

LABORATUAR ÖLÇEKLİ YERALTI KABLO MODELİNİN TASARIMI VE UYGULAMASI

Mehmet Ali ANADOL^{*}, Musa AYDIN^{}, Tankut YALÇINÖZ^{***}**

^{*} Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Selçuk Üniversitesi, KONYA

^{**} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, KONYA

^{***} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Melikşah Üniversitesi, KAYSERİ

anadol@selcuk.edu.tr, aydin@selcuk.edu.tr, tvalcinoz@meliksah.edu.tr

(Geliş/Received: 28.06.2011; Kabul/Accepted: 02.02.2012)

ÖZET

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli güç sistem uygulamaları için toplu parametrelili eşdeğer π devrelerinin ardışık şekilde bağlanmasıyla elde edilen fiziksel bir yer altı kablo modeli tasarımı sunulmaktadır. Modelin geçerliliği, STATCOM ve fiziksel kablo modelinden oluşan sonsuz baralı bir güç iletim sistemi üzerinde doğrulanmıştır. STATCOM, mikrokontrolör tabanlı, reaktif akım kontrolü esasına göre çalışan, üç fazlı, 12 darbeleri, gerilim kaynaklı dönüştürücü yapısına sahiptir. Bu tür bir güç sisteminde hattı yüksüz enerjilendirme, yüklü çalıştırma ve yük atma gibi olayların kablo hattı üzerindeki etkileri, deney ve simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Güç ve kontrol sistemine ait simülasyon modelleri, PSCAD/EMTDC programının C programlama ara yüzü ve model kütüphanesinde yer alan grafik tabanlı modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Geçici Durum Simülasyonu, Toplu Parametrelili Model, Statik Senkron Kompanzator, Yeraltı Kablo Modeli

DESIGN AND APPLICATION OF A LABORATORY SCALE UNDERGROUND CABLE MODEL

ABSTRACT

In this study, design of a physical underground cable model provided by a cascade connection of lumped-parameter equivalent π (pi) circuits for laboratory scale power system applications is presented. The validity of the model was confirmed by a power transmission system using an infinite bus bar constituted of a static synchronous compensator (STATCOM) and the physical cable model. STATCOM exhibits the structure of a three-phase, twelve-pulse voltage source converter that operates on the principle of microcontroller based reactive power control. In such type of a power system, the effects of powering an unloaded and loaded transmission line, as well as load shedding on the cable line were investigated through various experiments and simulation studies. The simulation models for the power and control systems were built by employing the PSCAD/EMTDC program's C-programming interface and the graphics based models in its model library. The experimental results are compared with the results obtained from the PSCAD/EMTDC simulation program.

Keywords: Electromagnetic Transient Simulation; Lumped Parameters Model; Static Synchronous Compensator; Underground Cable Model

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda Avrupa ülkelerinde ve Türkiye'de, özellikle alt yapısı tamamlanmış kentsel yerleşim alanlarında yüksek gerilim yer altı kablo yatırımları yapılmaktadır. Bu kablo yatırımları, havai iletim hatlarının neden olduğu görsel ve manyetik etkinin

azaltılmasını, iletim sisteminin genişlemesini ve artan enerji taleplerinin karşılanmasını mümkün kılmaktadır. Ancak özel durumlar dışında, ekonomik [1] ve teknik nedenlerden [2] dolayı bu kablo hatlarının uzunluğu oldukça kısadır. Bu durum, havai hat iletkenleri ile birlikte kullanılan modern yüksek gerilim yeraltı kablolarını ilgi çekici bir konuma

getirmektedir. Bunun nedeni yüksek gerilim AC iletim kablolarının, havai hat iletkenlerine göre yaklaşık %10 daha düşük dalga empedansına (SIL) sahip olması [3] ve her koşulda çok daha fazla reaktif güç fazlalığı üretmesidir [4]. Ancak bu durum, güç iletim ve dağıtım sistemlerinin işletilmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, bu olumsuzlukların [5] giderilebilmesi için güç sisteminin belirli noktalarına tesis edilmiş genellikle sabit veya mekanik olarak anahtarlamalı kondansatör veya reaktör grupları kullanılmaktadır [6]. Bu metotların dezavantajı, ani akım yükselmeleri oluşturmaları, çok sık bakım gerektirmeleri, yavaş ve bağlantı noktasındaki gerilime bağımlı olmalarıdır [7]. Günümüzde bu metotlar yerine, modern kontrol tekniklerinin ve güç yarı iletken anahtarlama elemanlarının kullanıldığı esnek AC iletim sistemleri (FACTS) olarak adlandırılan, STATCOM (Statik Senkron Kompanzator) gibi yeni nesil teknolojiler kullanılmaktadır [8,9].

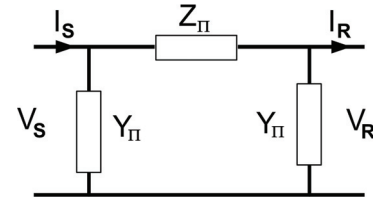
STATCOM gibi şönt bağlı bir reaktif güç kompanzatoru, kablolu iletim hatları üzerinde hem hattın dalga empedansını hem de hattın endüktif veya kapasitif reaktif güç ihtiyacını, hızlı ve bağlantı noktası geriliminden bağımsız bir şekilde kontrol ederek güç akışını ayarlayabilir. Ancak, mevcut enerji sistemleri laboratuvar düzenekleri içinde bu tür çalışmaların yapılabileceği fiziksel bir yer altı kablo modeli bulunmamaktadır. Bu tür çalışmalarda kullanılacak fiziksel bir kablo modelinin güç sistemlerinin analizi, kontrolü ve korunması için yararlı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, mevcut güç sistemleri elemanlarıyla uyum içinde çalışacak, pasif devre elemanlarıyla yapılmış, basit tasarımlı, laboratuvar ölçekli, modüler bir yer altı kablo modeli tasarımı sunulmuştur. Kablo modeline ait hat sabitleri, hem 400 kV, 2000 mm², XLPE yer altı yüksek gerilim kablosunun işletme ve üretici firma verilerinden hem de PSCAD/EMTDC programı içinde bulunan kablo sabitleri alt programı kullanılarak elde edilmiştir. Fiziksel kablo modeli, hattın dağılık parametreliliğine yaklaşabilmek ve diğer laboratuvar düzenekleri ile modüler bir kullanım kolaylığı sağlayabilmek amacıyla her biri 1 km uzunluğa sahip 10 adet toplu parametrelili π (pi) devrelerinin ardışık şekilde bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Kablo modeli, sonsuz baralı bir güç iletim sisteminde hattın boşta, yükte ve reaktif akım kontrolüne dayalı 12 darbeli bir STATCOM ile çalışma durumları için incelenmiştir. Deney sonuçları, PSCAD/EMTDC simülasyon programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. HAT MODELİ (THE LINE MODEL)

