

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE STATCOM KULLANIMI İLE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ

Ergin KAYAR¹, Hamza Feza CARLAK²

Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Antalya, Türkiye

¹erginkayar07@gmail.com

²fezacarlak@akdeniz.edu.tr

ÖZET

Enerji kalitesinin optimum olarak sağlanabilmesi için güç sistemlerindeki kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilmesi amacıyla pilot bir güç sistemi bölgesi modellenerek fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Güç elektroniğine dayalı mikro elektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) olarak isimlendirilen yeni bir kontrol sisteminin bir parçası olan STATCOM (Static Synchronous Compensators) ile güç sistemleri kontrol altında tutularak güç transferlerinin düzenlenip taşıma kapasitelerinin de belirli sınırlar dâhilinde artırılabilmesi ön görülmektedir. Batı Akdeniz Bölgesi'nde yer alan Denizli batı bölgesi enerji iletim sisteminde gerçek değerlerle 10 baralı sistemin benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi parametrelerle yük akışı analizi ile elde edilen sonuçların yorumlanarak, dinamik bir sistem olan güç sistemlerinin, anlık ihtiyaçlara bağlı olarak reaktif güç üretip tüketebilen ve reaksiyon süresi oldukça yüksek olan sistemler olduğu görülmüştür. Güç şebekelerinde maksimum yüklenme sınırlarının STATCOM kullanımı ile artırılabilmesi ve sistemin kontrolünü de kolaylaştırabileceği, simülasyon sonuçlarında görülmektedir. Sisteme dair yük akışı analizleri, DigSilent Power Factory Güç Sistemi Analiz programı ile, ulusal elektrik enerji ağı sisteminin reaktif güç kontrolü gerçekçi model üzerinden STATCOM teknolojisi kullanılarak fizibilitesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hali hazırda kullanılan mevcut sistemle karşılaştırılarak, sağlanmış olduğu faydalar, Türkiye enterkonnekte sisteminin iyileştirmesi için değerlendirilmesi planlanmaktadır. **Anahtar Kelimeler:** Güç Sistemi, FACTS, STATCOM, Gerilim Kararlılığı, Güç Sistemi Parametrelerinin Optimizasyonu

1.GİRİŞ

Güç sistemlerinde aktif güç, reaktif güç, empedans ve gerilim kontrolü için kullanılan güç elektroniği tabanlı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) olarak tanımlanmaktadır. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri cihazlarının büyük güçlü elektrik güç sistemlerinin kullanımı sayesinde sistem kontrolü sağlanmaktadır. Bu bağlamda güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim transfer kapasitesinin

artırılmasında, gerilim kararlılığında, reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlayan cihazların yerinin ve boyutunun belirlenmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Literatürde ilgili çalışmalara bakıldığında, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri teknolojisine yönelik çalışmalar yapılmış ve kontrolörleri sınıflandırılarak incelenmiş olmasına karşın gerçek bir enerji iletim sistemi için bütün parametreler hesaba katılarak gerçekçi değerlerle oluşturulmuş bir güç sistemi modeli için Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri ailesinden olan STATCOM teknolojisi kullanılarak fizibilite çalışması

gerçekleştirilmiştir. Enerji iletim şebekelerinde dinamik çalışmalar uygun sistem planlaması ve işletimi için önemlidir ve elde edilen sonuçlar, sistemin sonunda kısmi veya tam çökmeye neden olabilecek dengesiz koşullarda çalışmasını önlemek için doğru adımların atılmasını sağlar. Bu bağlamda, şu anda dünyada yaygın olarak kullanılan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri cihazlarının STATCOM (Static Synchronous Compensators) aygıtların Batı Akdeniz Bölgesi'nde yer alan Denizli batı bölgesi enerji iletim sisteminde gerçek değerlerle 10 baralı sistemin benzetim çalışmasını elektrik güç sistemlerinin gerilim kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere tasarlanmış basitleştirilmiş modellere uygulamaktır. STATCOM cihazlarının bara gerilim değişimleri ve hat kapasiteleri açısından optimum yerleşimlerini ve değerlerini belirlenip, performansı test edilecektir. Diğer çalışmalardan farkı, sabit bir yük profili yerine uzun vadede anlık ve rastgele değişen gerçek yük profilinin kullanılmasıdır. Gerçek bir bölgeye ait ulusal veriler kullanılarak analizler gerçekleştirilecek ve elde edilen sonuçlar hali hazırda kullanılan mevcut sistemle karşılaştırılarak sağlamış olduğu faydalar Türkiye enterkonnekte sisteminin iyileştirmesi için değerlendirilecektir. Enerji iletim hatlarının reaktif güç sebebiyle aşırı yüklenmesini ve reaktif güçten kaynaklanan ilave kayıpları önlemek için mevcut durumda manuel olarak devreye alınıp devre dışı bırakılan kapasitör gruplarını veya reaktörleri, STATCOM teknolojisi kullanılarak otomatik olarak devreye alıp devre dışı bırakarak bu işlemin çok daha hızlı ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayarak kayıpların minimize edilmesi ve reaktif güç kontrolünün sağlanması

