Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(5), 786-799, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Türkiye elektrik iletim sistemindeki bir hattın iki kutuplu YGDA sistemine dönüştürülerek modellenmesi ve arıza analizinin yapılması

Modeling a power transmission line located in the Türkiye's electric transmission system by converting to bipolar HVDC system and fault analysis

Ekrem Şahin[1*], *Hasbi İsmailoglu*[2]

[1]Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
esahin017@gmail.com

[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, Türkiye.
hasbi.ismailoglu@yalova.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 12.05.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 28.12.2024 doi: 10.5505/pajes.2025.68188
Kabul Tarihi/Accepted: 27.01.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Enerji kaynaklarının önemi arttıkça kullanılan ekipmanlar için verimlilik konusu önem arz etmektedir. Özellikle karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmaların yoğunlaştığı bu günlerde daha verimli ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Elektrik iletiminde ise uzun mesafelerde iletim olanağı sağlayan YGDA sistemleri düşük hat kayıpları ile daha verimli çalışmaktadır. Türkiye elektrik iletim sisteminde doğru akım ile iletim henüz yapılmamaktadır. Bu çalışmada AA ve DA ile iletim seçeneklerinin karşılaştırılması amacıyla mevcut iletim sisteminde bulunan AA hattın DA hatta dönüştürüldüğü varsayılarak bir YGDA sistem modellenmiştir. Yaklaşık 600 km uzunluğunda olan iki hat birleştirilerek DA hatta dönüştürülmüş olup aynı özelliklerde elektrik iletimi yapan AA hatlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemin koruması ve ekipman seçimi için gerekli olan arıza analiz çalışması da yapılmıştır. YGDA sisteminde arıza analizi çalışması için PSCAD simülasyon programı ile bir devresi oluşturulmuştur. DA hattı için Kutup-kutup, kutup-toprak arızaları ve AA üç faz kısa devre arızaları simüle edilmiştir. Bu arıza simülasyonlarında doğrultucu tarafı hat akım grafikleri elde edilerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte arıza direnci ve akım sınırlama reaktörü büyüklüklerinin arıza akımına olan etkisi de incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek gerilim doğru akım (YGDA), PSCAD, Enerji iletimi, Arıza analizi.

Abstract

As the importance of energy resources increases, the issue of efficiency in the equipment becomes important. Especially in these days when efforts to reduce carbon emissions It is inevitable to use more efficient equipment are intensified. HVDC systems, in electricity transmission which provide transmission over long distances, are included in this scope with their low line losses. With direct current transmission is not yet carried out in the Turkish electricity transmission system. In this study, in order to compare AC and DC transmission options, an HVDC system was modeled by converting the existing AC lines in the into DC lines. 600 km long who lines, were combined and converted into a DC line and compared with AC lines transmitting at the same distance and features. In addition, a detailed fault analysis study was carried out, which should be carried out in detail for the protection of the system and equipment selection. A fault simulation circuit was created with the PSCAD program for fault analysis in the HVDC transmission system. For DC line Pole-to-pole, pole-to-ground faults and AC three-phase short circuit fault situations are simulated. The effects of fault resistance and limiting reactor values on the fault current were also examined.

Keywords: High Voltage Direct Current (HVDC), PSCAD, Power transmission, Fault analysis.

1 Giriş

Günümüzde, farklı üretim kaynaklarının ortaya çıkması nedeniyle güç sistemleri daha karmaşık hale gelmektedir. Artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için daha fazla üretim yapılması gerekmektedir. Üretim istasyonlarının yerleri, mevcut kaynaklara, çevre sorunlarına ve mevcut enerjinin maliyetine göre seçilmektedir. Bu sebeplerden dolayı enerji üretim ve tüketim merkezleri coğrafi olarak birbirine uzak olabilmektedir. Böyle durumlarda uzak mesafelere iletimi sağlamak için ekstra yüksek gerilim alternatif akım (HVAC) hatlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, yeni iletim hatlarının inşası oldukça maliyetli, zaman alıcı ve ciddi çevresel düzenlemelere bağlı olmaktadır. Bu nedenle enerji iletiminde farklı yöntemlere başvurulmasına ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Yüksek gerilim doğru akım (YGDA) iletim sistemlerinin, büyük ölçekli güçlerin uzun mesafelere iletiminde önemli avantajlar sağladığı bilinmektedir. Alternatif akım (AA) iletim sistemleriyle karşılaştırıldığında, uzun mesafelerde güç kayıplarının daha düşük ve kurulum maliyetlerinin de daha düşük olduğu görülmektedir [2]. YGDA sistemi, asenkron bağlantı kurulması, dinamik tepki ve aktif-reaktif gücün bağımsız kontrolü gibi konularda da üstünlüklere sahiptir [3]. Deniz altı geçişlerindeki avantajlarından dolayı da adalarda bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının anakara bağlantılarını sağlayan çok sayıda YGDA sistemi de bulunmaktadır [4].

YGDA hattının kat ettiği uzun mesafe, elverişsiz coğrafi konumlar ve sert iklim koşulları nedeniyle hattın arızalanma olasılığı yüksektir. İstatistiklere göre DA iletim sistemindeki arızaların yaklaşık yarısını hatlarda ortaya çıkan arızalar oluşturmaktadır [5]. Güç sisteminin güvenli çalışmasını sağlamak için, şebekede bir arıza meydana geldiğinde, öncelikle arızalı hattın hızlı ve doğru bir şekilde sistemden ayrılması sonrasında ise arıza bilgilerinin derinlemesine

*Yazışılan yazar/Corresponding author

analiz edilmesi ve sistemin, tekrar kararlı durum çalışmasına hızlı bir şekilde getirilmesi önem arz etmektedir [6].

YGAA ve YGDA sistemleri ekonomik olarak karşılaştırılmasında terminal maliyeti, hat maliyeti ve kayıp maliyeti şeklinde üç maliyet bileşeniyle ilgilenilmektedir. Toplam maliyet, altyapıyı kurma maliyeti ve sistem işlevsel hale geldiğinde çalıştırma maliyeti olarak ikiye ayrılmaktadır. Yatırım maliyetinin hesaplanmasında, direkler, iletkenler ve yalıtım sistemi, dönüştürücü istasyonlar ve geçiş hakkı kullanım giderleri göz önüne alınmaktadır. İşletme maliyetlerinin belirlenmesinde ise kayıplar belirleyici olmaktadır.

Doğru akımda iletken direncinin, alternatif akımdakinden farklı olduğu bilinmektedir. Alternatif akım koşullarında, iletkende deri etkisi ortaya çıkmaktadır. Doğru akımda belirli kesitteki bir iletken, alternatif akıma göre %30 kadar daha fazla yüklenebilmektedir. Buna göre, doğru akımla enerji iletiminin daha ekonomik olduğu görülmektedir. Enerji iletiminde toplam maliyet göz önüne alındığında; mesafenin, hava hatlarında 500-800 km, denizaltı kablolarında ise 50 km üzerinde olması durumunda, doğru akım sistemi daha ekonomik olmaktadır. AA ve DA maliyet karşılaştırmalarında, hatlar için eşik mesafesinin 500-800 km olduğu ve denizaltı kabloları için 50 km daha az olduğu bilinmektedir. AA, eşik noktasının altındaki kısa mesafelerde karlı iken DA eşik noktasının üstündeki uzun mesafelerde karlı hale gelir.

AA hatta güç taşıma kapasitesi, hattın uzunluğuna bağlı olarak ters orantılı olarak değişmektedir. DA hatları, hattın uzunluğundan bağımsız olarak güç taşıyabilmektedir. AA hattında gerilim kontrolü DA hatlarına göre daha zor olmaktadır. Bunun nedeni, hattın başında ve sonunda sabit gerilim sağlamak için hattaki yük arttıkça reaktif güce ihtiyaç duyulmasıdır. Oysa DA hatlarının kendilerinin doğrudan reaktif güç kontrolüne ihtiyacı bulunmamaktadır.

Yüksek gerilimli AA kablolar, km başına havai iletim hatlarından çok daha fazla şönt kapasitansına sahiptir. Uzun mesafelerde kapasitans artmakta ve kabloyu şarj etmek için gereken reaktif akım nominal akıma yaklaşmaktadır. DA kablolar ise reaktif güç üretip tüketmez ve aktif güç kapasiteleri mesafeye neredeyse hiç zarar vermez. Ayrıca AA kablolar DA kabloların aksine yalıtkan kayıpları ve deri etkisine sahiptir. Ekonomik olarak DA kablolar aynı gerilim ve güç derecesine sahip AA kablolardan daha az maliyetlidir [7].

Dönüştürücü transformatörlerin yardımıyla YGDA sistemleri, geleneksel AA sistemlerine kıyasla daha az iletim kaybı sağlamaktadır. Bu, gücün uzun mesafelerde verimli bir şekilde iletilmesini sağlayarak enerji israfını azaltarak ve genel sistem performansını arttırmaktadır. Dönüştürücü trafolar, YGDA sistemlerinin uzun mesafelerde büyük miktarda güç iletmesini sağlayarak AA sistemlerine kıyasla güç iletim verimliliğini arttırmaktadır. Bu durum özellikle bölge içi ve sınır ötesi güç iletim projeleri için faydalı olmaktadır [8].

Bir YGDA iletim sisteminin arıza davranışları, bir AA sisteminin davranışlarına göre farklılıklar gösterir. Kısa devre akımının maksimum genliği, güç sistemi tasarımının, koruma çalışmalarının, kısa devre akım sınırlamasının ve ekipman seçiminin temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, bir YGDA sistemin arıza analizinde kullanılacak yöntemin belirlenmesi de önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır [9]. AA güç sisteminde akım, sinüzoidal dalga yapısına bağlı olarak doğal sıfır geçişine sahiptir [10]. DA sisteminde ise arıza akımı hızla yükselmekte ve sıfır geçişi bulunmamaktadır. Bu nedenle devre kesici açıldığında oluşan arkın kesilmesi önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Öncelikle DA sisteminin hasar görmesini önlemek için güvenilir bir devre kesici sistemleri üzerinde çalışmalar yapılması gerekmektedir [11]. YGDA şebekelerinin kısa devre arızalarına karşı korunması, önemli bir sorun olarak varlığını sürdürmektedir. DA sisteminde yer alan kapasitif yapıların hızlı bir şekilde deşarj olmaları, arıza akımlarının kısa sürede yüksek seviyelere yükselmelerine yol açabilmekte; bu ani yükselmeler de dönüştürücüler ve diğer ekipmanlara zarar verebilmektedir [12],[13].

YGDA iletim sistemi arızaları DA ve AA arızaları olarak sınıflandırılabilir. DA arızaları, dönüştürücü ve hat arızalarını içermektedir [14]. Bir YGDA sistemindeki farklı arıza türlerini tanımlamak için DA hattındaki gerilim ve akım değişimlerini kapsamlı bir şekilde incelemek gerekmektedir. Genel olarak YGDA arıza akımı, kutuptan toprağa arıza akımı ve kutuptan kutba arıza akımı olmak üzere iki farklı şekilde oluşabilmektedir [15]. Diğer DA arıza türleriyle karşılaştırıldığında, en şiddetli arızaların kutuplar arasındaki arızalar olduğu görülmektedir [16].

Karmaşık AA-DA sistemlerinin tasarımı, analizi ve işletimi, doğru ve güvenilir kapsamlı simülasyon çalışmalarının yapılmasını gerektirmektedir. Bu tür sistemleri incelemek için uzun süredir kullanılan analog simülatörler, modern sistemlerin artan karmaşıklığı nedeniyle fiziksel sınırlarına ulaşmış durumdadır. Günümüzde, AA-DA güç sistemlerini modellemek için endüstriyel dijital zaman domeninde işleyen simülasyon programları bulunmaktadır. Bu simülasyon programları, güç elektroniği ve kontrol ekipmanları bakımından daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. PSCAD/EMTDC ve DigSilent, hem endüstriyel hem de akademik çalışmalarda yaygın şeklide kullanılan simülasyon programlarıdır. Bu programlarda kullanıcının, elektrik şebekelerinin şematik diyagramını oluşturmasına, simülasyonu çalıştırmasına ve sonuçları grafik ortamında elde etmesine olanak tanınmaktadır [17].

