

# 12 Darbeli bir STATCOM için Denetleyici ve Filtre Parametrelerinin Simplex Yöntemi ile Optimizasyonu

A. Mete Vural<sup>a,1</sup>

K. Çağatay Bayındır<sup>b,2</sup>

Mehmet Tümay<sup>b,3</sup>

<sup>a</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Atılım Üniversitesi, Ankara

<sup>b</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana

<sup>1</sup>e-posta: mvural@atilim.edu.tr <sup>2</sup>e-posta: cbayindir@cu.edu.tr <sup>3</sup>e-posta: mtumay@cu.edu.tr

## Özetçe

Bu çalışmada 2 adet 6 darbeli gerilim kaynaklı konvertörden oluşan STATCOM cihazının AC ve DC gerilim denetleyicilerinin parametreleri ve her iki konvertörün çıkışına bağlı pasif L-C filtrelerinin parametreleri doğrusal ve gradyan olmayan Simplex yöntemi ile optimize edilmiştir. Her iki optimizasyon problemi için farklı performans endekslerine bağlı birer hedef fonksiyonu tanımlanmış ve Simplex yöntemi ile minimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinden sonra, 2 adet PI denetleyici ve 2 adet lead/lag kompanzatörden oluşan STATCOM'un AC ve DC gerilim denetleyicilerinin performansı benzetim çalışmalarıyla test edilmiş, basamak yanıtı performansı incelenmiştir. 154 kV'luk iletim hattının bir noktasına bağlanmış STATCOM'dan gerilim regülasyonunda kesin ve hızlı yanıtlar alınmıştır. Ayrıca Simplex yöntemi ile parametreleri optimize edilmiş filtreler sayesinde düşük anahtarlama frekanslarında dahi toplam harmonik bozulmasının standartlarda belirtilen değerin altında kalması sağlanmıştır.

## 1. Giriş

Güç sistemleri doğrusal olmayan karakteristik gösterir. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) entegre edilmiş bir güç sisteminde STATCOM için düşünülen doğrusal denetleyicilerin uygulaması kolay, parametre seçimleri ise zordur. Gerekli geçici rejim tepkisi performansının sağlanması için denetleyici parametrelerinin doğru seçimi kaçınılmazdır.

Gerilim denetim uygulamalarında STATCOM için gelişmiş denetim teknikleri mevcuttur [1]-[14]. Bunlar arasında, uygulama olarak basit olan PI denetleyicileri ile de istenen kapalı döngü performansı elde edilebilir. Basit yapıları ve güçlü sağlamlıklarıyla PI denetleyiciler pratik olarak STATCOM denetim sistemlerine, geçici rejim tepkisi performansının artırılması ve yatışkın durum doğruluğunun sağlanması için uygulanabilir. Buna bağlı olarak PI denetleyicilerinden istenilen performansın elde edilmesi doğru parametre seçimine bağlıdır. Diğer taraftan geri beslemeli denetim sistemlerinde lead/lag kompanzatörler kapalı döngü performansının artırılması için PI denetleyiciler ile birlikte kullanılabilir [15,16,17]. Bu tür denetleyicilerden oluşan bir denetim sisteminin parametre seçimi için gerekli

olan teknikler incelenen sistemin matematiksel modeline ihtiyaç

duyar. Analitik ve geleneksel yöntemler arasında sayılabilecek Ziegler-Nichols osilasyon yöntemi, Smith kestiricisi, ve kutup atama yöntemleri sayılabilir. [16]. Fakat bu uygulamalar sistemim transfer fonksiyonuna ihtiyaç duymaktadır. STATCOM entegre edilmiş bir güç sistemi ise kuplaj parametreleriyle birlikte çok giriş ve çok çıkışlı bir sistemdir. Böyle bir sistemin matematiksel modelinin elde edilmesi, güç sistemi elemanlarının sayısı ve çeşidi arttıkça daha da zor ve karmaşık hale gelmektedir. Ayrıca STATCOM'da kullanılan konvertörlere uygulanan çok seviyeli ve çok darbeli topolojiler modellemeyi daha da zorlaştırmaktadır. Bu sebeple bu tür geleneksel yöntemlerin STATCOM denetim sistemi parametrelerinin seçiminde kullanılmaları zor ve aynı zamanda da pratik değildir.

Bu çalışmada, PI denetleyici ve lead/lag kompanzatör parametrelerinin optimal seçiminde rastgele veya ardışıl seçme teknikleri yerine nicel bir optimizasyon yöntemi olan Simplex algoritması kullanılmıştır [18]. Optimize edilmek istenen parametre kümesi, PI denetleyicilere ait olan oransal kazanç  $k_p$  ve tümlev zaman sabiti  $T$ , lead/lag kompanzatörlere ait olan lead zaman sabiti  $T_{lead}$  ve lag zaman sabiti  $T_{lag}$  dir. Simplex yöntemi ile minimize edilmek istenen hedef fonksiyonu, STATCOM denetim sistemi için bir performans endeksi olacak şekilde tasarlanmıştır. Önerilen çözüm yöntemi, sistemin çalışma noktasında doğrusallaştırılmasına gerek kalmadan, ayrıca herhangi bir transfer fonksiyonu veya matematiksel modele ihtiyaç duymadan kullanılabilir.