hedeflenmektedir. Enerji iletim hatlarının transfer edilen gücün kapasitesini, kontrol edilebilirliğini artırmak sistemin reaktif güç talebinin hızlı bir şekilde sağlamak için, statik kontrolörler ve güç elektroniği elemanları yardımı ile kompanzasyon yapılmaktadır. Yarı iletken tabanlı anahtarlama tip dönüştürücüler ile şönt reaktif kompanzator aygıtları tasarlanabilir. FACTS aygıtları, iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan anahtarlama dönüştürücü devreleri yardımı ile reaktif güç üretip tüketebilmektedirler. Güç iletim sistemlerinde FACTS 'lerin kullanılması ve gelişmesi güç sistemlerinin kararlılığını iyileştirmek için birçok uygulamayı da beraberinde getirmektedir [1], Sistemin kararlılığını artırmak ve güç akışını kontrol etmek amacıyla da kullanılmaktadırlar. Bu tip aygıtların en büyük avantajı esneklikleri ve kontrol edilebilirlikleridir [2], FACTS 'lerle ilgili uygulamalar genellikle gerilim kararlılığının artırılması, salınımların sönümlenmesi, güç sistemlerinde gerilim kontrolü ve güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesi gibi konular üzerine gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalar gerilim değerinin ve faz açısının kontrolü ile yapılabilir [3], STATCOM yük kompanzasyonu yapılmış ve geleneksel STATCOM ile DGM-STATCOM arasındaki kontrol farkını daha iyi görebilmek için geleneksel STATCOM 'la ilgili benzetim sonuçlarına da yer verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışması, STATCOM 'un beklenmeyen ani gerilim değişikliklerine dahi çok hızlı bir şekilde cevap verdiğini göstermektedir [4], FACTS modelleri cihazlarının enerji iletim şebekesine dahil edilmesine yönelik bir metodoloji açıklanmış.

Güç sistemi analiz programına, elektrik enerjisi sistemleri stabilite çalışmalarında uygulanması için STATCOM uygulama metodolojisi dört aşama içermektedir. Elde edilen sonuçlar, güç sistemi analiz yazılımı programındaki modellerin doğru uygulandığını ve FACTS cihazlarının güç sistemi istikrarını arttırmada hangi şekilde katkıda bulunduğunu göstermiştir [5].

Literatürde ilgili çalışmalara bakıldığında, FACTS teknolojisine yönelik çalışmalar yapılmış ve FACTS kontrolörleri sınıflandırılarak incelenmiş olmasına karşın gerçek bir enerji iletim sistemi için hatta dair bütün parametreler hesaba katılarak gerçekçi değerlerle oluşturulmuş gerçek bir güç sistemi modeli için FACTS teknolojisi kullanılarak fizibilite çalışması gerçekleştirilmemiştir.

2. YÖNTEM VE MODELLER

i. YÜK AKIŞ ANALİZİ YÖNTEMİ

Çalışmanın ilk aşamasında elektrik güç sistemlerinde kullanılan, transformatör, kapasitör, reaktör ve STATCOM gibi elektrik şebekelerinde aktif rol oynayan güç elemanları elektrik güç akışı algoritmaları ile analiz edilerek gerekli güç hesaplamaları yapılarak sistem modeli oluşturulacaktır. Fizibilite çalışmasının gerçekleştirileceği pilot bölgenin güç sisteminin modellenerek yük akışı analizinin gerçekleştirilmesinde:

Düğüm admitans matrisi yardımıyla şebekeye dair fazör akım ve gerilim bağıntıları matrisler halinde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \vdots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \vdots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

n : toplam düğüm sayısı

Y_{ii} : i düğümüne ait öz admitans (i düğümünde sonlanan tüm admitansların toplamı)

Y_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki ortak admitans (i ve j düğümleri arasındaki tüm admitansların toplamının ters işaretlisi)

