



Rezistif Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının MATLAB/SIMULINK'te Modellenmesi

Yunus Emre Gürbüz¹, Aziz Deniz², Rıfki Terzioğlu^{3*}

¹ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-5650-4193), y.emregurbuz@gmail.com

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9919-6792), azizdeniz310@gmail.com

^{3*} Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6305-5349), rifkiterzioglu@ibu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 11 Ocak 2021 ve Kabul Tarihi 20 Mart 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.857945)

ATIF: Gürbüz, Y. E., Deniz, A., Terzioğlu, R. (2021). Rezistif Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının MATLAB/SIMULINK'te Modellenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 173-180.

Öz

Güç sistemlerinde meydana gelen arızaların sebep olduğu yüksek akımlar, sistem ve sistemdeki elemanlar için tehlike oluşturmaktadır. Arıza akımlarının sınırlandırılması; bu yüksek akımların zorlayıcı termal ve dinamik etkilerinden, sistem ve sistem elemanlarının korunması anlamına gelmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, arıza akımlarının sınırlandırılması için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların ortak amacı, sistemin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamaktır. Elektrik enerjisinin artan kullanımı, güç sistemlerinin sürekli genişlemesine ve karmaşıklığına yol açmaktadır. Bununla birlikte, arıza akımı sınırlayıcıları sürekli gelişen güç sistemlerinde giderek daha önemli hale gelmektedir. Mevcut sistemde herhangi bir değişiklik yapılmadan arıza akımı sınırlayıcıları sayesinde işletme sürekliliği sağlanabilir. Arıza akımı sınırlayıcıları birçok güç sistemi elemanı gibi, gerçek sistemde kullanılmadan önce sanal ortamlarda modellenerek çalışma performansları ve gerekli parametrelerin tespiti yapılmaktadır. Bu amaçla farklı SIMULINK süperiletken arıza akım sınırlayıcı (SFCL) modelleri kullanılarak sistem parametrelerinde sebep oldukları farklı etkiler 14 baralı IEEE sisteminde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıza akımı, Akım sınırlayıcı, Süperiletken, SFCL.

MATLAB/SIMULINK Modeling of Resistive Superconductor Fault Current Limiters

Abstract

High current levels caused by failures in power systems, comprise danger to the system and its elements. Limiting these fault currents protects the system and the system components from challenging thermal and dynamic effects. Many studies have been carried out to limit the fault currents. The common purpose of these studies are to ensure the safety and reliability of the system. The increasing usage of electrical energy leads to the continuous expansion and complexity of power systems. Therefore, fault current limiters are becoming increasingly important in continuously developing power systems. Operation continuity can be ensured by means of fault current limiters without making any changes in the existing system. Like many power system components, fault current limiters are modeled in virtual environments before they are used in the real system, and their operating performance and necessary parameters are determined. For this purpose, different effects on system parameters have been investigated in a 14-bus IEEE system using different SIMULINK superconductor fault current limiter (SFCL) models.

Keywords: Fault current, Fault limiter, Superconductor, SFCL.

* Sorumlu Yazar: rifkiterzioglu@ibu.edu.tr

1. Giriş

Elektrik enerjisinin hayatımızdaki önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde artan enerji talebinin karşılanabilmesi için geliştirilen güç sistemleri daha karmaşık hale gelmiştir. Modern güç sistemlerinde, artan enerji talebinin karşılanabilmesi için üretim ve iletim sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen güç sistemlerinin giderek daha karmaşık hale gelmesi meydana gelebilecek arızaların en hızlı ve en etkili biçimde düzeltilmesini gerekli kılmıştır. Tüm bu karmaşıklığa rağmen elektrik enerjisinin sürekli ve güvenilir bir biçimde tüketiciye ulaştırılması gerekmektedir (Gökçek & Ateş, 2019). Güç sistemlerinde olması muhtemel kısa devre problemlerine karşı sistem elemanları ve tüketicinin etkilenmemesi istenmektedir. Genel olarak, sistemde yapılan yanlış manevralar, atmosferik olaylar, canlıların teması veya diğer dış etkenler güç sistemlerinde arızalara neden olmaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen arızalarda, arıza akımı nominal akımın 5 ile 20 katına kadar ulaşabilmektedir (Seyedi & Tabei, 2012). Bu seviyelere ulaşan arıza akımları sistem donanımlarının zarar göreceği büyüklükteki termal gerilimlere ve elektrodinamik kuvvetlere maruz kalmasına neden olmaktadır (Şen & Özcan, 2020). Ayrıca artan arıza akımı seviyelerinin bir sonucu olarak adım ve dokunma gerilimleri de artmaktadır. Bu durum personel için güvenlik sorunlarına neden olmaktadır. Arıza akımının bu seviyeleri, sisteme zarar vermeden en etkili ve en güvenilir şekilde kesiciler tarafından kesilmelidir. Ancak artan enerji talebiyle birlikte arıza akım seviyelerinin de gelecekte güç sistemi kesicilerinin kesme yeteneklerini aşabileceği göz önüne alındığında hem uzun vadede yararlı hem de sistemi olası arızalara karşı koruyabilecek alternatif uygulamalara gerek duyulmuştur.

