

ANAHTARLAMALI PARALEL VE SERİ KOMPAZATÖRLERİN ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE GERİLİM/AKIM VE GÜÇ AKIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ulaş EMİNOĞLU Saadetdin HERDEM Tankut YALÇINÖZ

Niğde Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Niğde 51200 / Türkiye

e-posta:ulas41@hotmail.com sherdem@nigde.edu.tr tyalcinoz@nigde.edu.tr

Anahtar sözcükler: SVC, TCSC, Kompanzasyon, Yük Akışı, Enerji İletim Sistemleri

ÖZET

Bu çalışmada FACTS cihazlarından Statik VAR Kompanzator (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) paralel ve seri kompanzatorlerin güç sistemlerinde gerilim ve akım kontrolü ile yük akışına olan etkisi incelenmiştir. Matlab/Simulink programı kullanılarak endüktif yüklü iki baralı bir iletim hattında SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak yük geriliminin ve TCSC ile hat empedansı kompanze edilerek de yük akımının kontrolü yapılmıştır. Karmaşık 5 baralı bir güç sisteminde SVC ve TCSC'nin güç transferine ve sistem gerilimine etkisi incelenmiştir. TCSC ile seri kompanzasyonda %70 oranında hat empedansının kompanzasyonu, paralel kompanzasyonda ise yük baralarına yükün endüktif reaktif gücünün %100 oranında kompanzasyon yapılmıştır. Sonuçlar her iki kompanzatorün güç transferi ve akım/gerilim kontrolünde önemli etkisinin olduğunu göstermektedir.

1. GİRİŞ

Enerji iletim sistemlerinde yük değişimi ve hat parametreleri hattın aşırı yüklenmesine ve hat sonu geriliminin artmasına veya azalmasına neden olmaktadır. Yüksek veya düşük gerilim, hattın ve ekipmanın ısı kapasitesi, halka akışı, kısa devre akımlarının aşılması gibi olaylar iletim hatlarının sürekli halde limitlerini sınırlamaktadır. Günümüzde güç sistemlerinde yük akışı ve sistem gerilimi, empedans ve reaktif güç kompanzasyonu yapılarak kontrol edilmektedir. Uygulanan bu kontrol sistemlerinde mekaniki olayların sistemdeki elemanlarda deformasyon ve ısınmalar oluşturmasının yanı sıra kontrol hızları da düşüktür [1].

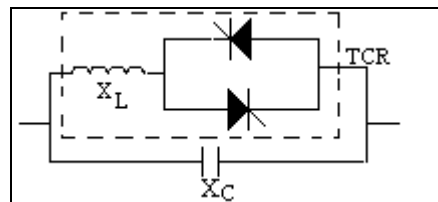
FACTS kontrolörleri, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve invertör temelli olmak üzere iki gruba ayrılır. TCR temelli FACTS cihazları, paralel reaktif güç kompanzatorü Statik VAR Kompanzator (SVC) ve seri empedans kontrolörü olan Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) olmak üzere iki temel yapıda; invertör temelli FACTS cihazları ise

Statik Kompanzator (Statcom), Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC), Faz Kaydırıcısı ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) gibi güç akış kontrolörleri olmak üzere dört temel konfigürasyona sahiptirler. Bu teknoloji, güç sistemlerinde daha hızlı ve güvenli olarak gerilim, akım, faz açısı, aktif ve reaktif güç kontrolüne olanak sağlamaktadır [2,3]. Statik VAR Kompanzator (SVC) güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, gerilim kararlılığının artırılması ve dengesiz yüklü sistemlerde sistemi dengelemek amacıyla kullanılmaktadır [4]. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör başlangıçta güç sistemlerinde faz açısı kararlılığının artırılması ve alt senkronizasyon rezonansının azaltılması ve hat empedansının kontrolü gibi bir çok uygulamalarda kullanılmaktadır [5,6].

Bu çalışmada birinci bölümde SVC ve TCSC kompanzatorlerinin sürekli durum analizi incelenerek yük akış modelleri verilmiştir. Endüktif yüklü iki baralı bir iletim sisteminde Statik Var Kompanzator kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile yük gerilimi ve TCSC kullanılarak hat empedansının kompanzasyonu ile yük akımının kontrolü verilmiştir. İkinci bölümde ise 5 baralı endüktif yüklü sistemde SVC kullanılarak yapılan reaktif güç kompanzasyonu ve TCSC ile %70 oranında hat empedansının kompanzasyonu sonucunda kompanzatorlerin sistem gerilimi ve aktarılan güç kapasitesine olan etkisi incelenmiştir.