V_i : i düğümündeki toprağa göre fazör gerilimi

I_i : i düğümünde şebekeye verilen fazör akımı

Şebeke düğümlerine bağlanmış olan generatörlerin, doğrusal olmayan yüklerin ve diğer cihazların etkileri düğüm akımında yansıtılır. Sabit empedanslı (doğrusal) yükler de düğüm admitans matrisinde yer alırlar. Düğüm eşitliklerinin oluşturulmasında, doğrusal olmayan güç akışı eşitliklerinde, eğer I akım girişleri bilirse eşitlik doğrusal olacaktır. Akım girişleri herhangi bir k düğümündeki P , Q ve V değerlerine bağlıdır:

$$\tilde{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\tilde{V}_k} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \text{---} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \text{---} \\ \Delta |V|_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V|_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

Yük baraları için P ve Q belli olup gerilim kontrollü baralar için de P ve \check{V} bellidir. Diğer düğüm tipleri için P, Q, \check{V} ve \check{I} arasındaki bağıntılar o düğümlere bağlanmış olan cihazların karakteristikleri ile tanımlanır. Çeşitli düğüm tiplerinin getirdiği sınır koşulları problemi doğrusal olmayan bir problem haline getirilmekte ve Fast -Decoupled Newton-Raphson Metodu kullanılarak iteratif olarak çözülmektedir. Fast -Decoupled Newton-Raphson Metodu, Newton-Raphson metodundaki Jacobian matrisinde reaktif gücün faz açısına bağlılığı (J3) ve aktif gücün gerilime bağlılığı (J2) ihmal edilerek yük akışı analizlerinin yapılması esasına dayandığı için hesaplama sürelerinin çok daha hızlandırılmış olduğu bir yöntemdir. Elde edilen denklem sistemleri eşitlik (5) ve (6)'da verilmiştir.

$$j_1(i)\Delta\delta(i) = \Delta P(i) \quad (5)$$

$$j_4(i)\Delta V(i) = \Delta Q(i) \quad (6)$$

Fast-Decoupled metodunun hesaplama süresini daha da kısaltmak amacıyla Jacobian matrisi başlangıç koşullarına göre oluşturularak hesaplama süresince sabit Jacobian'lı Fast-Decoupled metodu uygulanacaktır.

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = 2V_i G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ \neq i}}^n V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
(3) \quad &= 2V_i G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ \neq i}}^n V_k Y_{ik} [\cos(\theta_i - \theta_k) \cos \alpha_{ik} + \\
&\sin(\theta_i - \theta_k) \sin \alpha_{ik}] \\
&= 2V_i G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ \neq i}}^n V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + \\
&B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)]; \quad j = i \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
&= V_i Y_{ij} [\cos(\theta_i - \theta_j) \cos \alpha_{ij} \\
&\quad + \sin(\theta_i - \theta_j) \sin \alpha_{ij}] \\
&= V_i [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]; \quad j \neq i \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \approx 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \approx 0 \quad \Rightarrow \quad J_2 \approx 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} &= \sum_{\substack{k=1 \\ \neq i}}^n V_i V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) \\
&\quad + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)]; \quad j = i
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)]; \quad j \neq i \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \approx 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \approx 0 \quad \Rightarrow \quad J_3 \approx 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (15)$$

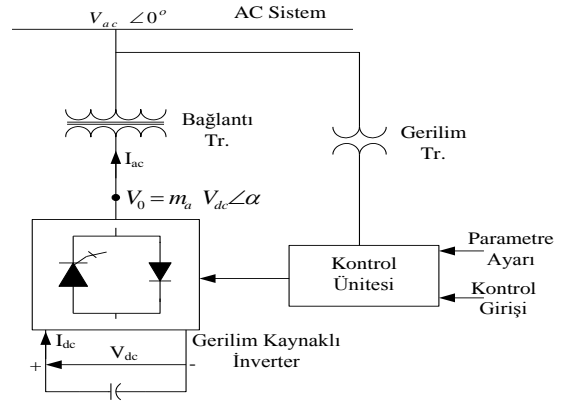
Çalışmada, süreksiz dağıtık üretim ve değişken güç talep durumları altında gün içi dinamik yük akış analizleri gerçekleştirilip, baraların elektriksel parametrelerinin saatlik bazda değişimleri hesaplanacaktır. Böylece, üretim süreksizliği gösteren kaynaklardan teşkil edilen dağıtık üretimin, gün içi değişen güç talepleri karşısında, baraların gerilim ve güç faktörleri kararlılığına etkileri analiz edilebilecektir.