Güç sistemlerinde meydana gelebilecek kısa devrelerde oluşan büyük arıza akımlarının sisteme verebileceği zararlı etkilerden koruyan ve arıza akımlarını kontrol edilebilir seviyelerde sınırlandıran elemanlara arıza akımı sınırlayıcıları denir. Literatürde birçok arıza akım sınırlayıcıları mevcuttur. Arıza akımı sınırlamada kullanılan bazı önemli yaklaşımlar şu şekildedir: akım sınırlayıcı reaktörler (Peelo ve diğ., 1996), katı hal arıza akım sınırlayıcıları (Ahmed ve diğ., 2004), süperiletken arıza akım sınırlayıcıları (Lee ve diğ., 2008), sigortalar (Fahnoe, 1970), güç sisteminin yeniden yapılandırılması, trafo merkezlerinde baraların ayrılması, bazı hatların kritik trafo merkezinden ayrılması, yüksek empedanslı transformatör uygulamaları, HVDC hatlarının kullanımı (Zhang ve diğ., 2006), yüksek gerilim seviyeli iletim hatlarının kullanımı (Nasiri & Barahmandpour, 2006) ve nötr reaktör uygulamalarıdır (Zadeh ve diğ., 2008). Süperiletken arıza akım sınırlayıcıları (SFCL) gibi yeni nesil arıza akımı sınırlayıcıları, güç sistemlerinde normal çalışma sırasında sisteme ihmal edilebilir seviyelerde direnç gösteren ancak oluşabilecek arıza durumlarında yüksek direnç göstererek sistemi arıza akımlarının zararlı etkilerinden koruyan elemanlardır.

Güç sistemlerindeki birçok eleman gibi SFCL'lerin de gerçek uygulamalardaki etkilerini görmek, optimum parametrelerini ve en uygun bağlantı yerlerini belirlemek için benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Literatürde güç sistemlerinin modellenmesinde birçok hazır paket program kullanılmaktadır. Bu programlar arasında MATLAB/SIMULINK önemli bir yere sahiptir. 2015 yılında rezistif bir SFCL, süperiletkenlerin elektrik alan-akım yoğunluğu ($E-J$) denklemi kullanılarak MATLAB/SIMULINK'te modellenmiş ve rüzgâr

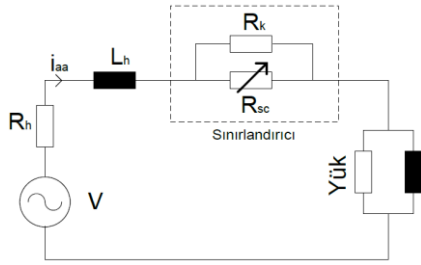
çiftliklerindeki etkileri incelenmiştir (Zhua ve diğ., 2015). SFCL'nin kullanımı ile kısa devre akımının %50 oranında azaltıldığı bildirilmiştir. Kullanılan modele ait parametreler çalışmada paylaşılmamıştır. 2016 yılında rezistif bir SFCL'nin modellenmesinde iyileşme süresinin (recovery time) senkron jeneratörün açılı kararlılığına etkisi incelenmiştir (Kheybargir ve diğ., 2016). (Zhang ve diğ., 2016) ve (Khan ve diğ., 2011)'de $E-J$ modeli ve adım direnç modeli ile SFCL'lerin yerleşim yerlerinin sisteme etkileri MATLAB/SIMULINK ile incelenmiştir. Bu çalışmalarda SFCL için $E-J$ ve adım direnç modeli kullanımının benzetim sonuçlarını önemli ölçüde etkilemediği belirtilmiştir. (Jiajun ve diğ., 2018) bir SFCL ile yüksek gerilim bir kesicinin birlikte kullanımını göstermiştir. 2020 yılında SFCL'lerin kullanımı ile güç sistemlerindeki geçici kararlılığa etkileri incelenmiştir (Peddakapu ve diğ., 2020). Bu çalışmada, arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinden rezistif SFCL sanal ortamda farklı SIMULINK modelleri gösterilmiş ve bu farklı modellerin kısa devre analizlerinde sebep oldukları farklı sonuçların sebepleri tartışılmıştır. SFCL'nin elektrik enerjisi iletim sistemlerinde uygulanabilirliğini incelemek ve mevcut SFCL modellerinin eksikliğini göstermek amacıyla uygulamada IEEE 14 baralı sistem kullanılmıştır. Aynı sistem ve aynı arıza durumlarında, farklı SFCL modelleri ile yapılan simülasyonlar kullanılarak sistem üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

2. Rezitif Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcılar ve Simulink Modelleri

Günlük hayatımızda kullanılan bütün iletkenlerin bir direnci bulunmaktadır. Fakat bazı iletkenlerde, malzeme kritik sıcaklık denilen bir sıcaklığın altına kadar soğutulduğunda, akımı taşıyan elektronlar enerjilerini ısıya çevirme yeteneklerini kaybederler ve dirençleri sıfıra düşer. Bir malzemenin, enerji iletkenliğinde direncinin 0 olması durumuna süperiletkenlik denebilmektedir. Bu malzemeler kritik sıcaklık, kritik akım yoğunluğu ve kritik manyetik alan sınırları içinde olduğu zaman süperiletken özelliği gösterecektir. Süperiletken malzemeler, yüksek akım seviyelerine maruz kaldıklarında süperiletken durumdan normal duruma geçmektedirler. Süperiletkenlerin bu özelliğinden faydalanılarak arıza akımı sınırlayıcı olarak kullanılmaktadırlar. SFCL'ler güç sistemlerinde oluşabilecek kısa devre akımlarını bir döngüden kısa bir sürede algılayıp bu hata akımını (arıza akımını) kabul edilebilir bir değerde tutabilen veya belirli süreler için tamamen sıfıra düşürebilen süperiletken cihazlardır. Normal kesicilere göre daha kısa sürede arıza akımını kestiklerinden açılı kararlılığına olumlu etkileri vardır. SFCL'lerde, süperiletkenlerin lineer olmayan akım-gerilim özelliklerinden yararlanılır. Kritik akım değeri aşıldığında süperiletkenler sıfır direnç özelliklerini kaybeder ve akıma karşı bir direnç gösterirler bu da sistemin empedansını arttırdığından akım alternatif olarak süperiletkene paralel bağlanmış koruma amaçlı dirençten geçer. Bu direncin değeri ilk durumdaki süperiletkenden daha yüksek olduğundan sistemin empedansı artar. Gerilimin sabit olduğu kabulü yapılırsa, empedansın artması akımı sınırlandırır. İnsan müdahalesi gerektirmeden otomatik olarak çalışan kompakt sistemlerdir. Fiyatları uygun, hafif ve yüksek güvenilirliklidirler. Sadece süperiletkenin bulunduğu kısmı soğutmak yeterli olduğundan süperiletkenlerin güç sistemlerindeki uygulamaları arasında uygulanabilirliği en uygun olan elemandır. Şimdiye kadar rezistif, endüktif ve hibrit gibi farklı SFCL türleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, MATLAB/SIMULINK