2. STATİK VAR KOMPAZATÖR

Statik VAR kompanzator (SVC) güç sisteminde çekilen reaktif gücün kontrolü ile bağlı olduğu sistem geriliminin belirlenen sınırlarda kontrolüne imkan sağlamaktadır. Genel olarak SVC, TCR ve buna paralel bir kondansatörden oluşur. SVC'ye ait temel devre şeması Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil 1. SVC temel devre şeması

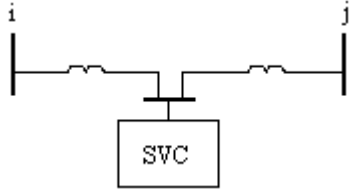
Tristörler simetrik olarak 90° ile 180° arasında tetiklenerek SVC reaktansı X_L ile X_C arasında değiştirilmektedir. Maksimum kapasitif reaktif güç $\alpha = 180^\circ$ durumunda çekilir. SVC eşdeğer reaktansı TCR reaktansı ile Kapasitör reaktansının paralel eşdeğerinden elde edilir

$$X_c = X_C \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/r_x)} \quad (1)$$

Burada $r_x = X_c / X_L$ 'ye eşit olup kompanzatorün endüktif ve kapasitif çalışma aralığına göre belirlenir [7].

2.1 Yük Akışı için SVC Modeli

Güç sistemlerinde SVC aktif gücü sıfıra eşit PV bara olarak alınmaktadır. Bu durumda sistem reaktansı değişecektir. Hattın ortasına bağlanması durumu için SVC modeli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. SVC'nin hatta bağlantı şeması

Bu durumda sistem için güç akışı denklemleri,

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(SVC)} \cos \delta_{ij} + B_{ij(SVC)} \sin \delta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(SVC)} \sin \delta_{ij} - B_{ij(SVC)} \cos \delta_{ij}) = 0$$

$$P_{SVC} = 0$$

$$|U_{i \min}| \leq |U_i| \leq |U_{i \max}|$$

$$S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (2)$$

şeklinde değişmektedir. Burada P_{Gi} ve Q_{Gi} i. baradan aktarılan aktif ve reaktif güç, P_{Di} ve Q_{Di} i. bara için gerekli olan aktif ve reaktif güç, U_i ve U_j sırasıyla i. ve j. bara gerilimleri, $G_{ij(SVC)}$ ve $B_{ij(SVC)}$ sistem bara admitans matrisi ij elamanının aktif ve reaktif bileşeni fonksiyonları, n sistemdeki bara sayısı, S_{ij} hattın görünür gücü, $S_{ij \max}$ hattın termal limiti, $U_{i \min}$ ve $U_{i \max}$ i. bara geriliminin minimum ve maksimum gerilim limitleridir.

3. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR

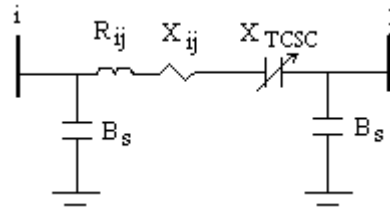
Enerji iletim sistemlerinde aktarılan aktif ve reaktif güç hattın başlangıç ve hat sonu gerilimi, gerilimler arası faz farkı ve hat empedansının bir fonksiyonudur. Seri kompanzasyon yapılarak hat empedansının kontrolü ile gerilim büyüklüğü, faz

açısı ve hat akımının kontrolünün yanısıra güç faktörünün ve güç transferinin artırılması da mümkündür [8].

Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) devre şeması Şekil 1'de verilen SVC devre şeması ile aynı olup güç sistemine seri olarak bağlanır. Enerji iletim sistemleri endüktif karakterli olduğundan TCSC gecici durum kararlılığını arttırmak için yalnızca geçici durumda endüktif olarak çalıştırılmakta, sürekli durumda ise kapasitif çalıştırılmaktadır. TCSC eşdeğer reaktansı Denklem (1)'de verilen SVC eşdeğer reaktansına eşittir.

3.1 Yük Akışı için TCSC Modeli

TCSC'nin hatta seri bağlanması ile hat reaktansı belirli sınırlarda değiştirilebilmektedir. Genel olarak TCSC reaktansı $-0.5X_h$ ile $0.5X_h$ aralığında değiştirilmektedir. TCSC'nin sisteme bağlantı şeması Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. TCSC'nin hatta bağlantı şeması

Bu durumda TCSC'nin sisteme bağlanması sonucunda sistemin güç akış denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(TCSC)} \cos \delta_{ij} + B_{ij(TCSC)} \sin \delta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(TCSC)} \sin \delta_{ij} - B_{ij(TCSC)} \cos \delta_{ij}) = 0$$

$$|U_{i \min}| \leq |U_i| \leq |U_{i \max}|$$

$$S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (3)$$

Burada $G_{ij(TCSC)}$ ve $B_{ij(TCSC)}$ sistem bara admitans matrisi ij elamanının aktif ve reaktif bileşeni fonksiyonlarıdır.