ii. SİSTEM MODELLEMESİ

Çalışmalarda pilot bölge olarak seçilen Batı Akdeniz enerji iletim hattı modelinin gerçek saha verileri kullanılarak, gerekli olan (gerilimin sürekli dengesiz olan) trafo merkezleri bara sistemlerine FACTS cihazlarını bağlayıp sistemin güç hesaplamaları ve yük akışı analizi gerçekleştirilip gerilim düşümü ve reaktif güç kontrolleri sağlanmıştır. Modern kompanzasyon yöntemlerini oluşturan FACTS aygıtlarının, çok kısa sürede tepki vermesi, her fazın ayrı ayrı denetlenebilirliği, dengesiz yükleri kompanze edebilmesi dikkate alındığında bu cihazlarının kullanımı önem kazanmaktadır [6]. FACTS kontrolü bakımından güç elektroniği tabanlı olduğundan geleneksel kontrolörlere göre daha hızlı tepki verirler. Bu cihazlar uygun olarak kullanıldıkları zaman iletim hatlarının kararlılık sınırlarını artırır. FACTS'ların iki temel amaçları vardır. Bunlardan birincisi iletim sistemlerinin güç taşıma kapasitelerinin artırılması, ikincisi ise iletim hatları üzerindeki güç akışını kontrol etmektir [7]. Günümüzde FACTS adı altında birçok güç akış denetleyicisi geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları; Statik Var Kompanzator (SVC), Tristör Kontrollü

Seri Kapasitör (TCSC), Statik Kompanzator (STATCOM), Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC), Faz Kaydırıcısı ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) olarak gösterilebilir.

Gelişmiş Statik Var Kompanzator (ASVC) olarak bilinen STATCOM, güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve bir dc enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bir inverter bağlanarak yapılan FACTS kontrolörüdür. STATCOM iletim hattına şönt bağlanmaktadır. STATCOM iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. Bu işlem STATCOM'un esas fonksiyonudur [8]. Şekil 1 'de görüldüğü gibi en basit halde, bir STATCOM kontrolörü; bir bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı inverter ve dc enerji depolama elemanından oluşmaktadır. Enerji depolama elemanı oldukça küçük bir kondansatör olduğundan STATCOM iletim sistemi ile sadece reaktif güç alışverişi yapabilir.



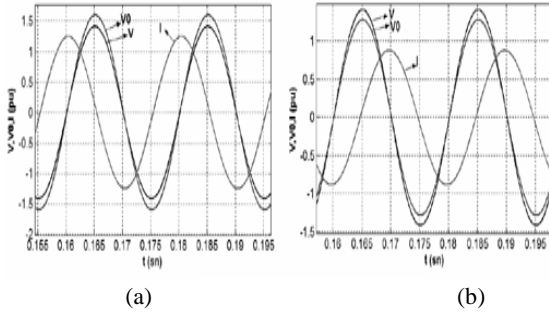
Şekil 1. STATCOM Elemanı Devre Şeması

Gerilim kaynaklı inverterden hatta doğru akan, akımın genlik değeri aşağıdaki denklem (16) ile hesaplanabilir. Burada X bağlantı transformatörünün kaçak

reaktansdır, karşılıklı alınıp verilen reaktif güç ise denklem (17)'deki gibi ifade edilebilir.

$$I_{ac} = \frac{V_0 - V_{av}}{X} \quad (16) \quad Q$$

$$= \frac{V_0^2 - V_0 V_{ac} \cos \alpha}{X} \quad (17)$$

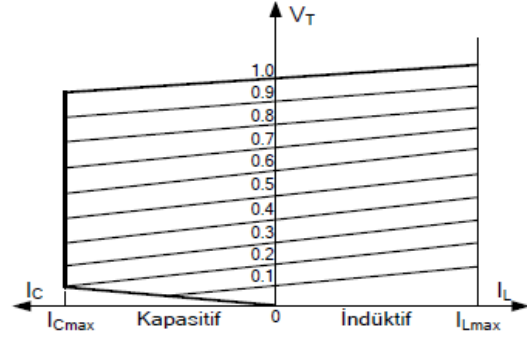


Şekil 2. STATCOM Kapasitif mod (a) Endüktif mod (b)