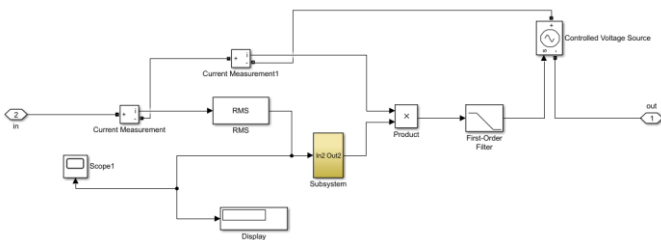
kullanılarak modellenen rezistif SFCL detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Rezistif SFCL'lerde, süperiletken eleman hatta seri olarak bağlanır. Kapladıkları küçük alan ve devrenin basitliği sebebiyle topolojisi en basit SFCL türüdür. Sistemin akımı normal çalışma koşullarında olduğunda süperiletken kısım direnç göstermeden süperiletken durumda olacaktır. Sistemde meydana gelecek arıza sonucu oluşan akım değeri süperiletken malzemenin kritik akım değerini aştığı zaman, süperiletken normal çalışma durumundan çıkarak, hatta seri olarak bağlanan yüksek bir direnç ile akımı sınırlayacaktır. Rezistif bir SFCL'nin şebekeye bağlanmış eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de gösterilen kaynak şebekeyi, R_h ve L_h iletim hattının direnç ve endüktansını, R_{sc} değişken SFCL direncini ve R_k koruma direncini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi koruma direnci süperiletken kısma paralel bağlanmaktadır. Paralel direnç kullanmanın amacı, SFCL'yi korumak, söndürme sırasında sıcak noktalardan kaçınmak, sınırlama akımını ayarlamak ve hızlı akım sınırlamaları nedeniyle aşırı gerilimleri önlemektir. Rezistif SFCL, Endüktif olanlara kıyasla çok daha küçük ve hafiftir.



Şekil 1. Rezistif SFCL eşdeğer devresi (Terzioğlu, 2017)

Literatürde kullanılan rezistif SFCL'lerin SIMULINK modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu modelde kullanılan SFCL'ye ait parametreler Tablo 1'de verilmektedir (Alaifi ve diğ., 2014; Sung ve diğ., 2009). Bu modelin alt sistemi tasarımında geçiş/tepki süresi, minimum ve maksimum empedans, iyileşme süresi ve tetikleme akımı olmak üzere 4 temel parametre kullanılır. Bu çalışmada SFCL alt sistemlerinde kullanılan yöntemin etkisini incelemek amacıyla tetikleme akımı, minimum ve maksimum empedans değerleri kullanılmıştır. Tüm benzetim modellerinde geçiş/tepki süresi ve iyileşme süreleri dikkate alınmamıştır. 550 A kritik akımda SFCL etkisinin daha net görünmesi için süperiletkenin direnci tüm modellerde 60Ω olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile oluşturulan alt sistem SFCL'nin modellenmesinde önemli bir yer almakta olup SFCL'nin sisteme tepkisini çok önemli bir ölçüde etkilemektedir. Literatürde kullanılan alt sistem (Şekil 2'de sarı ile gösterilen blok), bu çalışmada klasik model (adım direnç) olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada en çok kullanılan klasik model ile Lookup Table ve eğri uydurma yöntemleri karşılaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 2. Rezistif SFCL SIMULINK modeli

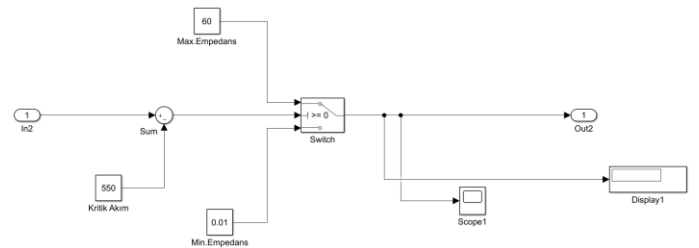
SFCL'nin sisteme etkilerini incelemek için kullanılan en genel model Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu model SFCL'lerin gerçek güç sistemlerine dahil edilmeden önce sistemdeki arıza akımlarına etkileri, sistemin açılı ve gerilim kararlılıklarının davranışlarını, SFCL'lerin optimum parametre ve yer yerleşimlerinin tespiti için kullanıldıklarından gerçek uygulamalarında bulunan bazı büyüklüklerin ihmalleri söz konusudur (termal etkiler, sıcaklık değişimi, soğutmanın getireceği ek yük ve alternatif akım kayıpları). Bu büyüklüklerin katılması sistemdeki etkinin davranışını etkilememekte (değerlerini etkilememekte) olup benzetim zamanını büyük ölçüde arttırmaktadır. MATLAB/SIMULINK'te değişken direnç bulunmamaktadır. Bu sebeple, süperiletkenlerin $E-J$ güç yasalarını benzetim modeline entegre etmek için akım ölçme bloğu ve kontrollü gerilim kaynağı kullanılmaktadır. Akım ölçme bloğu sürekli olarak sistemden geçen akımın etkin değerini ölçerek bu bilgiyi alt sisteme aktarmaktadır. Alt sistem bu değere göre bir çıkış sinyali üretmekte ve harmonik etkilerinden kurtulmak için bir filtreye bağlanmaktadır. Son olarak kontrollü gerilim kaynağına giriş olan bu sinyal SFCL'nin terminal gerilim değerini belirlemektedir. Bu yöntemin kullanımı SFCL'nin değişken direncinin modellenmesini sağlamaktadır. Alt sistem bu modelde SFCL'nin davranışını çok önemli ölçüde etkilemektedir. Bu amaçla alt sistemde kullanılan klasik yöntem ve bu yöntemle alternatif olabilecek Lookup Table ve eğri uydurma yöntemleri açıklanacaktır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan temel SFCL parametreleri (Alaifi ve diğ., 2014; Sung ve diğ., 2009)