Literatürde, PSCAD kullanılarak yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Wang ve diğ. [18], Xiu ve dig. [19] çalışmalarında CIGRE YGDA modelini kullanarak komütatör arızaları ve kutup toprak arızalarında DA akım, gerilim ve AA gerilim tepkilerini incelemiştir. Zheng ve diğ. [20], Çin'de bulunan Yunnan-Guangdong hattını LCC (hat komütasyonu dönüştürücü) YGDA olarak modelleyerek arıza kaynaklı ani akımları incelemiştir. Zhu ve diğ. [21] çalışmalarında önerdikleri arıza akımı ifadelerinin doğruluğunu ve akım sınırlama stratejisinin etkinliğini doğrulamak için LCC/MMC hibrit YGDA sistemi modellemişlerdir. Yang ve diğ. [22] çalışmalarında dört terminalli bir VSC (gerilim kaynaklı dönüştürücü) YGDA şebekesinde farklı direnç ve endüktanslara sahip akım sınırlayıcılarının performanslarını karşılaştırmışlardır. Song ve diğ. [23] çalışmalarında MMC (modüler çok seviyeli dönüştürücü) YGDA sistemi modelleyerek kutup toprak ve kutup kutup arızaları oluşturmuş ve uyguladıkları ortalama değer modelinin verimliliğini test etmişlerdir. Imdadullah ve diğ. [24], CIGRE LCC YGDA modeli ve esnek asenkron AA şebeke (FASAL) modelini kullanarak arıza akımlarının her iki sistem üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Nadeem ve diğ. [25] çalışmasında çok terminalli YGDA sistemi modelleyerek kutup toprak arızasında arıza bileşenlerini incelemişlerdir. Xiang ve diğ. [26] yüksek sıcaklık süper iletkene sahip deniz aşırı rüzgâr santrali fizibilite çalışmasında hızlı DA arıza geçişlerini

incelemişlerdir. Xue ve diğ. [27], Zhang ve diğ. [28] MMC YGDA sisteminde AA 3 faz toprak arızalarının etkilerini incelemişlerdir.

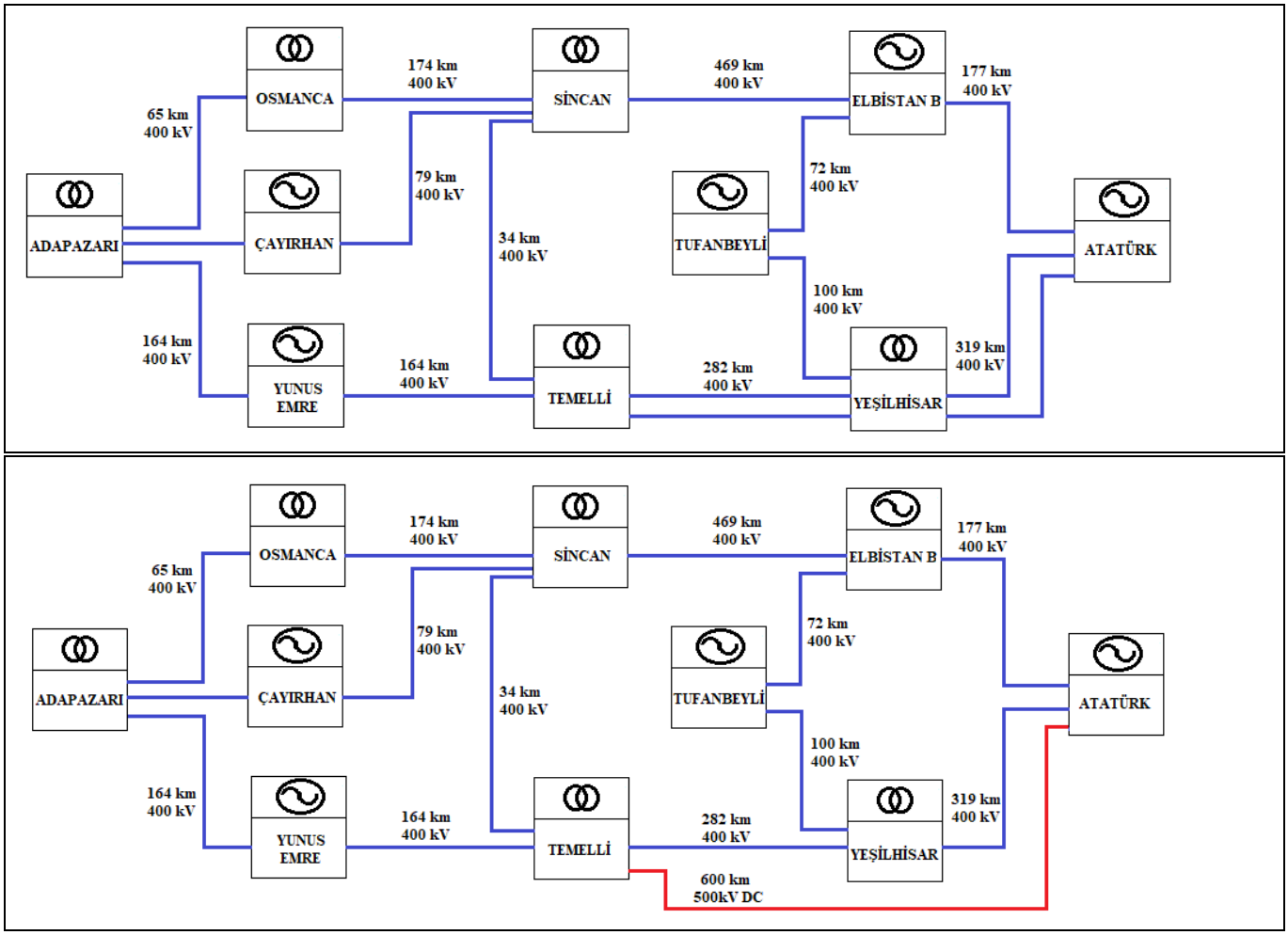
Bu çalışmada, Türkiye elektrik iletim sisteminde bulunan 600 km'lik paralel AA hatlarından bir tanesinin YGDA sistemine dönüştürüldüğü varsayılarak modellenmiştir. Birbirine paralele iki hattın güç kaybı açısından karşılaştırılma amacıyla öncelikle sistemde bulunan 10 adet transformatör merkezi ve bu merkezleri birbirine bağlayan 15 adet 400 kV Enerji nakil hatları mevcut özellikleriyle DigSilent simülasyon yazılımı ile yük akış analizi oluşturulmuştur. YGDA hat olarak belirlenen Atatürk TM ile Temelli TM arasındaki hat aynı özelliklerle PSCAD programında oluşturulmuş ve arıza analizi uygulaması yapılmıştır. Oluşturulan sistemde hatta meydana gelebilecek kutup kutup, kutup toprak ve AA tarafında arızaları için analiz çalışması yapılmıştır. Ayrıca, arıza direncinin ve sınırlama reaktörünün, arıza akımına olan etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak arıza türlerinin sisteme olan etkileri karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışma; Türkiye Elektrik İletim Sisteminde yer alan mevcut bir yüksek gerilim hattının YGDA hattına dönüştürüldüğü varsayılması ve aynı özelliklerdeki mevcut iletim hattıyla karşılaştırma yapabilme olanağı ile bu alanda yapılan diğer çalışmalara katkı sağlamaktadır. Ayrıca mevcut sistem parametreleri ve işleteme değerleri ile yapılan arıza analizi çalışması ile bu tür hatların arıza karakteristiği de belirlenmektedir.

YGDA sistemleri LCC (Line Commutated Convertor) ve VSC (Voltage Source Converter) olarak iki ana türden oluşmaktadır. Türkiye iletim sisteminde bulunan Artvin-Gürcistan ve Van-İran sırt sırta YGDA (back to back HVDC) sistemlerinde LCC türü kullanılmıştır. Bu sebeple çalışmada dönüştürüldüğü varsayılan hat için de LCC uygulaması tercih edilmiştir.

2 YGDA sistemin modellenmesi

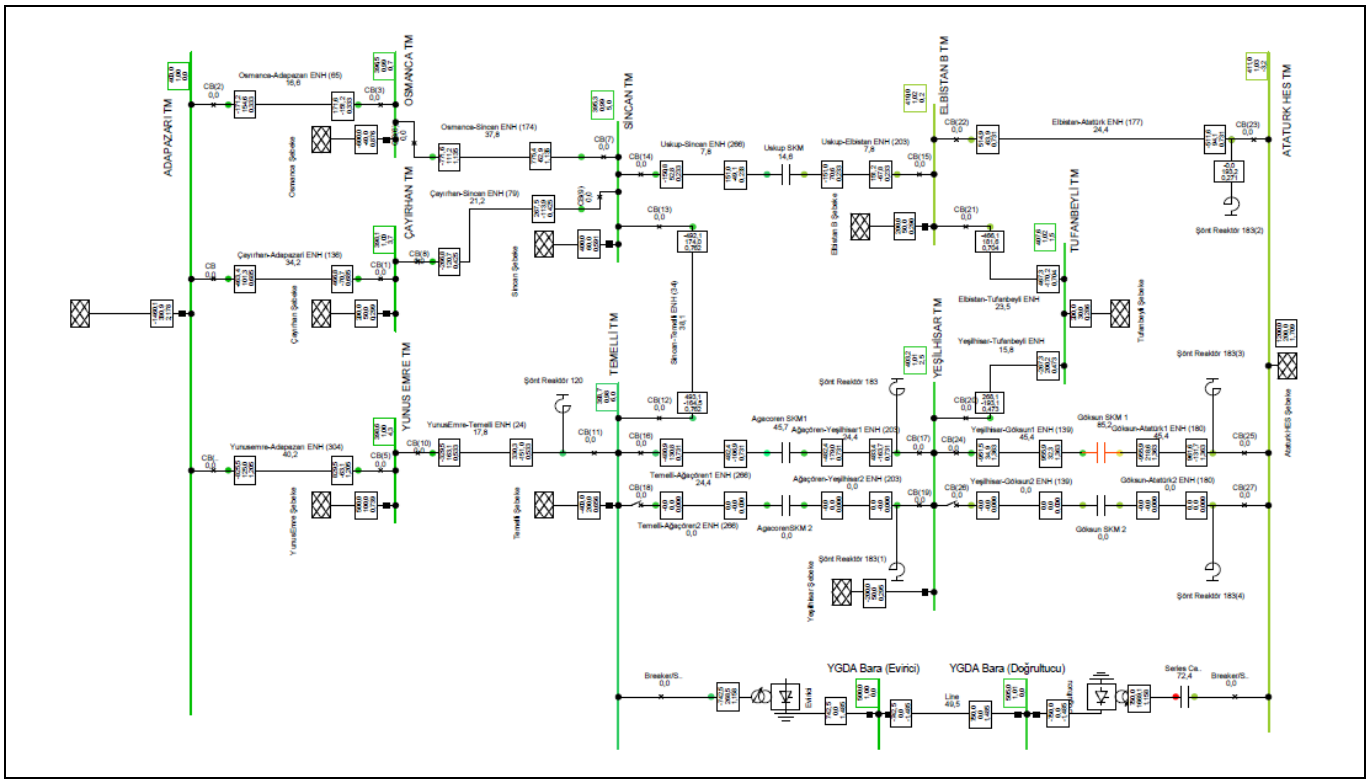
Türkiye elektrik iletim sisteminde üretim merkezlerinden tüketim bölgelerine alternatif akımla doğrudan iletim yapılmaktadır. AA sisteminin karakteristiği gereği; hatlar belirli mesafelerde transformatör merkezlerine (TM) bağlanmakta ve parçalı bir yapı oluşturmaktadır. Örneğin Atatürk HES TM, Yeşilhisar TM, Temelli TM ve Adapazarı TM arasındaki hatlar da böyle bir yapıya sahiptir. Bunlardan Atatürk HES TM'den Temelli HES TM 'ye kadar olan hatlar aynı güzergahta ayrı direkler üzerinde, paralel olarak tesis edilmiştir (Şekil 1). Çalışmada bu paralel hatlardan bir tanesinin mevcut direk ve iletken yapılarıyla 600 km tek parça, YGDA bipolar sisteme dönüştürüldüğü varsayılmıştır.