İletim hatlarının sürekli ve geçici durum davranışlarının incelenmesinde toplu parametrelili ve dağılık parametrelili olmak üzere iki devre modeli

kullanılır. Uygun modelin seçimi, hattın uzunluğuna ve ilgilenilen frekans aralığına bağlıdır [10]. İlgilenilen frekans aralığı geniş ve iletim hattı uzun ise dağılık parametrelili devre modelleri tercih edilir. Dağılık parametrelili modeller, toplu parametrelili modellere göre daha doğru ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir [11]. Bunun nedeni, dağılık parametrelili modellerde hattın asimetrik, çok iletkenli, kayıplı ve frekans bağımlı karmaşık yapısını dikkate alan hat parametrelerinin kullanılmasıdır. Frekans bağımlı bu nicelikler, EMTP/ATP/EMTDC tipi simülasyon programları yardımıyla, kablo malzemesi ve geometrisi dikkate alınarak üretici firma verilerinden [12,13] veya işletmede olan iletim hattı üzerinden ölçülen hat başı-hat sonu büyüklükleri kullanılarak hesaplanabilir [14]. Ancak, iletim hattı parametrelerinin dağılık yapısı ve hat parametrelerinin frekans bağımlılığı zaman domeninde çözüm elde etmeyi zorlaştırmaktadır [15]. Bu nedenle, iletim hattı uzun ve ilgilenilen frekans aralığı yüksek ise fiziksel hattın dağılık parametrelili yapısına bir dereceye kadar yaklaşabilmek için iletim hattı, Şekil 1'de gösterilen toplu parametrelili birçok pi devresinden meydana gelebilir. Ardışık şekilde bağlanacak eşdeğer pi devrelerinin sayısını belirlemek için kullanılan kriterler [16]'da verilmektedir.



Şekil 1. Hat eşdeğer pi devre modeli (Line equivalent π circuit model)

Burada Z_π ve Y_π , eşdeğer pi devresine ait seri empedans ve şönt admitans elemanını, I_S ve V_S hat başı akım ve gerilimini, I_R ve V_R hat sonu akım ve gerilimini ifade etmektedir. Devreye ait hat parametreleri, denklem (1)-(5)'de verilmektedir.

$$Z = R(\omega) + j\omega L(\omega) \quad (1)$$

$$Y = G(\omega) + j\omega C(\omega) \quad (2)$$

$$Z_\pi = (Zl) \cdot \frac{\sinh(\gamma l)}{(\gamma l)} \quad (3)$$

$$Y_\pi = \left(\frac{Yl}{2} \right) \cdot \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\left(\frac{\gamma l}{2}\right)} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

Kablo sisteminin birim uzunluğuna ait frekans bağımlı Z seri empedansı ve Y şönt admitansı, R seri direnç (Ω/km), L seri endüktans (H/km), G şönt kondüktans ($1/\Omega.\text{km}$) ve C şönt kapasitans (F/km) ile ifade edilmektedir. Burada l (km) hattın uzunluğu, γ

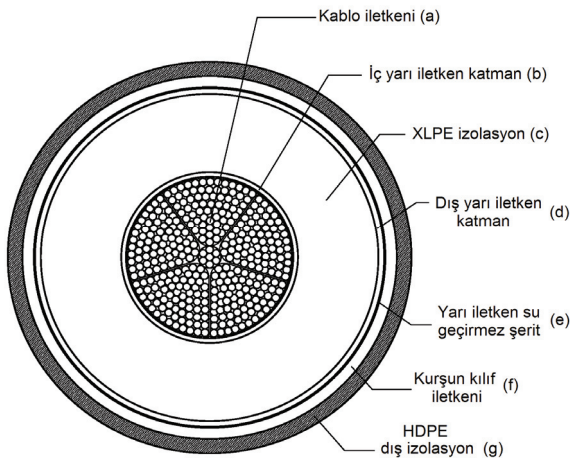
yayıma sabiti, α zayıflatma katsayısı (neper/km) ve β faz sabitidir (rad/km) [15].

Denklem 3 ve 4'deki hiperbolik düzeltme katsayıları, kısa iletim hatları ve düşük frekanslar için 1'e yaklaşır. Böylece, eşdeğer pi devresine ait hat parametreleri nominal pi devresine eşit olur. Bununla birlikte, ardışık şekilde bağlı nominal pi devresine ait hat parametrelerinin (R, L, G ve C) sabit olduğu varsayılırsa, modelin parametreleri de sabit olur ve elde edilen modelin EMTP gibi simülasyon programları ile zaman domeninde geçici durum simülasyonları yapılabilir [17].

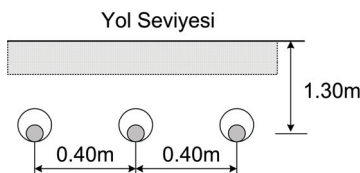
3. KABLO MODELİ TASARIMI (DESIGNING A THE CABLE MODEL)

3.1. Kablo Verileri (Cable Data)

Fiziksel kablo modelinin tasarımında Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından işletilen ve Davutpaşa - Yıldıztepe (İstanbul / Türkiye) arasında bulunan, 9.495 m uzunluğundaki 400 kV'luk yer altı kablosuna ait veriler kullanılmıştır. Kablo enine kesiti Şekil 2'de, materyal özellikleri Tablo 1'de ve kablo geometrik yerleşim planı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kablo kesit alanı (: Cable cross section area)



Şekil 3. Kablo geometrik yerleşim planı (Cable geometric location plan)