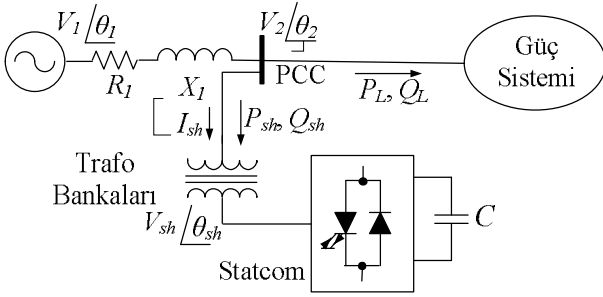
Bu çalışmada ayrıca her bir STATCOM konvertörü için L-C elemanlarından oluşan birer pasif filtre tasarlanmıştır. Yukarıda bahsedilen hedef fonksiyonundan farklı bir hedef fonksiyonu tanımlanarak STATCOM denetim sistemi parametrelerinin optimizasyonu için önerilen yöntemin aynı L-C parametrelerinin optimizasyonunda da kullanılmıştır.

## 2. Statcom

### 2.1. STATCOM Konfigürasyonu

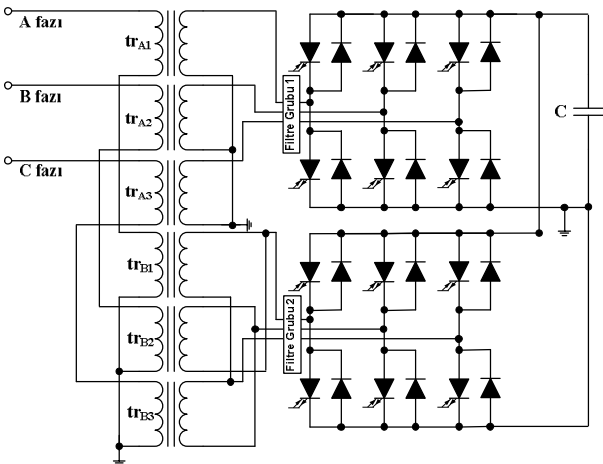
Bu çalışmada STATCOM, Şekil 1'de görüldüğü gibi, örnek bir güç sistemine bir kuplaj noktasında (PCC) bağlıdır.

Çalışma gerilimi 154 kV, çalışma frekansı ise 50 Hz'dir.  $V_1 = 154$  kV rms (*hat gerilimi*),  $R_f = 4.59 \Omega$  ve  $X_f = 26.05 \Omega$ 'dur. 2 adet 6-darbeleri gerilim kaynaklı konvertörlerden oluşan STATCOM, Şekil 2'de görüldüğü gibi bir kondansatörün oluşturduğu DC bir linkten beslenmektedir. Çalışmada anma DC link gerilimi 70 kV olarak seçilmiştir. STATCOM'un temel yapıtaşı olan konvertörler Gate-Turn-Off Tristör (GTO), (ON/OFF direnci =  $0.005 \Omega/1.0E8 \Omega$ ) ve ona ters paralel bağlı diyotlardan oluşmaktadır. Her bir diyot için paralel bir snubber devresi mevcut olup, snubber direnci 5.0 k $\Omega$  ve snubber kapasitansı ise 0.05  $\mu F$  olarak alınmıştır. GTO'lar için ayrı bir snubber devresi bulunmamaktadır. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM) konvertörlerin çıkışlarındaki harmonik bileşenleri azaltmakta ve GTO 'ları yüksek anahtarlama frekanslarında tetikleme imkanı vermektedir [19].



Şekil 1. Örnek bir güç sistemine ortak bir kuplaj noktasında bağlı olan STATCOM.

Her bir konvertörün büyüklüğü ve faz açıları denetlenebilen üç faz AC çıkışı, birer 3-faz kuplaj trafosu üzerinden toplanabilmekte, bu sayede STATCOM PCC'de eşdeğer bir AC gerilim üretebilmektedir. Her bir konvertör için düşünülen 3-faz kuplaj trafosu 3-adet tek-faz trafodan meydana gelmiştir. Üst konvertör için trafo bankaları yıldız-yıldız olarak bağlanmıştır. ( $tr_{A1}-tr_{A2}-tr_{A3}$ ), (16.67 MVA, 154/35 kV, sızıntı reaktansı,  $X_{tr_{Ai}} = 0.1$  pu), diğer taraftan alt konvertör için trafo bankaları yıldız-üçgen olarak bağlanmıştır. ( $tr_{B1}-tr_{B2}-tr_{B3}$ ), (16.67 MVA, 154/50 kV, sızıntı reaktansı,  $X_{tr_{Bi}} = 0.1$  pu). Konvertör ve trafolar arasındaki bağlantı detayları Şekil 2' de görülebilir.

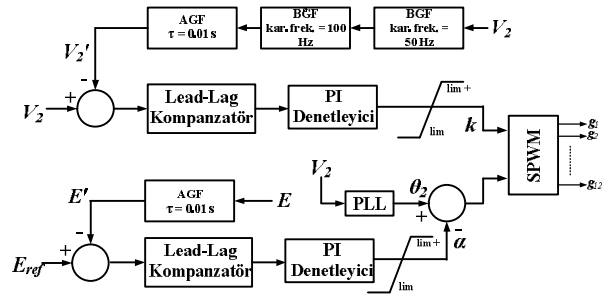


Şekil 2. STATCOM için çoklu konvertör konfigürasyonu: 2 adet 6-darbeleri gerilim kaynaklı konvertörler ve 6 adet tek-faz trafo bankaları.

Trafo bankalarının anma gerilim-güç değerleri STATCOM denetim sisteminin performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmiştir. Güç sistemi ve STATCOM'un çalışma prensibi dengeli 3-faz olarak kabul edilmiştir.

## 2.2. STATCOM Denetimi

Bu çalışmada STATCOM, şönt reaktif kompanzasyon tekniği ile PCC'deki gerilim büyüklüğünü dinamik olarak denetimi için tasarlanmıştır. Güç sistemi ile enerji depolayan DC link kondansatörü arasında gerçekleşen aktif güç değiş-tokuşu sayesinde STATCOM, Q-P yüzeyinin her dört bölgesinde çalışabilmektedir [12]. STATCOM gerilim denetimi için genel olarak 2 tip mod vardır [20].