Şekil 1. Mevcut AA ve YGDA hat sonrası tek hat şeması.

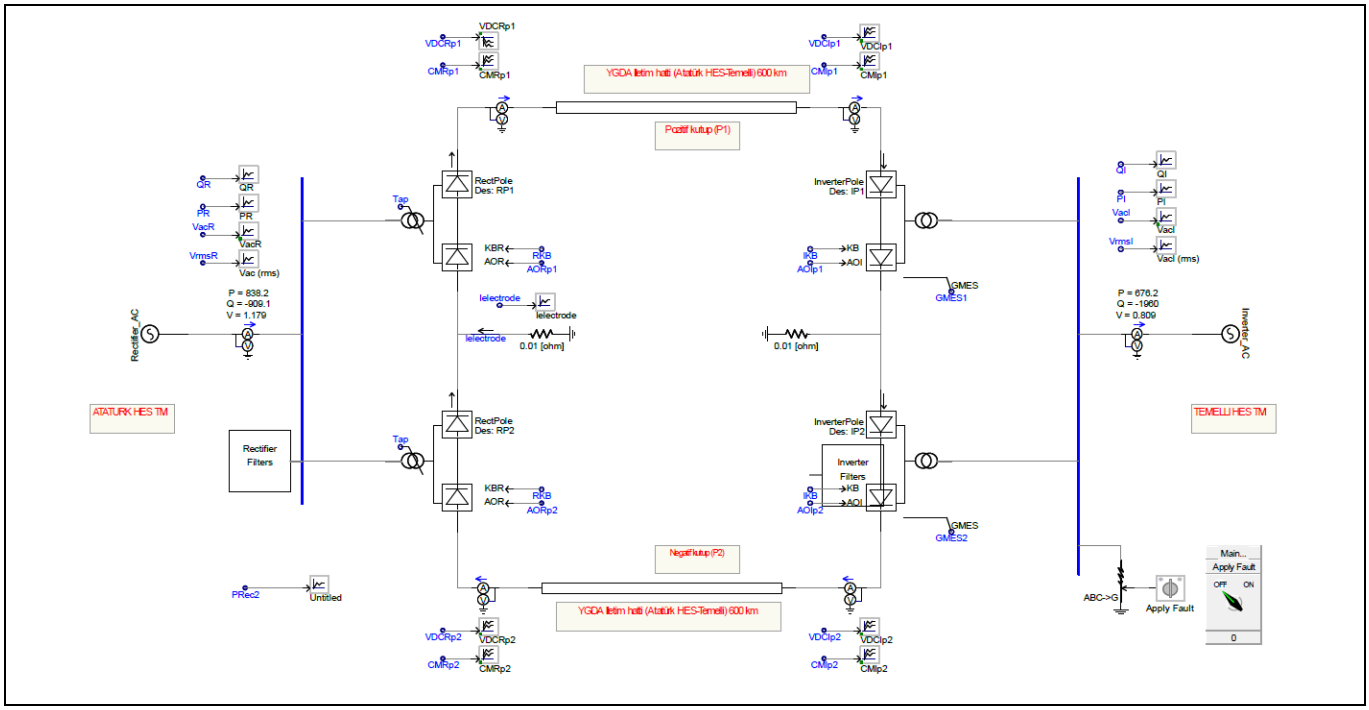
Figure 1. Simple line diagram of existing AC and after HVDC line.

Çalışma kapsamında, hat kayıpları açısından karşılaştırma yapabilmek için, aynı karakteristiklere sahip AA ve DA hatlarda yük akış analizleri yapılmıştır. Bunun için, öncelikle Atatürk HES TM ve Adapazarı TM arasında Şekil 1'de gösterildiği gibi, paralel enerji iletim hatlarından ve transformatör merkezlerinden oluşan bir bölüm seçilmiştir. Bu sistem bölümü Digsilent simülasyon programı ile Şekil 2'deki gibi modellenmiştir.



Şekil 2. Digsilent yük akış analizi ekran görüntüsü.

Figure 2. Digsilent load flow analysis screenshot.



Şekil 3. Bipolar YGDA modeli PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 3. Bipolar HVDC model PSCAD screenshot.

Model Digsilent programının busbar, external grid, circuit-breaker, line, shunt filter, series capasitor, rectifer ve inverter fonksiyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar kullanılarak mevcut sistemin yük akış analizi için simülasyonu oluşturulmuştur. Yük akış hesaplamalarında Newton-Raphson (Power Equations, classical) yöntemi kullanılmıştır. Şekil 1'den farklı olarak detaylı incelenecek hatlara paralel olarak YGDA hat eklenmiştir. Hat başı ve hat sonuna konulan kesici konumları yardımıyla revizyon öncesi ve sonrası olacak şekilde analiz yapılabilmektedir. Analiz esnasında transformatör merkezleri baralarının per unit ve kV cinsinden gerilim değerleri ve faz açısı ekranda gösterilmektedir. Hatlarda ise hat başı ve hat sonu olmak üzere akım, aktif ve reaktif güç gösterilmektedir.

Daha sonra, DA akım sistemine dönüştürüldüğü varsayılan hattın, PSCAD simülasyon programında detaylı modeli oluşturulmuştur. YGDA sisteminin, Şekil 3'te tek hat şeması verilen modelinin oluşturulmasında PSCAD kütüphanesinde bulunan "Bipolar HVDC Transmission System" örnek modeli kullanılmıştır. Bu model monopole Cigre Benchmark örneğinden oluşturulmuştur. Sistem gerilimi pozitif kutupta + 500 kV DA, negatif kutupta -500 kV DA 'tur. Analiz yapılan işletme koşullarında her bir kutupta yaklaşık 800 A akım akmaktadır. Böylece hattan 800 MW aktif güç akışı sağlanmaktadır. Pozitif ve negatif kutuplarının doğrultucu ve evirici kısmında 6 köprülü tristör gurubu kullanılmaktadır. Her bir dönüştürücü grubunun öncesinde 400/160 kV dönüştürme oranında transformatör bulunmaktadır. Evirici ve doğrultucu sonrası AA şebekesi 400kV gerilim ve 50 Hz frekansında oluşturulmuştur. Ayrıca, AA tarafında AA filtre DA tarafında 600 km iletim hatları ve sınırlama reaktör endüktansları bulunmaktadır. DA Sınırlama reaktörleri 8 mH olarak seçilmiş, bunun dışında bir değişiklik yapılmaksızın, var olan üç fazlı üçlü demet iletken sisteminin kullanıldığı varsayılmıştır. Mevcut iletim sistemindeki orta iletkenin, topraklanmış olarak boşta bırakılması; sağ ve sol iletkenlerden biri pozitif diğeri negatif olacak şekilde iki kutuplu olarak kullanılması öngörülmüştür. Bu verilere göre, simülasyon programında T eşdeğer modeli dikkate alınarak Pheasant (1272 MCM) tip iletkenlere ait parametreler kullanılmıştır.

PSCAD yazılımında hattın verileri bu iletken tipi değerlerine göre 600 km olduğu varsayılarak girilmiştir. YGDA sisteminin yeni modelleneceği varsayılarak kütüphane modelinin parametreleri sabit kalmıştır. Yaklaşık 800 MW yük akışı tasarlandığı için her bir kutup için gücü transformatör 500 MVA değeri girilmiştir. Ayrıca örnek modele hat üzerinde arıza akımı ve gerilimi değerlerinin izlenebilmesi için ekstra ölçüm noktaları eklenmiştir. Bipolar YGDA sistemi modelinde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

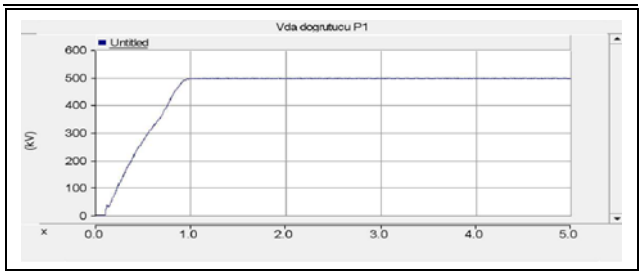
Öncelikle sistemin normal koşullardaki işleyişini görmek için kararlı durumda simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu aşamada, arıza fonksiyonları aktif edilmemiştir. Sistemdeki 800 MW'lık güç, P1 ve P2 kutuplarından 800 A akımla kutup başına 400 MW olarak iletilmektedir. Kararlı durum simülasyon çalışmalarında, her iki kutbun doğrultucu ve evirici bloklarında akım ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Doğrultucu pozitif kutbu için, 5 sn.'lik zaman aralığında elde edilen akım ve gerilim değişimleri Şekil 4'te verilmiştir.

Görüldüğü gibi, söz konusu akım ve gerilim 1. sn. sonunda kararlı değerlerine ulaşmaktadır. Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde sistem başlangıç akımı (inrush) pik yaptığı görülmektedir.

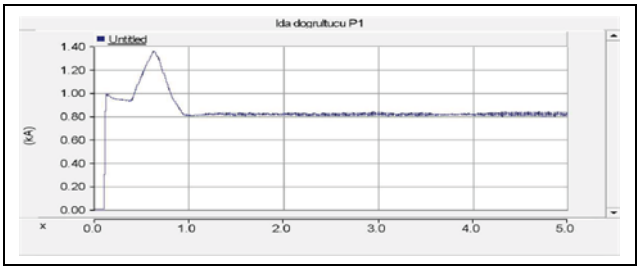
Tablo 1. YGDA sistem parametreleri.

Table 1. HVDC system parameters.

PARAMETRELER	DEĞER
YGDA Tipi	LCC
Anma Gücü	1000 MVA
YGDA Gerilimi	500 kV
Dönüş. Transformatör Oranı	400/160 kV
Dönüş. Transformatör Tipi	Y / D
Hat Uzunluğu	600 km
İletken Tipi	Pheasant (1272 MCM)
İletken Adedi	3
Hat Direnç Değeri	13.5 mΩ/km
Hat Endüktans Değeri	0.248 mH/km
Hat Kapasite Değeri	0.021 µF/km
Hat Modeli	T modeli
DA Sınırlayıcı Reaktör	8 mH
Dönüştürücü Tipi	Bipolar 6 köprülü tristör



(a)



(b)

Şekil 4. Doğrultucu tarafı. (a): Gerilim grafiği. (b): Akım grafiği.

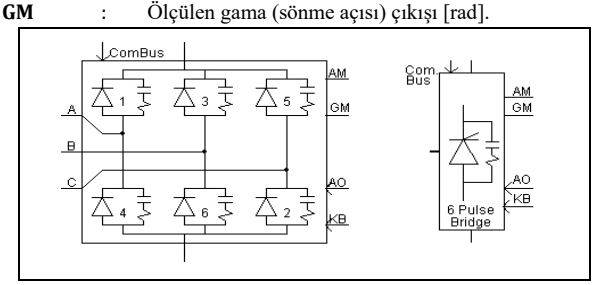
Figure 4. Rectifier side. (a): Voltage graphic. (b): Current graphic.

Bu ani akımla ilgili Guo ve diğ. [29], dönüştürücü trafonun boşta açılmasıyla oluşan enerjilendirme ani akımın sınırlamak için dirençli tip süperiletken arıza akımı sınırlayıcı (R-SFCL) kullanan bir yöntem incelenmiştir. Kurokawa ve diğ. [30], ani akımları önlemek için yumuşak başlatma (soft start) işlemi gerçekleştirmiştir. Geleneksel yumuşak başlatma işlemine alternatif olarak önerilen yöntemde, yumuşak başlatmanın en hızlı koşulu elde edilmiştir. Önerilen bu yöntemde iki tip yumuşak başlatma uygulanmıştır. Yumuşak başlatma işlemi için iki farklı fonksiyon tipi uyarlanmış ve karşılaştırılmıştır.

