

GELİŞMİŞ GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİLERİ İLE DONATILMIŞ GÜÇ SİSTEMLERİNİN NEWTON-RAPHSON METODU İLE ANALİZİ

A.Mete VURAL¹, Mehmet TÜMAY²

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gaziantep Üniversitesi,
27310 Şahinbey-Gaziantep, e-posta: vural@gantep.edu.tr

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Çukurova Üniversitesi,
01330-Balçalı, Yüreğir-Adana, e-posta: mtumay@mail.cu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems (FACTS))' nin en son geliştirilen ve aynı zamanda çok yönlü bir elemanı olan Gelişmiş Güç Akış Denetleyicisi (GGAD) ile donatılmış güç sistemleri için yük akış çalışmalarında kullanılacak bir metod geliştirilmiştir. Metod GGAD'nin durgun-hal koşullarındaki modelinin çıkarılmasıyla ve yük akış çalışmalarında kullanılan geleneksel Newton-Raphson yük akış metodunun genişletilmesiyle ve de modifikasyonu ile sağlanmıştır. Önce GGAD'nin gerilim kaynakları durgun-hal modeli enjekte edilen güçler olarak elde edilmiş daha sonra Newton-Raphson yük akış algoritmasına uyarlanmıştır. Hazırlanan bilgisayar programıyla amaçlanan metod ve yük akış algoritması örnek bir güç sistemi üzerinde (IEEE 14-baralı sistemi) test edilmiştir. Sonuçlar amaçlanan metodun sağlam ve kararlı çalıştığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gelişmiş güç akış denetleyicisi, Newton-Raphson yük akış algoritması.

1. GİRİŞ

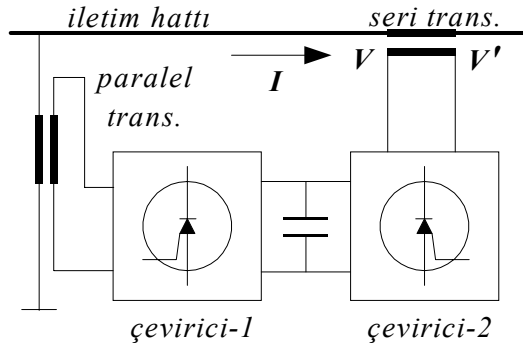
Son yıllardaki artan enerji talebi, kojenerasyon, yüksek iletim kayıpları, güç sistemlerinin kararlılıkları gibi faktörler iletim hatlarının daha etkin kullanılmasını gerekli kılmıştır. Enerji sistemleri son yıllarda hızlı gelişen güç elektroniği denetim teknolojisi ile daha fazla denetlenebilir ve esnek yapıda olabilmektedir. İletim sistemlerinde şimdiye kadar güç akış denetimi mekanik anahtarlamalı olarak çalışan devrelerle ve tap-changing transformatörlerle sağlanmaktaydı. Bu şekildeki bir denetim hem yeterince esnek olmamakta hem de yakın gelecekte ihtiyaç duyulabilecek bir takım ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Son yıllardaki çalışmalar iletim hatlarının daha etkin kullanılmasını amaçlamış ve orijinal adı "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)" olan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri adı altında bir dizi kompanzator geliştirilmeye başlanmıştır [1]. Gelişmiş Güç Akış Denetleyicisi (GGAD) bunlardan biri olmakla beraber içlerinde en gelişmiş olanıdır. Bu cihaz çok fonksiyonlu bir aygittir. Birbirinden tamamiyle