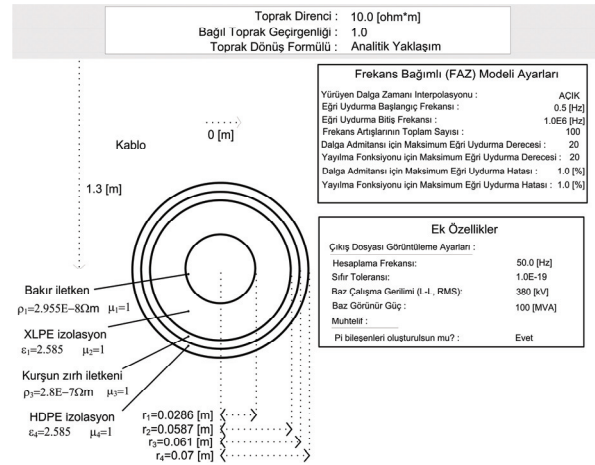
Tablo 1. Kablo materyal özellikleri (Cable material's properties)

	a	b	c	d	e	f	g
Kalınlık (mm)	28.6*	1.6	27	1.5	0.4	3.9	7

* Kablo iletkenine ait yarıçapı değeridir.

3.2. PSCAD/EMTDC Kablo Sabitleri (PSCAD/EMTDC Cable Constants)

PSCAD/EMTDC programı, kablo veya havai iletim hatlarının sürekli ve geçici durum analizi için toplu parametrelili ve dağıtık parametrelili iletim hattı modelleri içermektedir. Bu hat modelleri, iletim hattına ait hat sabitlerinin bilinmesini gerektirir. Bu amaçla, PSCAD/EMTDC programı içinde hattın fiziksel ve geometrik özellikleri kullanılarak hat sabitlerinin hesaplandığı bir kablo sabitleri alt programı bulunmaktadır. Ancak, yüksek gerilim yer altı kablo sistemlerinin kompleks yapısı ve program içindeki mevcut kablo modellerinin getirdiği sınırlamalar nedeniyle kablo sistemine ait verilerin, kablo sabitleri alt programı tarafından kullanılabilir bir şekilde dönüştürülmesi gerekir. Bölüm 3.1'de verilen yeraltı kablosuna ait veriler, [12]'de belirtilen kriterler dikkate alınarak dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Dönüştürme işlemi sonucunda elde edilen veriler, Şekil 4'de gösterildiği gibi kablo sabitleri alt programında, kablo modelini oluşturmak için kullanılmıştır.



Şekil 4. PSCAD kablo sabitleri alt programında kullanılan kablo geometrisi (The cable geometry used in PSCAD cable constants subroutine)

Tablo 2. PSCAD programı tarafından hesaplanan ve TEİAŞ ile Üretici firma verilerinden elde edilen hat sabitleri (Line Constants based on TEIAS and Manufacturer's data and computed by PSCAD program)

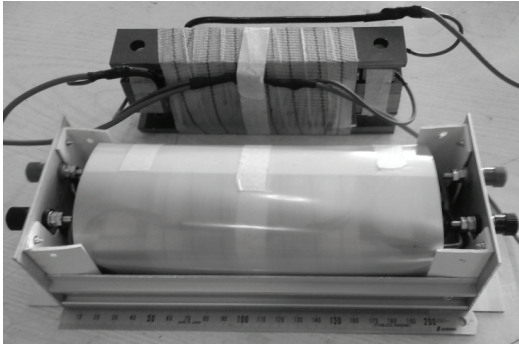
Hat Sabitleri	Üretici Firma	TEİAŞ	EMTDC
Direnç (R) Ω/km	0.0119	0.0164	0.24803
Endüktans (L) mH/km	0.626	0.596	0.607
Kapasitans (C) nF/km	200	231	200
Kondüktans (G) S/km	1.885E-8	-	-

Bu kablo modeline ait hat parametreleri, kablo sabitleri alt programının "frekans bağımlı hat modeli" ve "ek özellikler" bileşenlerine ait ayarlar kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, işletmeci ve

üretici firma verileriyle birlikte Tablo II'de gösterilmektedir. Tablo II'de PSCAD/EMTDC ile elde edilen direnç değeri, işletmeci ve üretici firma verilerine göre daha büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 2 ve Şekil 4'de verilen kablo geometrileri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu durum, [12] ve [13]'de detaylı şekilde açıklanmıştır.

3.3. Fiziksel Yeraltı Kablo Modeli (A Physical Underground Cable Model)

Bu çalışmada, Tablo II'de verilen hat parametreleri yardımıyla bir kablo modeli oluşturulmuştur. Kablo modeli, hattın dağıtık parametreliliğine yaklaşılabilmek için her biri 1 km uzunluğunda olan 10 adet kablo parçasından meydana gelmektedir. Tablo II'de verilen işletme frekansına ve birim uzunluğa ait hat sabitleri, Denklem 1 ve 2'de yerine konularak, 1 km'lik hat parçasına ait nominal pi eşdeğer devrenin seri empedans (Z) ve şönt admitans (Y) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin, Denklem 3 ve 4'de verilen hiperbolik düzeltme katsayılarıyla çarpılması sonucu, eşdeğer pi devresine ait seri empedans (Z_{π}) ve şönt admitans (Y_{π}) değerleri bulunmuştur. Kısa iletim hatları ve düşük frekanslar için hiperbolik düzeltme katsayıları 1'e yaklaştığından eşdeğer ve nominal pi devresine ait hat sabitleri, birbirine eşit çıkmaktadır.