YGDA sisteminde dönüştürücü tipi olarak Şekil 5'te 6 darbeli köprü dönüştürücü bileşeni kullanılmaktadır. Bu bileşen, dahili altı darbeli Graetz dönüştürücü köprüsü (evirici veya doğrultucu olabilir), dahili faz kilitli osilatör (PLO), ateşleme ve valf blokaj kontrolleri ve ateşleme açısı/sönme açısı ölçümlerini içeren bir DA kompakt dönüştürücüyü temsil etmektedir. Ayrıca, her tristör için dahili RC sönümleme devreleri içermektedir. Bu bileşenin genel prensibi, bir tristör

köprüsü oluşturma, kontrolleri bir araya getirme ve bir HVDC dönüştürücüsünü modellemede yer alan valf ateşleme darbelerini koordine etme gibi karmaşık süreci ortadan kaldırmaktır. 6 Darbeli Köprü Dönüştürücü aşağıdaki harici giriş ve çıkışlara sahiptir:

ComBus	:	Dahili Faz Kilitli Osilatöre giriş sinyali,
AO	:	Dönüştürücü için giriş alfa sırası (ateşleme açısı),
KB	:	Giriş blok/blok çözme kontrol sinyali,
AM	:	Ölçülen alfa (ateşleme açısı) çıkışı [rad],
GM	:	Ölçülen gama (sönme açısı) çıkışı [rad].



Şekil 5. Altı darbeli köprü dönüştürücü bileşeni.

Figure 5. Six-pulse bridge converter component.

Dönüştürücü bloğunun giriş parametreleri:

Tristör Yönü: "Yukarı" veya "Aşağı" seçilmektedir. Yukarı, doğrultucu çalışmasını belirtirken; Aşağı, evirici çalışmasını belirtmektedir.

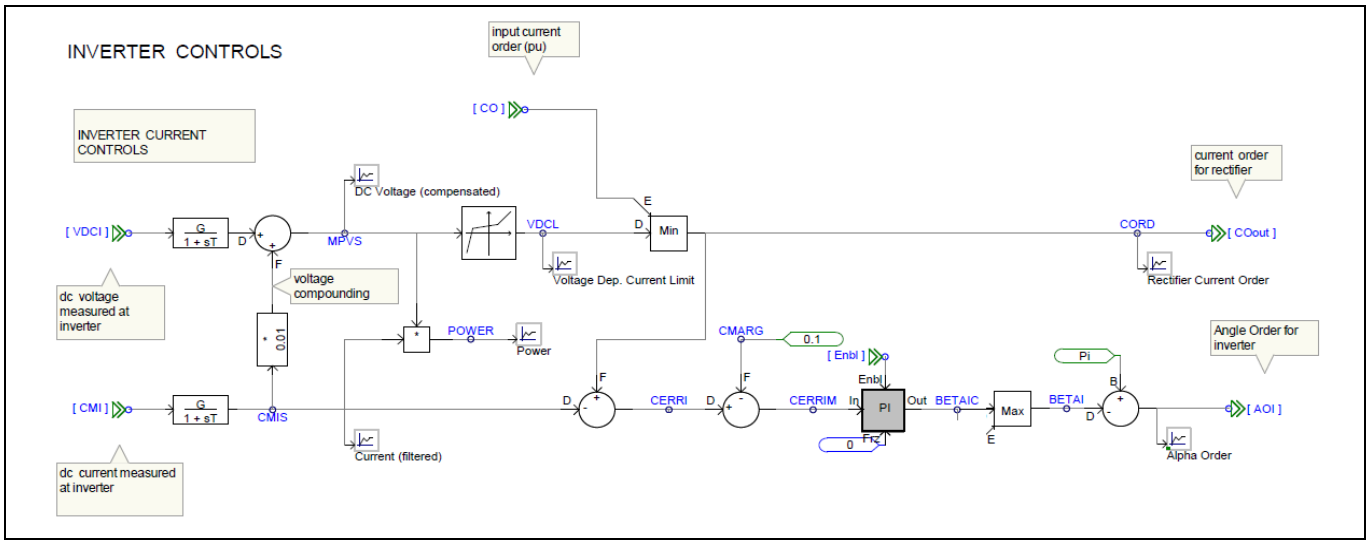
Ateşleme Sırası Girişi: Radyan Cinsinden Açı seçilmiştir. Bu giriş, köprünün nasıl kontrol edileceğine bağlı olarak harici alfa sırası girişini (AO) yapılandırmaktadır.

Sönümleyici Devre Kullanımı: Bütün bloklarda kullanılmıştır.

Transformatör Faz Yapılandırması: Pozitif kutup için -60 negatif kutup için -30 seçilmiştir. Bu giriş, dönüştürücü transformatörü ile değişmektedir.

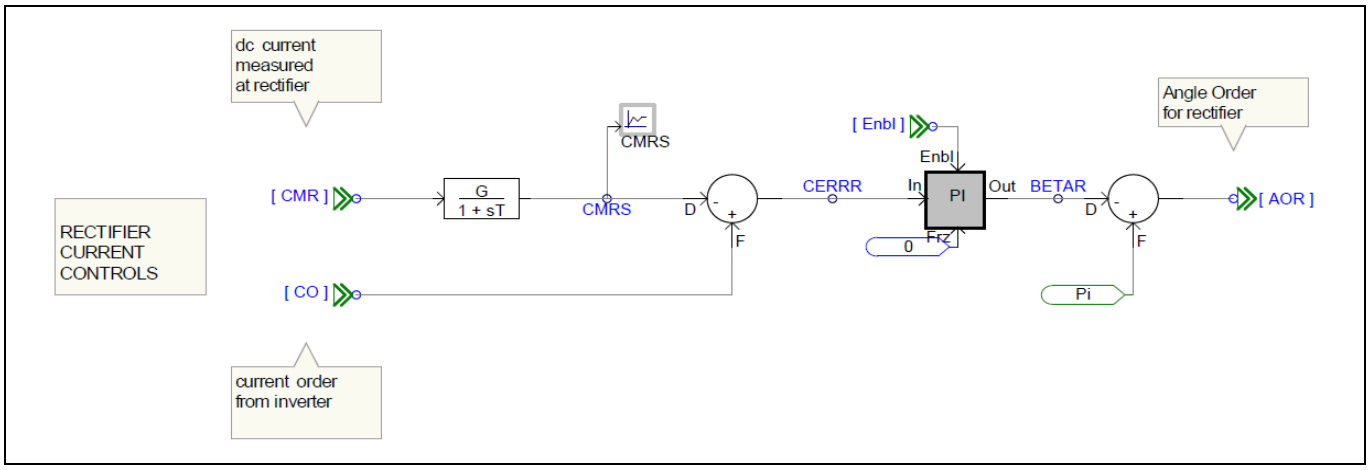
Engellemeyi Kaldırma Süresi: Vana grubu bu süre geçene kadar kilitli kalmaktadır. Her bir blok için 0.04 sn. seçilmiştir.

Şekil 6 ve Şekil 7 de sırasıyla evirici ve doğrultucu tarafındaki dönüştürücülerin kontrol döngüleri verilmiştir.



Şekil 6. Evirici kontrol döngüsü.

Figure 6. Inverter control loop.



Şekil 7. Doğrultucu kontrol döngüsü.

Figure 7. Rectifier control loop.

3 AA ve DA hatların karşılaştırılması

Hat kayıplarını karşılaştırmak üzere, Digsilent modeli oluşturulmuş ve yük akış analizi yapılmıştır. AA yük analizinin başlangıç koşularını belirlemek için Digsilent yazılımının "External Grid" fonksiyonu kullanılmıştır. Burada yük akışı olarak PQ modu seçilmiştir. Transformatör merkezine bağlı fiderlerin simülasyonda kullanılan iletim hatları dışındaki fiderlerin aktif ve reaktif güçlerinin toplamlarının yazılması ile yük akış fonksiyonu ayarlanmıştır. Her bir transformatör merkezi için aktif ve reaktif güçler Tablo 2'de verilmektedir.

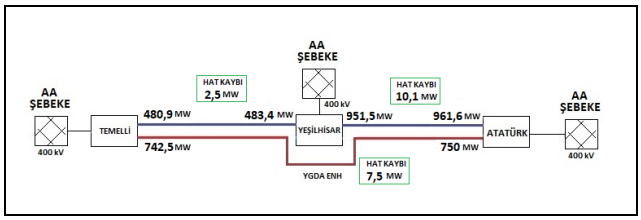
Tablo 2. AA yük analizi başlangıç koşulları.

Table 2. AC load analysis startup conditions.

NO	TM ADI	P (MW)	Q (MVAr)
1	Atatürk HES TM	1200	200
2	Yeşilhisar TM	-200	50
3	Sincan TM	400	60
4	Elbistan B TM	200	50
5	Temelli TM	-400	200
6	Tufanbeyli TM	200	30
7	Osmanca TM	-600	-40
8	Çayırhan TM	200	50
9	Adapazarı TM	-1100	50
10	Y. Emre TES TM	500	100

Sistem, önce mevcut haliyle çalıştırılmış; sonrasında ise Atatürk HES TM-Temelli TM arasında bulunan hatlardan birisinin, YGDA iletim hattı olduğu varsayılarak, tekrar çalıştırılmıştır. Her iki durumda hat başı ve hat sonu aktif güçleri belirlenmiş ve AA-DA hat kayıpları karşılaştırılmıştır.

Yük analizi sonucunda AA ve DA hatları için elde edilen kayıplar Şekil 8'de verilmiştir. Yeşilhisar-Temelli hattı 282 km uzunluğunda olup, ilettiği yük 483 MW, Atatürk TM-Yeşilhisar TM hattı ise 319 km uzunluğunda olup yük 961 MW yük iletilmektedir.



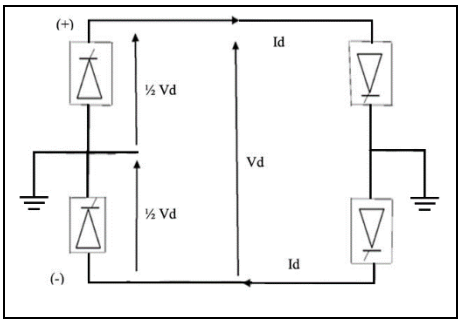
Şekil 8. AA ve DA hat kayıplarının detaylı gösterimi.

Figure 8. Detailed display of AC and DC line losses.

Mesafe oranlarına göre hesap yapıldığında iki hattın ağırlıklı ortalaması 737 MW olmaktadır. Hatların uzunluk ve güçlerinin eşit olması AA ve DA hatların kayıpları açısından karşılaştırma olanağı elde edilmektedir.

AA ve DA hatlarının aynı yüklerdeki ve aynı mesafedeki kayıpları sırasıyla 12.6 ve 7.5 MW olduğu görülmektedir. YGDA hat kaybı, AA hatlara göre 5.1 MW daha düşük olmaktadır. 2023 yılı elektrik fiyatı ortalaması EPİAŞ Şeffaflık Platformu- Piyasa Teklif Fiyatı (PTF) değerlerine göre 2189 TL/MWh'dır [31]. Böylelikle net kazanç 11164 TL/sa. olmaktadır.

Simülasyon sonucu değerlerle teorik hesaplamalarının karşılaştırılması AA ve DA hat kayıpları denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir. Şekil 9'da bipolar YGDA sistemi şeması üzerinde denklem bileşenleri verilmiştir. Burada Va AA gerilimini, Ia A akımını, Vd DA gerilimini, Id DA akımını ve R direnci temsil etmektedir.



Şekil 9. DA hat kayıpları için denklem bileşenleri.