bağımsız olarak iletim hattı üzerindeki aktif ve reaktif güç akış denetimi, gerilim regülasyonu, seri ve paralel kompanzasyon gibi bir çok işleve sahiptir. GGAD'nin aşırı yüklenmiş hatlar, paralel hatlar arasındaki yük dağılımı (load-sharing), loop-flow denetimi, sistemlerin dinamik ve geçici rejim koşullarında kararlılık denetimi gibi farklı problemlerin çözümünde de kullanılması amaçlanmıştır [2]. GGAD'nde bir denetim modundan diğerine mekanik olarak bir geçiş söz konusu değildir. Gelişmiş güç elektroniği tekniği sayesinde elektronik olarak kip değiştirebilmektedir. Bu avantaj güç sistemindeki değişen koşullara karşı oldukça esnek bir çalışma olanağı sunmaktadır. İlk pratik GGAD uygulaması Amerika Birleşik Devletleri'nin Kentucky eyaletinin, Inez dağıtım istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan GGAD, ±160 MVA kapasitesinde olup, uygulamanın ilk ayağında gelişmiş statik var kompanzatorü olarak çalıştırılmış, daha sonra ise bütünüyle devreye alınmıştır [3]. Bu çalışmada GGAD'nin yük akış çalışmaları için bir modeli çıkarılmakta ve model geleneksel Newton-Raphson yük akış algoritmasına uyarlanmaktadır. Model, GGAD'nin eşdeğer gerilim kaynaklı gösteriminden yola çıkılarak enjekte güçler olarak elde edilmiştir. Modele GGAD'nin işletme kayıpları da dahil edilmiştir. Bu çalışmada enjekte güç modeli ve yük akış algoritması Fortran77 dilinde yazılmış bir programla test edilmektedir. Test sistemi olarak ise IEEE'nin 14-baralı sistemi tercih edilmiştir.

2. GGAD'NİN ÇALIŞMA İLKELERİ

GGAD, Şekil 1'de gösterildiği gibi iki adet anahtarlamalı çeviriciden oluşmaktadır. Bu çeviriciler ortak bir kondansatörün meydana getirdiği bir dc-link ile çalışmaktadır. Ayrıca bir seri bir de paralel transformatör seri (çevirici-1) ve paralel çeviriciyi (çevirici-2) iletim hattına bağlamaktadır. Gerilim kaynaklı çeviriciler GTO tristör teknolojisini kullanmaktadır. Çevirici-1 genel olarak Çevirici-2 ile iletim hattı arasındaki aktif güç akış dengesini sağlamakta aynı zamanda yalnız başına gelişmiş statik var kompanzatorü olarak ta çalışabilmektedir. Çevirici-2 GGAD'nin ana fonksiyonunu yerine getirmesinde kullanılmaktadır. Çevirici-2 temel (fundamental) frekansta, değişken büyüklükte

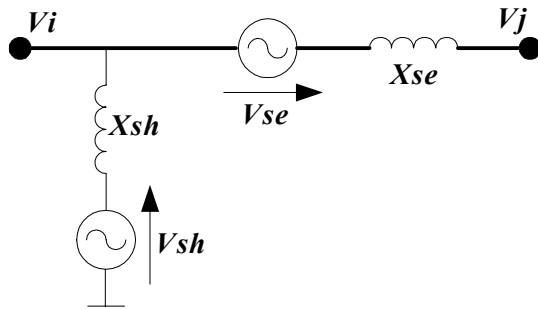
($0 \leq V_T \leq V_{Tmax}$) ve değişken faz açısıyla ($0 \leq \phi_T \leq \phi_{Tmax}$) bir gerilim değeri üretmekte, üretilen bu gerilim değeri seri transformatör yardımıyla iletim hattına enjekte edilmektedir. Bu sayede direk gerilim denetimi, seri kompanzasyon, faz kaydırıcı ve de bu fonksiyonların kombinasyonları gibi denetim hedeflerinin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Çevirici 2'nin enjekte gerilim değeri farkı denetim hedefleri için ihtiyaç duyulan reaktif gücü dahili olarak üretebilmekte ve tüketebilmektedir. Bu çalışma prensibiyle GGAD'nin her iki çeviricisi reaktif güç üretebilmekte (ve/veya tüketebilmekte) aynı zamanda aktif gücün, iletim hattı-paralel çevirici-seri çevirici-iletim hattı veya tersi şeklinde bir yol izleyerek akışı sağlanabilmektedir. Bu çalışma ilkeleri ile GGAD ideal bir ac-ac güç çeviricisi olarak kabul edilebilir.



Şekil 1. Gelişmiş güç akış denetleyicisinin temel devre düzeni.