Gerilim kaynaklı inverterin 3-faz çıkış geriliminin genliği değiştirilerek, STATCOM'un reaktif güç üretmesi veya çekmesi kontrol edilebilir. Eğer inverterin çıkış gerilimi (V_0) ac sistem geriliminden (V_{ac}) büyük olursa, o zaman ac akım (I_{ac}), inverterden reaktif güç üreten ac sisteme transformatör reaktansı üzerinden akar. Bu durumda inverter ac sistem için, geriliminden ileride bir açıyla kapasitif akım üretir. Eğer inverterin çıkış geriliminin genliği ac sistem geriliminden küçük olursa, ac akım, ac sistemden gerilim kaynaklı invertere akar. Bu durumda ise inverter geriliminden geride bir açıyla endüktif bir akım çeker yani endüktif reaktif güç tüketir. Eğer inverterin çıkış gerilimi ve ac sistem gerilimlerinin genlikleri eşit ise, inverterden ac sisteme veya ac sistemden invertere bir ac akım akışı olmayacaktır. Kısaca inverter reaktif güç üretimi veya tüketimi yapmayacaktır [9]. Gerilim kaynaklı inverter ile AC sistem arasındaki

aktif güç alışverişi denklem (18) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P = \frac{V_0 V_{ac} \sin \alpha}{X} \quad (18)$$



Şekil 3. STATCOM V-I Karakteristiği

Şekil 3'te STATCOM V-I karakteristikleri verilmiştir. Alçak gerilimlerde STATCOM'un akım sağlama kapasitesi SVC'den çok daha iyidir. STATCOM herhangi bir sistem gerilimi değerinde tam kapasitif veya tam endüktif çıkış akımı sağlayabilir. STATCOM tarafından sağlanan reaktif güç kompanzasyonu miktarı fazladır çünkü düşük bir gerilim düzeyinde reaktif güç gerilimin karesi ile orantılı olarak azalırken STATCOM'da gerilim ile doğrusal olarak azalır. Bu STATCOM'un reaktif güç denetlenebilirliğini üstün kılmaktadır [10].

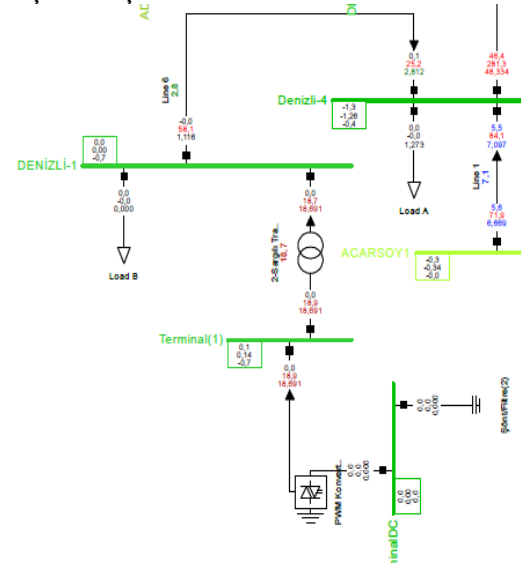
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

FACTS kontrolörlerinin tanımlanması, gelişimi ve sınıflandırılması ele alınarak Batı Akdeniz Bölgesi elektrik enerji iletim sistemi için gerçek değerlerle modellenerek benzetim çalışması gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların yorumlanması ve sağlamış olduğu faydaların gerçekçi parametrelerle belirlenmiştir. FACTS kontrolörlerinden olan STATCOM, güç sistemi modelleme,

analiz ve simülasyon programı (Dig-SILENT Power Factory) kullanılarak, modellenmesi ve bu model için reaktif güç kontrolü için analizler gerçekleştirilip ve elde edilen sonuçların, sistem güvenilirliği ve kararlılığını artırmak, hataların ve donanımsal bozuklukların etkilerini sınırlandırarak enerji kesilmelerini önlemek ve Türkiye enterkonnekte sisteminin reaktif güç kontrolünün kararlılığını artırarak daha verimli, kaliteli ve ekonomik bir şekilde elektrik enerjisi sürekliliğini sağlanması üzerine katkıları yorumlanmıştır.