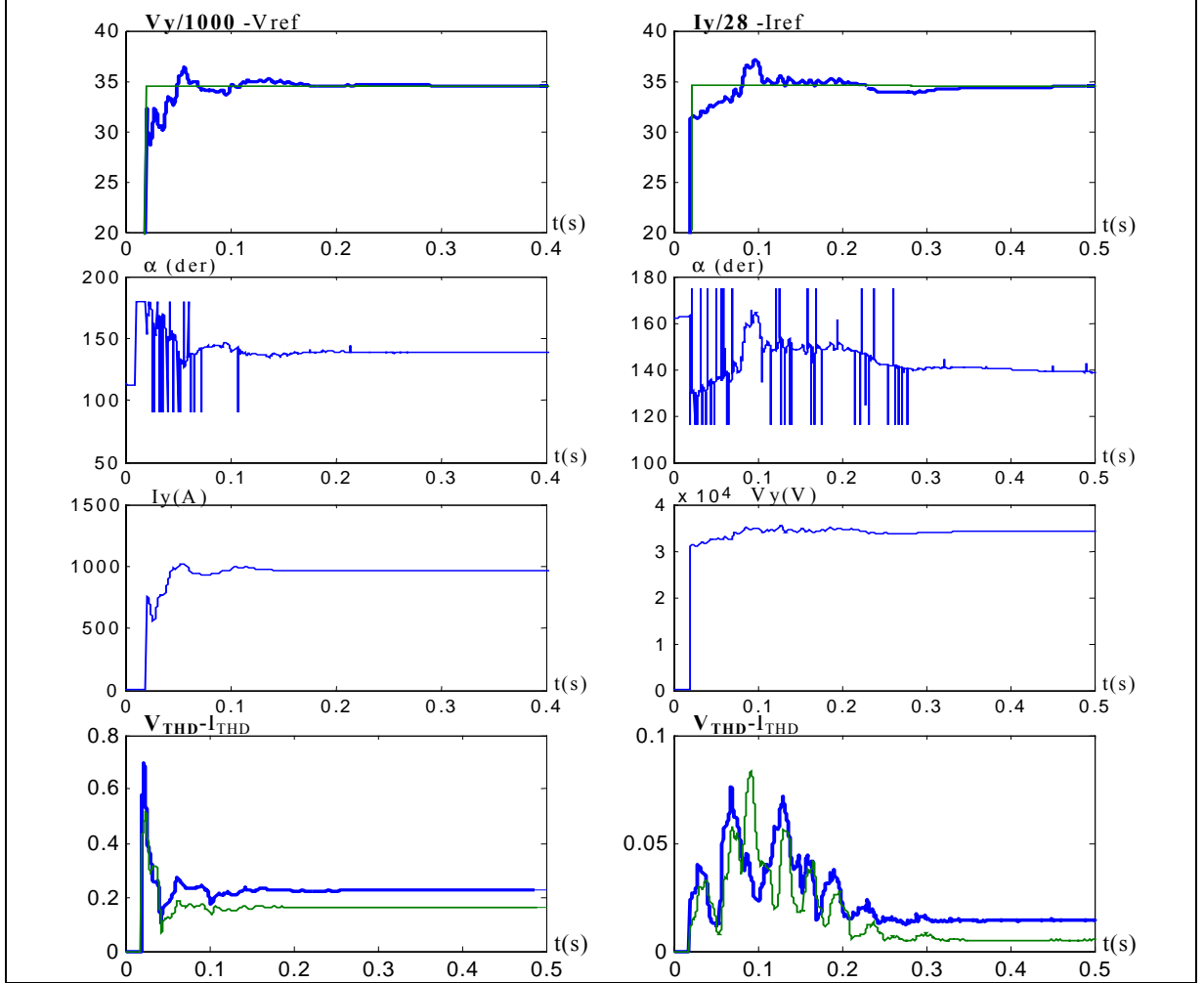
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

