

Kararlı durumda seri kapasitörlerin iletim şebekesine etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of series capacitor on transmission network in steady state

Doğan Can SAMUK^{1*}, Fatih Mehmet NUROĞLU²

¹Elektrik-elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.
dogancan.samuk@erdogan.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
fnn@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.01.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 25.01.2019

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.76009

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Artan nüfus ve gelişen sanayi ile birlikte elektrik enerjisi ihtiyacı günden güne artmaktadır. Bu talebin karşılanması için yeni üretim tesisleri birincil enerji kaynaklarına yakın yerlerde kurulmakta ve iletim şebekesi ile tüketim merkezlerine taşınmaktadır. Özellikle üretim ve tüketim merkezleri arasındaki mesafenin uzun olduğu yerlerde güç transfer kapasitesinin azalması ve güç açısı değerinin büyümesi problemlere neden olmaktadır. Bu bağlamda uzun iletim hatlarında iletilen aktif gücü artırmak için seri kapasitörler kullanılmaktadır. Seri kapasitörlerin, paralel hatlar arasında yük paylaşımına olanak sağlaması ve sistemin geçici hal kararlılığını artırmaya yardımcı olması şebekeye sağladığı diğer olumlu katkılardır. İletim hatlarına olan bu katkıların yanında seri kapasitörlerin sistemde koruma görevini yerine getiren mesafe koruma rölelerinin çalışmasını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, seri kapasitörün yüksek gerilimli uzun iletim hatlarının yüklenmesine, şebekenin geçici hal kararlılığına ve mesafe koruma rölelerinin çalışmasına etkisini incelemek üzere Digsilent PowerFactory programında örnek bir test sistemi oluşturulmuştur. Test sistemi üzerinde yük akış ve kısa devre analizleri yapılarak seri kapasitörlerin iletim sistemi üzerine olumlu ve olumsuz etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Seri kapasitör, Mesafe koruma rölesi, Yük akış analizi, Kısa devre analizi, Digsilent powerfactory

Abstract

Electrical energy need is increasing day by day along with the developing industry and growing population. New generation facilities are established near the primary energy sources to meet the demand. The generated energy is transported to the load location by transmission lines. Decrease of the power transfer capacity and great value of the power angle cause some problems, especially at the long-distanced places between the generation and the load location. In this context, series capacitors are used to increase transfer capacity on long transmission lines. It is also known that the series capacitors allow load sharing between the parallel lines and improve transient stability of the network. In addition to these positive contributions to the network, the series capacitor affects operation of the distance relay negatively. In this study, a sample test system is modeled by using Digsilent PowerFactory software in order to investigate the effect of series capacitor on loading of long transmission lines, transient stability of the network and operation of distance protection relays. Load flow and short circuit analysis were performed on the test system. The advantages and disadvantages of the series capacitors on the transmission system were investigated.

Keywords: Series capacitor, Distance relay, Load flow analysis, Short circuit analysis, Digsilent powerfactory

1 Giriş

İletim hatlarında yaygın olarak kullanılan seri kapasitörlerin başlıca kullanım amacı, hattın endüktif reaktansının bir kısmının kompanse edilmesidir. Bu sayede hattın empedans değeri azaltılarak transfer kapasitesinin artırılması sağlanır [1]. Seri kapasitörlerin ilk uygulaması Amerika'da New York Power and Light firmasına ait bir şebekede 1928 yılında yapılmıştır. Burada kullanılan kapasitör grubu 33 kV gerilim ve 1.25 MVAR reaktif güç değerine sahipti [2]. Bu tarihten sonra iletim hatlarında seri kapasitörlerin kullanımı yaygınlaşmış ve bu konuda yapılan çalışmalar literatürde geniş yer bulmaya başlamıştır. Seri kapasitörler, özellikle üretim ve tüketim merkezleri arasındaki mesafenin uzun olduğu yerlerde iletim kayıplarının en aza indirilerek transfer kapasitesinin artırılması için kullanılmaktadır. Kapasitörlerin ayrıca sistemin geçici hal kararlılığını iyileştirme ve paralel hatlar arasında yük paylaşımına olanak sağlama gibi şebekeye olumlu katkıları da vardır [3].

Gencer ve Öztürk [4] yaptıkları çalışmada seri kapasitörün sistemin geçici hal kararlılığına etkisini incelemek için 11 baralı

test sistemi modellemişlerdir. Model üzerinde kapasitörsüz ve kapasitörlü olarak oluşturdukları kısa devre arızalarında kapasitörlü durumda sistemin gerilim ve açı kararlılığının daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Grünbaum ve diğ. [5] yaptıkları çalışmada seri kapasitörler yardımıyla enerji iletim hatlarının ileteceği güç miktarının artırılabilirliğini ve bu durumda yeni hatların tesis edilmesine gereksinim kalmayacağını belirtmişlerdir.

Lee ve diğ. [6] tristör kontrollü seri kapasitörün Kore Elektrik Güç Sistemi'ne entegrasyonunun sisteme getirdiği faydaları araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre kapasitörün güç akışını kontrol etmede ve iletim kapasitesinin artırılmasında amacına uygun olduğunu vurgulamışlardır.

Şebekeye sağladığı bu olumlu katkıların yanında, seri kapasitörlerin mesafe koruma rölesinin çalışmasını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir.

Zellagui ve Chaghi [7] Cezayir'de bulunan seri kompanse edilmiş 220 kV iletim hattının MATLAB programında analizini yapmışlardır. Yapılan analizde, farklı arıza durumlarında kapasitörün MHO tipi mesafe koruma rölesine etkilerini

incelemişlerdir. Sonuçlardan seri kapasitörün konumu ve değerine bağlı olarak mesafe koruma rölelerinin koruma işlevini düzgün olarak yerine getiremediği görülmüştür.

Vyas ve diğ. [8] seri kapasitör kullanılan iletim hattında meydana gelebilecek problemleri incelemişlerdir.

Yapılan bu çalışmada seri kapasitörün iletim şebekesinde yük akışına ve kısa devre arızası durumunda mesafe koruma rölelerinin çalışmasına etkisi Digsilent PowerFactory programında oluşturulan örnek bir test sistemi üzerinde incelenmiştir.

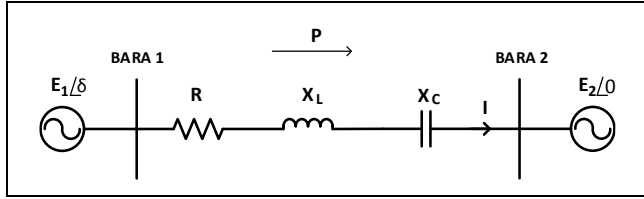
Çalışmanın ikinci bölümünde teorik altyapı, üçüncü bölümünde yapılan benzetim çalışmaları ve dördüncü bölümünde sonuçlar verilmiştir.

2 Teorik altyapı

Bu kısımda seri kapasitörler ve mesafe koruma rölelerinin çalışma yapıları hakkında genel bilgiler verilecektir. Seri kapasitörün iletim hattına olumlu etkileri ve mesafe rölelerinin çalışmasına olumsuz etkisi teorik olarak ele alınacaktır.