Parametreler	Değerler
Minimum Empedans	0.01Ω
Maksimum Empedans	20Ω
Tetikleme Akımı	550A

2.1. Klasik Model

Klasik modelde kullanılan alt sistem Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu modelde girişten alınan sistemin etkin akım değeri SFCL'nin kritik akım değeri ile karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla bir çıkarma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu çıkarma işleminin sıfırdan büyük veya küçük olmasının tespiti bir switch bloğu yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu çıkarma işleminin sıfır veya eksi çıkması, sistemde müdahale edilecek bir arızanın olmadığını ve SFCL'nin süperiletken fazda olduğunu göstermektedir. Bu sebeple kontrollü gerilim kaynağına aktarılacak empedans değeri SFCL'nin minimum empedans değeridir. Bu çıkarma işleminin pozitif olması ise SFCL'nin süperiletken fazdan normal faza geçiş yaptığının göstergesidir. Bu durumda ise kontrollü gerilim kaynağına aktarılan değer SFCL'nin maksimum empedans değeridir.



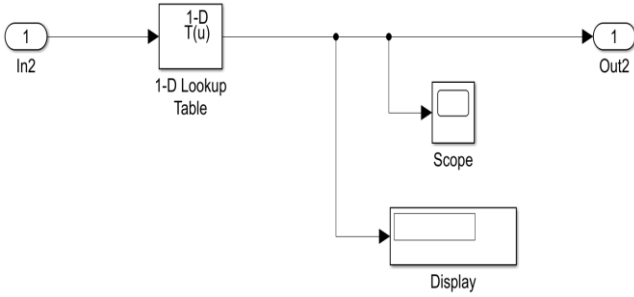
Şekil 3. Klasik modele ait SFCL SIMULINK alt sistemi

Maksimum değer kontrolü gerilim kaynağına giriş yapması, sistemde kısa devre akımını besleyen kaynağın etkisini

azaltarak kısa devre akımını sınırlamaktadır. Bu modelin eksik tarafı süperiletkenlerin lineer olmayan $V-I$ karakteristiklerinin hesaba katmamasıdır. Sistem ya minimum empedanstır ya da maksimum empedanstır. Bu sebeple bu yöntemin diğer bir adı adım direnç yöntemidir.

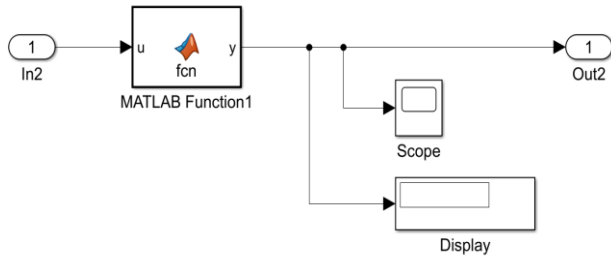
2.2. Lookup Table Modeli

Süperiletkenlerin lineer olmayan $V-I$ karakteristiklerini modele dahil etmek için alt sistemde önerilen bir yöntem Lookup Table bloğunun kullanıldığı modeldir. Bu modelin alt sistemi Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu blok istenilen sayıda giriş değerine karşılık istenilen çıkışın verilebildiği bir bloktur. Lookup Table bloğu ile rezistif SFCL'nin alt sistemi tasarlanırken gerçek süperiletken kablo davranışlarından yararlanılmıştır. Bu yöntem süperiletkenin farklı akım seviyelerinde sisteme karşı gösterdiği değişken direnç değerlerinin alınması esasına dayanmaktadır. Klasik model ile karşılaştırılabilmesi için bu modelde Lookup Table bloğuna kritik akım değerine yakın olan 460 A'e kadar çıkış empedansı 0.01 Ω , bundan sonra ise 550 A'de 60 Ω olacak şekilde eksponansiyel davranış gösterecek değerler girilmiştir.



Şekil 4. Lookup Table modeline ait SFCL SIMULINK alt sistemi

2.3. Eğri Uydurma Modeli



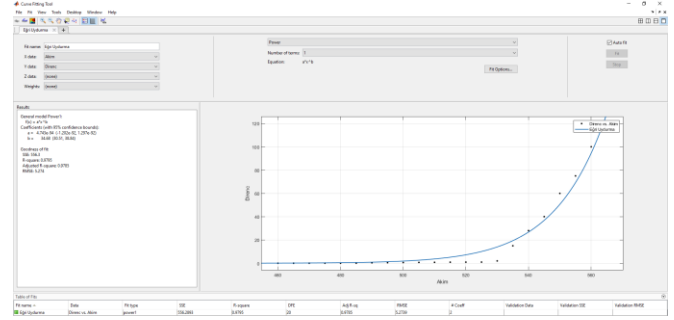
Şekil 5. Eğri uydurma modeline ait SFCL SIMULINK alt sistemi

Alt sistemde kullanılması önerilen diğer bir blok ise Matlab Function bloğudur. Matlab Function bloğu, içerisine yazılan komutlar doğrultusunda çıkış verebilen bir bloktur. Bu bloğun kullanıldığı alt sistem Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu amaçla Lookup Table modelinde kullanılan verilerin denklemleri MATLAB CFTOOL yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 6'da eğri uydurma işleminin yapıldığı CFTOOL'a ait bir ekran görüntüsü gösterilmektedir. Bu araç ile istenilen veriler tanımlandıktan sonra, verilere en uygun eğri uydurma işlemi kullanıcının istediği denklem biçiminde gerçekleştirilmektedir. Bu eğri uydurma işlemi sonrası, "R-square" parametresi uydurulan eğrinin doğruluk oranını göstermekte olup bu çalışma için 0.9795'tir. Bu yöntem ile her türlü süperiletken kablunun deneysel ortamda ölçülen gerçek verilerine ait denklemler elde

edilerek MATLAB/SIMULINK'e entegrasyonu mümkündür. Bu yöntem sonucunda elde edilen ve Matlab Function bloğuna girilen denklemler Tablo 2'de gösterilmiştir.