3. GGAD'NİN MATEMATİKSEL MODELİ

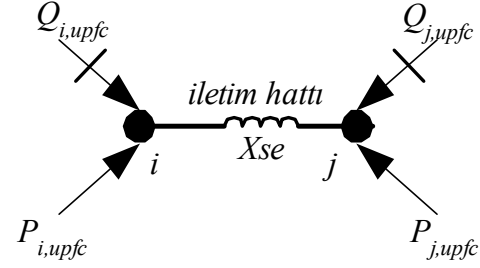
Gelişmiş güç akış denetleyicisinin yük akış çalışmaları için matematiksel modelinin çıkarılmasında Şekil 2'den faydalanılmıştır [4].



Şekil 2. Gelişmiş güç akış denetleyicisinin gerilim kaynaklı eşdeğer devresi.

GGAD'nin bir iletim hattının herhangi iki noktası (i-j) arasına yerleştirildiği varsayılmış, her bir çeviricinin çıkışı birer denetlenebilir gerilim kaynağı (V_{se} , V_{sh}) olarak gösterilmiş, her bir transformatörün reaktansı da gerilim kaynaklarına seri bağlı birer reaktans (X_{se} , X_{sh}) olarak gösterilmiştir. GGAD'nin gerilim

kaynaklı eşdeğer devresi temel devre teorisi kullanılarak ilgili baralar üzerine eşdeğer aktif-reaktif güç enjeksiyonlarına dönüştürülebilir. Yük akış çalışmalarında kullanılmak üzere matematiksel model, (1-4) no'lu eşitliklerde gösterilen ve Şekil 3'te de ifade edilen i ve j düğümlerine enjekte edilen denetlenebilir aktif ve reaktif güçler olarak formülize edilmiştir [4]. İletim hattının eşdeğer devresinin konumu ve parametreleri GGAD'nin hat üzerinde konuşturıldığı yere göre değişiklik gösterecektir.



Şekil 3. GGAD'nin eşdeğer aktif-reaktif güç enjeksiyon modeli.

$$P_{i,upfc} = 0.02rb_{se}V_i^2 \sin \gamma - 1.02rb_{se}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (1)$$

$$Q_{i,upfc} = -rb_{se}V_i^2 \cos \gamma \quad (2)$$

$$P_{j,upfc} = rb_{se}V_iV_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (3)$$

$$Q_{j,upfc} = rb_{se}V_iV_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (4)$$

Eşitliklerde (1-4), r ve bse GGAD'nin denetim parametreleri olmakta (r, enjekte edilen seri gerilim değerinin pu karşılığı, γ , bu gerilim değerinin faz açısı farkı ve de $b_{se} = X_{se}^{-1}$ olmaktadır. θ_i ve θ_j ise i ve j düğümlerine ait gerilim değerlerinin (V_i , V_j) faz açılarıdır.

4. GELENEKSEL NEWTON-RAPHSON METODUNUN MODİFİKASYONU

Yük akış çalışmalarında kullanılmak üzere iterasyona dayalı Newton-Raphson metodu seçilmiştir. Geleneksel Newton-Raphson formülleri aşağıdaki (Eşitlik (5-9)) gibi olacaktır.

$$P = f_1(V, \theta, G, B) \quad (5)$$

$$Q = f_2(V, \theta, G, B) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H = \frac{\partial P}{\partial \theta}, \quad N = V \frac{\partial P}{\partial V}, \quad (8)$$

$$J = \frac{\partial Q}{\partial \theta}, \quad L = V \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (9)$$