2.1 Seri Kapasitörler

Seri kapasitörler adından da anlaşılacağı üzere iletim hattına seri olacak şekilde bağlanırlar. Temel görevi, hattın endüktif reaktansının azaltılarak (kompanzasyon) transfer kapasitesinin artırılmasını sağlamaktır [9]. Şekil 1'de iki baralı seri kapasitör içeren iletim hattı örneği verilmiştir [7].



Şekil 1: İki baralı seri kapasitör içeren iletim hattı.

İletim hattının omik direnç değeri (R) reaktans değerine (X) oranla çok küçük olduğundan işlem yaparken ihmal edilebilir. Şekil 1'deki hatta kapasitör eklenmeden önce akımın değeri Denklem (1),(2)'deki gibidir.

$$I = \frac{E_1(\cos\delta + j\sin\delta) - E_2}{jX_L} \quad A \quad (1)$$

$$I = \frac{E_1 \sin\delta}{X_L} + j \left(\frac{E_2 - E_1 \cos\delta}{X_L} \right) \quad A \quad (2)$$

Buna göre Bara 1'den Bara 2'ye iletim aktif güç Denklem (3)'teki gibi olur.

$$P = \frac{E_1 E_2 \sin\delta}{X_L} \quad W \quad (3)$$

Burada;

E_1 : Bara 1 gerilimi

E_2 : Bara 2 gerilimi

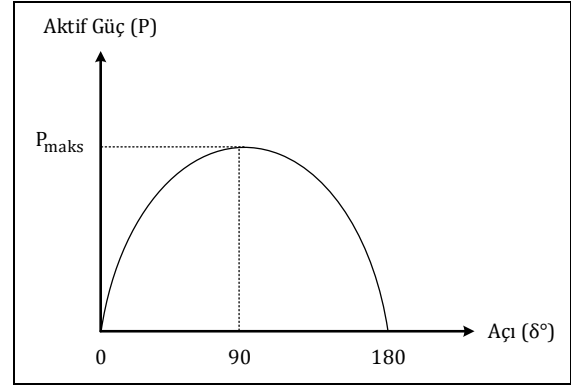
I: Hat akımı

P: İletilen aktif güç

X_L : Hattın endüktif reaktans değeri

δ : Bara 1 ve Bara 2 arasındaki güç açısıdır.

Denklem (3)'e göre oluşan aktif güç-güç açısı eğrisi Şekil 2'deki gibi olur.

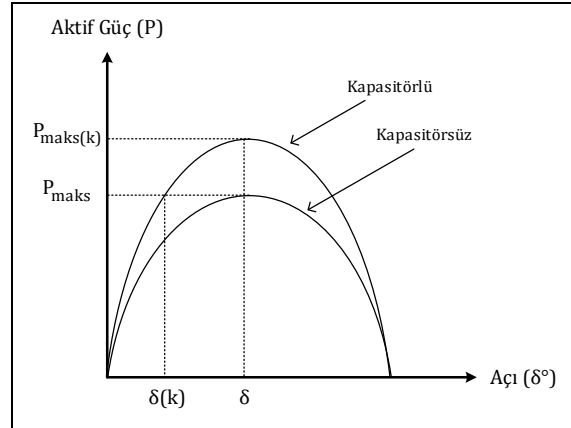


Şekil 2: Kapasitörsüz durumdaki iletim hattının aktif güç-güç açısı eğrisi.

İletim hattına seri kapasitör eklenirse hattın yeni empedans değeri $Z = X_L - X_C$ olur. Burada X_C eklenen kapasitörün reaktans değeridir. Buna göre hattın iletilecek aktif gücün yeni değeri Denklem (4)'teki gibidir.

$$P = \frac{E_1 E_2 \sin\delta}{X_L - X_C} \quad W \quad (4)$$

Denklem (3),(4) göz önüne alındığında Şekil 3'te kapasitörlü ve kapasitörsüz durumda oluşacak aktif güç-güç açısı eğrileri verilmiştir [7]. Şekil 3'e göre kapasitörlü durumda iletilen aktif güç miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda iletilen aktif güç sabit iken, kapasitörlü durumda güç açısının değeri daha düşüktür. Bu kapasitörün sistemin geçici hal kararlılığını olumlu yönde etkilediğini gösteren bir durumdur.

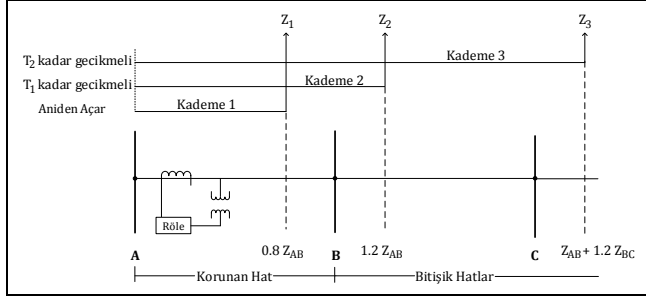


Şekil 3: Seri kapasitörlü ve kapasitörsüz aktif güç-güç açısı eğrileri.

2.2 Mesafe koruma rölesi

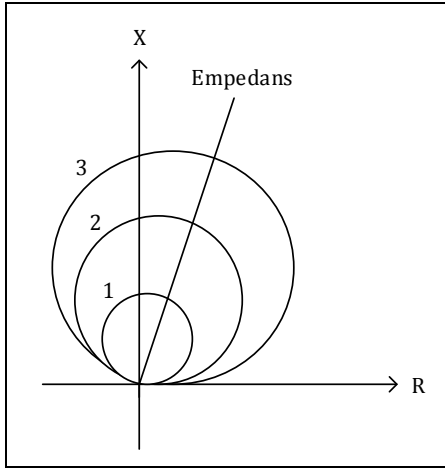
Mesafe koruma rölesi (MKR), iletim hatlarında oluşan kısa devre arızası durumlarında hattı koruma görevini yerine getiren elemandır [10],[11]. Temel çalışma prensibi ölçü aletlerinden aldığı gerilim ve akım bilgilerini kullanarak empedans ölçümüne dayanır. Normal işletme koşulundaki hattın empedansı, rölenin ayar değeri olarak seçilir. İletim hattında kısa devre arızası meydana geldiğinde, gerilim değeri azalırken, akım değeri artmaktadır. Bu durumda röle tarafından görülecek empedans değeri ayarlanan empedans değerinden daha küçük olacağı için röle açma sinyali üretir ve arızalı kısım sistemden ayrılır. MKR ile koruma yapılırken yanlış açmaların engellenmesi için röle farklı koruma

bölgelerine ayrılır [12]. Şekil 4'te 3 kademeli (koruma bölgesine sahip) MKR'nin zaman-mesafe karakteristiği verilmiştir.



Şekil 4: Mesafe koruma rölesinin zaman-mesafe karakteristiği.