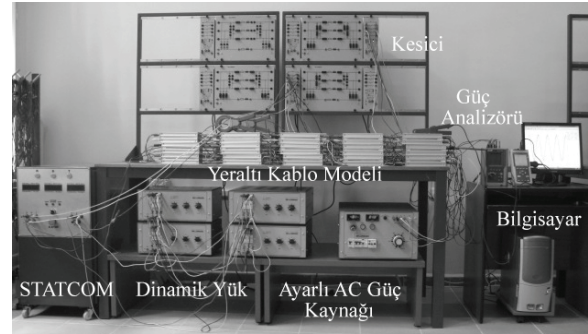
Şekil 5. Pasif devre elemanları ile oluşturulan eşdeğer pi devre kablo modeli (Fig. 5: Equivalent pi circuit cable model formed with passive circuit components)

Kablo modelinin oluşturulmasında standart değerlere yakınlığı nedeniyle üretici firma verileri esas alınmıştır. Modelin seri empedans elemanı için gerekli seri direnç (R_{π}) ve endüktans değeri (L_{π}), 0,40 mm çapında emaye kaplı bakır iletkenlerden, 50 sipir sarılarak elde edilen manyetik nüveli selonoid bir bobin ile sağlanmaktadır. Bobinin nüvesiz olarak LCR metreyle ölçülen endüktans değeri 241 μH 'dir. Model için gerekli olan yaklaşık 626 μH 'lik endüktans değeri, bobine yerleştirilen "I" şeklinde ve manyetik akı yoğunluğu 1 Tesla olan manyetik trafo saçlarıyla sağlanmıştır. Bu saçlar, trafolarında olduğu gibi kapalı bir manyetik devre oluşturmamaktadır. Bobin için seçilen iletken kesiti sayesinde seri empedans elemanına ayrıca bir direnç eklemeye gerek

kalmamıştır. Çünkü oluşturulan modelin seri empedans devresinden 1,35 A'lık DC akım geçirildiğinde ölçülen DC seri direnç değeri 14 m Ω 'dur. Tasarımı yapılan modelin şönt admitans elemanı için gerekli kondansatör değeri (C_{π}), 100 nF ve 1000 V'luk standart kondansatörlerle sağlanmıştır. Şönt kondüktansın değeri (G_{π}) ise ihmal edilmektedir. Tasarımı gerçekleştirilen kablo modeli, Şekil 5'de gösterilmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Tasarımı gerçekleştirilen fiziksel yeraltı kablo modelinin testi, Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün Güç Sistemleri Laboratuvarında set halinde bulunan, modüler yapı ve tek baralı bir güç iletim sistemi üzerinde yapılmıştır. Tek baralı güç iletim sistemine ait laboratuvar düzeneği Şekil 6'da gösterilmiştir. Deney sistemine ait parametreler, çalışmanın sonunda Ek'de sunulmuştur. Bu deney sistemi kullanılarak, TSR-tabanlı SVC'nin ve TCR-tabanlı SVC'nin davranışı deneysel olarak önceden incelenmişti [18]. Bu çalışmada ise kablo modeli, sonsuz baralı bir güç iletim sisteminde hattın boşa, yükte ve reaktif akım kontrolüne dayalı 12 darbeli bir STATCOM ile çalışma durumları için incelenmiştir.

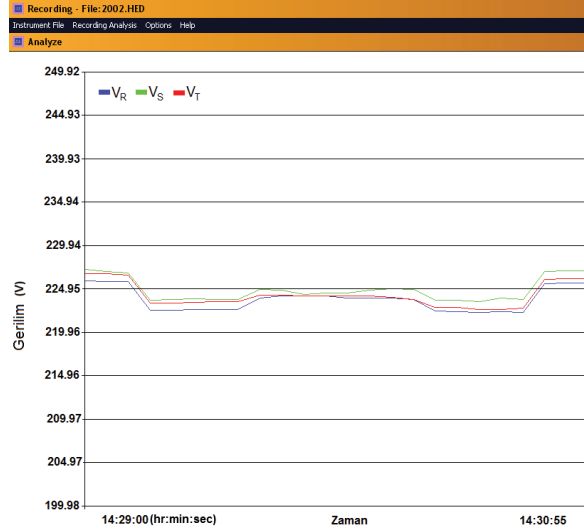


Şekil 6. Deney için kullanılan laboratuvar sistemi (Laboratory setup used for experiment)

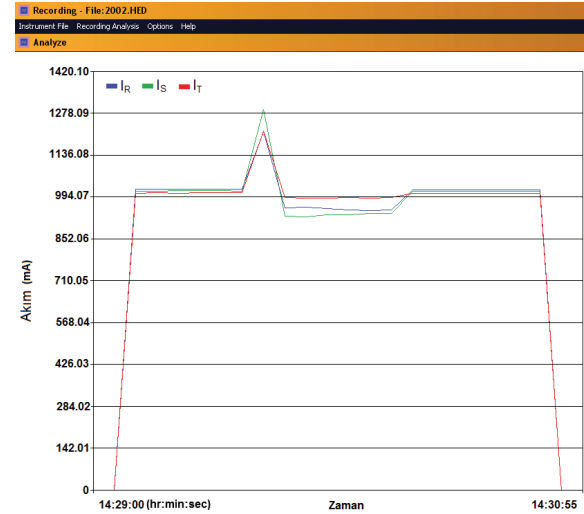
İlk aşamada fiziksel kablo modelinin geçerliliğini göstermek için yeraltı kablo hattı, yüksüz enerjilendirilerek 10 sn boşa çalıştırılmıştır. İkinci aşamada hat sonunda bulunan geri güç katsayılı yük, devreye alınarak 30 sn süresince STATCOM devrede değilken çalıştırılmıştır. Üçüncü aşamada STATCOM devreye alınarak, 35 sn çalıştırdıktan sonra devreden çıkartılmıştır. STATCOM sonrası kablo hattı, 30 sn yüklü ve 10 sn yüksüz çalıştırdıktan sonra ölçme işlemine son verilmiştir.

Şekil 7'de ortak bağlantı noktasına ait faz gerilimlerinin RMS değişim grafiği gösterilmiştir. Yüksüz enerjilendirilen kablo hattının sonunda faz gerilimleri yükselmiştir. Bu duruma, kısa kablo hattını besleyen hat başı geriliminin yüksekliği neden olmaktadır. Bu gerilim değeri, uzun iletim hatlarında

Ferranti olayı nedeniyle tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir. Faz gerilimleri arasında görülen dengesizlik durumu ise şebekeye ait dengesiz besleme gerilimlerinden kaynaklanmaktadır.