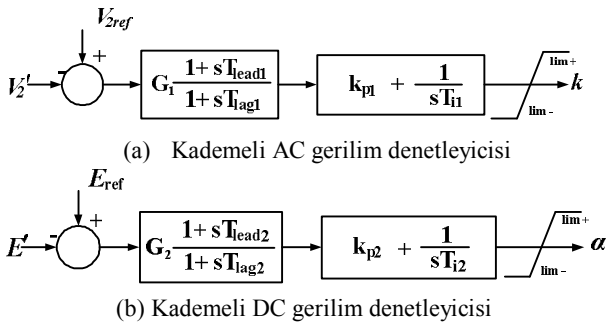


Şekil 3. Tümüleşik STATCOM Denetleyici Yapısı.

Birinci tip denetim modunda, DC link gerilimi,  $E$ , (Şekil 2) STATCOM çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimi arasındaki faz farkının ( $\theta_{sh} - \theta_2$ ) dinamik olarak değiştirilmesiyle regüle edilmekte, bu sayede PCC'deki gerilim denetlenebilmektedir. Bu çalışma için seçilen ikinci tip denetim modunda ise, DC link gerilimi,  $E$ , birinci tip denetim modunda belirtilen faz açısı regülasyonu sayesinde sabit tutularak (@70.0 kV) PCC'deki gerilimin, modülasyon endeksinin,  $k$ , dinamik olarak denetimi ile istenilen değerde kalması sağlanmaktadır. Modülasyon endeksi,  $k$ ,  $V_{sh}$ ,  $E$  ve STATCOM'da kullanılan konvertör topolojisine bağlı bir değişkendir.

STATCOM için tasarlanan tümleşik denetleyici yapısı Şekil 3'te çizilmiştir. PCC'de ölçülen AC gerilim,  $V_2$ , gürültüsüz ve düzgün bir işaret için üç aşamalı bir filtreden geçirilmiştir. Bu filtre grubu, alçak geçiren bir filtreden ve iki adet bant geçirmeyen filtreden oluşmuştur [21]. Filtrelenen değer,  $V_2'$ , referans değer olan  $V_{2ref}$  (@ 1.0 pu) ile karşılaştırılmıştır. Hata işareti sırasıyla lead/lag kompanzatore ve PI denetleyiciye aktarılmıştır. Bu iki ardışık denetleyici modülasyon endeksinin,  $k$ , ( $0.0 \leq k \leq 1.0$ ) dinamik olarak denetimini gerçekleştirmektedir. Diğer taraftan her iki konvertör için ortak DC link gerilimi,  $E$ , ilk önce alçak geçiren bir filtreden geçirilmiştir. Daha sonra filtrelenen değer,  $E'$ , referans değeri olan  $E_{ref}$  (@ 1.0 pu) ile karşılaştırılmıştır. Hata işareti sırasıyla lead/lag kompanzatore ve PI denetleyiciye aktarılarak faz açısı kaydırımının ( $-\pi \leq \theta_{sh} - \theta_2 \leq \pi$ ) dinamik olarak denetlenmesi sağlanmıştır. PCC gerilimine ait olan  $\theta_2$  açısını yakalamak ve istenen faz kaydırmasını sağlamak için bir faz kilitli çevrim

kullanılmıştır.  $k$  ve  $(\theta_{sh} - \theta_2)$  değerleri GTO'lar için gerekli anahtarlama işaretlerinin üretimi için geleneksel SPWM darbe üreticini sürmektedir. SPWM'de üçgensel taşıyıcı frekansı temel frekansın (@50 Hz) bir tamsayı katı olarak 1650 Hz olarak seçilmiştir. PI denetleyicilerin ve lead/lag kompanzatorlarının parametreleri Şekil 4'te görülebilir. Şekil 4(a)'da kademeli AC gerilim denetleyicisi, Şekil 4(b)'de ise kademeli DC gerilim denetleyicisi görülmektedir. Lead/lag kompanzatorlarının kazançları,  $G_1=G_2=1.0$  olarak alınmıştır.  $T_{lead}$  ve  $T_{lag}$  ise lead/lag zaman sabiteleridir.  $T_{lead} > T_{lag}$  olduğunda kompanzator bir lead ağı olmakta,  $T_{lead} < T_{lag}$  olduğunda ise kompanzator bir lag ağı olmaktadır.  $k_{pi}$  ve  $T_{ii}$  ise geleneksel PI denetleyicilerinin sırasıyla oransal kazançları ve tümlev zaman sabiteleridir. Şekil 3 ve Şekil 4'te görülen PI denetleyicilerin üst ve alt limitleri STATCOM denetim sisteminin geçişken performansında önemli bir rol oynadığı saptanmış ve çalışmada uygun değerlere getirilmiştir.



Şekil 4. Tanımlı parametreler ile STATCOM'un kademeli denetleyici yapıları. a) AC gerilim denetleyicisinin blok diagramı, b) DC gerilim denetleyicisinin blok diagramı.

### 2.3. STATCOM için L-C Filtre Grupları

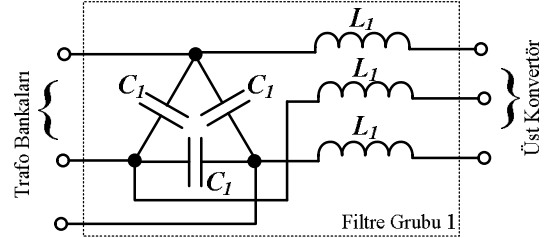
STATCOM'un konvertörlerine ait L-C filtre grupları Şekil 5'te gösterilmiştir. Her iki konvertör için özdeş bir filtre yapısı düşünülmüş, Şekil 5(a)'da üst konvertör için L-C filtre grubunun, Şekil 5(b)'de ise alt konvertör için L-C filtre grubunun bağlantı şekilleri görülmektedir.