Kademe 1 genelde korunan hattın %80-85'ini kapsar ve röle bu bölge içine düşen arızalarda zaman gecikmesi olmadan açma sinyali üretir. Kademe 2 korunan hattın %120'sini kapsayacak şekilde seçilir ve röle bu bölgede zaman gecikmeli olarak çalışır. Kademe 1 ve 2 korunan hat için ana koruma görevini yerine getirir. Kademe 3 ise korunan hattın %100'üne ek olarak bitişik en uzun hattın %120'sini kapsayacak şekilde ayarlanır ve süresi kademe 2'den daha fazla olacak şekilde zaman gecikmeli olarak çalışır. Temel görevi bitişik hat için yedek korumayı sağlamaktır. Şekil 5'te MKR'nin $R - X$ karakteristiği verilmiştir. Hat boyunca R ve X değeri sabit olduğundan empedans doğrusal karakteristiğe sahiptir. Şekil 5'te $R - X$ düzlemine konumlandırılmış çemberler koruma bölgelerini temsil etmektedir. Çemberin içine aldığı bölge yapılan kademe ayarı yüzdesine göre belirlenir. Röle tarafından ölçülen empedans ilgili kademeye ait çemberin içinde olduğunda röle açma sinyali üretir.



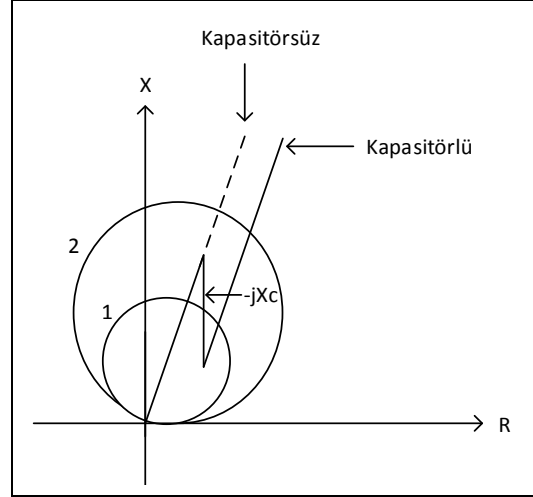
Şekil 5: MKR'nin $R - X$ karakteristiği.

Seri kapasitör bulunan iletim hatlarında mesafe koruma rölelerinin çalışmasının olumsuz yönde etkilendiği bilinmektedir. Özellikle kısa devre arızası ile MKR arasında seri kapasitör bulunduğu durumda röle tarafından ölçülen empedansın değeri değişir ve bu durum rölenin hatalı bir şekilde çalışmasına sebebiyet verir. Seri kapasitör bulunan iletim hattında kullanılan MKR'lerde görülen başlıca problemler, rölenin kademe genişlemesi sebebiyle hatalı açma sinyali üretmesi veya gerilimin yön değiştirmesine bağlı olarak hatalı şekilde açma sinyali üretmemesidir [13].

2.2.1 Kademe genişlemesi

Kademe genişleme kısa devre arıza empedansının seri kapasitörün empedansından daha büyük olduğunda

meydana gelir [14]. Bu durumda röle ayarlanan kademe değerinden daha uzaktaki bir olayı kendi birinci kademesi içinde görenek hatalı açma sinyali üretir. Kademe genişlemesi olduğunda rölenin $R - X$ diyagramı Şekil 6'daki gibi olmaktadır [7].

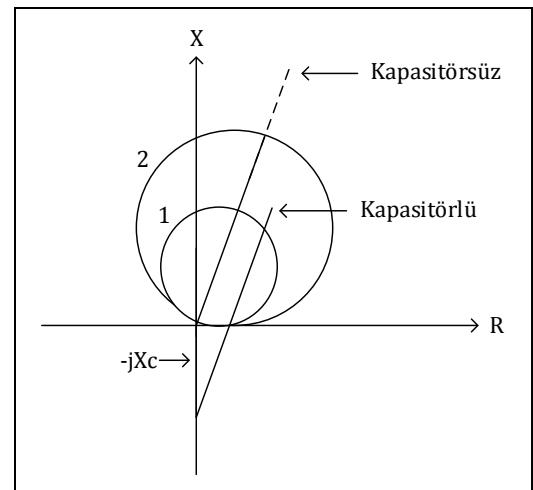


Şekil 6: Kademe genişlemesi durumunda rölenin $R - X$ diyagramı.

Şekil 6'ya göre, normalde 2. koruma bölgesi içerisine düşecek olan arıza röle tarafından 1. bölgede olacak şekilde algılanabilir ve bu durum rölenin hatalı açma yapmasına sebebiyet verebilir.

2.2.2 Gerilimin yön değiştirmesi

Gerilimin yön değiştirmesi kısa devre arıza empedansının seri kapasitörün empedansından daha küçük olduğunda meydana gelir [15],[16]. Bu durumda rölenin gördüğü gerilim açılal olarak 90° veya daha fazla yön değiştirmektedir. Oluşacak kısa devre akımının açılal olarak yönü sabit olduğunda gerilimin yön değiştirmesi rölenin arızayı ters yönde algılamasına sebebiyet verir. Gerilimin yön değiştirmesi durumunda rölenin $R - X$ diyagramı Şekil 7'deki gibi olmaktadır [7].

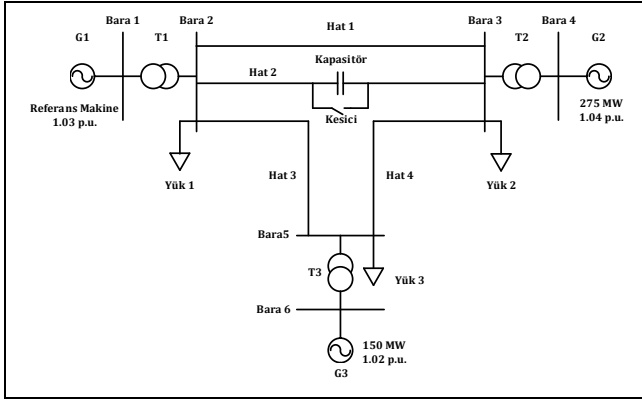


Şekil 7: Gerilimin yön değiştirmesi durumunda rölenin $R - X$ diyagramı.

Şekil 7'ye göre normalde 1. koruma bölgesi içerisine düşecek olan arıza röle tarafından ters bölgede algılanabilir ve bu durum rölenin hatalı bir şekilde açma sinyali üretmemesine sebebiyet verebilir.

3 Benzetim alışmaları

Yapılan benzetim çalışmalarında yük akış analizi ve kısa devre analizi için, 6 bara, 3 generatör ve transformatör ve 4 adet iletim hattı içeren bir test sistemi Digsilent PowerFactory programında oluşturulmuştur. Bu program yük akışı ve kısa devre arıza analizi yapmak için oldukça kullanılıştır [17]. Test sisteminin benzetim modeli Şekil 8’de verilmiştir. Modelde kullanılan generatörler ve transformatörler özdeştir. Buna göre generatörler 18 kV 500 MVA ve transformatörler ise 18/230 kV 500 MVA ve %5.1 gerilim düşümü oranına sahiptir. Seri kapasitör Hat 2’nin orta noktasına denk gelecek Şekilde yerleştirilmiştir ve devreye alınıp çıkarılması terminal uçlarına bağlanan kesici yardımıyla yapılmaktadır. Aynı zamanda Hat 2’ye Bara 2 tarafında olacak Şekilde bir MKR yerleştirilmiştir. Röle, 3 ayrı koruma bölgesine ayrılmış, zaman ve koruma bölgesi ayarları mesafe koruma rölesi başlığı altında aıklanđıđı gibi yapılmıştır.