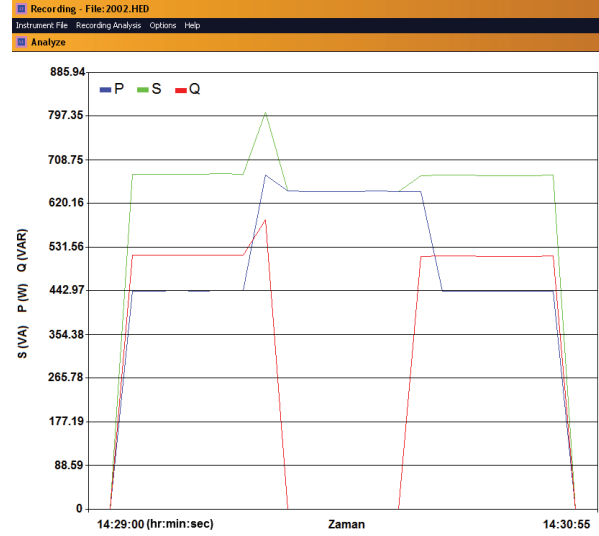
Şekil 7. Ortak bağlantı noktasına ait faz gerilimlerinin RMS değişim grafiği (The RMS variation graph of phase voltages belonging to the PCC)



Şekil 8. Ortak bağlantı noktasından çekilen faz akımlarının RMS değişim grafiği (The RMS variation graph of phase currents drawn from the PCC)

Şekil 8'de ortak bağlantı noktasından çekilen faz akımlarının RMS değişim grafiği gösterilmiştir. Yükün devreye girmesiyle birlikte kablo hattı üzerinden, besleme geriliminden kaynaklanan, dengesiz faz akımları çekilmektedir. Bu akımın aktif ve reaktif bileşenleri, iletim hattının seri empedansında gerilim düşümü oluşturmaktadır. Ancak yük tarafından ihtiyaç duyulan reaktif akım bileşeninin bir kısmı, kaynak yerine hattın şönt kapasitansından karşılandığından, hat sonu faz gerilimlerinde kayda değer bir gerilim düşümü meydana gelmemiştir. Başka bir deyişle, kablo hattının sonunda yer alan yük ile hattın dalga

empedans yükü arasındaki farkın küçük olduğu söylenebilir. Bu nedenle, dalga empedans yüküne eşit veya yakın değerdeki yükleri besleyen iletim hatlarında gerilim profili çok fazla değişmemektedir.



Şekil 9. Ortak bağlantı noktasından ölçülen üç faza ait aktif, reaktif ve görünür güç değişim grafiği (The variation graph of three-phase active, reactive and appear power measured from the PCC)

STATCOM'un devreye girmesiyle birlikte hattın çekilen faz akımları, DC bara kondansatörlerinin şarjı sırasında geçici olarak yükselmiştir. Kararlı çalışma durumuna ulaşıldığında, yük tarafından ihtiyaç duyulan reaktif akım bileşeninin tamamı kompanzátörden karşılanmaktadır. Bu nedenle, ortak bağlantı noktasında hat sonu faz gerilimleri yükselmiştir. Bununla birlikte, akım ve gerilim dalga şekillerinde görülen dengesizlik durumu, STATCOM'un 12 darbeli dönüştürücü yapısı nedeniyle [19] kompanzasyon süresince de devam etmektedir. Şekil 9'da ortak bağlantı noktasından çekilen 3 faza ait aktif, reaktif ve görünür güç değişim grafiği gösterilmiştir. STATCOM, DC bara kondansatörlerini şarj edebilmek için hattın aktif akım çekmektedir. Bu nedenle, ortak bağlantı noktasında aktif güç tüketimi artmıştır. Ancak Şekil 8'de görüldüğü gibi yük devredeyken hattın çekilen akım değeri, yükün STATCOM ile birlikte çalışırken çektiği akım değerinden daha büyüktür. Böylece, kablo hattının sonunda yer alan ayarlanabilir bir reaktif güç kompanzátörü, hem hattın gerilim regülasyonunu hem de reaktif güç kontrolünü gerçekleştirmiştir. STATCOM'un devreden çıkmasıyla birlikte, ortak bağlantı noktasında akım, gerilim ve güç değerleri STATCOM öncesi değerlerine tekrar geri gelmiştir.

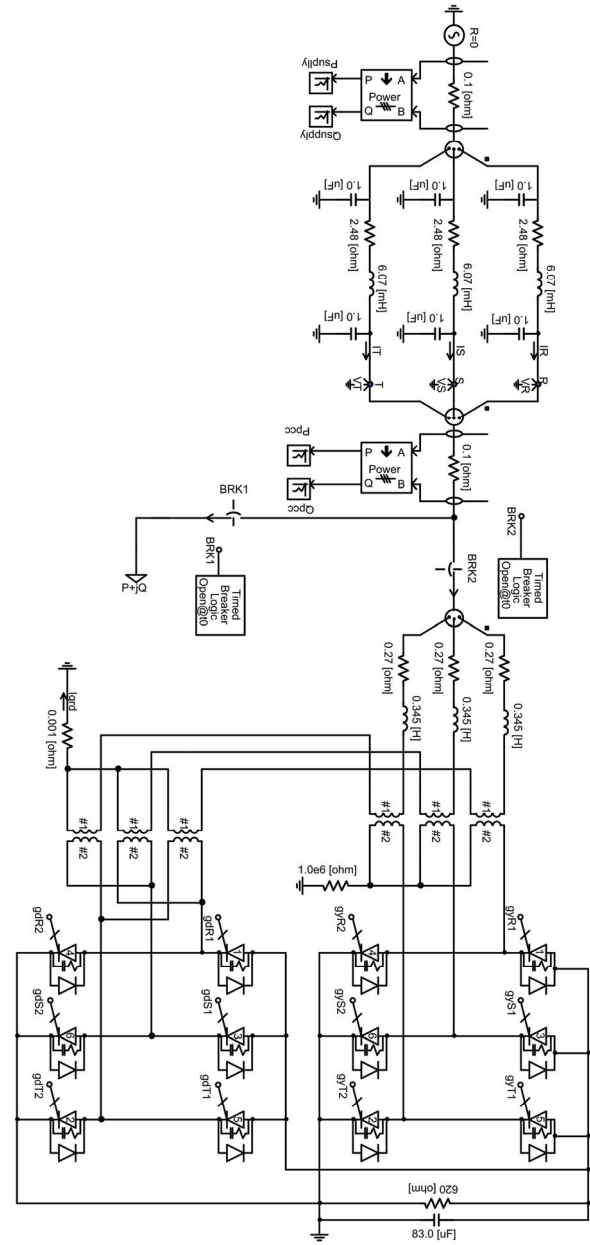
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Tasarımı gerçekleştirilen fiziksel yeraltı kablo modelinin doğruluğunu kontrol ve analiz etmek için