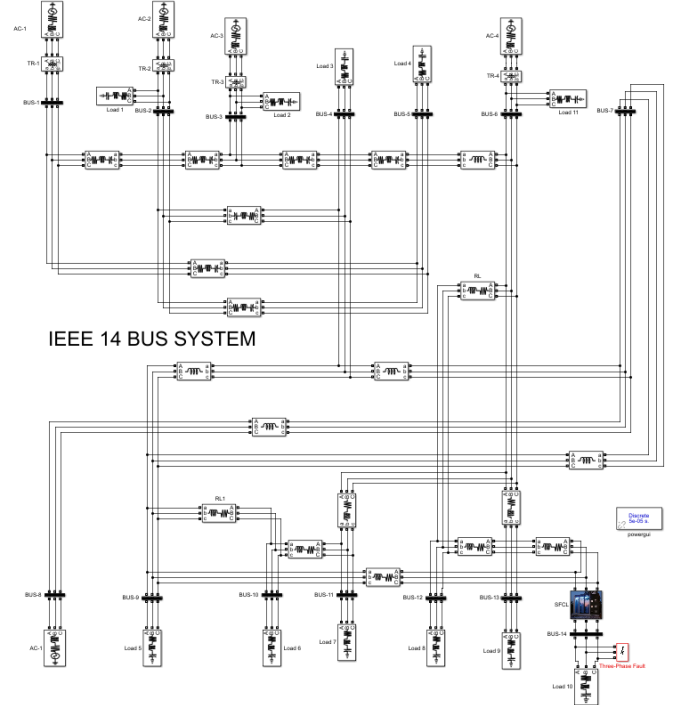
Tablo 2. Eğri uydurma sonucunda elde edilen denklemler

Akım (A)	Direnç Denklemi (Ω)
Akım \leq 455	$R=0.01$
$455 < \text{Akım} \leq 565$	$R=4.74 \cdot 10^{-94} \cdot \text{Akım}^{34.68}$
$565 < \text{Akım} < 5000$	$R=4.2 \cdot \text{Akım} + 7$



Şekil 6. MATLAB CFTOOL ekran görüntüsü

3. 14 Baralı IEEE Sistemi ve Benzetim Sonuçları



Şekil 7. IEEE 14 baralı sistem

Öncelikle IEEE 14 baralı sistemin MATLAB/SIMULINK modelinin normal işletme koşullarında 14. baraya ait akım ve gerilim seviyeleri incelenmiştir. Sisteme ait hat parametreleri <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>'dan alınmış olup MATLAB modeli Şekil 7'de gösterilmektedir. Arızalar tek-faz toprak, faz- faz, iki faz-toprak ve dengeli üç faz arızası olmak üzere dört kısımda sınıflandırılır. Bu çalışmada, hem sistemlerde en çok meydana gelen kısa devre çeşidi olması hem de elde edilen simülasyon grafiklerinde SFCL'nin etkisinin daha anlaşılır olması açısından tek faz toprak kısa devresi tercih edilmiştir. Bu sistemde kısa devrenin meydana geleceği yer olarak 10 (14. baraya bağlı yük) numaralı yük seçilmiş olup hata

bloğu eklenerek tek faz toprak kısa devresi oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm SFCL modelleri 3 fazı koruyacak yapıdadır. SFCL'nin kısa devreye etkisini görmek amacıyla sonuçlarda sadece kısa devrenin olduğu faza ait sonuçlar verilmiştir. Sistemin kısa devre durumunu incelendikten sonra 14. baradan önce farklı tip rezistif SFCL modelleri eklenerek sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir.

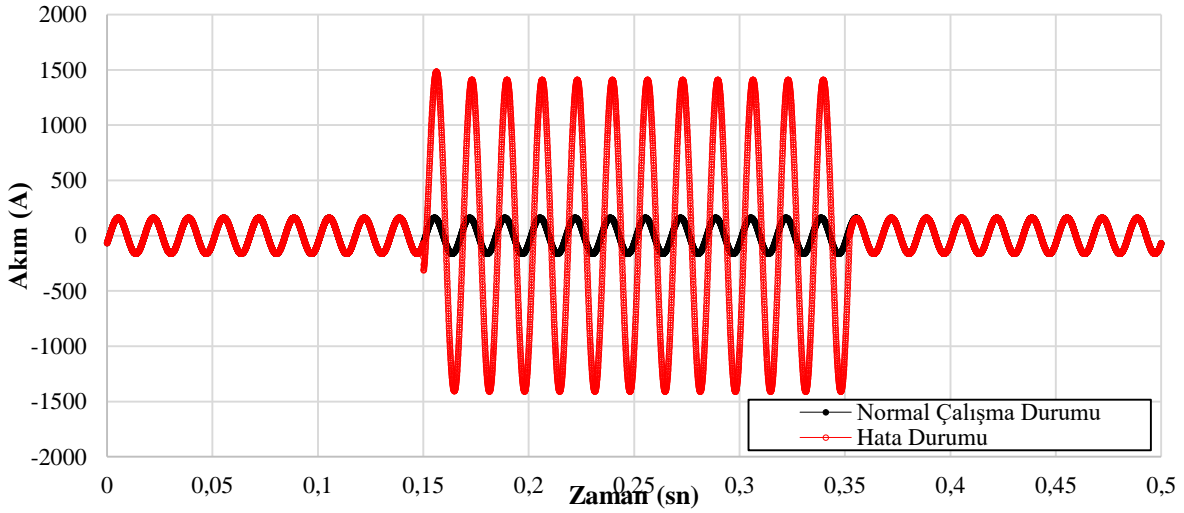
IEEE 14 baralı sistemde 14. baraya ait normal işletme koşullarında [0-1s] A fazına ait akım grafiği Şekil 8'de verilmiştir. 14. baranın nominal akım değerinin 162.7 A olduğu gözlemlenmektedir. Daha sonra sisteme [0.15s-0.35s] zaman aralığında aktifleşen hata bloğu bağlanarak tek faz-toprak kısa devresi oluşturulmaktadır. Kısa devrenin sebep olduğu büyük arıza akımının 14. bara üzerindeki olumsuz etkileri benzetim sonuçlarında net bir şekilde görülmektedir. IEEE 14 baralı Simulink modelinde sistemde oluşan hata sonucunda nominal çalışma akımı 162.7 A iken hata anında görülen maksimum akım değeri 1484 A olmaktadır. Ayrıca tek faz-toprak kısa devre öncesi, sırası ve sonrasında A fazında meydana gelen maksimum akım değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Sistemde oluşan bu seviyelerdeki hata akımları güç sistemlerinde kullanılan malzemelere ve tüketiciye ciddi zararlar