Şekil 8: Digsilent PowerFactory programında oluşturulan örnek test sistemi.

Hatlara ve yüklere ait teknik bilgiler Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Tablo 1: Hatlara ait teknik bilgiler.

Parametre	Hat 1	Hat 2	Hat 3	Hat 4
Hat Uzunluğu (km)	150	150	80	50
Rezistans (Ω)	15	15	8	5
Reaktans (Ω)	75	75	40	25

Tablo 2: Yüklere ait teknik bilgiler.

Parametre	Yük 1	Yük 2	Yük 3
Aktif G (MW)	150	500	150
Reaktif Güç (MVar)	30	50	10
Görünür G (MVA)	152.9	502.5	150.3

Tablo 1’den görüldüğü üzere seri kapasitörün bulunduğu Hat 2 ile ona paralel olan Hat 1 özdeş seçilmiştir.

Yapılan benzetim çalışmaları yük akış analizi ve kısa devre analizi olmak üzere iki başlık altında incelenecektir.

3.1 Yük akış analizi

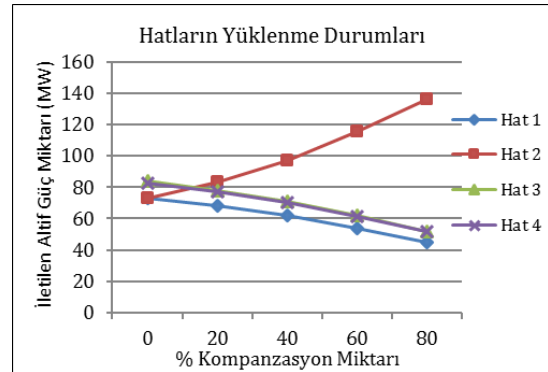
Yapılan çalışmanın ilk kısmında, seri kapasitör devrede yokken ve kademeli olarak iletim hattına %20, %40, %60 ve %80 kompanzasyon uygulandığı durumlar için yük akış analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde seri kapasitörün hatların yüklenme durumuna, sistemin geçici hal kararlılığına ve toplam reaktif güç kaybına etkileri incelenmiştir. Buna göre ilk olarak hatların yüklenme durumları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde ilk durumda seri kapasitör devrede değilken Hat 1 ile Hat 2’nin eşit yükü paylaştıkları grlmektedir. Daha sonra Hat 2’ye kademeli olarak kompanzasyon uygulandığında, ilettiği aktif güç miktarı kompanzasyon derecesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi Hat 2’nin transfer kapasitesi artarken aşırı yüklenme durumu söz konusu olmamaktadır. Aynı zamanda Hat 2’ye uygulanan kompanzasyon ile Hat 3 ve Hat 4 fiderlerinin ilettiği aktif güç miktarının azalması, kapasitör yardımıyla paralel hatlar arasında yük akışının kontrolünün mümkün olabileceğini bize göstermektedir.

Tablo 3: Hatların yüklenme durumları.

Hatlar	Parametreler	% Kompanzasyon Miktarı				
		0	20	40	60	80
Hat 1	P (MW)	72.9	68	61.7	53.8	45.1
	Q (MVar)	-10	-9.3	-7.9	-5.2	0.3
	Yüklenme(%)	17.9	16.7	15.1	13.2	10.9
Hat 2	P (MW)	72.9	83.5	97.2	115	136
	Q (MVar)	-10	-15	-25	-43	-89
	Yüklenme(%)	17.9	20.7	24.4	30	39.5
Hat 3	P (MW)	83.9	78	70.8	61.7	51.8
	Q (MVar)	-3.6	-2.4	-0.6	2.4	8.6
	Yüklenme(%)	20.4	19	17.2	15	12
Hat 4	P (MW)	82.6	77	70.1	61.1	51.4
	Q (MVar)	-29.	-28	-26	-22	-14
	Yüklenme(%)	21.6	20.2	18.4	16	13.1

Şekil 9’da hatların ilettiği aktif gn kompanzasyon miktarı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 9: Hatlardan akan aktif gn kompanzasyon miktarı ile değişimi.

Şekil 9’da hatların yüklenme durumlarının kompanzasyon miktarı ile değişimi daha net bir Şekilde grlmektedir. Seri kapasitör yardımıyla Hat 2’nin ilettiği aktif güç miktarı neredeyse iki katına çıkarılabilmektedir. Bu durumda iletim hattına neden %100 kompanzasyon işlemi uygulanmadığı sorusu akla gelebilir. %100 kompanzasyon durumunda oluşacak kısa devrede hat reaktansı sıfır olduğundan dolayı iletim hattı çok yüksek kısa devre akımlarına maruz kalabilir ve bu durum sistem okmesine varana kadar ciddi sonuçlar doğurabilir [18].

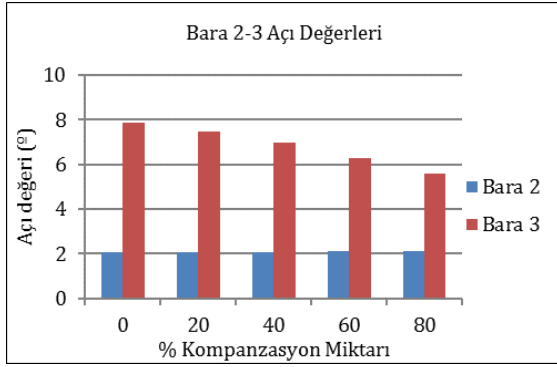
Yapılan yük akış analizlerine göre iletim hatlarını birbirine bağlayan baraların gerilim ve aı değerlerindeki değişim Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde, uygulanan kompanzasyon ile bara aç ı değerlerinin birbirine yaklaştığı görölebilir. Baralar arasındaki aç ı farkının az olması sistemin geçici hal kararlılığını olumlu yönde etkileyen bir faktördür. Aç ı farkı azalırken bara gerilim değerlerinin de kararlılık sınırı içinde kalması önemli bir noktadır.

Tablo 4: Baraların kompanzasyon miktarına göre gerilim ve aç ı değerleri.