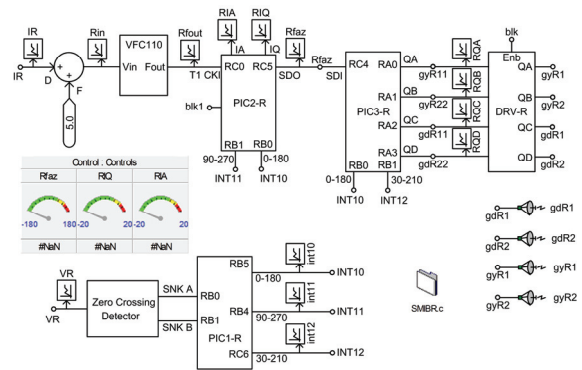
PSCAD/EMTDC programı ile simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Güç ve kontrol sistemine ait simülasyon modellerinin oluşturulmasında ve simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde PSCAD programının C programlama ara yüzü ve model kütüphanesinde yer alan grafik tabanlı modeller kullanılmıştır. Simülasyon çalışması, deneysel çalışmada kullanılan senaryo ile aynı fakat veri boyutunu küçültmek ve çalışma süresini kısaltmak amacıyla 10 sn'lik simülasyon süresi ve 50 μ s'nlik zaman adımı ile gerçekleştirilmiştir. Güç ve kontrol devresine ait simülasyon modelleri Şekil 10'da gösterilmiştir.

Tek baralı güç iletim sistemi, sonsuz baradan beslenen bir yeraltı kablo hattı ve bu hattın sonunda yük ile paralel şekilde bağlı 12 darbeleri bir STATCOM'dan meydana gelmektedir. Kablo hattını besleyen sonsuz bara, fazlar arası 390 kV (RMS) değerinde, dengeli 3 faz AC sistem gerilimine sahiptir. Kaynağın empedansı, sonsuz barayı ifade edebilmek için ihmal edilmiştir (ideal $R=0$). Deneysel çalışmada kullanılan 1 km'lik ardışık şekilde bağlı pi hat parçaları, simülasyon programında veri boyutunu, hesaplama süresini, düğüm sayısını ve matris boyutunu arttırmaktadır. Bu nedenle kablo hattı, Şekil 8'a görüldüğü gibi 10 km uzunluğundaki hattın parametrelerine sahip tek bir pi model olarak simüle edilmiştir [20]. Bu pi modele ait hat parametreleri, kablo sabitleri alt programı ile elde edilen hat parametreleridir. Hat sonunda yer alan yük, her faz için $P=143$ W, $Q=169$ VAR, 220 V (RMS) ve 50 Hz'lik çalışma değerlerine sahiptir. Endüktif özellikli bu yük, sabit direnç ve sabit endüktans elemanı olarak modellenmiştir. STATCOM, her biri 6 darbeleri gerilim kaynaklı iki dönüştürücülerden oluşmaktadır. Dönüştürücü köprülerinde, sönümlenme devresine sahip ters paralel diyotlu GTO anahtarlar kullanılmıştır. Bu dönüştürücüler, DC tarafta bir kondansatör üzerinden paralel şekilde bağlanmıştır. STATCOM'un AC sistem ile bağlantısı, iki kublaj trafosu ve filtreleme bobinleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Üç fazlı STATCOM'un kontrolü, sistemin her fazı için birbirinin aynı üç kontrol kartı ile gerçekleştirilmiştir. Her kontrol kartında üç mikrokontrolör yer almaktadır. Kontrol kartlarının yapısı ve çalışma prensibi, sistemin diğer fazları için de aynıdır. Bu nedenle Şekil 10b'de, sadece R fazına ait mikrokontrolör tabanlı kontrol kartının simülasyon modeli gösterilmiştir. Kontrol sistemi, genelleştirilmiş non-aktif güç teorisine [21] dayanmakta ve sadece ortak bağlantı noktasına ait akım ve gerilim ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır. Gerilim dalga şeklinin sıfır geçişine bağlı olarak üretilen kontrol sinyalleri, ortak bağlantı noktasından çekilen akımın aktif ve reaktif bileşenlerinin hesabı ve anahtarlama sinyallerinin üretimi için kullanılmıştır.

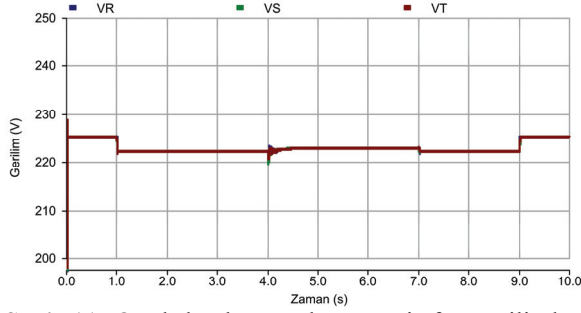


(a) Güç devresi (Power circuit)



(b) STATCOM'un R fazına ait mikrokontrolör tabanlı kontrol sistemi (Control system based on microcontrollers belonging to R phase of STATCOM)

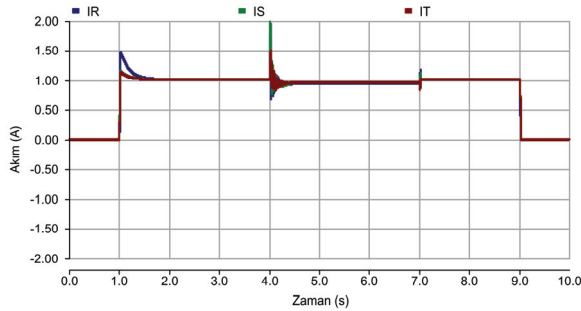
Şekil 10. PSCAD/EMTDC simülasyon modeli (Simulation model with PSCAD/EMTDC)



Şekil 11. Ortak bağlantı noktasına ait faz gerilimleri RMS değişim grafiği (Fig.11:The RMS variation graph of phase voltages drawn from the PCC)

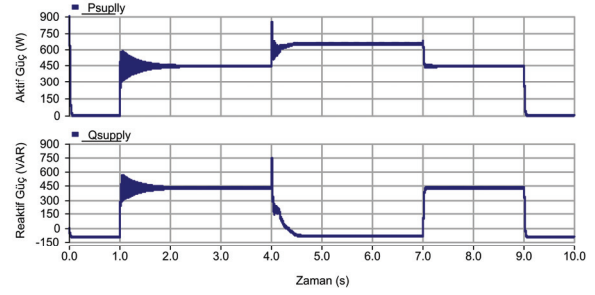
Şekil 11'de, ortak bağlantı noktasına ait faz gerilimlerinin RMS değişim grafiği verilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlardan farklı olarak, dengeli kaynak gerilimi nedeniyle ortak bağlantı noktasına ait faz gerilimlerinin de dengeli olduğu görülmektedir.