Yük akışı analizinin amacı, olası değişken yük durumlarında, güç akışlarını, yüklenmeleri, bara gerilimlerini incelemektir. Bu analiz sonucunda, baralar da oluşabilecek gerilim yükselmeleri, hat ve transformatörlerde oluşan yüklenmeler, yön değiştirebilecek güç akışları, üretim tesisinin reaktif güç kapasitesi gibi birçok konu izlenebilir. Yukarıdaki bölümde anlatıldığı üzere STATCOM cihazları limitleri dahilinde reaktif güç kontrolünde kullanılan etkili cihazlardır. Örnek olarak 10 bara sisteminde modellenmiş olup etkinlikleri araştırılmış, STATCOM cihazları elektrik güç sistemine alt ve üst sınır değerleri suseptans olarak modellenmiş olup hem endüktif hem kapasitif karakteristikte çalışabilmektedir. STATCOM cihazların doğruluğunu ve performansını test etmek için enerji iletim sisteminde 10 baradan oluşan gerçekçi Enerji İletim Sistemi şebeke modeli oluşturulmuştur. Modellenen güç sisteminde, şebekeye dair veriler: 160 KV gerilim seviyesi (1 pu), gerilim alt aralığı (0,9-1pu) üst gerilim aralığı (1-1,1pu), toplam 600 MVA (max) YNd5 trafo gücü, 500 MW (G1-G2-G3) toplam üretim kapasitesi, 400 MW (yük A-B-C-D-E) toplam yük, Kısa devre gücü (Sk) 10000

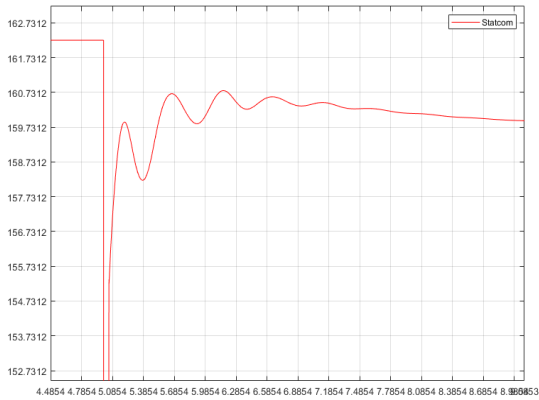
MVA olan harici şebeke ve gerilim kontrollü 20 MVAR (C) Kapasitör bağlanmıştır. Simülasyon çalışması 4 saniyelik adımlar ve toplamda 20 saniyelik çalışma süresince dengeli 3 faz sistem gerilimleriyle gerçekleştirilmiştir. Modellenmiş enerji iletim sistemi hat ve bara yüklenmeleri %15 ile %20 arasında gerilim 1 pu seviyelerinde, sistem üretimi G1 için %9,12 G2 için %68,41 G3 %74,39 değerindedir. Simülasyon STATCOM bağlı iken sürekli durum veya geçici durum arızalarına, 20 MVAR kapasitör bağlı iken sürekli durum veya geçici durum arızaları analiz edilmiştir. Hat-2 ye bağlı 30MW D yükünde de meydana gelecek arızadan dolayı yük devre dışı kalma durumları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da enerji iletim sistemi şebeke modelinin diğer baralara ait gerilim değerleri incelenmiştir. Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sistemi Denizli bölgesi örnek olarak 10 bara sisteminde modellenmiş olup etkinlikleri araştırılmıştır.



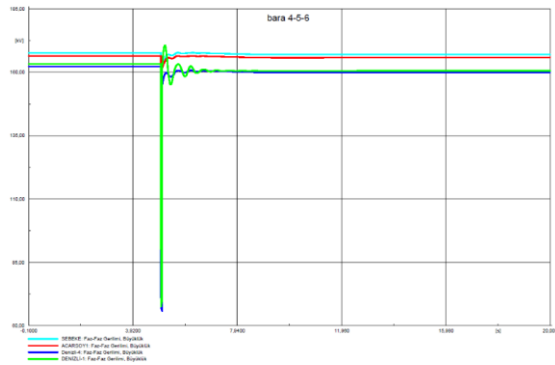
Şekil 4. Denizli-1 barasına STATCOM bağlantısı

STATCOM cihazları elektrik güç sistemine paralel bağlandığı için yardımcı

bir sanal bara ihtiyaç duyulmamıştır. Modellemede alt ve üst sınır değerleri 160 KV gerilim seviyesi (1 pu), gerilim alt aralığı (0,9-1pu) üst gerilim aralığı (1-1,1pu) olarak modellenmiş olup hem endüktif hem kapasitif karakteristikte çalışabilmektedir. STATCOM cihazları sistemde Denizli-1' bara ya modellenmiştir. Modellenen Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde hatlardan birinin (hat-2a) devre dışı kalması durumunda; FACTS cihazları olan STATCOM güç sisteminde oluşan gerilim çökmelerine karşı sistemin kararlılık sınırlarına etkileri incelenip ve sistemde oluşan bozucu etkilerden sonra sistemde oluşan gerilim osilasyonlarının giderilmesine karşı etkisi değerlendirilmiştir (Şekil-5 ve Şekil-6).