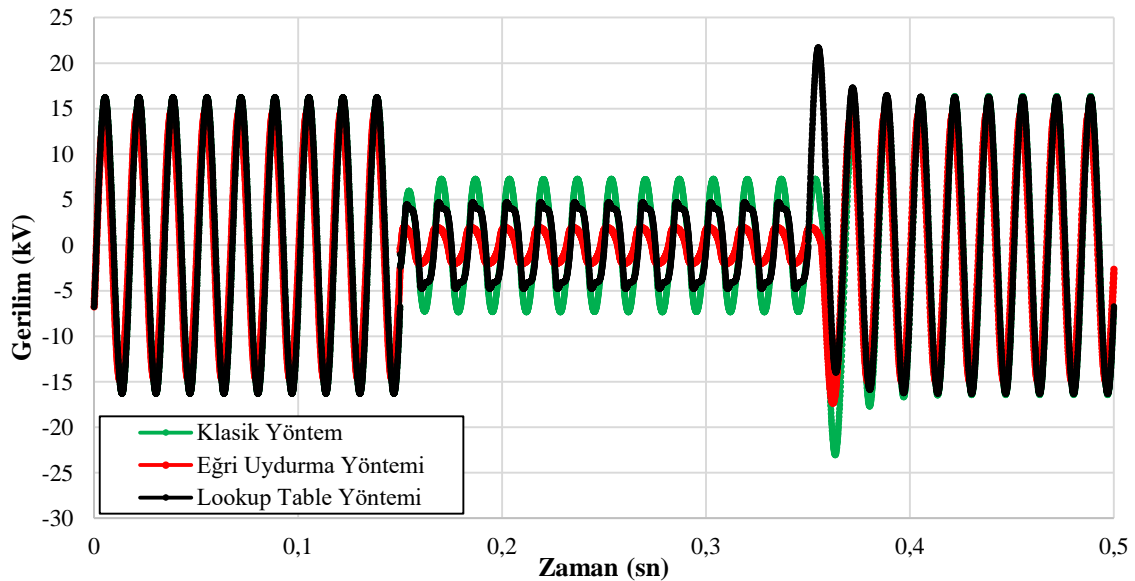
verebilir. Yüksek akımlar aşırı ısınmaya neden olarak yangın ve patlama ihtimallerini arttırmaktadır. Ayrıca sistem ekipmanlarında mekanik ve termal hasarlar oluşabilmektedir. Oluşmasını istemediğimiz bu seviyelerdeki arıza akımlarından korunmak amacıyla 3 farklı yöntem ile oluşturulmuş SFCL'ler yükten önce bağlanmıştır. Süperiletkenlerin doğal karakteristikleri gereği SFCL'nin [0-0.15s] ve [0.35-0.5s] zaman aralıklarında sisteme karşı ihmal edilebilir derecede direnç göstermesi ve [0.15s-0.35s] aralığında ise sisteme yüksek direnç göstererek akımı kabul edilebilir seviyelere (kritik akıma yakın) sınırlaması beklenmektedir.

Tablo 3. Tek faz-toprak kısa devre sırasında 14. baraya ait A fazında meydana gelen maksimum akım

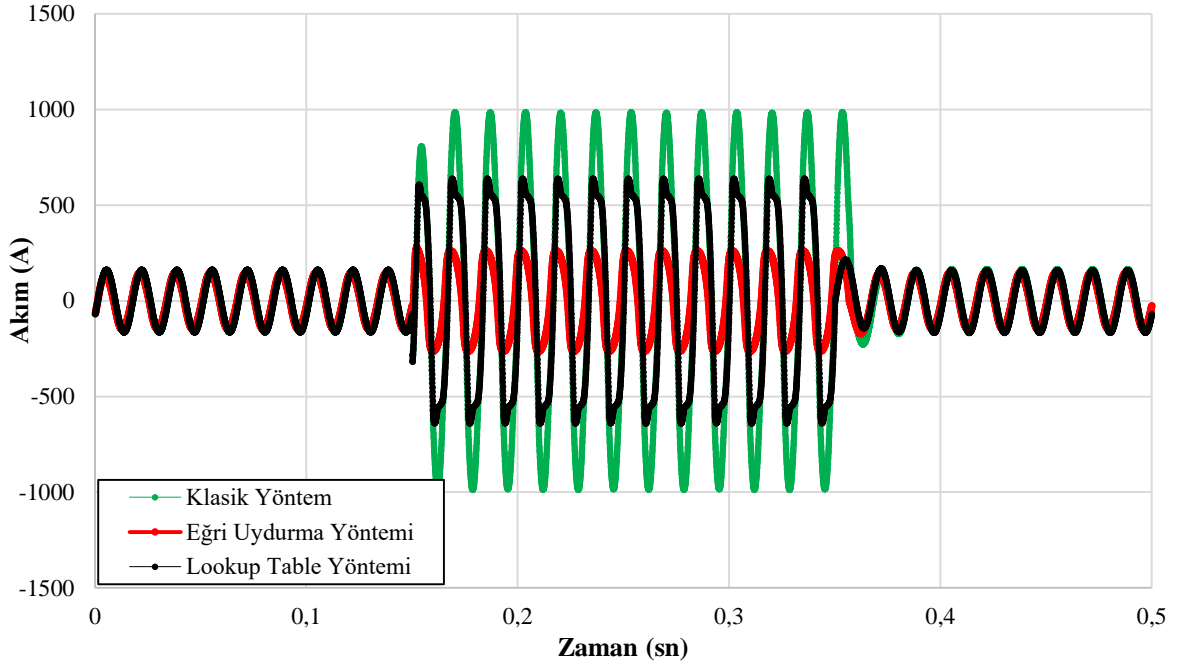
Durum	Süre (s)	Maksimum Akım Değeri (A)
Arıza öncesi durum	[0-0.15]	162.7
Arıza durumu	[0.15-0.35]	1484
Arıza sonrası durum	[0.35-0.5]	162.7