P ve Q, polar formda ifade edilen düğüm gerilimlerine ($V\angle\theta$) ve de şebeke iletkenliğine (conductance) ve sanal geçirgenliğine (susceptance) bağlı birer aktif ve reaktif düğüm güç enjeksiyonu vektörleridir. $\Delta P = P_{\text{özümlü}} - P_{\text{hesaplanan}}$ aktif güç uyumsuzluk vektörü, $\Delta Q = Q_{\text{özümlü}} - Q_{\text{hesaplanan}}$ ise reaktif güç uyumsuzluk vektörüdür. $\Delta\theta$ and ΔV düğüm gerilimlerinde meydana gelen değişimleri göstermektedir. H, N, J, ve L Jacobian matrisindeki temel elemanları temsil etmektedir. Aktif ve reaktif güçlerin düğüm noktalarının büyüklüklerine ve de faz açılarına göre kısmi türevlerini ifade etmektedir. n iterasyon sayısını göstermektedir. GGAD'nin modeli genel bir Newton-Raphson yük akış algoritmasına eşitlik (10-13)'te belirtilen güç uyumsuzluk denklemlerinin modifikasyonu ve de eşitlik (14-17)'de gösterilen Jacobian matrisindeki ilgili elemanların modifikasyonu sayesinde uyarlanabilir. GGAD'ne ait eşdeğer güç enjeksiyonları (P_{upfc} , Q_{upfc}) bara gerilim büyüklüklerine ve faz açılarına bağlı olduğu için Jacobian matrisinin ilgili elemanları her iterasyonda modifiye edilecektir.

$$\Delta P_i = P_{i,G} - P_{i,L} + P_{i,\text{upfc}} - P_{i,\text{hesaplanan}} \quad (10)$$

$$\Delta P_j = P_{j,G} - P_{j,L} + P_{j,\text{upfc}} - P_{j,\text{hesaplanan}} \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,G} - Q_{i,L} + Q_{i,\text{upfc}} - Q_{i,\text{hesaplanan}} \quad (12)$$

$$\Delta Q_j = Q_{j,G} - Q_{j,L} + Q_{j,\text{upfc}} - Q_{j,\text{hesaplanan}} \quad (13)$$

$$H_{\text{mod}} = H_{\text{orj}} + H_{\text{upfc}}; H_{\text{upfc}} = \frac{\partial P_{\text{upfc}}}{\partial \theta} \quad (14)$$

$$N_{\text{mod}} = N_{\text{orj}} + N_{\text{upfc}}; N_{\text{upfc}} = \frac{\partial P_{\text{upfc}}}{\partial V} \quad (15)$$

$$J_{\text{mod}} = J_{\text{orj}} + J_{\text{upfc}}; J_{\text{upfc}} = \frac{\partial Q_{\text{upfc}}}{\partial \theta} \quad (16)$$

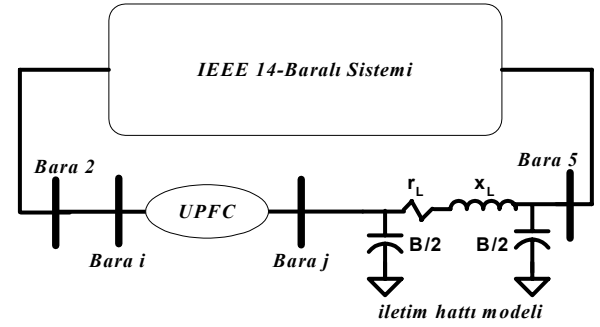
$$L_{\text{mod}} = L_{\text{orj}} + L_{\text{upfc}}; L_{\text{upfc}} = \frac{\partial Q_{\text{upfc}}}{\partial V} \quad (17)$$

GGAD modelinin sisteme entegrasyonu için hayali i ve j yük baraları oluşturulmuş, GGAD'nin aktif-reaktif güç enjeksiyon modelinden dolayı (Şekil 3) i-j baraları arasına seri empedans değeri Xse olan bir iletim hattı yerleştirilmiştir. Eşitlik (10-13)'te "mod" indisi modifiye edilmiş Jacobian matris elemanlarını, "orj" indisi sistemdeki i-j baraları dışındaki baralara ait Jacobian matris elemanlarını, "upfc" indisi i-j baralarına ait Jacobian matris elemanlarını göstermektedir. P_{upfc} ve Q_{upfc} 'nin indisleri matris içerisindeki konuma göre i veya j olabilmektedir.