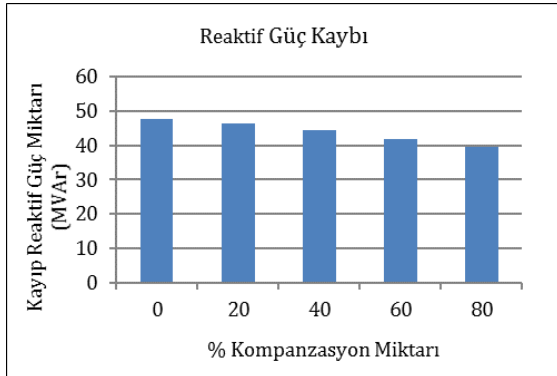
Bara	Parametre	% Kompanzasyon Miktarı				
		0	20	40	60	80
2	Gerilim (kV)	236.6	236.6	236.8	237.1	237.8
	Aç ı (°)	-2.09	-2.09	-2.09	-2.1	-2.1
3	Gerilim (kV)	236.4	236.3	236.2	236.0	235.3
	Aç ı (°)	-7.87	-7.47	-6.97	-6.31	-5.57
5	Gerilim (kV)	234.83	234.84	234.85	234.85	234.83
	Aç ı (°)	-5.58	-5.34	-5.02	-4.62	-4.16

şekil 10'da Bara 2 ile 3'ün aç ı değerlerinin kompanzasyon miktarı ile değişimi verilmiştir.



şekil 10: Bara 2 ve 3'ün kompanzasyon miktarına göre aç ılarının değerini.

şekil 10 incelendiğinde, kompanzasyon miktarının artmasıyla Bara 2 ile Bara 3'ün aç ı farklarının azaldığı görölmektedir. Bu durum kapasitörün sistemin geçici hal kararlılığını artırdığını gösteren önemli bir unsurdur. Kapasitör kullanılarak geçici kararlılığın iyileştirilmesi, hatların demet iletkenli yapılması veya paralel hat sayısının artırılması gibi yöntemlere göre daha ekonomik ve avantajlıdır. Yapılan yük akış analizinde son olarak seri kapasitörün reaktif güç kaybına etkileri incelenmiştir. Buna göre şekil 11'de toplam reaktif güç kaybının kompanzasyon miktarına göre değerini verilmiştir.



şekil 11: Toplam reaktif güç kaybının kompanzasyon miktarına göre değerini.

İletim hattının seri kapasitör eklenmeden önceki reaktif güç kaybı $Q_k = I^2 * X_L$ 'dir [18]. Seri kapasitör eklendiğinde ise hattın reaktans değeri azalacağından dolayı reaktif güç kaybı da azalır [$Q_k = I^2 * (X_L - X_C)$]. şekil 11 incelendiğinde kompanzasyon derecesinin artması ile reaktif güç kaybının giderek azaldığı görölmektedir.

3.2 Kısa devre analizi

Çalışmanın ikinci kısmında kısa devre arıza analizi için Hat 2'nin %50 ve %85'ine denk gelen noktalarda, seri kapasitör devrede değilken, %40 ve %60 kompanzasyon durumlarında ayrı ayrı 3 faz dengeli ve tek faz toprak kısa devre arızaları oluşturulmuştur. Hattın %50'sinde oluşturulan arıza kapasitörün Bara 3 tarafında bulunan terminalinde gerçeleştirilmiştir. Yani röle ile kısa arasında seri kapasitör olduğu durumda sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 5'te MKR'nin kademe ayar değerleri verilmiştir.

Tablo 5: MKR'nin kademe ayar değerleri.

Hat Parametreleri						
Z (Ω)	Aç ı (°)	R (Ω)		X (Ω)		
76.49	78.69	15		75		
Bölge	Faz			Toprak		
	% Hat	Z (Ω)	Aç ı (°)	% Hat	Z (Ω)	Aç ı (°)
1	80	61.19	78.69	80	66.69	63.55
2	120	91.78	78.69	120	100.03	63.55
3	196	107.08	78.69	147	116.7	63.55

3.2.1 3 faz kısa devre arızası

Hattın %50'sine denk düşen noktada oluşturulan 3 faz dengeli kısa devre arızasında her üç kompanzasyon durumu için (kapasitör yokken, %40 ve %60 kompanzasyon) oluşan R – X eğrileri şekil 12'de verilmiştir.

Rölenin kademe ayar değerine göre Hat 2'nin %50'sinde meydana gelen kısa devre, rölenin 1. koruma bölgesi içerisine düşmektedir. Röle, kapasitör devrede yokken ve Hat 2'ye %40 kompanzasyon uygulandığı durumda arızayı bölge 1 olarak algılayarak düzgün bir şekilde açma sinyali üretmiştir. Ancak Hat 2'ye %60 kompanzasyon uygulandığı durumda röle, gerilimin yön değeristirmesine bağlı olarak kısa devreyi ters bölgede algılayıp hatalı bir şekilde açma sinyali üretmemiştir.

Oluşan R – X karakteristiklerine göre rölenin kısa devreyi gördüğu bölgeler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Hat 2'nin %50'sinde oluşan kısa devre arızalarında rölenin arızayı gördüğu bölgeler.

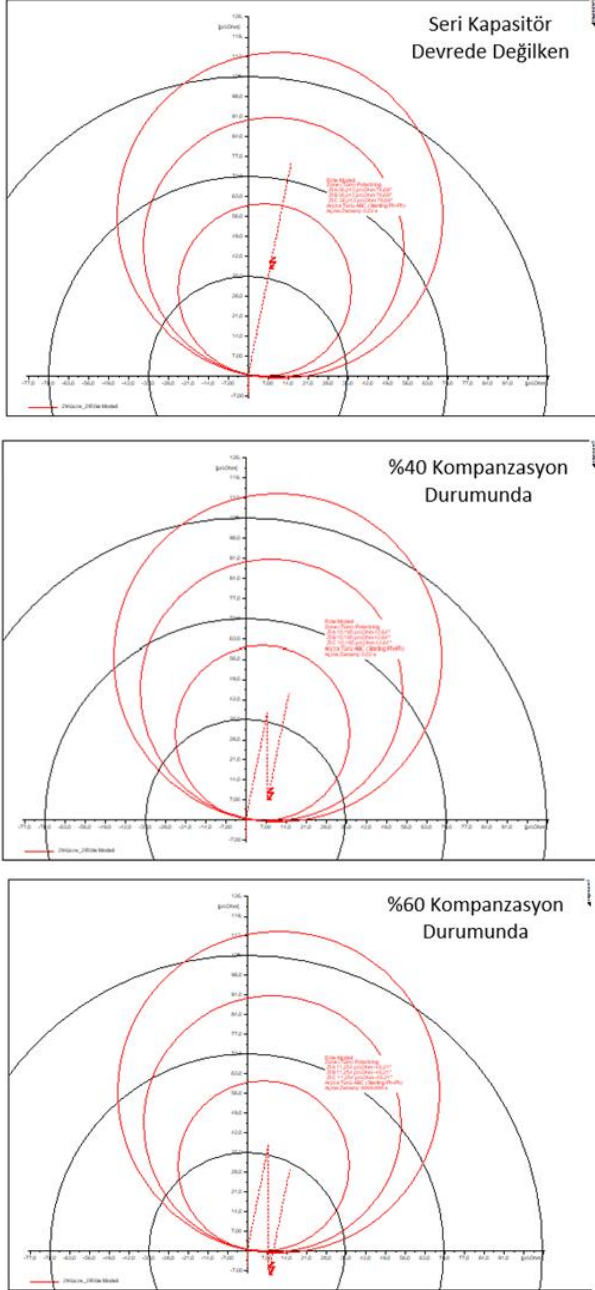
Kısa Devre Yeri	Kompanzasyon Durumu		
	Yok	%40	%60
%50	1. Bölge	1. Bölge	Ters Bölge* Hatalı Çalışma*

Hat 2'nin %50'sinde meydana gelen kısa devre arızalarında Bara 2'nin gerilim ve akım bilgileri Tablo 7'de verilmiştir.