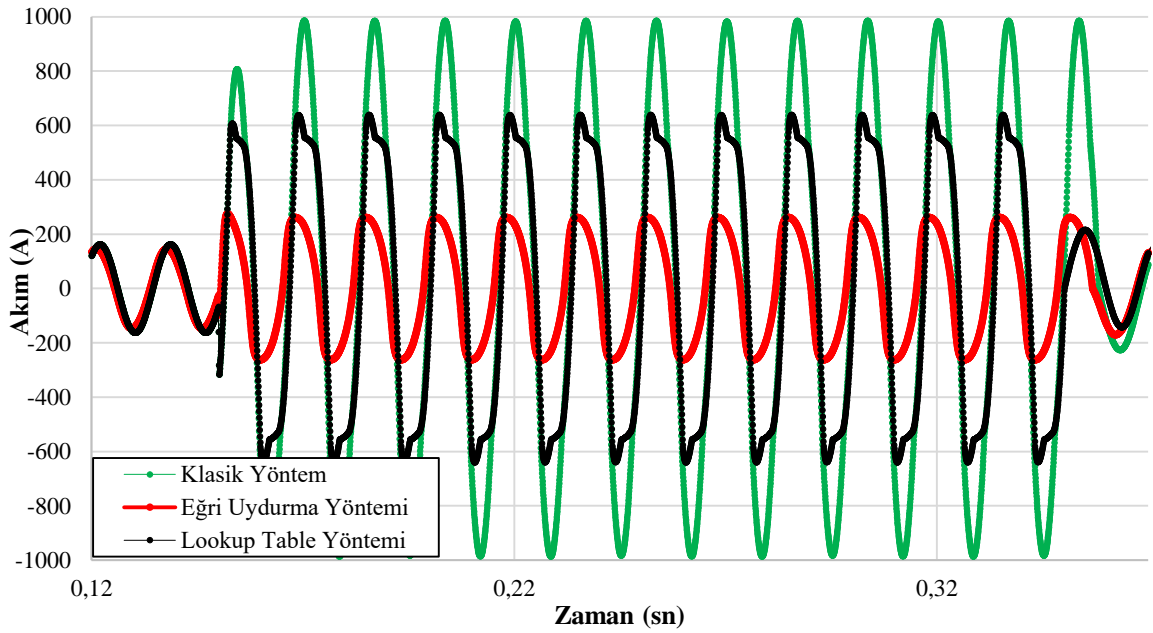
Şekil 8. Normal çalışma ve hata durumunda 14. baraya ait A fazının akım değişimi



Şekil 9. Üç SFCL modeli için 14. baraya ait A fazının gerilim değişimi



Şekil 10. Üç SFCL modeli için 14. baraya ait A fazında oluşan hata akımının değişimi



Şekil 11. Arıza akımlarının yakından görünümü

Tablo 4. Tüm durumlarda A fazında oluşan hata akımları, sınırlama oranları ve benzetim süreleri

Durum	Normal çalışma durumunda tepe değeri (A)	Arıza durumunda mevcut tepe değeri (A)	Sınırlama oranı (%)	Benzetim Süresi (s)
SFCL olmadan	162.7	1484	0	3.31
Klasik model ile SFCL	162.7	986.1	33.55	5.69
Lookup Table ile SFCL	162.7	639.3	56.92	4.84
Eğri Uydurma ile SFCL	162.7	276	81.40	5.45

Şekil 10'da kısa devre anında (0.15-0.35s) oluşan arıza akımlarının üç yöntemde de sönümlendiği fakat sönümlendirme oranlarının farklı olduğu açıkça görülmektedir. Hata anındaki akımların daha iyi görünebilmesi için Şekil 10'a yaklaşılarak Şekil 11'de gösterilmiştir. Tablo 4'te tüm durumlar için A fazında oluşan maksimum akım değerleri, hata akımı sınırlama oranları ve simülasyon süreleri verilmiştir.

Benzetim çalışmalarının yapıldığı bilgisayara ait özellikler ise Tablo 5'te verilmiştir.

Normal durumda aynı parametreler ile modellenmiş güç sistem elemanlarının sistemdeki büyüklüklere aynı etki etmesi beklenmektedir. Fakat Tablo 4'te 3 yöntem için hata sınırlama oranları karşılaştırılacak olursa kısa devre akımını en çok düşüren SFCL modelinin %81.4 ile Eğri uydurma modelinin

olduğu söylenebilir. Lookup Table ve klasik yöntem ile modellenmiş SFCL kullanımında ise hata akımı sırasıyla %56.92 ve %33,55'dir. Sonuçlardaki bu farklılıklara, modelleme esasında kullanılan blokların sebep olduğu söylenebilir.