Şekil 12'de ortak bağlantı noktasına ait faz akımlarının RMS değişim grafiği verilmiştir. Yük ve STATCOM'un devreye alınması sırasında faz akımları, sırasıyla hattın şönt kapasitansı ve DC bara kondansatörlerinin ani şarjı nedeniyle geçici olarak yükselmiştir. Kompanzasyonun sağlanmasıyla birlikte ortak bağlantı noktasından çekilen faz akımlarının azaldığı görülmektedir.



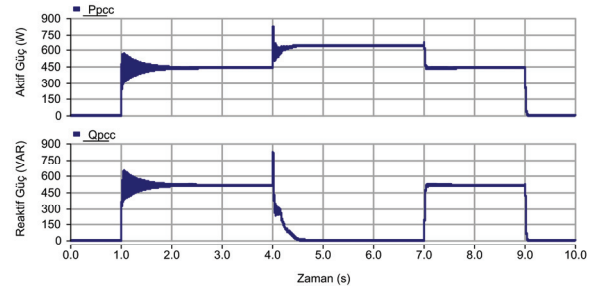
Şekil 12. Ortak bağlantı noktasından çekilen faz akımlarının RMS değişim grafiği (The RMS variation graph of phase currents drawn from the PCC)

Şekil 13'de üç fazlı sonsuz güçlü baradan çekilen, toplam aktif ve reaktif güç değişim grafiği verilmiştir. Hat sonu boşta iken kablo hattı üzerinden kapasitif şarj akımları akmaktadır. Bu akımlar, hattın şönt kapasitansında reaktif güç depolanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kaynak barasında üç faza ait toplam reaktif güç, yaklaşık -90 VAR'dır ve yönü kaynağa doğru olduğundan negatif ekseninde gösterilmiştir. Yükün devreye girmesiyle birlikte hat üzerinden çekilen akımın artması sonucunda, hattın endüktans ve kapasitansı arasında güç dalgalanmaları olmaktadır. STATCOM'un devreye girmesiyle birlikte, hat başından çekilen aktif gücün arttığı ve reaktif gücün, boş çalışmada olduğu gibi -88 VAR'e gerilediği görülmektedir.



Şekil 13. Kaynak uçlarından ölçülen üç faza ait toplam aktif ve reaktif güç değişim grafiği (The variation graph of three-phase active and reactive power measured from the infinity bus)

Şekil 14'de ortak bağlantı noktasından çekilen üç faz toplam aktif ve reaktif güç değişim grafiği verilmiştir. STATCOM'un devreye girmesiyle birlikte, ortak bağlantı noktasından çekilen aktif gücün arttığı görülmektedir. Ortak bağlantı noktasına ait aktif gücün yaklaşık 200 W'ı reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirebilmek için STATCOM cihazı tarafından, yaklaşık 437 W'ı yük tarafından tüketilmektedir. Yük tarafından ihtiyaç duyulan reaktif güç ise STATCOM tarafından karşılanmaktadır.



Şekil 14. Ortak bağlantı noktasından ölçülen üç faza ait toplam aktif ve reaktif güç değişim grafiği (Fig.14:The variation graph of three-phase active and reactive power measured from the PCC)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, toplu parametrelili eşdeğer pi devrelerinin ardışık şekilde bağlanmasıyla elde edilen fiziksel bir yer altı kablo modelinin tasarımı sunulmaktadır. Kablo modeline ait hat parametreleri, hem işletmeci ve üretici firma verilerinden hem de PSCAD/EMTDC kablo sabitleri alt programında hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre fiziksel bir yeraltı kablo modelinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kablo modelinin dezavantajı, 3 fazlı, 10 km'lik bir hat oluşturabilmek için 30 adet hat parçasının kullanılmasıdır. Bu tür bir kablo modeli, hem maliyetli olmakta hem de laboratuar ortamında çok geniş bir alan kaplamaktadır. Ancak kablo modelinin sağlayacağı avantajlar yanında, bu dezavantajlar göz ardı edilebilir.

Kablo modelinin analizi, tek baralı bir güç iletim sistemi üzerinde gerçekleştirilen deney ve simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır. Güç sistemi, kablo hattının sonunda geri güç katsayılı bir yük ve bu yükte paralel şekilde bağlı 12 darbeli bir STATCOM ile oluşturulmuştur. Giriş kısmında belirtildiği gibi anahtarlamalı kondansatör veya reaktör bobinleri ile gerçekleştirilen reaktif güç kontrolünde, bobin veya reaktör gruplarının her adım değişiminde aşırı akım yükselmeleri meydana gelebilmektedir. Bu durum yeraltı kablolarının ısınmasına ve/veya izolasyonun bozulmasına sebep olabilmektedir. STATCOM ile gerçekleştirilen reaktif güç kontrolünde ise aşırı akım yükselmesi, sadece DC bara kondansatörlerinin ilk şarj anında görülmektedir. Bu durum, DC bara kondansatörlerinin şarj sırasında devrede olan direnç değerleri artırılarak yani şarj süresi uzatılarak çözümlenebilir.