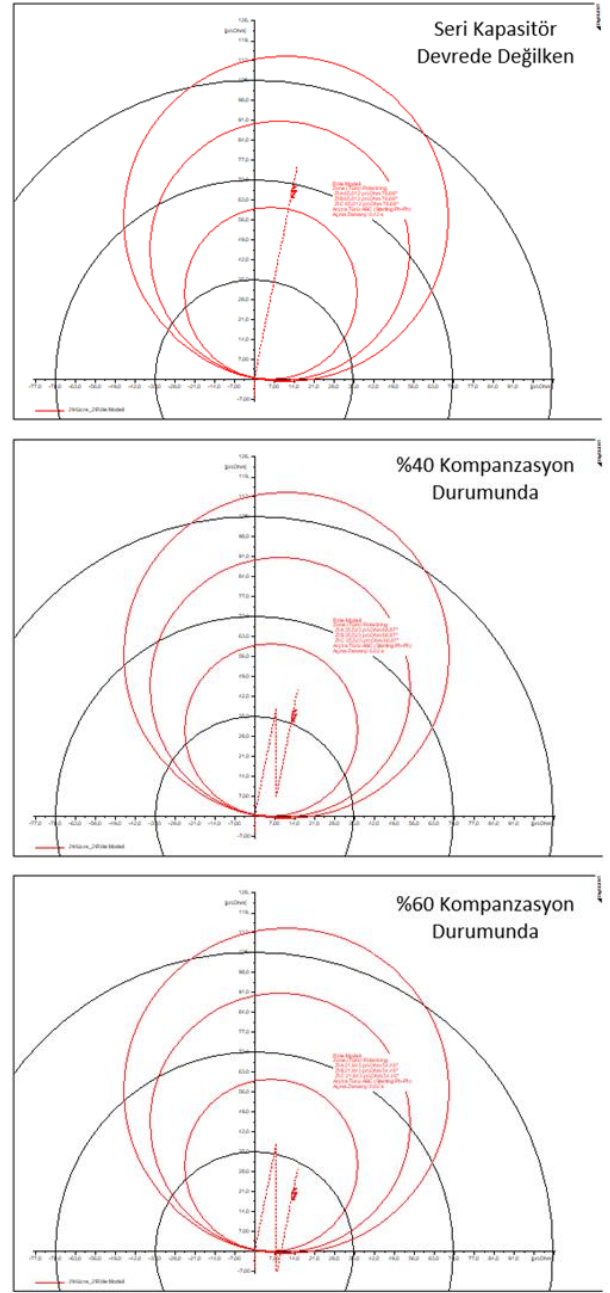
Tablo 7'de kapasitörsüz durumda gerilimin aç ı göz önüne alındığında, %60 kompanzasyon durumunda aç ının 90'den daha fazla yön değeristirdiği görölmektedir. Bu durum seri kapasitörün etkisiyle rölenin kısa devreyi ters bölgede algılayıp hatalı şekilde çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 7: Bara 2 gerilim ve akım bilgileri.

Hat 2'nin %50'sindeki kısa devre arızası				
Kompanzasyon Durumu	Gerilim (kV)	Açı (°)	Akım (kA)	Açı (°)
Yok	78.28	-3.9	2.05	-82.5
%40	40.11	-29.9	3.78	-74.9
%60	67.16	-108	6.33	-63.1



Şekil 12: Hat 2'nin %50'sinde meydana gelen arızalarda kompanzasyon durumlarına göre rölenin R-X karakteristikleri. Hat 2'nin %85'ine denk gelen noktada oluşturulan 3 faz dengeli kısa devre arızalarında her üç kompanzasyon durumu için (kapasitör yokken, %40 ve %60 kompanzasyon) oluşan R – X eğrileri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13: Hat 2'nin %85'inde meydana gelen arızalarda kompanzasyon durumlarına göre rölenin R-X karakteristikleri. Rölenin kademe ayar değerine göre Hat 2'nin %85'inde meydana gelen kısa devre 2. koruma bölgesi içerisine düşmektedir. Röle kapasitör devrede yokken arızayı bölge 2 olarak algılayarak açma sinyali üretmiş ve görevini düzgün bir şekilde yerine getirmiştir. Hat 2'ye %40 ve %60 kompanzasyon uygulandığı durumda röle kapasitörün neden olduğu kademe genişlemesi sebebiyle arızayı bölge 1'de görerek hatalı açma sinyali üretmiştir.

Oluşan R – X karakteristiklerine göre rölenin kısa devreyi gördüğü bölgeler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Hat 2'nin %85'inde oluşan kısa devre arızalarında rölenin arızayı gördüğü bölgeler.

Kısa Devre Yeri	Kompanzasyon Durumu		
	Yok	%40	%60
%85	2. Bölge	1. Bölge*	1. Bölge*

Hatalı Çalışma*

Hat 2'nin %85'inde meydana gelen kısa devre arızalarında Bara 2'nin gerilim ve akım bilgileri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9: Bara 2 gerilim ve akım bilgileri.

Hat 2'nin %85'indeki kısa devre arızası				
Kompanzasyon Durumu	Gerilim (kV)	Açı (°)	Akım (kA)	Açı (°)
Yok	86.04	-3.92	1.33	-82.6
%40	70.7	-8.6	1.97	-77.8
%60	58.14	-17.6	2.58	-73.2

Tablo 9'da %40 ve %60 kompanzasyon durumundaki gerilim ve akım bilgileri kullanılarak kısa devre empedansları hesaplandığında %40 için 35.89 Ω ve %60 için 22.58 Ω değerleri elde edilir. Rölenin kademe ayar değerlerinin verildiği Tablo 5 incelendiğinde bu iki empedans değerinin de bölge 1 için ayarlanan değerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum seri kapasitörün kademe genişlemesine bağlı olarak MKR'lerde hatalı çalışmalara sebebiyet verdiğinin açıkça kanıtıdır.

3.2.2 Tek faz toprak kısa devre arızası

İkinci arıza analizi tek faz toprak arızası oluşturularak yapılmıştır. Arıza empedansı 5Ω seçilmiştir. Buna göre hattın %50'sine denk düşen noktada oluşturulan tek faz toprak kısa devre arızasında her üç kompanzasyon durumu için oluşan $R - X$ eğrileri Şekil 14'te verilmiştir.

Oluşan $R - X$ karakteristiklerine göre rölenin kısa devreyi gördüğü bölgeler Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10: Hat 2'nin %50'sinde oluşan kısa devre arızalarında rölenin arızayı gördüğü bölgeler.