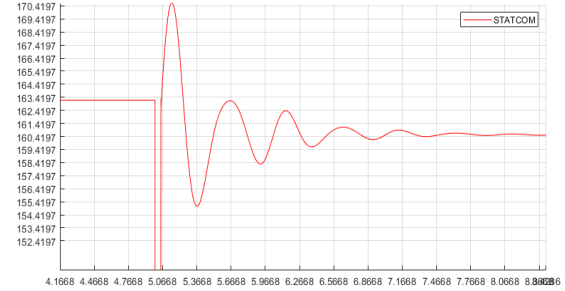


Şekil 5. Hata durumunda bütün baraların STATCOM' un bağlı bulunduğu baranın gerilim osilasyonu



Şekil 6. Baraların hata durumunda gerilim çökmelerine karşı gerilim osilasyonları

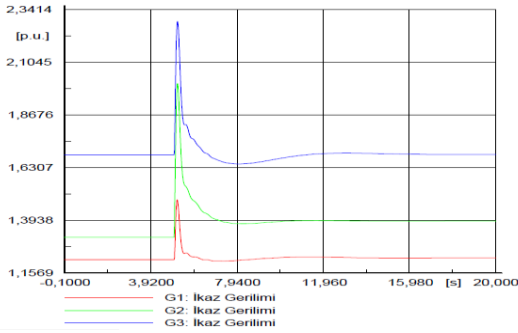
Modellenen Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde gerilim sorunu yaşayan en kritik baralar için gerilim-yüklenme parametresi eğrilerini değerlendirilerek bu baralara STATCOM sistemleri bağlandığında reaktif güce olan katkısı incelenerek, sistemin kritik barasını besleyen hatların devre dışı kalmaları durumunda Denizli-1 barasına eklenen STATCOM' un yüklenme sınırlarını ne ölçüde artırdığına bakılıp sürekli hal güç akışı analizi yapılarak sistemde farklı bozucu etkiler olması durumunda sistemin güç akışı sonucu Denizli-1 barasına STATCOM' un ilave edilmesiyle gerilim kararlılığının değişimi gösterilmiştir (Şekil-7).



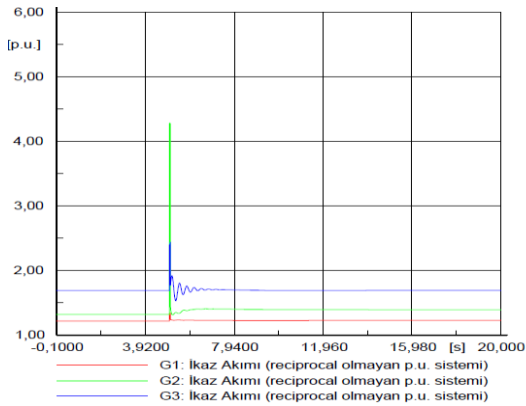
Şekil 7. Hata durumunda STATCOM kullanıldığında kritik baranın (Bara 1'in) yüklenme sınırları

Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminin modellenerek yük akışı analizi gerçekleştirilmesi sonucunda ihtiyaç duyulan baralara paralel eklenen STATCOM gerilim regülasyonunun sağlanması sonucu sistemin gerilim çökmesine uğradığı noktalar tespit edilip FACTS cihazlarının bu noktadaki etkinliğinin karşılaştırılması yapılmış, elde edilen sonuçlardan STATCOM denetleyicilerinin, gerilim çökmesi olayına karşı sistemin güvenilirliği arttığı görülmüştür. STATCOM' un reaktif güç yük değerinde sistem en kararlı çalıştığı,

aktif ve reaktif güç değerlerinin en iyi güç transferi sağladığı, STATCOM ile gerekli reaktif güç kompanzasyonunun hızlı bir şekilde sağlandığı, gerilim çökmesine bara gerilimi değerinin ani yük değişimleri ve farklı yük karakterlerine rağmen istenen referans değerini aldığı görülmüştür. Generatörlerin rotor açısı ve rotor hızı salınımlarına bakıldığında, salınının bastırılmasına yapmış olduğu katkıların generatör gerilim kararlılığını iyileştirdiğini ve sistemin güvenilirlik ve kapasitesini artırmaya yardımcı olduğunu ortaya koyduğu görülmüş sonuç olarak modellenen siteme endüktif ve kapasitif enerji vererek sistemin çok daha kararlı çalışması sağlanmıştır. (Şekil-8 ve Şekil-9)