5. YÜK AKIŞ ÇALIŞMALARI

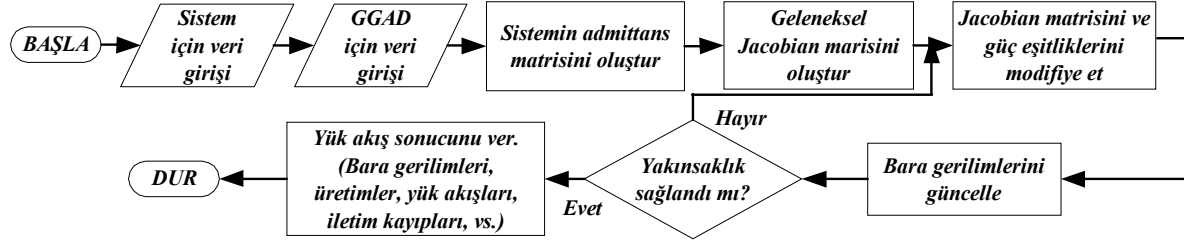
Newton-Raphson yük akış metodu iterasyona dayalı sayısal bir yöntemdir. Bu nedenle GGAD'nin amaçlanan yük akış modeli bilgisayar ortamında Fortran77 dilinde yazılmış bir program ile test edilmiştir. GGAD, IEEE 14-baralı sistemi içerisinde

Şekil 4'teki gibi bir konumda düşünülmüştür. Programın akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. IEEE 14-baralı sistemi üzerinde 4 farklı benzetim çalışması yapılmış, her bir çalışmada GGAD'nin denetim parametreleri (r ve γ) değiştirilmiştir. Doğruluk toleransı $1E-6$ olarak seçilmiştir. Çalışmada GGAD'nin anma gücünün üzerinde bulunduğu hattaki güç akışlarını kabul edecek seviyede olduğu varsayılmıştır. İlk önce GGAD'siz IEEE 14-baralı sistemin yük akış çalışması yapılmış, sonuçlar önceden bilinen gerçek neticelerle karşılaştırılıp hazırlanan algoritmanın sağlamlığı ve güvenilirliği sınanmıştır. Daha sonra güç sisteminin 2 ve 5 no'lu baraları arasındaki enerji nakil hattı üzerinde bara 2'ye yakın bir noktaya Şekil 5'teki gibi yerleştirilip 3 farklı benzetim çalışması daha yapılmıştır. Seçilen iletim hattının seri empedansı ($r_L + jx_L$) $0.05695 + j173.88$ pu olup paralel empedansı ($jB/2$) ise $j0.0346$ 'dır. Her bir çalışmada GGAD'nin açık-devre koşullarında denetim parametreleri değiştirilip, benzetim çalışmalarının sonuçlarının bir kısmı Tablo 1'de listelenmiştir.



Şekil 4. GGAD yerleştirilmiş IEEE 14-baralı sistemi.

Seçilmiş iletim hatları üzerindeki aktif ve reaktif yük akışları ile sistemin aktif-reaktif iletim kayıpları listelenmiştir. GGAD bulunduğu hat üzerindeki yük akışını değiştirmekte bu durum diğer hatlardaki akışları değiştirmekte sistem için aktif ve reaktif iletim kayıpları da değişik GGAD parametreleri için değişiklik göstermektedir. Elde edilen deneyimlerden, iletim hattı üzerine yerleştirilen GGAD'nin denetim parametrelerinin biri çok büyük seçildiğinde ($r > 0.1$) hazırlanan yük akış programında yakınsaklığın sağlanması çok zor hale gelmektedir. Pratikte fiziksel limitlerden dolayı (işletme şartları, GGAD içerisindeki transformatörlerin ve diğer cihazların izolasyon seviyeleri, toplam maliyet, v.s.) r_{max} çok büyük değerlere göre dizayn edilmek istenmemektedir. Tablo 2 hazırlanan programın hesaplama performansını göstermektedir. GGAD'nin aktif hale getirilmesiyle iterasyon sayılarında ve doğruluk değerlerinde değişiklikler olmuştur.



Şekil 5. Hazırlanan programın akış diyagramı.

Tablo1. IEEE 14-baralı sistemin GGAD'li yük akış çalışması.