Kısa Devre Yeri	Kompanzasyon Durumu		
	Yok	%40	%60
%50	1. Bölge	1. Bölge	Ters Bölge*

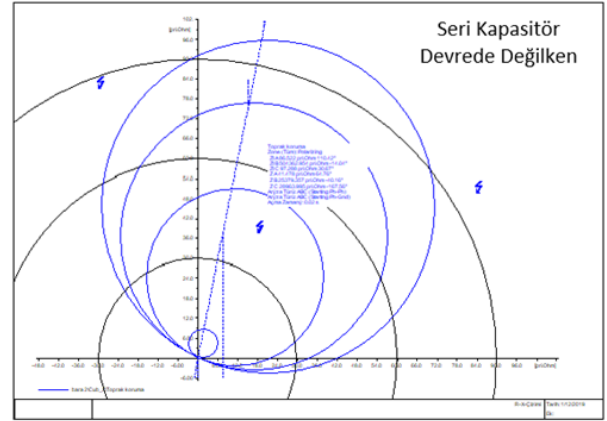
Hatalı Çalışma*

Hat 2'nin %50'sinde meydana gelen kısa devre arızalarında Bara 2'nin gerilim ve akım bilgileri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11: Bara 2 gerilim ve akım bilgileri.

Hat 2'nin %50'sindeki kısa devre arızası				
Kompanzasyon Durumu	Gerilim (kV)	Açı (°)	Akım (kA)	Açı (°)
Yok	88.90	-9.5	2.14	-74.2
%40	66.43	-37.7	4.02	-62.9
%60	104.81	-76.4	6.61	-45.26

Tablo 11 incelendiğinde kapasitörsüz ve %40 kompanzasyon durumlarında arıza empedansının açısının negatif olduğu görülmektedir. Ancak %60 kompanzasyon durumunda arıza empedansının açısı pozitif olmakta ve bu durum rölenin arızayı ileri yönde görememesine sebebiyet vermektedir.



Şekil 14. Hat 2'nin %50'sinde meydana gelen arızalarda kompanzasyon durumlarına göre rölenin R-X karakteristikleri.

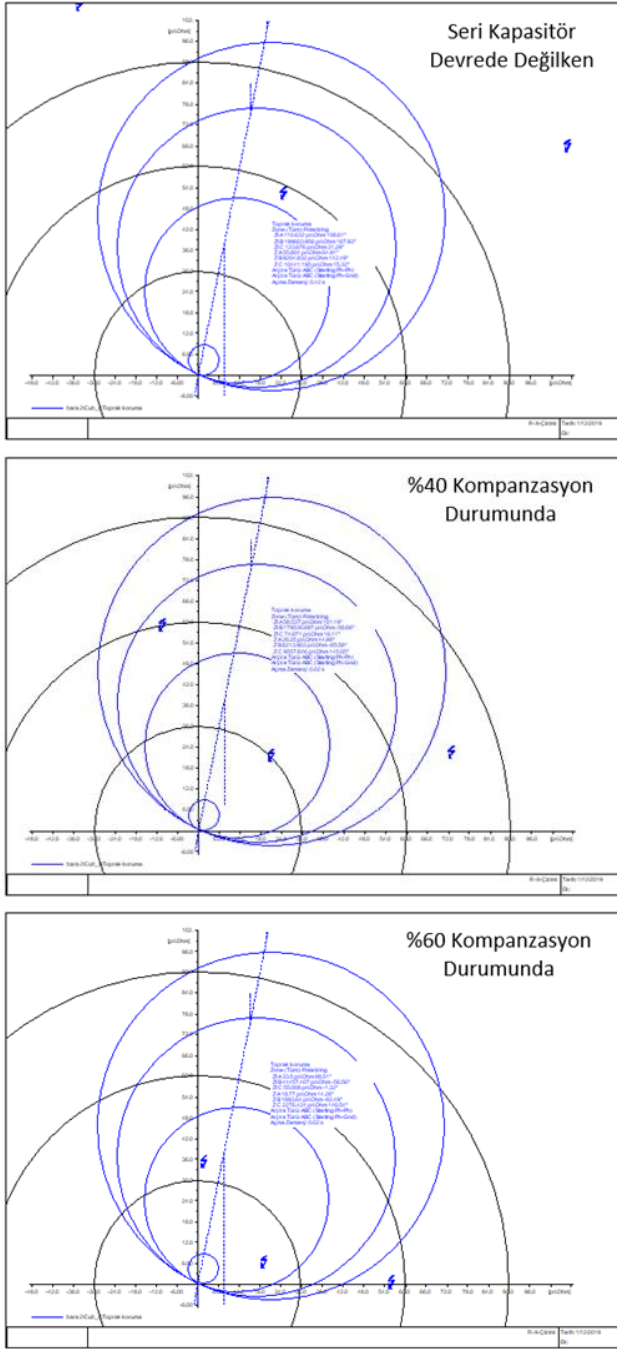
Hat 2'nin %85'ine denk gelen noktada oluşturulan tek faz toprak kısa devre arızalarında her üç kompanzasyon durumu için oluşan $R - X$ eğrileri Şekil 15'te verilmiştir.

Oluşan $R - X$ karakteristiklerine göre rölenin kısa devreyi gördüğü bölgeler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12: Hat 2'nin %85'inde oluşan kısa devre arızalarında rölenin arızayı gördüğü bölgeler.

Kısa Devre Yeri	Kompanzasyon Durumu		
	Yok	%40	%60
%85	2. Bölge	1. Bölge*	1. Bölge*

Hatalı Çalışma*



Şekil 15. Hat 2'nin %85'inde meydana gelen arızalarda kompanzasyon durumlarına göre rölenin R-X karakteristikleri. Hat 2'nin %85'inde meydana gelen kısa devre arızalarında Bara 2'nin gerilim ve akım bilgileri Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13: Bara 2 gerilim ve akım bilgileri.

Hat 2'nin %85'indeki kısa devre arızası				
Kompanzasyon Durumu	Gerilim (kV)	Açı (°)	Akım (kA)	Açı (°)
Yok	95.27	-8.6	1.71	-73.5
%40	78.71	-20.8	2.79	-65.7
%60	74.67	-42.2	3.98	-56.5

Tablo 13'te %40 ve %60 kompanzasyon durumundaki gerilim ve akım bilgileri kullanılarak kısa devre empedansları hesaplandığında %40 için 28.21Ω ve %60 için 18.76Ω değerleri elde edilir. Rölenin kademe ayar değerlerinin verildiği Tablo 5 incelendiğinde bu iki empedans değerinin de bölge 1 için ayarlanan değerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum tek faz toprak arızasında da seri kapasitörün kademe genişlemesine bağlı olarak MKR'lerin hatalı çalışmasına sebebiyet verdiğini göstermektedir.