Figure 9. Equation components for DC line losses.

$$\text{DC ile iletilen güç} = \text{Vd} \times \text{Id} \tag{1}$$

$$\text{AA ile iletilen güç} = 3\text{Va} \times \text{Ia} \times \cos\theta \tag{2}$$

$$\text{DA güç kaybı} = 2 \times \text{Id}^2 \times \text{R} \tag{3}$$

$$\text{A güç kaybı} = 3 \times \text{Ia}^2 \times \text{R} \tag{4}$$

(3) ve (4) denklemlerindeki AA ve DA iletim kayıpları eşitlendiğinde, denklem (5) elde edilir.

$$2 \times \text{Id}^2 \times \text{R} = 3 \times \text{Ia}^2 \times \text{R} \rightarrow \frac{\text{Ia}}{\text{Id}} = \sqrt{(\frac{2}{3})} \tag{5}$$

Üç fazlı AA yerine DA kullanıldığında, aynı güç iletimi, aynı iletken boyutu ve aynı güç kaybı varsayımı altında; Her iki tarafta iletilen güç aynıysa, (6) denklemi elde edilir.

$$3 \times \text{Va} \times \text{Ia} = \text{Vd} \times \text{Id} \rightarrow \frac{\text{Vd}}{Va} = 3\frac{\text{Ia}}{Id} = 3\sqrt{(\frac{2}{3})} = \sqrt{6} \tag{6}$$

3 iletken çift devre AA hattı 3 iletken çift devre DA hattına dönüştürüldüğünde DA tarafından iletilen güç ile AA tarafından iletilen güç arasındaki ilişki denklem (7) olarak ifade edilir. 3 iletken çift devre AC hat güç transferi $=2(3VaIa\cos\theta)$ ve 3 iletken çift devre DC hat güç transferi $=3VdId$, denklemleri ile DA tarafından iletilen gücün AC tarafından iletilen güce oranı:

$$\frac{P_{DA}}{P_{AA}} = \frac{3(2\sqrt{2}\text{Va})}{6\text{VaIa}} = \sqrt{2} = 1.414 \tag{7}$$

Bu denklemler ışığında aynı koşullarda DA hattı taşıma kapasitesi açısından 1.44 kat daha avantajlı olmaktadır. Her iki hatta eşit güç iletimi için simülasyon yazılımı ile yapılan yük akış analizinde hat kayıpları oranı ise 1.68 olarak bulunmuştur [7].

YGDA hattının 750 MW'lık gücün iletiminde kayıpları azaltması, sistem veriminin artması ve aynı gücü elde etmek için daha az enerji kaynağı kullanılması anlamına gelmektedir. 1 kWh enerji üretmek için ortalama 0.38 kg CO_2 salındığı dikkate alınırsa saatte 5100 kWh kayıp için 1938 kg CO_2 salınımı gerçekleştiği ortaya çıkmaktadır [32]. Buna göre, söz konusu hattın YGDA sistemine dönüştürülmesi ile çevresel yararlar da sağlanmaktadır.

Çalışmada ele alınan YGDA hattı mevcut direk ve iletkenleri kullandığı varsayılmaktadır. Bu sebeple direk, iletken, izolatör, geçiş hakkı ücreti, AA Transformatör merkezi, hat montaj işçiliği gibi maliyetler göz önüne alınmamaktadır. Ek olarak kurulacak sistem dönüştürücü transformatörleri, AA filtreler

ve tristörleri kapsamaktadır. 500 kV gerilim ve 1000 MVA kapasitesine sahip LCC YGDA sistemi için yatırım maliyet kalemleri Tablo 3'te verilmiştir. [33]

Tablo 3. LCC YGDA ekipmanları yatırım maliyetleri.

Table 3. LCC HVDC devices investment costs.

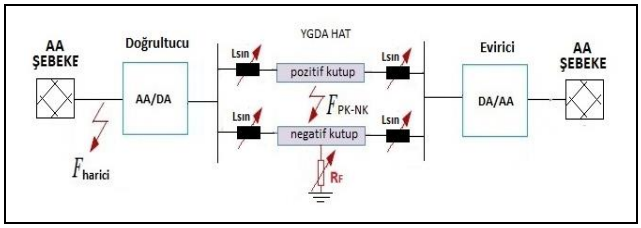
NO	EKİPMAN (bipolar 2 grup)	YATIRIM MALİYETİ (k$/MVA)
1	Dönüştürücü transformatör	23.8
2	AA filtre	7.14
3	Tristör grubu	10.7
	Toplam=	41.64

Burada toplam rakam 41.64 M$ olarak hesaplanmıştır. Saatlik olarak net kazanç yaklaşık 318 $/s olarak alındığında yatırım geri dönüş süresi yaklaşık 15 yıl olmaktadır. Bu hesaplamalara göre sistem iletim gücü ve hat uzunluğu arttıkça geri dönüş süresi de ters orantılı olarak azalmaktadır. AA sistem maliyeti ile karşılaştırıldığında AA sisteminin VSC YGDA sisteme göre maliyeti dörtte bir, LLC YGDA sisteme maliyeti ile karşılaştırıldığında yarısı oranında daha azdır [34], [7].

4 YGDA hattı için arıza analizi

YGDA hattına ilişkin koruma sistemi ve ekipman seçimi yapılmadan önce sistemin kısa devre arızalarına karşı tepkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla çift kutuplu YGDA sisteminde oluşturulan farklı arızaların etkileri irdelenmiştir. Sistemin hem DA hem de AA bölümleri için arıza simülasyonları yapılmıştır. DA sistemindeki arızaların daha tehlikeli oldukları göz önüne alınarak; hem kutup-kutup, hem de kutup-toprak arızalarına ilişkin simülasyonlar yapılmıştır. AA arızalarının DA iletim hattı üzerindeki etkilerini irdelemek için de üç faz kısa devre arızasının simülasyonu yapılmıştır. Diğer tüm arıza koşulları aynı kalacak şekilde değişik arıza dirençleri için arıza akımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca DA hatlarının empedansını büyütmek amacıyla kullanılan seri reaktörlerin arıza akımına etkisini görmek için analiz yapılmıştır. Sabit arıza direnci ile kutup toprak arası arıza oluşturularak değişken reaktör değerleri ile arıza akım değerleri karşılaştırılmıştır.

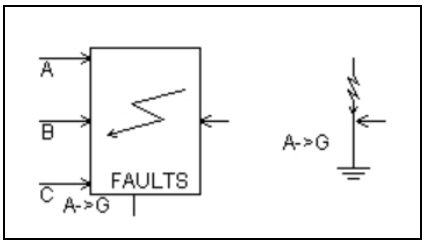
Şekil 10'da görülen şemadaki her arıza tipi için PSCAD programında arıza blokları oluşturulmuştur. Arızalar, öngörülen konumlarda hat parametrelerini değiştirilerek oluşturulmuştur. Analizlerde 160 milisaniyelik periyod dikkate alınmıştır.



Şekil 10. Arıza tiplerini gösteren tek hat şeması.

Figure 10. Single line diagram of fault types.

AA ve DA arıza bloğunun oluşturulması ve parametrelerinin belirlenmesi için PSCAD yazılımının 3 faz arıza bileşeni kullanılmaktadır (Şekil 11). AA için her bir faz için faz toprak, iki faz toprak, iki faz, üç faz ve üç faz toprak arızaları ile 12 arıza fonksiyonu bulunmaktadır. DA arızalarında A ve B girişlerine pozitif ve negatif kutup bağlantıları eklenmiştir. Böylelikle AB faz arızası ve A faz toprak arızası ile kutup kutup ve kutup toprak arızaları elde etmiştir. Arıza başlangıcı arıza zamanı belirlenerek yapılacağı gibi harici başlatma girişi de bulunmaktadır.



Şekil 11. Üç faz arıza bileşeni.

Figure 11. Three phase fault component.

Üç faz arıza bloğunun giriş parametreleri:

Arıza Türü Kontrolü: "Dahili" veya "Harici" seçilmektedir. Bütün arızalarda dahili seçilmiştir.

Akım Akıyorsa Temizleme Mümkün mü?: "Evet" veya "Hayır" seçilmektedir. Bütün arızalarda hayır seçilmiştir.

Nötr Topraklanmış mı?: "Evet" veya "Hayır" seçilmektedir. Bütün arızalarda evet seçilmiştir.

Arıza Direnci: Bütün arızalarda 0.01 Ω değeri girilmiştir. Arıza direnci etkisinin belirlendiği analizde ise sırasıyla 10,50,100 Ω değeri girilmiştir.

Arıza gerçekleşme zamanı: Bütün arızalar için 2.5 s olarak girilmiştir.

Arıza süresi: Bütün arızalar için 0.05 s olarak girilmiştir.

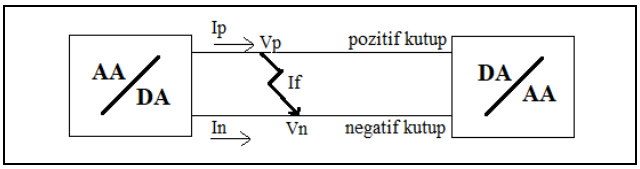
4.1 DA kutup kutup arızası

Kutup-kutup arızalar kablo ve hava hatlarında çeşitli sebeplerle meydana gelen hasarlar sonucunda oluşmaktadır. Kutuptan kutba arıza durumu, çift kutuptan toprağa arıza durumuna benzemektedir. Her iki durumda kutuplar dengede olduğundan topraktan bir akım geçişi yoktur. Her iki durumda da yeri için,

$$Vp = Vn = 0 \tag{8}$$

$$Ip = If = -In \tag{9}$$

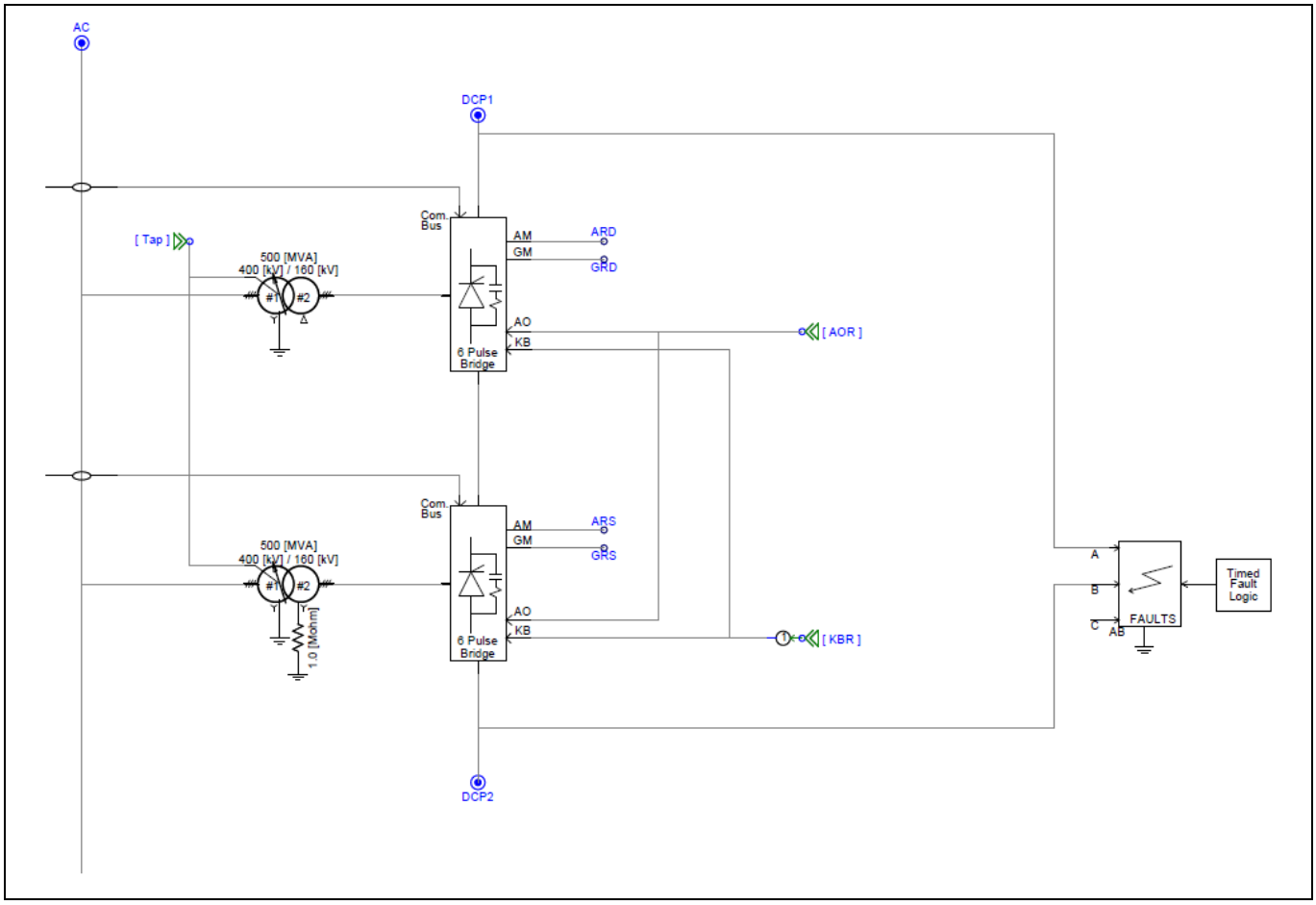
denklemleri yazılabilir. Bu denklemlerde V_p ve V_n arıza yerinde sırasıyla pozitif ve negatif kutbun gerilimi, I_p ve I_n ise arıza noktasındaki pozitif ve negatif kutup akımlarını, I_f ise arıza akımını göstermektedir (Şekil 12) [35].