Deney ve simülasyon sonuçlarının uyum içerisinde olması, tasarımı gerçekleştirilen fiziksel kablo modelinin güç akış çalışmalarında ve sürekli hal uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca kablo modeli, karma güç iletim sistemlerinin geliştirilmesine ve karma hatlarla ilgili olayların incelenmesine de yardımcı olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 104M235 nolu TÜBİTAK KARIYER projesi çerçevesinde ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. "Background Paper Undergrounding of Electricity Lines in Europe", **Commission of the European Communities**, Brussels, 10 December 2003, ec.europa.eu/energy/gas_electricity/studies/doc/electricity/2003_12_undergrounding.pdf
2. Colla, L., Gatta, F.M., Geri, A., Lauria, S., and Maccioni, M. "Steady-state Operation of Very Long EHV AC Cable Lines", **Power Tech. Conference**, Bucharest, Romania, 1-8, 28 Haziran - 2 Temmuz 2009.
3. Gilany, M., El Din, E.S.T., Abdel Aziz, M.M., Ibrahim, D.K., "An accurate scheme for fault location in combined overhead line with underground power cable", **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, San Francisco, USA, Cilt 3, 2521 - 2527, 16 Haziran 2005.
4. Lauria, S., Gatta, F.M., Colla, L., "Shunt compensation of EHV Cables and Mixed Overhead-Cable Lines", **Power Tech. Conference**, Lausanne, Switzerland, 1344-1349, 1-5 Temmuz 2007.
5. Gatta, F.M., Lauria, S., "Very long EHV cables and mixed overhead-cable lines. Steady-state operation", **Power Tech. Conference**, St. Petersburg, Russia, 1-7, 27-30 Haziran 2005.
6. Colla, L., Gatta, F.M., Iliceto, F., Lauria, S., "Design and operation of EHV transmission lines including long insulated cable and overhead sections", **7. International Power Engineering Conference**, Singapore, 1-10, 29 Kasım-2 Aralık 2005.
7. Dixon, J., Moran, L., Rodriguez, J., Domke, R., "Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review", **Proceeding of the IEEE**, Cilt 93, No 12, 2144-2164, 2005.
8. Çetin, A., Ermiş, M., "VSC-Based D-STATCOM With Selective Harmonic Elimination", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Cilt 3, No 3, 1000-1015, 2009.
9. Qingguang, Y., Pei, L., Wenhua, L., Xiaorong, X., "Overview of STATCOM Technologies", **IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies**, Hong Kong, Cilt 2, 647-652, 5-8 Nisan 2004.
10. Tang, Y., Wang, H., Dai, F., Jiang, S., "Transmission line models used in traveling wave studies", **IEEE Transmission and Distribution Conf.**, New Orleans, USA, Cilt 2, 797-803, 11-16 Nisan 1999.
11. Martinez, J.A., Gustavsen, B., Durbak, D., "Parameter determination for modeling system transients-Part I: Overhead lines", **IEEE Trans. Power Del.**, Cilt 20, Sayı 3, 2038-2044, 2005.
12. Gustavsen, B., "Panel session on data for modeling system transients: Insulated cables", **IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting**, Columbus, USA, cilt2, 718-723, 28 Ocak- 1 Şubat 2001.
13. Gustavsen, B., Martinez, J.A., Durbak, D., "Parameter determination for modeling system transients-Part II: Insulated cables", **IEEE Trans. Power Del.**, Cilt 20, Sayı 3, 2045-2050, 2005.
14. Indulkar, C.S., Ramalingam, K., "Estimation of transmission line parameters from measurements", **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Cilt 30, Sayı 5, 337-342, 2008.
15. Macias, J.A., Exposito, A.G., Soler, A.B., "A Comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines", **IEEE Trans. Power Del.**, Cilt 20, Sayı 2, 894-903, 2005.
16. Smith, J.R., Bell, W.W., "Selection of transmission circuit models for power system transient studies", **Generation, Transmission and Distribution IEE Proc.**, Cilt 3, Sayı 1, 1-4, 1984.

17. Marti, L., "Simulation of electromagnetic transients in underground cables using the EMTP" **IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management**, Hong Kong, Cilt 1, 147-152, 7-10 Aralık 1993.
18. Gelen A., Yalcinoz T., "Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation", **Turk J Elec Eng. & Comp. Sci.**, Cilt 18, No 2, 147-158, 2010.
19. Kalyan K. Sen, "STATCOM-Static synchronous COMPensator: Theory, Modelling, and Applications", **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, USA, Cilt 2, 1177-1183, 31 Ocak- 4 Şubat 1999.
20. EMTDC V4.2 user's guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., Winnipeg, Manitoba, Canada, https://pscad.com/resource/File/PSCADV421Student/PSCAD_Users_Guide_V4.2.pdf, 2005.
21. Xu, Y., Tolbert, L.M., Kueck, J.D., Rizey, D.T., "Voltage and current unbalance compensation using a static var compensator", **IET Power Electron.**, Cilt 3, Sayı 6, 977-988, 2010.

EK (Appendix)

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan güç sistem mühendisliği laboratuvarı parametreleri (Power System Engineering Laboratory Parameters used in Experiment)

Ayarlı, üç fazlı, AC güç kaynağı	380 V (RMS), 10 A
Üç fazlı koruma Röleleri	400 V, 3 A
Her biri yedi adımlı, üç anahtarla kontrol edilen endüktif yük	900 VAR, 380/220 V, Y/Δ
Her biri yedi adımlı, üç anahtarla kontrol edilen omik yük	1200 W, 380/220 V, Y/Δ

Tablo 2: Prototip STATCOM'un parametreleri (Parameters of Prototype STATCOM)

Yarı İletken Elemanlar (IGBT)	IXDH30N120D1, $V_{CES}=1200$ V, $I_c=60$ A
DC Gerilim Seviyesi	$V_{DC(high)}=500$ V, $V_{DC(low)}=200$ V
DC Kondansatör Kapasitansı	$C=(330 \mu F / 4) 83 \mu F/400$ V
Transformatör (T1)	600 VA, 110 V /110 V, Y/Y
Transformatör (T2)	600 VA, 110 V /190 V, Y/Δ

Tablo 3. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm cihazları (Measurement equipments used in experimental study)

Ölçüm Cihazı	Yazılım Programı
Fluke 43B Power Quality Analyzer ¹	Fluke View Power Quality Analyzer Software v.3.10.1
HT SKYLAB 9032 Power Quality Analyzer ²	Toplink Software v.2.09

¹http://www.pqmeterstore.com/crm_uploads/fluke_43b_power_quality_analyzer_datasheet.pdf

²<http://www.infotestcihazlari.com/dosyalar/pdf/gucanalizoru/HT-9032.pdf> (29.11.2011)