Aynı zamanda yapılan kısa devre analizlerinde seri kapasitör bulunan Hat 2'de kapasitör devrede olduğu durumlarda hattan akan kısa devre arıza akımı değerlerinin kapasitörsüz duruma kıyasla daha fazla olduğu sonuçlardan görülmektedir. Kapasitörlü durumda mesafe koruma rölelerinin işlevini düzgün yerine getirememesi ve oluşan kısa devre akımının genliğinin artması elektrik şebekeleri için göz önüne alınması gereken önemli bir durumdur. Yapılan analizler sonucunda seri kapasitör bulunduran iletim hattında MKR'lerin işlevini düzgün bir şekilde yerine getirmesi için yapılan öneriler aşığıda sıralanmıştır.

Öneri 1: Oluşan kısa devre arızasının giderilmesi için blokaj, kesici açtırma ve müsaadeli açtırma gibi pilot röle şemaları kullanılabilir. Çalışmadaki test sistemi üzerinden örnek vermek gerekirse, Hat 2'nin Bara 3 ile seri kapasitör arasında kalan kısımda meydana gelen arızalarda Bara 3 tarafındaki röle kapasitörden etkilenmeden arızayı doğru tespit edebilmektedir. Bara 3 tarafındaki röleden gönderilecek müsaadeli açtırma sinyali ile Bara 2'de bulunan rölenin açma yapması sağlanarak hattın enerjisi kesilebilir.

Öneri 2: Kademe genişlemesine bağlı olarak oluşan hatalı açma durumlarının ortadan kaldırılması için yine pilot röle ile blokaj sinyali kullanılabilir. Test sisteminde bu duruma örnek vermek gerekirse, özellikle %60 kompanzasyon durumunda MKR'nin kademe genişlemesine bağlı olarak hatalı çalıştığı görülmektedir. Bara 3 tarafında bulunan röle hattın %20'lik dilimine kadar olan arızalarda blokaj sinyali ile Bara 2'de bulunan rölenin kademe 1'de açmasını engelleyebilir ve hatalı çalışma durumu ortadan kaldırılabilir.

Öneri 3: Bilindiği üzere MKR'ler empedansa dayalı çalışma yapısına sahiptir. Bu sebeple seri kapasitör bulunan hatlarda hattın kompanzasyon miktarının optimum olabilmesi için MKR'lerin çalışma yapıları göz önüne alınmalıdır. Özellikle hattın orta noktasında bulunan kapasitör grubunun reaktans değeri kompanzasyon miktarı %50'den fazla olmayacak şekilde seçilmelidir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada seri kapasitörün iletim şebekesine olan etkileri incelenmek üzere örnek bir test sistemi Digsilent PowerFactory programında modellenmiştir. Test sistemi üzerinde yapılan yük akış analizi sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, seri kapasitörün uzun iletim hatlarında transfer kapasitesini arttırmaya yardımcı olduğu görülmektedir. Bu durum transfer kapasitesini arttırmada kullanılan diğer yöntemler (yeni iletim hattı inşası vb.) ile kıyas edildiğinde oldukça ekonomik bir çözümdür. Aynı zamanda seri kapasitörün komşu iletim hatlarında yük akışının kontrolüne imkân sağladığı ve iletim hatlarını birbirine bağlayan baralar arasındaki açı farklarını azaltmak suretiyle sistemin geçici hal kararlılığını arttırmaya yardımcı olduğu sonuçlardan görülmektedir. Bu çalışmada ayrıca kapasitörün reaktif güç kaybına etkisi incelenmiş ve reaktif güç kaybının kompanzasyon miktarına bağlı olarak

azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda artan transfer kapasitesi ile kapasitör tarafından üretilen reaktif güç miktarının da artması kapasitörün iletim hatlarında reaktif güç dengesine olumlu etki ettiğini göstermektedir. Yapılan kısa devre analizlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise, seri kapasitörün etkisiye MKR'lerin hatalı çalıştığı durumların oluştuğu sonuçlardan görölmektedir. Özellikle MKR ile kısa devre arasında seri kapasitör bulunduğu durumda röle tarafından ölçölen empedans değerinin değişmesine bağlı olarak hatalı çalışma durumları oluşmuştur. Yapılan kısa devre analizi sonuçları, iletim hattında seri kapasitör kullanıldığı durumda MKR'nin ayar değerlerinin yeniden yapılandırılması veya bu durumun çözümü için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

5 Kaynaklar

- [1] Saadat H. *Power System Analysis*. 5th ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1999.
- [2] De Kock J, Strauss C. *Practical Power Distribution for Industry*. 1st ed. Burlington, USA, Newnes Press, 2004.
- [3] Miller J, Watson MB. "Review of Series Compensation for Transmission Lines". PSC Consulting Technical Report, JU4715, 2014.
- [4] Gencer ÖÖ. Seri Kompanzasyon Sistemlerinin Geçiçi Hal Kararlılığına Etkilerinin Örnek Bir Sistem Üzerinde İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2002.
- [5] Grünbaum R, Halvarsson P, Jones P. "Series Compensation for Increased Power Transmission Capacity". 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Brighton, UK, 19-21 April 2010.
- [6] Lee HJ, Kim SH, Hur K, Choi JS, Oh HJ, Lee BJ, Chow JH. "Integrating TCSC to enhance transmission capability and security: Feasibility studies for korean electric power system". *Power and Energy Society General Meeting*, Boston, USA, 17-21 July 2016.
- [7] Zellagui M, Chaghi A. "Impact of series compensation (SC) on the MHO distance relay in algerian 220 kV transmission line". *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, 2(6), 181-189, 2011.
- [8] Vyas B, Maheshwari RP, Das B. "Protection of series compensated transmission line: issues and state of art". *Electric Power System Research*, 107, 93-108, 2014.
- [9] Kumar BSA, Parthasarathy K, Prabhakara FS, Khincha HP. "Effectiveness of series capacitors in long distance transmission lines". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 5, 941-951, 1970.
- [10] Ziegler G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. 4th ed. Erlangen, Germany, Publicis Publishing, 2011.
- [11] Glover JD, Sarma MS, Overbye TJ. *Power System Analysis and Design*. 5th ed. Stamford, USA, 2011.
- [12] Özevin E. Elektrik Güç Sistemlerinde Hatların Kısa Devre ve Güç Salınımına Karşı Nümerik Mesafe Röleleri ile Korunmasının İncelenmesi ve Dinamik Simülasyonunun Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [13] Altuve HJ, Mooney JB, Alexander GE. "Advances in series-compensated line protection". 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas, USA, 30 March-2 April 2009.
- [14] Jamali S, Kazemi A, Shateri H. "Distance relay over-reaching due to installation of TCSC on next lines". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Montreal, Canada, 9-13 July 2006.
- [15] Bakie E, Westhoff C. "Voltage and current inversion challenges when protecting series-compensated lines-a case study". 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas, USA, 4-7 April 2016.
- [16] Jamali S, Kazemi A, Shateri H. "Voltage inversion due to presence of TCSC on adjacent lines in inter phase faults and distance relay mal-operation". 43rd International Universities Power Engineering Conference. 1-4 September 2008.
- [17] Digsilent Power System Software and Engineering. "AdvancesFeatures". <https://www.digsilent.de/en/protection-functions.html> (22.01.2018).
- [18] Kundur P. *Power System Stability and Control*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1994.