Şekil 12. Kutup kutup arıza bileşenleri.

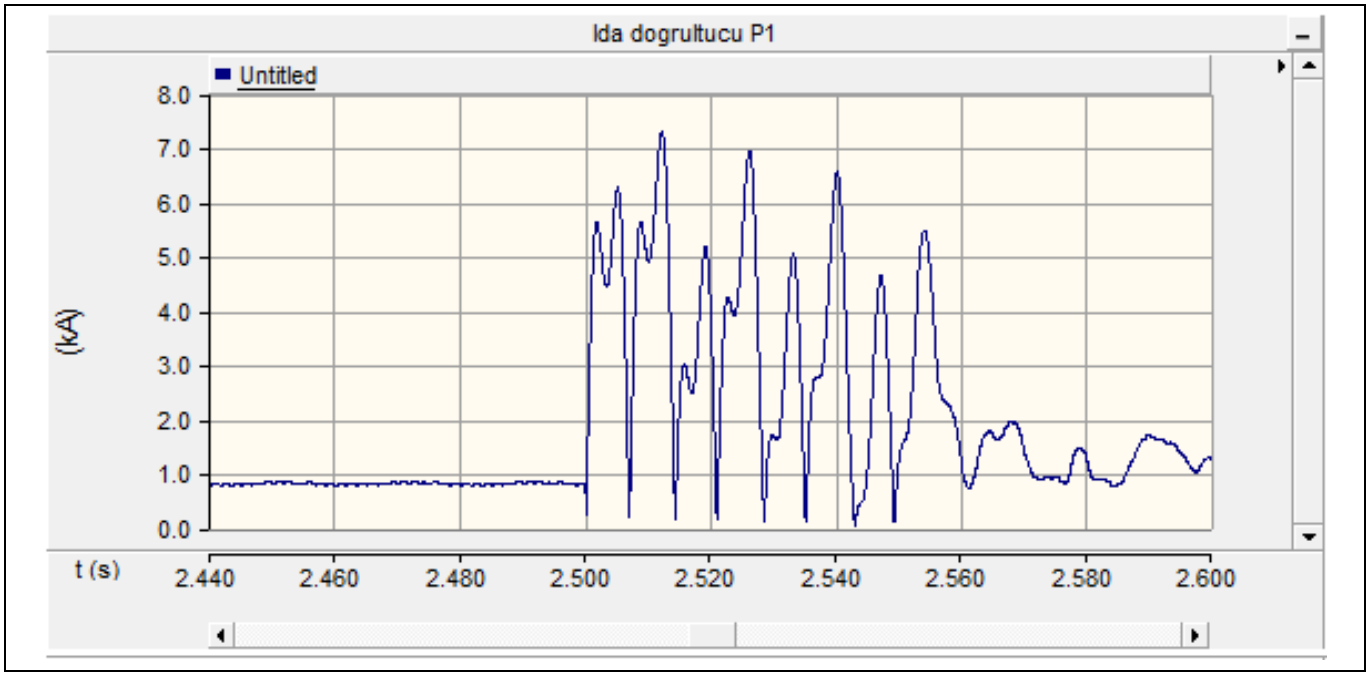
Figure 12. Pole-pole fault component.

Kutup-kutup arası arızasına ilişkin PSCAD blok şeması Şekil 13'te verilmiştir. Hattın doğrultucu tarafında pozitif ve negatif kutuplu iletkenler zaman ayarlı bir arıza fonksiyonu üzerinden kısa devre edilmiştir. Bu fonksiyonda 50 ms arıza süresi ve 0.01 Ω arıza direnci ayarlanmıştır. Arıza öncesi ve sonrasında doğrultucu akımının değişimi Şekil 14'te verilmiştir. Arıza başlangıcından itibaren oluşan salınımlar açıkça görülmekte ve arıza sonunda, sistem kararlı hale dönmektedir.



Şekil 13. Kutup kutup arıza PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 13. Pole to pole fault PSCAD screenshot.



Şekil 14. Kutup kutup arıza doğrultucu tarafı akım grafiği.

Figure 14. Pole to pole fault rectifier side current graph.

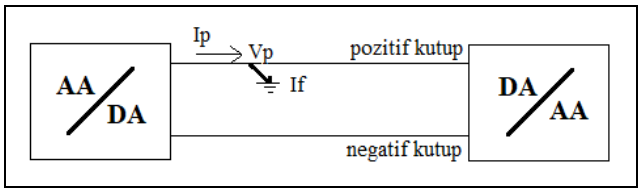
4.2 DA kutup toprak arızası

YGDA kutup-toprak arızası, iletkenin toprak ile temas etmesi sonucunda oluşmaktadır. İletkenin, toprağa belli bir arıza direnci ile temas etmesi sonucunda da oluşabilir. Bir kutup-toprak arıza durumu dikkate alındığında, arıza konumunda aşağıdaki denklemler oluşmaktadır:

$$Vp = 0 \tag{10}$$

$$Ip = If \tag{11}$$

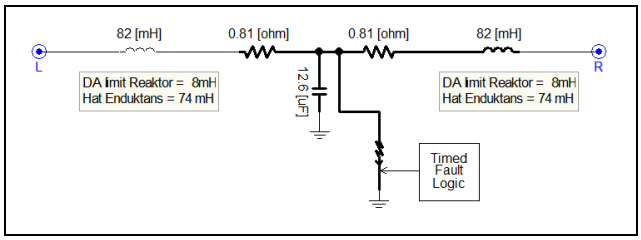
Burada V_p pozitif kutbun arıza yerindeki gerilimi, I_p ve I_n arıza noktasındaki pozitif ve negatif kutup akımlarıdır. I_f ise arıza akımını belirtmektedir (Şekil 15), [19].



Şekil 15. Kutup toprak arıza bileşenleri.

Figure 15. Pole-ground fault component.

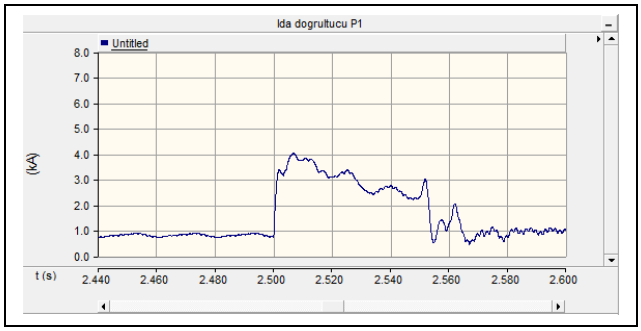
Kutup-toprak arası arıza simülasyonu için Şekil 16'daki gibi bir blok oluşturulmuştur. Pozitif kutup iletkenin orta noktasına arıza fonksiyonu üzerinden toprak kısa devre edilmiştir. Arıza yeri, hat parametrelerini oranlayarak set edilmesi ile belirlenmiştir. Arıza, hattın tam orta noktasında (300. km'de) 0.01 Ω değerinde arıza direnciyle temsil edilmiştir.



Şekil 16. Kutup toprak arıza PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 16. Pole to ground fault PSCAD screenshot.

Arıza öncesi ve sonrasında doğrultucu akımının değişimine ilişkin grafik Şekil 17'de verilmiştir. Kutup kutup arızaya göre akımın tepe değerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

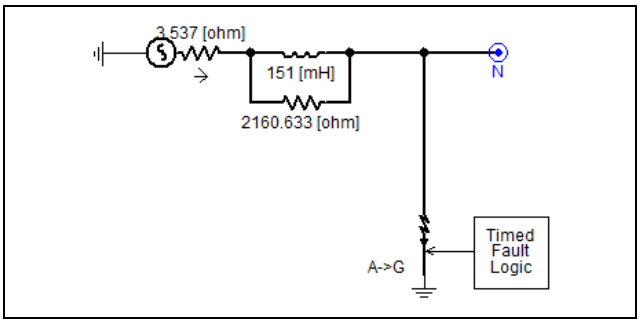


Şekil 17. Kutup toprak arıza doğrultucu tarafı akım grafiği.

Figure 17. Pole to ground fault rectifier side current graph.

4.3 AA üç faz arızası

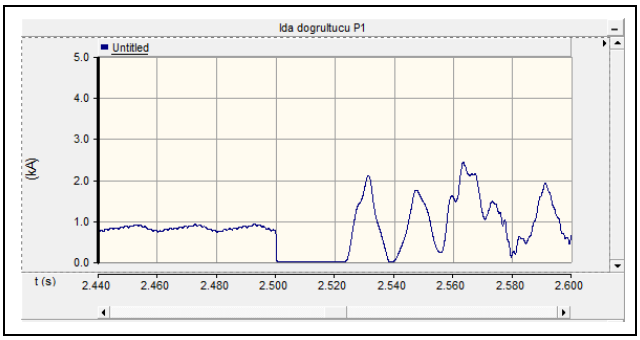
AA sisteminde oluşabilecek arızaların DA hat üzerindeki etkisini gözlemlemek için doğrultucu tarafında Şekil 18'de görüldüğü gibi üç faz kıza devre bloğu oluşturulmuştur. Arıza direnci 0.01 Ω olarak belirlenmiştir.



Şekil 18. AA üç faz arıza şeması PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 18. AC three phase fault PSCAD screenshot.

AA arızası, doğrultucu öncesinde oluşmasına rağmen; DA hat üzerindeki etkisini görmek için DA hattın doğrultucu tarafındaki akım elde edilerek Şekil 19'da verilmiştir. Grafiğe göre arıza anından 20 ms boyunca akımın sıfırlandığı daha sonrasında da keskin salınımlar yaptığı gözlemlenmiştir. Akım tepe değerinin işletme akımının yaklaşık 3 katına kadar ulaşabildiği görülmüştür.

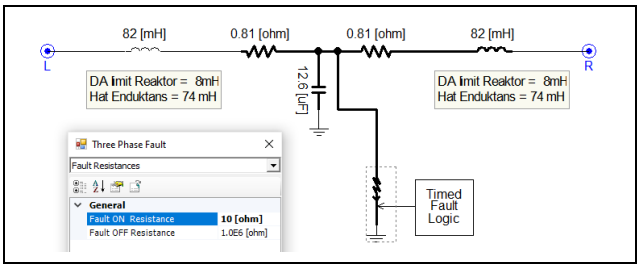


Şekil 19. AA üç faz arıza doğrultucu tarafı akım grafiği.

Figure 19. AC three phase fault rectifier side current graph.