## 3. Optimizasyon Yöntemi

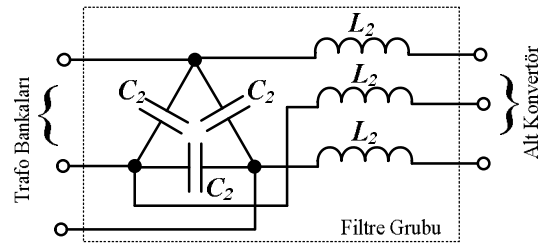
### 3.1. Simplex Yöntemi

Nelder ve Mead' a ait olan Simplex yöntemi direk bir arama algoritması olup, sistemlerin gradyan bilgilerine dayanmayıp, geometrik yaklaşımlara dayanmaktadır [18]. Bu yegane özelliği sayesinde bu yöntem yüksek dereceli doğrusal olmayan çok-giriş çok-çıkışlı sistemlere uygulanabilir. Bu sayede sistemin transfer fonksiyonuna veya matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaz. Dolayısıyla bu yöntem, çoklu değişkenlerden oluşan bir hedef fonksiyonuna ait yerel minimum noktalarının bulunmasında kolaylıkla kullanılabilir. Simplex, köşeleri  $n+1$  tane olan bir küme tarafından tanımlanan geometrik bir şekildir. Burada  $n$  uzaydaki boyut sayısını ifade etmektedir. Örneğin,  $n=2$  için simplex bir üçgen,  $n=3$  için ise simplex dört yüzlü bir piramittir. Eğer simplex bir üçgen ise problem, fonksiyon değerlerini bir üçgenin üç

köşesi için karşılaştıran bir örüntü arama problemi olmaktadır. Fonksiyon değerinin en kötü olduğu köşe noktası çıkarılmakta ve yeni bir köşe noktası ile değiştirilmektedir. Bu sayede yeni bir üçgen oluşturulmakta ve fonksiyon değeri daha küçük olan noktalar için aramaya devam etmektedir. Bu süreç köşe değerleri git gide küçülen bir dizi üçgen oluşturmaktadır. Bu şekilde oluşan yeni üçgenlerin alanları küçülmekte ve en küçük noktanın koordinatları ortaya çıkmaktadır.



(a) Üst Konvertör için L-C filtre Grubu



(b) Alt Konvertör için L-C filtre Grubu

Şekil 5. STATCOM Konvertörleri için L-C Filtre Grupları

### 3.2. Önerilen Çözüm Yöntemi

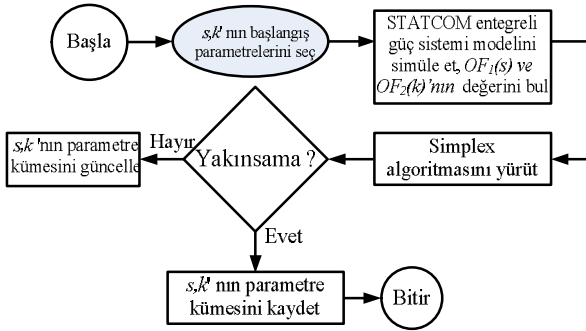
Simplex yöntemi kullanılarak STATCOM denetim sisteminin parametre optimizasyonu ve L-C filtre grubunun parametre optimizasyonu için önerilen çözüm yönteminin akış şeması Şekil 6'da gösterilmiştir. Önerilen optimizasyon yöntemi PSCAD/EMTDC ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı akış şeması STATCOM' a ait L-C filtre gruplarının parametre optimizasyonu için de düşünülebilir. Şekil 6'da görüldüğü gibi hedef fonksiyonunun seçimi ve değerlendirilmesi önem arz etmekte ve problemin çekirdeğini oluşturmaktadır. Bu yüzden hedef fonksiyonu belirlerken, denetim sisteminin çoklu parametre optimizasyonu için kullanışlı bir performans endeksi olan tümlelik karesel hata ölçütü (ISE) kullanılmıştır. ISE tipik bir denetim sistemindeki ölçülen ve referans değerlerinin farkı olan hata fonksiyonunun karesinin tümlevine bağlı bir ölçüttür. ISE'de hata fonksiyonunun negatif değerlerini kompanse etmek için hata fonksiyonunun karesi alınmaktadır ve denetim sistemlerine de uygulanması bakımından pratiktir [17]. Bu çalışmada seçilen hedef fonksiyonu,  $OF_1(s)$ , 2 adet ISE performans endeksinin toplamından oluşmaktadır.  $V_{2ref} - V_2'$  AC gerilim denetleyicisi için hata işareti,  $E_{ref} - E'$  ise DC gerilim denetleyicisi için hata işaretidir. Her iki işaret hedef

fonksiyonunu oluşturmaktadır. Eşitlik 2’de ise STATCOM’ a ait L-C filtre gruplarının parametre optimizasyonu için düşünülmüş hedef fonksiyonu yer almaktadır. Bu hedef fonksiyonu,  $OF_2(k)$ , başka bir performans endeksine bağlı olarak, PCC’deki  $V_2$  geriliminin toplam harmonik bozulması (THD) [19] baz alınarak çıkarılmıştır.

$$OF_1(s) = K_1 \int_{t=t_0}^{T_{ISE}} (V_{2,ref} - V_2')^2 dt + K_2 \int_{t=t_0}^{T_{ISE}} (E_{ref} - E')^2 dt \quad (1)$$

$$OF_2(k) = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{V_n}{V_1} \right)^2} \quad (2)$$

