s.