4.1 SVC ve TCSC ile Gerilim/Akım Kontrolü

Bu çalışmada ilk olarak kaynak ve endüktif yükten oluşan iki baralı bir enerji iletim hattında SVC ve TCSC kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ve hat empedansının kontrol edilmesiyle yük gerilimi ve akımı kontrol edilmiştir. Simülasyon Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Her iki kontrol için referans ve kontrol edilen sinyaller aynı büyüklükte alınarak PID kontrolör parametreleri birbirine eşit seçilmiştir. Verilen sistemde $P=50$ MW, $Q=30$ MVar ve 70 km'lik dağılmış parametrelili hatta $Z=0.8+j19.8 \Omega$ alınarak hat kapasitansı ihmal edilmiştir. SVC için

$X_C=31.8 \Omega$, $X_L=9.4 \Omega$ ve maksimum kapasitif güç $Q_{SVC}=37.4$ MVar olarak alınmıştır. Bu değerler için SVC rezonans tetikleme açısı $\alpha_{rez}=126.1^\circ$ olmaktadır. Yük akımının kontrolü için TCSC parametreleri $X_C=18.74 \Omega$ ve $X_L=8.72 \Omega$ alınmıştır.

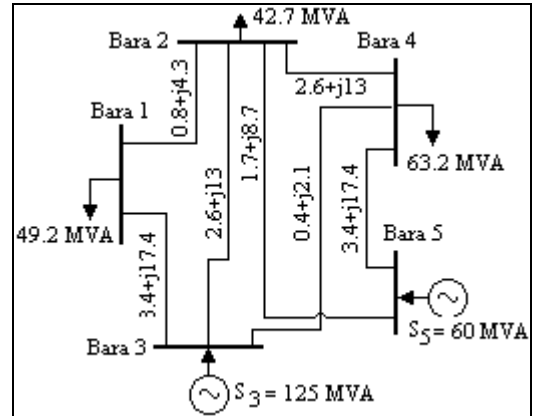
Bu durum için TCSC rezonans tetikleme açısı $\alpha_{rez}=115.2^\circ$ dir. Hat empedansı endüktif olduğundan TCSC tetikleme açısı $115^\circ < \alpha < 180^\circ$ aralığında tutulmuştur. Yapılan her iki kontrol için elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. SVC ile (I. Sütun) ve TCSC ile (II. Sütun) yapılan kontrol için sistem elemanlarının akım, gerilim, tetikleme açısı ile akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulmaların zamana göre değişimi

4.2 SVC ve TCSC'nin Yük Akışına Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada ikinci olarak beş baralı bir enerji iletim sisteminde SVC ve TCSC'nin sistemdeki yük akışına ve bara gerilimine etkisi incelenmiştir. Sistem, 66 kV'luk iki senkron generatör, üç adet endüktif karakterli yük ve yedi iletim hattından oluşmakta olup simülasyon Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Sisteme ait tek hat devre şeması Şekil 5'de, yük ve generatörlerin kompanzasyonsuz durumda MVA olarak görünür güçleri ve TCSC kullanılarak hattın endüktif reaktansının %70 oranında kompanzasyonu sonucunda bu güçlerin % olarak değişimleri Tablo 1'de, TCSC'siz sistemde bara gerilimi değerleri ile TCSC'li sistem için bu gerilimlerin % olarak değişimi Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. Beş baralı sistem için tek faz devre şeması

Tablo 1. TCSC ile Seri kompanzasyon durumunda görünür güçlerdeki değişimler

TCSC Yeri	Yük görünür gücündeki değişim (%)			Generatör güçlerindeki değişim (%)	
	S ₁	S ₂	S ₄	S ₃	S ₅
Normal Durum	36.93 (MVA)	33.08 (MVA)	51.1 (MVA)	80.5 (MVA)	39 (MVA)
Z ₁₂	%2.86	%0.46	%0.47	%7.5	%1.4
Z ₂₄	%0.62	%0.95	-%0.04	%8	-%1.4
Z ₁₃	%2.47	%1.5	%0.22	%10.2	-%3.4
Z ₂₃	%1.7	%1.9	%0.56	%10.9	-%5.3
Z ₃₄	%0.62	%3.63	%1.3	%9.6	-%3.3
Z ₂₅	%1.9	%2.1	%0.8	%2.8	%11.4
Z ₄₅	%0.82	%0.9	%0.75	%5.1	%6.4