Şekil 8. Generatör İkaz Gerilimleri



Şekil 9. Generatör İkaz Akımları

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Çalışmada STATCOM denetleyicilerinin güç sistemi reaktif güç kontrolüne olan etkileri incelenmiştir. Batı Akdeniz bölgesi enerji iletim sisteminde gerçekçi olarak modellenmesi yapılan Denizli bölgesine ait güç sistemi için STATCOM kullanımı sonucunda model şebekenin reaktif güç kararlılığı gözlemlenmiş olup yükün ya da sistemin aşırı yüklenmesi durumunda gerilim ve reaktif güç üzerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ayrıca farklı yük karakteristiklerine sahip bir enerji iletim sisteminde, STATCOM cihazının gerilim kararsızlığının giderilmesinde nasıl bir rol oynadığı, 10 baralı bir sistem üzerinde gözlemlenmiştir. Hatların kararlılık değerleri ve yük baralarına ait voltaj limit değerleri hesaplanmış olup FACTS cihazları bağlandıktan sonra güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı kullanılarak, yük akışı çalışmaları yapılmıştır.

Türkiye enterkonnekte sistemine STATCOM cihazlarını entegre ederek reaktif güç kontrolü yapılması sayesinde güç sistemi üzerindeki kayıplar azaltılarak, elektrik enerjisinin güvenli, kontrollü ve en ekonomik şekilde iletilmesi sağlanarak ülke ekonomisine önemli ölçülerde katkılar sağlanabileceği düşünülmektedir. Pilot bölge olarak seçilen ulusal bir elektrik enerji iletim sistemini, FACTS teknolojisi kullanılarak gerçekçi değerlerle modelleyip fizibilite çalışmasını gerçekleştirerek, reaktif güç kontrolünün hassasiyetini artırarak üretim ve tüketim dengesini daha kararlı hale getirmek suretiyle, teknik olarak enerji iletim maliyetinin düşürülmesine katkıda bulunmak hedeflenmektedir. STATCOM cihazlarının gerilim çökmesine karşı sistemin en yüksek yüklenebilme

noktasını manuel sistemlere (mevcut durum) göre daha üst noktaya çıkartabildikleri ve şebekedeki hatlardan birinin devre dışı kalması durumunda, bara gerilimleri, generatör rotor hızları ve rotor açılarında meydana gelen salınımlı çalışma modunu bastırılabilirdikleri görülmektedir. STATCOM sistemlerinin, güç sisteminde elektriksel ya da mekanik bozucu etkiler olması durumlarında reaktif güç kompanzasyonu yapılarak, aşırı yük koşullarında belirli sınırlar dahilinde gerilim çökmesini engelleyebileceği elde edilen sonuçlar ışığında tespit edilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi, FBA-2018-3792'nolu BAP projesi kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hingorani N.,G., (1993), Flexible AC transmission, IEEE reprinted from IEEE Spectrum, Volume 30, No.4 , 40-45.
- [2] Cheng, H., In, I. and Chen S., DC-Link Voltage Control and Performance Analysis of STATCOM, 2002.
- [3] Yang, Z., Shen, C., Zhang, L., Crow, M., L.,” Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage”, IEEE Trans. on Power System, Vol. 16, no. 2, May 2001, pp. 254-260.
- [4] Çöteli, 2006 “*STATCOM ile güç akış kontrolü*”, Yüksek Lisans Tezi Elektrik Eğitimi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elazığ.
- [5] Jaime Cepeda, Esteban Agüero, 2014 “*FACTS models for stability studies in DIGSILENT Power Factory*” IEEE Transmission and Distribution Latin America 2014, DOI: 10.1109/TDC-LA.2014.6955182.
- [6] TMMOB, TMMOB Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları, İstanbul EMO, 1999.
- [7] A., Hasanovic, “Modeling and Control of The Unified Power low Controller (UPFC)”, MA Thesis, West Virginia Uni., 2000.
- [8] Schauder, C., and Mehta, H., “Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators”, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, 1993 pp.299–306.
- [9] Gyugyi, L., “Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators”, Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 4, 1988. pp. 483-493.
- [10] Paserba J., (2003), How FACTS Controllers Benefit AC Transmission System, Trans. And Dist. Con. and Exp., IEEE PES Volume 3, 7-12 Sept. vol.3 949 – 95.