GGAD siz yük akışı		1. simülasyon		2. simülasyon		3. simülasyon	
GGAD parametreleri		GGAD parametreleri		GGAD parametreleri		GGAD parametreleri	
$r=0.0$ (pu)	$\gamma=0.0^\circ$	$r=0.04$ (pu)	$\gamma=45.18^\circ$	$r=0.09$ (pu)	$\gamma=74.52^\circ$	$R=0.10$ (pu)	$\gamma=27.0^\circ$
(x-y) baraları arasındaki yük akışı (pu)		(x-y) baraları arasındaki yük akışı (pu)		(x-y) baraları arasındaki yük akışı (pu)		(x-y) baraları arasındaki yük akışı (pu)	
(1-2)	1.5509-j0.2302	(1-2)	1.2043-j0.1437	(1-2)	0.6597+j0.0042	(1-2)	1.2368-j0.1545
(2-3)	0.7185+j0.0144	(2-3)	0.7197+j0.0126	(2-3)	0.7146+j0.0141	(2-3)	0.7018+j0.0164
(2-4)	0.5597-j0.1623	(2-4)	0.5652-j0.1998	(2-4)	0.5506-j0.1803	(2-4)	0.5403-j0.2527
(2-5)	0.4171-j0.1897	(2-5)	0.0775-j0.0418	(2-5)	-0.4284-j0.1948	(2-5)	0.1547+j0.0228
(4-5)	-0.6098-j0.0549	(4-5)	-0.6041-j0.1593	(4-5)	-0.6240-j0.0938	(4-5)	-0.6530-j0.2114
İletim kayıpları (pu)		İletim kayıpları (pu)		İletim kayıpları (pu)		İletim kayıpları (pu)	
Aktif	Reaktif	Aktif	Reaktif	Aktif	Reaktif	Aktif	Reaktif
0.1389	0.1099	0.1207	0.1247	0.1028	0.0974	0.1265	0.1298

Tablo 2. Programın hesaplama performansı.

İterasyon sayısı	Doğruluk	GGAD parametreleri	
		r (pu)	γ° (derece)
6	0.000012	0.00	0.00
8	0.000009	0.04	45.18
7	0.000015	0.09	74.52
6	0.000013	0.10	27.00

6. SONUÇLAR

GGAD günümüzde veya yakın gelecekte ihtiyaç duyulacak enerji sistemlerinde güç akış denetimi için bir çözümdür. Geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vererek bağımsız aktif ve reaktif güç akış denetimi yapabilmektedir. GGAD'nin yük akış modelinin çıkarılması bu konuda yapılacak çalışmalara destek olacaktır. Geliştirilen modelin sağlamlığı Tablo 2'den anlaşılmaktadır. Yük akış sonuçları yakınsamakta, doğruluk değerleri ise kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Yük akış çalışmalarını sonuçlarına göre GGAD'nin esnek bir biçimde iletim hattı üzerindeki aktif ve reaktif güçleri denetleyebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan benzetim çalışmalarından GGAD'nin iletim hattı üzerindeki konumunun da çalışma performansı için önemli bir etken olduğu saptanmıştır. Yeni iletim hatlarının tesis edilmesi günümüz koşullarında zor hale geldiğinden ayrıca elektrik enerjisinin özelleştirilmesiyle birlikte gelen güç akış denetimi ihtiyacı için FACTS'ler ve en önemli elemanı olan GGAD'ler anahtar teknoloji olarak görülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] IEEE Power Engineering Society/Cigre: "FACTS Overview", IEEE Service Center, Piscataway, N.J., 1995, Special Issue, 95TP108.
- [2] A. Edris, A.S. Mehraban, M. Rahman, L. Gyugyi, S. Arabi, T. Reitman, "Controlling the flow of real and reactive power", IEEE Computer Applications In Power, January 1998, pp. 20-25.
- [3] C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Kehri, A. Mehraban, A. Edris, "AEP UPFC project: Installation, commissioning, and operation of the ± 160 Mva statcom (Phase I)", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998, pp. 1530-1535.
- [4] A.M. Vural, M. Tümay, T.T. Ma, "Güç Sistemlerindeki Güç Akışının UPFC ile Kontrolü", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, EMO'2001 Kocaeli, Eylül 2001, pp. 196-199.