Tablo 2. TCSC ile seri kompanzasyon durumunda bara gerilimlerdeki değişimler

TCSC Yeri	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
Normal Durum	57.56 (kV)	58.49 (kV)	60.68 (kV)	59.67 (kV)	61.01 (kV)
Z ₁₂	%0.8	%0.1	%0.2	%0.23	%0.14
Z ₂₄	%0.24	%0.32	-%0.03	-%0.11	%0.11
Z ₁₃	%1.12	%0.66	%0.01	%0.13	%0.34
Z ₂₃	%0.74	%0.87	-%0.19	%0.33	%0.57
Z ₃₄	%0.22	%0.29	-%0.03	%1.69	%0.3
Z ₂₅	%0.27	%0.27	%0.34	%0.41	%0.04
Z ₄₅	%0.83	%0.94	%0.41	%0.4	-%0.5

Şekil 3'de verilen sistemde 20 MVar kapasitif güçlü SVC kullanılarak yük baralarının %100'lük reaktif güç kompanzasyonu sonucunda Generatör çıkışı ve yük için görünür güçlerindeki değişimler % olarak Tablo 3'te, SVC'siz sistemde bara gerilimlerinin kV olarak değerleri ile SVC'nin kullanılması durumunda bu gerilimlerin % olarak değişimi Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda görünür güçlerdeki değişimler

SVC Yeri	Yük görünür gücündeki değişim (%)			Generatör güçlerindeki değişim (%)	
	S ₁	S ₂	S ₄	S ₃	S ₅
Normal Durum	36.93 (MVA)	33.08 (MVA)	51.1 (MVA)	80.5 (MVA)	39 (MVA)
1. Bara	-%0.16	%6.3	%0.74	%8.6	%1.16
2. Bara	%6.5	%0.36	%4	%8	%0.8
4. Bara	%4.5	%4.5	%0.5	%7.5	%0.06

Tablo 4. SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda bara gerilimlerdeki değişimler

SVC Yeri	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
Normal Durum	57.56 (kV)	58.49 (kV)	60.68 (kV)	59.67 (kV)	61.01 (kV)
1. Bara	%4.37	%3	%1.84	%1.99	%1.83
2. Bara	%3.1	%3.45	%1.82	%2.07	%2
4. Bara	%2.2	%2.22	%2.2	%2.96	%1.72

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Devlet Planlama Teşkilatı DPT 2003K 120880-2, 2003 proje çerçevesinde desteklenmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak Tristör Kontrollü Reaktör temelli FACTS cihazlarından Statik Var Kompanzator (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) kullanılarak 34.5 kV'luk endüktif reaktif güçlü 2 baralı bir sistemde yük gerilimi ve akımının kontrolü verilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü ve hat empedansının kompanzasyonu ile akım kontrolünde her iki kontrol sisteminin iyi sonuçlar verdiği ve kararlı bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Fakat TCSC ile yapılan kontrolde gerilim ve akımdaki bozulmalar SVC'li kontrol sisteminden daha düşük değerdedir. Bu kompanzatorların karmaşık sistemlerde yük akışına ve sistem gerilimine olan etkisini göstermek amacıyla beş baralı güç sistemi incelenmiştir. Yüke aktarılan gücün artırılması ve bara geriliminin regülasyonu açısından Statik Var Kompanzatorün TCSC'ye göre daha uygun sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Yalçınöz T., Erbaş H and Yücel İ, Esnek alternatif akım iletim sistemleri ve uygulama alanları, Kaynak Elektrik, Enerji, Elektrik, Aydınlatma, Elektronik ve Otomsasyon Mühendisliği Dergisi, No.153, pp.114-117, Ocak 2002.
- [2] Hingorani N.G., Flexible AC Transmission, System, IEEE Spectrum, pp.40-45, April 1993
- [3] Canizares C.A., Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage and Angle Stability Studies, IEEE /PES WM Panel, Singapore, Jan. 2000.
- [4] Huang G. M., Ping Y., The Impacts of TCSC and SVC on Power System Load Curtailment, IEEE Winter Conference, 2001
- [5] Pilotto LaA. S., Ping W., Carvalho A. R., Wey A, Long W.F., Alvarado F. L., Edris A., Determination of needed FACTS controllers that increase asset utilization of power systems, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 1, Jan. 1997, pp.364-371.
- [6] Larsen E. V., J. J. Sanchez-Gasca, Chov J. H., Concepts for desing of FACTS controllers to damp. Power swings, IEEE Trans. Power System, vol. 10, no.2, May. 1995, pp. 948-956.
- [7] Sadiković R.P., Glavič M., Effect of FACTS devices on steady state voltage stability, 1.st Balkan Power Conference, Slavonig, September 2001.
- [8] Claudio A. Canizares, A. Berizzi, P. Marannino, Using FACTS controllers to Maximize Available Transfer Capability, Bulk Power Systems Dynamics and Control IV-Restructuring, pp.24-28, Santarino, Greece, August-1998