4.4 Arıza direncinin arıza akımına etkisi

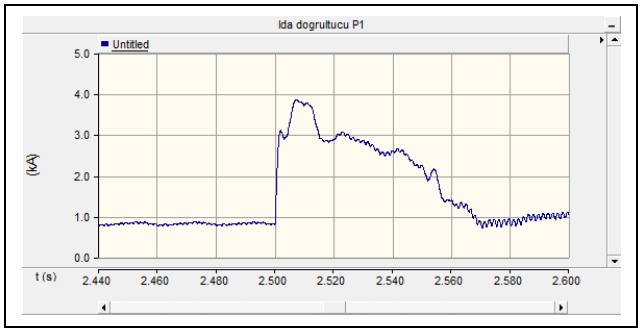
Arıza direnci değerinin arıza akımına etkilerini görmek için pozitif kutup ile toprak arasında Şekil 20'te görüldüğü gibi arıza blok şeması kullanılmıştır. Arıza yeri, hattın tam orta noktası olan 300. km'de oluşturulmuştur. Arıza direnci değeri sırasıyla 10, 50 ve 100 Ω olarak seçilmiş ve her bir değer için simülasyonlar tekrarlanmıştır.



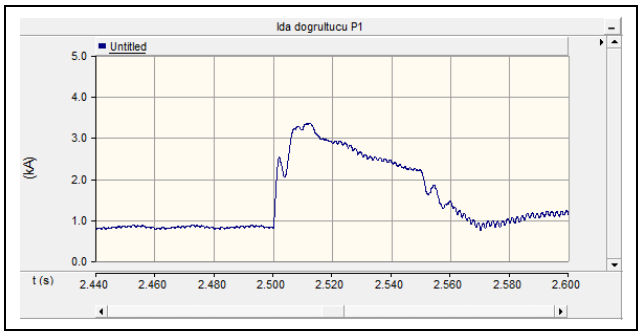
Şekil 20. Arıza direnci değişimi PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 20. Fault resistance change PSCAD screenshot.

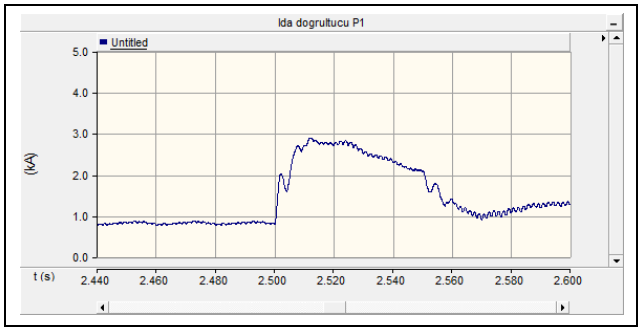
Arıza akımı, seri bağlı olan hat direnci ve arıza direnci üzerinden toprağa akmaktadır. Buna göre arıza akımını etkileyen değişkenler, arızanın yeri ve arıza direnci biçiminde tanımlanabilir. Arıza direnci arttıkça arıza akımının da azalması beklenmektedir. Şekil 21'de her bir arıza direnci için pozitif kutup doğrultucu tarafı arıza akımlarının değişimleri verilmiştir. Arıza direnci arttıkça arıza akımının azaldığı görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

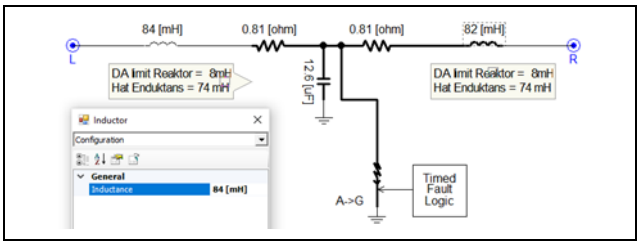
Şekil 21(a): 10 Ω. (b): 50 Ω. (c): 100 Ω değerlerindeki arıza dirençleri için doğrultucu tarafı akım grafikleri.

Figure 21. Rectifier side current graphs at (a): 10 Ω. (b): 50 Ω. (c): 100 Ω fault resistance values.

4.5 DA reaktörün arıza akımına etkisi

Kutup-toprak arası arızalarda DA reaktörünün etkisini göstermek amacıyla bir simülasyon yapılmıştır. Kutup-toprak arası arıza eşdeğer devresi Şekil 22'de verilmiştir. Pozitif kutup toprak arıza simülasyon bloğunda arıza yeri olarak hattın tam ortası seçilmiştir. Arıza direnci her test için sabit 0.01 Ω olarak belirlenmiştir.

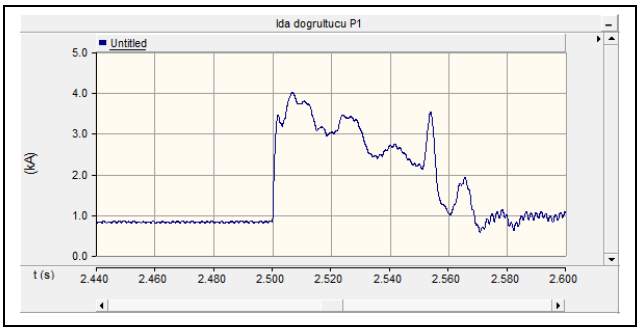
10, 50 ve 200 mH DA reaktörü oluşturmak için hattın her iki tarafındaki endüktans değerine sırasıyla 10, 50 ve 200 mH eklenmiştir.



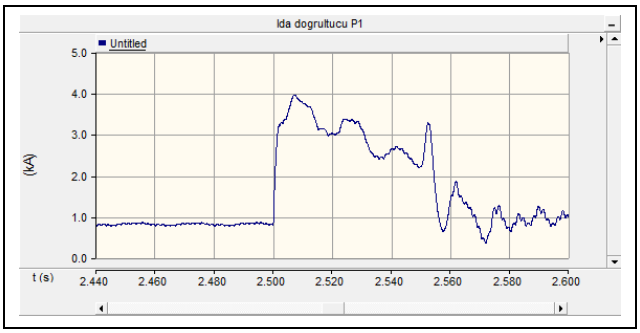
Şekil 22. Sınırlama reaktörü değişim PSCAD ekran görüntüsü.

Figure 22. Limiting inductance change PSCAD screenshot.

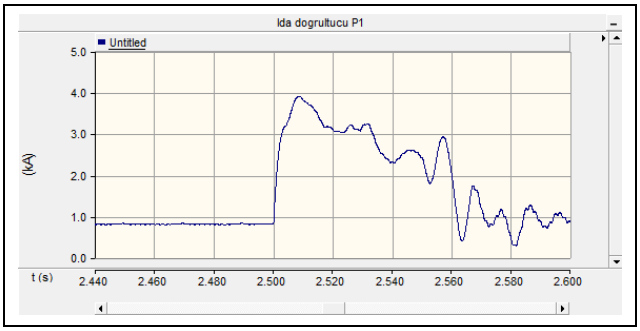
Hat üzerinde seri bulunan sınırlama reaktör değerinin arıza akımına olan etkisini gösteren grafikler Şekil 23'te verilmiştir. Reaktör değeri büyüdükçe arıza akım tepe değerinde az miktarda değişim gözlenmiştir. Ancak, akımın ilk artış eğiminde düşme gözlenmiştir. Ayrıca, arıza sonrasındaki salınımlarda da iyileşmeler meydana gelmiştir.



(a)



(b)



(c)

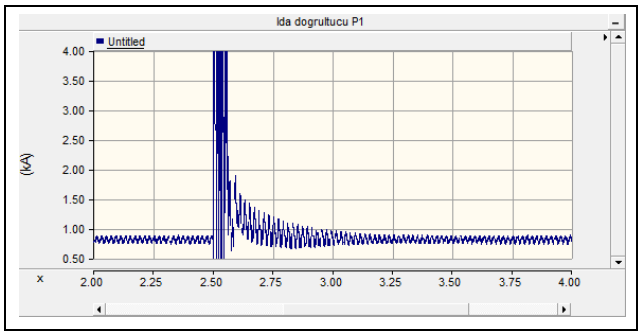
Şekil 23(a): 10 mH. (b): 50 mH. (c): 200 mH değerlerindeki reaktör için doğrultucu tarafı akım grafikleri.

Figure 23. Rectifier side current graphs at (a): 10 mH. (b): 50 mH. (c): 200 mH inductance values.

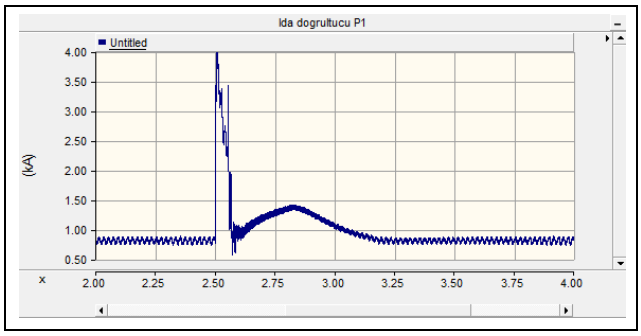
4.6 Arıza sönümlenme sürelerinin karşılaştırılması

Bu bölümde analizi yapılan DA kutup kutup, DA kutup toprak ve doğrultucu tarafı AA üç faz kısa devre arızaları daha geniş ölçekte incelenmiş ve arızanın sönümlenme süreleri karşılaştırılmıştır. Burada arıza zamanı 2.5 s, arıza süresi 0.05 s seçilmiş; analizde ise ilk dört saniyelik periyod dikkate alınmıştır. Arıza akımının yeniden kararlı duruma geldiği süreler belirlenmiştir.

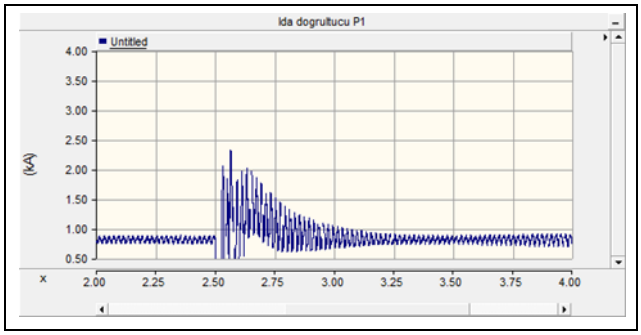
Şekil 24'te sırasıyla kutup kutup, kutup toprak ve AA tarafı arıza akımlarının sönümlenme sürelerinin incelendiği grafikler verilmiştir. Arıza sonrası 0.5 sn.'lik geçici durumlar incelendiğinde akımda meydana gelen salınımlar AA akım arızasında daha fazla gözlemlenmiştir. Her üç arıza tipi içinde arızadan 0.75 sn. sonra akımın kararlı duruma geldiği görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 24(a): Kutup-kutup arızası. (b): Kutup toprak arızası. (c): AA arızası sönümlenme süreleri.

Figure 24(a): Pole pole fault. (b): Pole ground fault. (c): AC fault damping times.

5 Arıza analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Elde edilen arıza analiz sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu tabloda kutup kutup, kutup toprak, AA üç faz arıza, arıza direnci ve sınırlandırma reaktörünün etkilerinin tepe akım değerleri ve arıza karakteristikleri verilmiştir.

Tablo 4. Arıza analiz sonuçları tablosu.

Table 4. Fault analysis results table.

Analiz Şekli	Arıza Yeri	Arıza Direnci Ω	DA Reaktör mH	Tepe Akımı kA
Kutup kutup	Hatbaşı	100	8	7.1
Kutup toprak	Hat ortası	100	8	4
AA 3 Faz	AA Şebeke	100	8	2.6
Arıza direnci	Hat ortası	10 50 100	8	4-3.1-2.8
DA reaktör	Hat ortası	0.01	50 100 200	4-4-3.7

6 Sonuçlar

Çalışmada ilk olarak birbiriyle aynı karakteristikteki iki paralel hat ile AA ve DA iletimin hat kayıpları açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Üzerinden yaklaşık aynı büyüklükte yük akan iletkenlerde DA ile iletim yapanda 5.1 MW daha düşük hat kaybı gözlenmiştir. Bu da güncel verilere göre 11164 TL/sa. maddi kazanç ve 1938 kg/sa. daha az CO_2 salınımı gibi çevresel kazanım anlamına gelmektedir.