Eşitlik 1’de  $s$  denetim sisteminin parametre kümesidir ve  $s = \{k_{p1}, T_{i1}, k_{p2}, T_{i2}, T_{lead1}, T_{lag1}, T_{lead2}, T_{lag2}\}$  olarak tanımlanmaktadır.  $K_1$  ve  $K_2$  ise ISE perfomans endekslerinin ağırlıklı faktörleridir.  $t_0$  ise algoritma için seçilen başlangıç zamanıdır. Tümlemin üst limiti olan  $T_{ISE}$ ,  $T_{ISE} \gg T_s$  olacak şekilde seçilmiştir. Buradaki  $T_s$  ise denetim sisteminin zaman ayarıdır. Eşitlik 2’de belirtilen  $k$  ise L-C filtre grubunun parametre kümesidir ve  $k = \{L_1, L_2, C_1, C_2\}$  olarak tanımlanmıştır.  $V_n$ , gerilimin n’inci harmonik bileşeninin rms değerini,  $V_1$  ise gerilimin fundamental bileşenini ( $n=1$ ) ifade etmektedir.



Şekil 6. Simplex yöntemi kullanılarak oluşturulan STATCOM denetim sistemi ve L-C filtre grubunun parametre optimizasyonunun akış şeması.

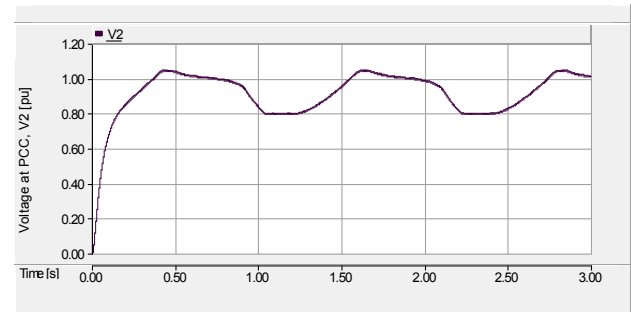
Optimizasyon sürecinde hedef  $s$ 'i  $OF_1(s)$ ' in en küçük değeri için bulmaktır. STATCOM denetim sisteminin her koşulunun sonunda algoritma  $OF_1(s)$ 'in değerini kaydetmekte ve bu değerler koşullar arasında birbiri ile karşılaştırılmaktadır. Algoritma, bu karşılaştırma esnasında eğer fark daha önceden tanımlanmış bir tolerans değerine eşit veya daha küçük ise durmaktadır.  $s$ 'in ilk değer kümesi bir dizi ön çalışmadan sonra dikkatle seçilmiştir. Algoritmanın yürütüm süresi,  $s$ 'in ilk değer kümesine ve tolerans değerine göre değişmektedir. Her bir yeni iterasyonda Simplex yöntemi  $OF_1(s)$ 'i süren  $s$ 'in yeni bir parametre kümesini seçmektedir. Deneyimler, öngörülen algoritmanın tolerans değeri  $1.0E-7$  için,  $1000$ 'den daha az sayıdaki iterasyonla yakınsadığını göstermektedir. Bu iterasyon sayısı PI denetleyicilerinin ve lead/lag kompanzatorlerin parametre optimizasyonu için kullanılan diğer sayısal yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça küçük kalmaktadır. Örneğin  $s$

kümesinin bir elemanın 100 farklı değeri için öngörülen iterasyon sayısı  $10^{16}$  dır ki, bu değer gerçekçi olmamakla birlikte uygulaması hemen hemen imkansızdır. AC ve DC denetleyicilerin basamak yanıtları her bir  $s$  kümesi için  $OF_1(s)$ 'i minimize etmek için simüle edilmiştir. Algoritmanın adım büyüklüğünün, yakınsama hızı ve iterasyon sayısını etkilediği de gözlemlenmiştir.  $s$ 'in farklı başlangıç değerleri ve farklı başlangıç adım büyüklükleri kullanılarak  $OF_1(s)$ 'in yerel minimum değerine ulaşması sağlanmış, bunun için bir dizi çoklu koşu gerçekleştirilmiştir. Çözümünden emin olmak ve çözümün sağlamlığını doğrulamak için STATCOM entegre edilmiş güç sistemi modeli uzun bir süre simüle edilmiştir. Her iki hedef fonksiyonunun minimizasyonunda; ilk önce  $OF_1(s)$ , filtre grupları de-aktif edilerek minimize edilmiş daha sonra, bulunan optimal  $s$  kümesi kullanılarak,  $OF_2(k)$  fonksiyonunun minimizasyonu yapılmış, bu sayede optimal  $k$  kümesi bulunmuştur.  $OF_2(k)$  minimize edilirken Şekil 6’da gösterilen aynı akış şeması kullanılmıştır.

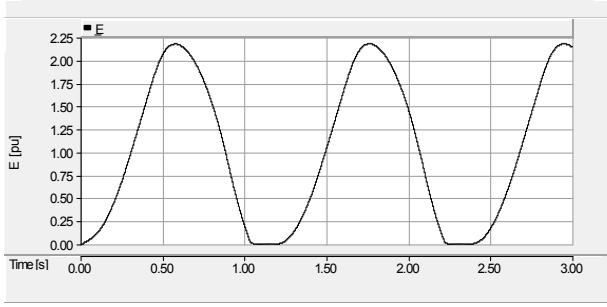
### 3.3. Durum Çalışmaları

#### 3.3.1. Denetim Sisteminin Parametre Optimizasyonu

İlk önce, tüm sistemin STATCOM olmadan benzetim çalışması yapılmış, sisteme ait veriler gözlemlenmiştir. PCC gerilimi,  $V_2$  0.85 pu olarak ölçülmüştür ( $V_{base}=154$  kV). Diğer taraftan, aktif-reaktif hat güç akışları  $P_L$  ve  $Q_L$  sırasıyla 1.4 pu ve 0.8256 pu olarak ölçülmüştür ( $S_{base}=100$  MVA). İlk adım olarak STATCOM denetim sistemi için optimize olmayan bir parametre kümesi,  $s$  seçilmiş, bu parametre kümesi ile sistemin benzetim çalışması yapılmıştır. Optimize olmayan parametre kümesi,  $s$  için  $OF_1(s)$  0.281007 olarak hesaplanmıştır. Optimize olmayan parametre kümesi,  $s$ 'in elemanları Tablo 1 ve 2’de listelenmiştir. Bu parametre kümesi ile yapılan benzetim çalışmalarında denetimi yapılan değişkenlerin referans değerleri etrafında osilasyon yaptığı Şekil 7 ve 8’de gösterildiği şekilde gözlemlenmiştir.



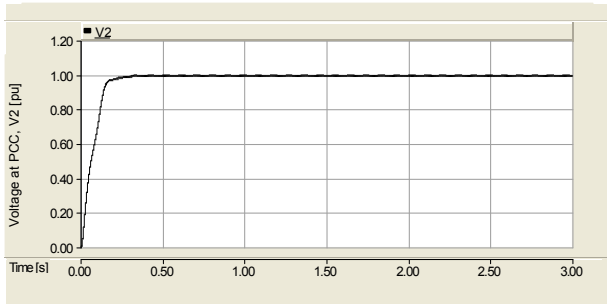
Şekil 7. Optimize edilmemiş parametreler için OKN gerilimi,  $V_2$  (pu) adım yanıtı.



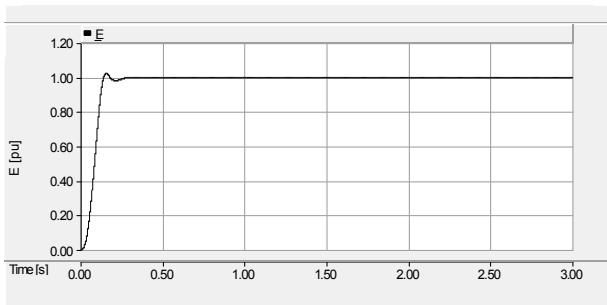
Şekil 8. Optimize edilmemiş parametreler için DC link gerilimi,  $E$  (pu) adım yanıtı.

Daha sonra önerilen çözüm yöntemi ile Eşitlik (1) minimize edilmiştir. 308 iterasyondan sonra optimize edilmiş parametre kümesi,  $s^*$ 'e ulaşılmıştır. Optimize edilmiş parametreler Tablo 1 ve 2'de listelenmiş ve bu parametreler STATCOM denetim sistemine uygulanmıştır. Elde edilen AC ve DC gerilim denetleyicilerine ait basamak yanıtları Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.

Şekil 9'de görüldüğü üzere, AC gerilim denetim döngüsüne ait çıkış zamanı ( $T_r$ ) 0.25 saniyedir. Şekil 10'da DC gerilim denetim döngüsüne ait çıkış zamanı ise ( $T_r$ ) 0.135 saniyedir.  $OF_I(s)$ 'in iterasyon sayısına göre değişimi ise Şekil 11'da gösterilmiştir. STATCOM denetim sistemine optimize edilmiş parametreler uygulandığında, kaydedilen üst ve alt konvertörlere ait hat gerilimleri sırasıyla Şekil 12 ve 13'de gösterilmiştir.



Şekil 9. Optimize edilmiş parametreler için OKN gerilimi  $V_2$  (pu) adım yanıtı.



Şekil 10. Optimize edilmiş parametreler için DC link gerilimi,  $E$  (pu) adım yanıtı.

Tablo 1

Optimizasyondan Önce ve Sonraki AC Gerilim Denetim Parametreleri

Yöntem	$K_{p1}$	$T_{i1}$	$T_{lead1}$	$T_{lag1}$
Optimize	0.050000	0.010000	0.001000	0.000100

edilmemiş ( $OF_I(s) = 0.281007$ )				
Simplex ( $OF_I(s) = 0.027678$ )	1.000695	0.095242	0.095242	0.170029

Tablo 2

Optimizasyondan Önce ve Sonraki DC Gerilim Denetim Parametreleri

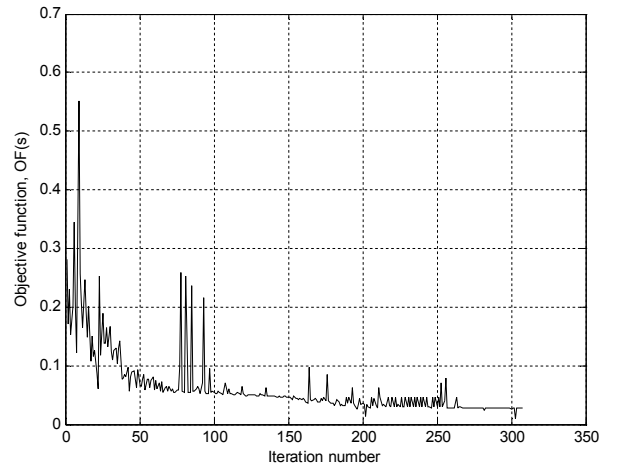
Yöntem	$K_{p2}$	$T_{i2}$	$T_{lead2}$	$T_{lag2}$
Optimize edilmiş ( $OF_I(s) = 0.281007$ )	0.050000	0.010000	0.001000	0.000100
Simplex ( $OF_I(s) = 0.027678$ )	0.849775	0.000428	0.082754	0.001654

STATCOM gerilim denetiminin yanısıra iletim kapasitesinin iyileştirilmesi için de kullanılabilir [11]. Hat güç akışları ( $P_L$ ,  $Q_L$ ) STATCOM'un sisteme entegre edilmesiyle birlikte artmıştır.  $P_L$  and  $Q_L$  'deki değişimler yüzde olarak Tablo 3'te listelenmiştir.