İkinci olarak modellenen YGDA hat üzerinde oluşabilecek arıza türlerinin birbirleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları Tablo 4'te detaylı olarak gösterilmiştir. Sonuçlara göre büyük arıza hat akımı kutup-kutup arıza koşullarında oluşmaktadır. Doğrultucu tarafında elde edilen arıza akımı tepe değeri 7.1 kA civarındadır. Bu da arıza anındaki işletme akımının yaklaşık 9 katına yakın olduğu anlamına gelmektedir. Kutup toprak arasında meydana gelen arızada ise arıza akımı 4 kA gibi akım tepe değeri görülmektedir. Kutup kutup arıza esnasında arıza noktası gerilim değeri kutup toprak arızasındaki gerilim değerinin iki katı kadar olmaktadır. Ohm kanunu çerçevesinde yaklaşık aynı iletken ve arıza direnci ile arıza akımında da yaklaşık iki katı gibi bir değer beklenmektedir. Simülasyon sonuçları bu teoriyi doğrulamaktadır.

Hattın orta noktasında meydana geldiği varsayılan pozitif kutup toprak arızasında ise farklı arıza dirençlerinde analizler yapılmıştır. Arıza direnleri sırasıyla 10-50-100 Ω olarak belirlenen koşullarda 4 -3.1-2.8 kA hat akımları gözlenmiştir.

Kutup toprak arızalarında arıza akımı bir arıza direnci (R_f) üzerinden toprağa akmaktadır. Toprak ile bağlantılı devrenin direnci, hat direnci ve arıza direncinin toplamı şeklinde olmaktadır. Ohm yasası $(V = I \times R)$ dikkate alındığında toplam direnç büyürse akım da ters orantılı olarak düşmektedir. Simülasyon ile elde edilen sonuçlar teoriyi de doğrular niteliktedir.

Yine hattın orta noktasında arıza direnci sabit tutularak sınırlama reaktörleri 10-50-200 mH büyüklüklerinde belirlenerek analiz tekrarlanmış ve sırasıyla 4 -4-3.7 kA hat akımları gözlenmiştir. DA sınırlama reaktör değeri büyüdükçe hat akımının küçük oranda azaldığı görülmüştür.

DA hatlarında hat reaktansı bulunmadığı için arıza akımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu sebeple hat başı ve hat sonuna sınırlama reaktörleri konulmaktadır. Eklenen reaktörler hat empedansını yükselttiği için arıza akımı artış hızını düşürücü yönde iyileştirme sağlamaktadır. Simülasyon sonucu grafiklerinde elde edilen en önemli sonuç, sınırlama reaktörü

değeri arttıkça arıza akımının yükselme eğiminin düşmesi ve arıza sonrası salınımların iyileşmesidir.

7 Conclusions

In the study, firstly, two parallel lines with the same characteristics and AC and DC transmission were compared in terms of line losses. In conductors with approximately the same size load flowing on them, 5.1 MW lower line loss was observed in those conducting DC transmission. According to current data, this means a financial gain of 11164 TL/h and an environmental gain of 1938 kg/h less CO2 emissions.

Secondly, the types of faults that may occur in the modeled HVDC line were compared with each other. The results of the fault analysis are shown in detail in Table 4. According to the results, the highest line current is observed under pole-to-pole fault conditions. The peak fault current measured by the rectifier is around 7.1 kA. This means that it is approximately 9 times the operating current at the time of fault. In the fault occurring between pole and ground, the fault current peak value is seen as 4 kA. During a pole-to-pole fault, the fault point voltage value is twice the voltage value of the pole-to-ground fault. Within the framework of Ohm's law, a value of approximately twice the fault current is expected with approximately the same conductor and fault resistance. Simulation results confirm this theory.

For the positive pole ground fault, which is assumed to occur at the midpoint of the line, different fault resistances were analyzed. Line currents of 4 - 3.1 - 2.8 kA were observed under conditions where fault resistors were determined as 10-50-100 Ω, respectively.

In polar ground faults, the fault current flows to the ground via a fault resistance (R_f). The resistance of the circuit connected to the ground is the sum of the line resistance and the fault resistance. When Ohm's law $(V = I \times R)$ is taken into account, if the total resistance increases, the current decreases inversely. The results obtained with the simulation also confirm the theory.

Again, at the middle point of the line, the fault resistance was kept constant and the limiting reactors were determined as 10-50-200 mH, and the analysis was repeated and line currents of 4 -4-3.7 kA were observed, respectively. It has been observed that the line current decreases slightly as the DC limiting reactor value increases.

Since there is no line reactance in DC lines, the fault current increases very quickly. For this reason, limiting reactors are placed at the beginning and end of the line. Since the added reactors increase the line impedance, they provide improvement in reducing the fault current increase rate. The most important result obtained in the simulation result graphs is that the fault current increase slope decreases as the limiting reactor value increases and the after-fault oscillations improve.

8 Yazar katkı beyanı

Çalışmada, Ekrem Şahin, fikir oluşması, literatür taraması, simülasyonların yapılması ve yazım aşamalarında; Hasbi İsmailoğlu yazım denetimi, makalenin gözden geçirilmesi ve kontrol edilmesi aşamalarında katkı sunmuşlardır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

10 Kaynaklar

[1] Salman S, Xin A, Masood A, Iqbal S. "Composite E-HVAC and CSC-HVDC system: control and its fault analysis". *Electrical Engineering*, 103, 1265–1277, 2021.

[2] Merlin V, Santos R, Pavani A, Vieria J. "A frequency spectrum-based method for detecting and classifying faults in HVDC systems". *Electric Power Systems Research*, 207, 107828, 2022.

[3] Liu T, Zhang Y, Wang S, Li X, Goi H, Gias A. "Fault identification and fault location methods for VSC-HVDC transmission lines based on the traveling waveform difference". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 147, 108867, 2023.

[4] Rodriguez C, Mane M, Garcia F, Araujo E, Bellmunt O. "Integration of an MMC-HVDC link to the existing LCC-HVDC link in Balearic Islands based on grid-following and grid-forming operation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(6), 5278 - 5288, 2022.

[5] Wu H, Yang Y, Deng S, Wang Q, Song H. "GADF-VGG16 based fault diagnosis method for HVDC transmission lines". *PLoS ONE*, 17(9), 0274613, 2022.

[6] Wang X, Zhang D, Zhang X, Ni P. "Fault diagnosis method for hybrid HVDC transmission system based on stacked sparse autoencoder". *7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*, Hangzhou, China, 15-17 April 2022.

[7] Acaroğlu A, Najafi A, Kara Ö, Yürük B. "An economic and technical review for the utilization of HVDC in Türkiye and in the World". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 809- 835, 2021.

[8] EFICAA "Energy Efficiency Delivered" Web Site". https://www.eficaa.com/understanding-distribution-transformers-and-converter-transformers-and-the-significance-of-hvdc-systems#:~:text=Low%20Transmission%20Losses%3A%20HVDC%20systems,and%20increasing%20overall%20system%20performance (22.12.2024).

[9] Song J, Li Y, Zhang Y. "Fault steady-state analysis method for the AC system with LCC-HVDC infeed". *Electric Power Systems Research*, 192, 106994, 2021.

[10] Khan W, Raza A, Usman M, Hamid S, Rehman S, Usman A, Politis C. "Fault interruption scheme for HVDC system using SiC-MESFET and VCB based hybrid circuit breaker". *IEEE Access*, 9, 157371-157383, 2021.

[11] Jeong J, Kim G, Park S, Choi Y. "Analysis of operation characteristics of a superconducting DC circuit breaker according to fault types in VSC-HVDC system using PSCAD/EMTDC". *24th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Gyeongju, Korea, 31 October-03 November 2021

[12] Pourmirasghariyan M, Zarei S, Hamzeh M, Blaabjerg F. "A power routing-based fault detection strategy for multi-terminal VSC-HVDC grids". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38(1), 528 - 540, 2023.

[13] Joshi A J, Khathoon R, Devikrishna, PV A. "A computationally less expensive fault detection technique in VSC-HVDC system using wavelet decomposition and support vector machine classifier". *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy*, Trivandrum, India, 02-05 January 2022.

[14] Wu J, Li Q, Peng G, Wang J, Fu Q, Yang B. "Evaluation, analysis and diagnosis for HVDC transmission system faults via knowledge graph under new energy systems construction: a critical review". *Energies*, 15(21), 8031-8051, 2022.

[15] Zhang J, Dai S, Luo P, Song M, Ma T. "Pole-to-pole fault characteristics in VSC-HVDC transmission system with a resistance-inductance type superconducting fault current limiter". *Electric Power Systems Research*, 217, 109049, 2023.

[16] Tao Y, Li B, Jiang Q, Blaabjerg F. "Practical fault current level evaluation and limiting method of bipolar HVDC grid based on topology optimization". *IEEE systems journal*, 16(3), 4466-4476, 2022.

[17] Faruque M, Zhang Y, Dinavahi V. "Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1), 378 -387, 2006.

[18] Wang Y, Wang H, Wu J. "Analysis of asymmetric fault commutation failure in HVDC system considering instantaneous variation of DC current". *Sustainability*, 15, 11796, 2023.

[19] Xui L, Kang Z. "Study on fault simulation of HVDC system based on PSCAD/EMTDC". *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Xiamen, China, 06-09 December 2017

[20] Zhang T, Lui X, Guo X. "Analysis of fault-induced inrush current of converter transformer in LCC HVDC system considering DC control and protection". *Electrical Power and Energy Systems*, 125, 106536, 2021.

[21] Zhu Y, Li Y, Liu N, Chen X. "Fault current analysis and active current limiting strategy for hybrid cascaded LCC/MMC HVDC system". *Electrical Power and Energy Systems*, 151, 109125, 2023.

[22] Yang C, Xin Y, Li C, Li Q, Lu J, Wang C, Li B. "Fault protection of multiterminal HVDC networks: Impact of inductance". *Electrical Power and Energy Systems*, 141, 108113, 2022.

[23] Song G, Wang T, Huang X, Zahng C. "An improved averaged value model of MMC-HVDC for power system faults simulation". *Electrical Power and Energy Systems*, 110, 223-231, 2019.

[24] Imdadullah, Beig A, Ashgar M. "Performance evaluation and reliability of flexible asynchronous AC link and LCC-HVDC link under fault conditions". *IEEE Access*, 8, 120562-120574, 2020.

[25] Naadem M, Tai N, Zheng X, Huang W, Gul M. "Multi-Terminal HVDC fault current analysis during line to ground fault". *IEEE Innovative Smart Grid Technologies*, Auckland, New Zealand, 04-07 December 2017.

[26] Xiang W, Yuan W, Xu L, Hodge E, Mckeever P, Bell K. "DC fault study of a point-to-point HVDC system integrating offshore wind farm using high-temperature superconductor DC cables". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(1), 377 - 388, 2021.

[27] Xue S, Gu C, Lu B, Fan B. "Analysis and protection scheme of station internal AC grounding faults in a bipolar MMC-HVDC system". *IEEE Access*, 8, 26536 - 26548, 2020.

[28] Zhang X, Bai J, Chen C. "PSCAD Based Multi-infeed HVDC system simulation validated by a recorded fault". *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 19(2), 199-204, 2014

[29] Guo Y, Zheng Y, Xie Q, Zhao J. "Study of resistive type SFCL for limiting inrush current of LCC-HVDC converter transformer". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 3101771, 2021.

[30] Kurokawa F, Sakai T, Sagara S, Hirose K. "Inrush current suppression characteristics for HVDC converter". *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, Canada, 28 September 2014 - 02 October 2014

[31] EPİAŞ Şeffaflık Platformu. "Piyasa Takas Fiyatı (PTF)". https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-markets/day-ahead-market-dam/market-clearing-price-mcp (31.12.2023).

[32] Enerji Atlası. "Elektrik Üretiminde Karbon Salınımı". https://www.enerjiatlasi.com/haber/elektrik-uretiminde-karbon-salinimi (31.12.2021).

[33] Chen N, Zha K, Qu H, Li F. "Economy analysis of flexible LCC-HVDC systems with controllable capacitors". *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8(6), 1708-1719, 2022.

[34] Raza A, Shakel A, Hassan H, Jamil M. Gillani S. "Economic analysis for HVDC transmission system in Pakistan". *International Journal of Control and Automation*, 10(11), 18-29, 2017.

[35] Elgamasy M, Izzularab M, Zhang X. "Single-end based fault location method for VSC-HVDC transmission systems". *IEEE Access*, 10, 43129 - 43142, 2022.