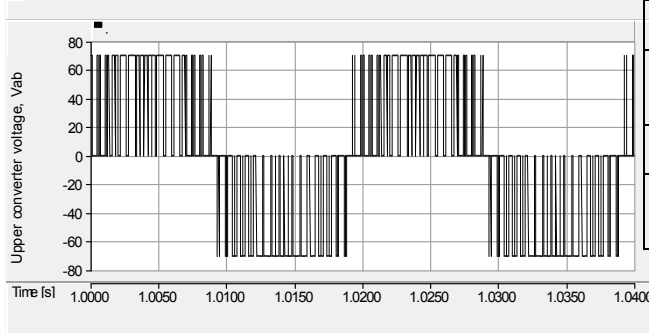
Tablo 3

STATCOM ve STATCOM olmadan Hat Güç Akışları

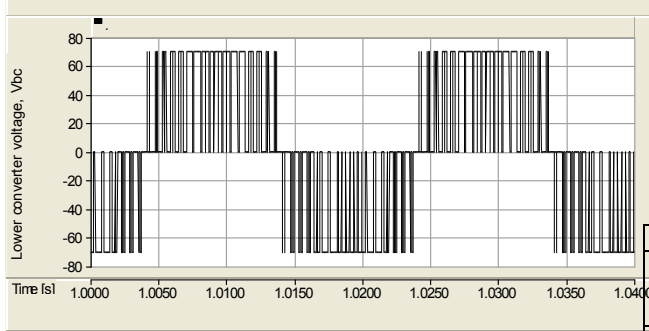
Hat Güç Akışları	STATCOM yok	STATCOM var	Yüzde Değişim (%)
$P_L$	1.4000 pu	1.8683 pu	+ 33.45
$Q_L$	0.8256 pu	1.0960 pu	+ 32.75



Şekil 11. Hedef fonksiyonu  $OF_I(s)$ 'in iterasyon sayısına göre değişimi.



Şekil 12. Optimize edilmiş parametreler için STATCOM üst konvertörünün hat gerilimi,  $V_{ab}$ .



Şekil 13. Optimize edilmiş parametreler için STATCOM alt konvertörünün hat gerilimi,  $V_{bc}$ .

Optimize edilmemiş parametre kümesi,  $s$  için, AC gerilim denetleyicisindeki lead/lag kompanzator bir lead ağı olmuştur ( $T_{lead1} > T_{lag1}$ ). Aynı durum DC gerilim denetleyicisi için de gözlemlenmiştir ( $T_{lead2} > T_{lag2}$ ). Fakat optimize edilmiş parametreler uygulandıktan sonra AC gerilim denetleyicisindeki lead/lag kompanzator bir lag ağı olmuştur ( $T_{lead1} < T_{lag1}$ ). DC gerilim denetleyicisindeki lead/lag kompanzator ise bir lead ağı olarak kalmaya devam etmiştir ( $T_{lead2} > T_{lag2}$ ).

### 3.3.2. L-C Filtre Grupları için Parametre Optimizasyonu

Önerilen Simplex tabanlı optimizasyon yöntemi, STATCOM'a ait L-C filtre gruplarının parametre optimizasyonu için de PSCAD/EMTDC ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yöntem gerçekleştirilirken, Tablo 1 ve 2'de listelenmiş denetleyici parametrelerinin optimum değerleri kullanılmıştır. İlk önce, algoritma çalıştırılmadan ve filtreler devre dışı bırakılarak PCC'deki  $V_2$  gerilimine ait THD, konvertörler için seçilen farklı anahtarlama frekansları için ölçülmüş ve elde edilen veriler Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Bazı Anahtarlama Frekanslarına Bağlı  $V_2@PCC$  için THD Değerleri

Anahtarlama Frekansı (Hz)	150	450	750	1050
$V_2@PCC$ % THD L-C OFF	9.04	4.22	2.98	2.08
Anahtarlama Frekansı (Hz)	1350	1650	1950	2250
$V_2@PCC$ % THD L-C OFF	1.71	1.07	0.28	0.21

Anahtarlama frekansı 150 Hz, 450 Hz ve 750 Hz için IEEE SM 519-1992 [22]'ye göre THD > % 2.5 olarak tesbit edilmiştir. Bu frekans değerleri için önerilen optimizasyon yöntemi kullanılarak Eşitlik (2), üst sınır  $n = 31$  alınarak minimize edilmiş, anahtarlama frekansı 450 Hz ve 750 Hz için THD ≤ % 2.5 olması sağlanmış ve  $k = \{L_1, L_2, C_1, C_2\}$  kümesinin optimal değerleri bulunarak Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. Bazı Anahtarlama Frekanslarına Bağlı  $V_2@PCC$  için Optimum THD Değerleri ve Optimum L-C Filtre Parametreleri

Anahtarlama Frekansı = 150 Hz					
$V_2$ % THD L-C OFF	$V_2$ Opt. % THD L-C ON	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	$C_1$ ( $\mu$ F)	$C_2$ ( $\mu$ F)
9.04	5.23	8.388	12.500	0.102	0.107
Anahtarlama Frekansı = 450 Hz					
$V_2$ % THD L-C OFF	$V_2$ Opt. % THD L-C ON	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	$C_1$ ( $\mu$ F)	$C_2$ ( $\mu$ F)
4.22	2.42	17.129	16.673	0.053	0.053
Anahtarlama Frekansı = 750 Hz					
$V_2$ % THD L-C OFF	$V_2$ Opt. % THD L-C ON	$L_1$ (mH)	$L_2$ (mH)	$C_1$ ( $\mu$ F)	$C_2$ ( $\mu$ F)
2.98	1.79	16.951	15.940	0.071	0.072

Anahtarlama frekansı  $\geq 1050$  Hz için filtre kullanılmadan THD ≤ % 2.5 olduğundan, bu frekans değerleri için L-C parametre optimizasyonu yapılmamıştır. Ayrıca L-C filtre parametrelerinin optimizasyonunda ortalama iterasyon sayısı < 350 olarak gözlemlenmiştir.

## 4. Sonuç

Bu çalışmada, 2 adet 6 darbeli gerilim kaynaklı konvertör tabanlı bir STATCOM'a ait AC ve DC gerilim denetleyicilerinin parametre optimizasyonu Simplex algoritmasına bağlı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ortak kuplaj noktasındaki gerilime ait THD'nin standartlara uygunluğu için STATCOM'un alt ve üst konvertörlerine özdeş birer L-C filtre tasarlanmış ve gerilim denetleyicileri için önerilen optimizasyon yönteminin aynı L-C parametrelerinin optimizasyonu için de kullanılmıştır. Her iki optimizasyon yönteminde herhangi bir matematiksel modellemeye gidilmemiş, tasarlanan hedef fonksiyonları sayesinde optimum parametre kümeleri bulunmuştur. Algoritmanın her iki optimizasyon yöntemi için ihtiyaç

duyduğu yakınsama zamanı, deneme yanılma yöntemleri veya parametrelerin ardışıl olarak değiştirilmesine dayanan yöntemlerin ihtiyaç duyduğu zamanlara oranla çok daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. Kaynakça

- [1] Rao, P., Crow, M.L., and Yang, Z., "STATCOM control for power system voltage control applications", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, issue. 4, pp. 1311-1317, Oct. 2000.
- [2] Tapia O. R., Ramirez, J.M., "Power Systems Neural Voltage Control by a StatCom", *International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN, 2006*.
- [3] Xue, C.-F., Zhang, X.-P., and Godfrey, K.R., "Design of STATCOM damping control with multiple operating points: a multimodel LMI approach", *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 3, issue 4, pp. 375-382, July 2006.
- [4] Nassif, A.B., da Costa, V.F., da Silva, L.C.P., "Effects of the SVC and the STATCOM on Damping Power Systems Low Frequency Electromechanical Oscillations", *IEEE Trans. Latin America*, vol. 2, issue 2, pp.120-125, June 2004.
- [5] Padiyar, K.R., and Prabhu, N., "Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 21, issue 3, pp. 1398-1405, July 2006.
- [6] Khalilinia, H., Ghaisari, J., "Improve Sub-Synchronous Resonance (SSR) damping using a STATCOM in the transformer bus", *In Proc. EUROCON 2009*, pp. 445-450.
- [7] Joorabian M., Mirabbasi D., Sina A., "Voltage flicker compensation using STATCOM" *In Proc. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, pp. 2273 - 2278.
- [8] Hidese, K., Ishizuka, T., Aoyama, F., Ota, S., and Ogushi, K., "Development on 31.5MVA STATCOM and digital evaluation tool for voltage flicker compensation", *In Proc 7th International Conference on Power Electronics, ICPE, 2007*, pp. 1230-1234.
- [9] Mazurov, M.L., Nikolaev, A.V., and Lozinova, N.G., "Improvement of voltage quality in AC network by use of STATCOM", *In Proc. IEEE Power Tech, 2005*, Russia, pp. 1 - 4.
- [10] Mienski, R., Pawelek, R., and Wasiak, I., "Shunt compensation for power quality improvement using a STATCOM controller: modelling and simulation", *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, issue 2, March 2004, pp. 274 - 280.
- [11] Singh, B., and Saha, R., "Enhancing Power Transfer Capacity of Transmission System by a Reduced Magnetics Based 48-Pulse STATCOM Controller", *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, POWERCON, 2008*, pp. 1 - 8.
- [12] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, and Bikash Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control (Power Systems)*, Springer, 2006.
- [13] Fujii, T., Chisyaki, H., Teramoto, H., Sato, T., Matsushita, Y., Shinki, Y., Funahashi, S., and Morishima, N., "Coordinated Voltage Control and Continuous Operation of the 80MVA STATCOM under Commercial Operation" *In Proc. Power Conversion Conference, PCC - Nagoya, 2007*, pp. 969 - 974.
- [14] Wang, H.F., Li, H., and Chen, H., "Application of cell immune response modelling to power system voltage control by STATCOM", *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, issue 1, pp.102 - 107, Jan. 2002,
- [15] Li Qiu and Kemin Zhou, *Introduction to Feedback Control*, Prentice Hall, 1<sup>st</sup> edition, 2009.
- [16] Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado, *Control System Design*, Prentice Hall, 2000. REF
- [17] Stanley M. Shinnars, *Modern Control System Theory and Design*, Wiley-Interscience; 2nd edition, 1998.
- [18] C. T. Kelley, "Iterative Methods for Optimization (Frontiers in Applied Mathematics)", Society for Industrial Mathematics, 1987.
- [19] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice (IEEE Press Series on Power Engineering)*, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [20] Schauder, C. ; Mehta H. Vector Analysis And Control Of Advanced Static VAR Compensators. *IEE Proceedings-C*, vol.140, No.4, July, 1994.
- [21] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, *Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems*, (IEEE Press Series on Power Engineering), Wiley-IEEE Press, 2002.
- [22] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineering, April 1993.