Klasik model kullanıldığında 986.1 A olan kısa devre akımının tepe değeri, SFCL'nin kritik akımı olan 550 A'den daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuca göre SFCL, sistemde oluşan tüm hata süresi boyunca, üzerinden dirençsiz taşıyabileceği akım değerinden neredeyse iki kat büyük bir akım taşıyacaktır. Gerçek bir SFCL böyle bir akıma maruz kalacak olursa süperiletken durumdan çıkarak normal çalışma durumuna geçecektir. Bu da SFCL'lerin avantaj olarak sunduğu kayıpsız çalışma durumunu ortadan kaldıracaktır. Ayrıca normal çalışma akımından iki kata yakın akım iletecek bir SFCL bu yüksek akıma maruz kaldığında zorlanma sonucu kalıcı zararlar görecektir. Bu sebepler ile alt sisteminde klasik model kullanılan SFCL SIMULINK modellerinin gerçek sonuçları yansıtmayacağı söylenebilir.

Eğri uydurma modeli benzetim sonuçlarına bakıldığında arıza durumunda hata akımının tepe değeri 276 A olarak bulunmuştur. Bu değer, SFCL'nin kritik akım değeri olan 550 A'in yarısına yakın bir değerdir. SFCL, 550 A değerine kadar direnç göstermeyeceğinden, arıza akımını 276 A'de sabit tutması mümkün değildir. Lookup Table bloğunu kullanarak oluşturulmuş SFCL modelinde kısa devre anında hata akımının tepe değeri 639.3 A olarak bulunmuştur. Bu değer SFCL'nin kritik akım değerinden yüksek olmasına rağmen SFCL'nin arıza süresi boyunca taşıyabileceği büyüklükte bir akımdır (Kim ve diğ., 2008). Diğer iki modelin benzetim sonuçlarına kıyasla gerçek uygulamada beklenecek sonuca en uygun model Lookup Table modelidir (Kim ve diğ., 2008). Bunun sebebinin her akım değerine karşılık gelen direnç değerinin diğer modellere kıyasla daha doğru modellenmesi olarak açıklanabilir. Literatürde Lookup Table bloğunun kullanımı ile yapılmış hiçbir SFCL modeline rastlanılmamıştır. Bu sonuçlara göre SFCL'lerin güç sistemlerine dahil edildiklerinde kısa devre akımlarına olan etkilerin incelenmesinde literatürde kullanılan klasik model yerine Lookup Table modelinin kullanılması önerilmektedir.

Tablo 5. Simülasyonların Yapıldığı Bilgisayarın Özellikleri

İşletim Sistemi	Windows 10 Home 64
Mikroişlemci	Intel® Core™ i7-7700HQ (2,8 GHz taban frekansı, Intel® Turbo Boost Teknolojisi ile 3,8 GHz'e kadar, 6 MB önbellek, 4 çekirdekli)
Bellek, standart	16 GB DDR4-2133 SDRAM (2 x 8 GB)
Video Grafik	NVIDIA® GeForce® GTX 1050 (4 GB GDDR5 ayrılmış)

4. Sonuç

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devreler, şebekedeki bazı hatlardan yüksek hata akımı geçmesine, şebekedeki gerilim seviyesinin düşmesine, elektrik motorlarının torkunda bir düşüşe, frenlemesine ve düşük performansa neden olmaktadır. Ayrıca kısa devre, hat üzerinde aşırı bir güç harcanmasına sebep olduğu için ısı kaybına neden olur. SFCL'ler, güç sistem kesicilerinin müdahale edilebilir arıza akımlarıyla karşılaşmasını ve sistemin bu zararlı akımlardan görebileceği etkileri azaltabilir. Yapılan benzetim çalışmaları ile SFCL'lerin bu istenmeyen arıza akımlarını sınırlandırdığı gösterilmiştir. 3 farklı SFCL SIMULINK modeli 14 baralı IEEE sistemine bağlanarak kısa

devre akımları incelenmiştir. Klasik yöntem ile kısa devre akımı %33.55 oranında sönümlenmekte olup benzetim süresi 5.69 sn'dir. Lookup table ve Eğri uydurma modellerinde ise sırasıyla kısa devre akımı %56.92 ve 81.40 oranında sönümlenmiştir. Önerilen iki yöntemin benzetim süreleri klasik modelden düşüktür. Literatürdeki sonuçlar ile kıyaslandığında, klasik modelin ayırık bir davranış göstermesi gerçek sonuçları yansıtmada başarısızlığa sebep olmaktadır. Gerçek SFCL davranışına en yakın davranışı Lookup Table modelinin gerçekleştirdiği benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

SFCL uygulamasının en büyük dezavantajı soğutma sistemi kullanımınıdır. Eğer soğutma sistemi düzgün çalışmazsa, SFCL sisteme karşı arıza olmamasına rağmen yüksek direnç gösterebilir ve bu durum hem tüketici hem de üretici açısından istenmeyen bir durumdur. SFCL uygulamasının gelişimi süperiletken teknolojisinin gelişimi ile doğrudan ilişkilidir. Oda sıcaklığında süperiletken malzeme araştırmaları SFCL uygulamaları için büyük önem arz etmektedir. Genel olarak SFCL'nin boyutunun standart güç transformatörleri kadar olması, hızlı şekilde sisteme müdahale etmesi, kararlı ve güvenilir olması sebebiyle gelecekte güç sistemlerinde sıklıkla kullanılması beklenmektedir.

Kaynakça

- Ahmed, M. M. R. Putrus, G. A., Li, R. Li & Xiao, L. J. (2004). Harmonic analysis and improvement of a new solid-state fault current limiter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 (4), 1012-1019. [10.1109/TIA.2004.830774](https://doi.org/10.1109/TIA.2004.830774)
- Alaraifi, S., El Moursi, M. & Zeineldin, H. (2014) Optimal allocation of HTS-FCL for power system security and stability enhancement, *IEEE Trans Power Syst* 28(4):4701–4711. [10.1109/PESGM.2014.6939409](https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939409)
- Fahnoe, H. H. (1970). Taking advantage of high-voltage fuse capabilities for system protection, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, 6 (5), 463-471. [10.1109/TIGA.1970.4181216](https://doi.org/10.1109/TIGA.1970.4181216)
- Gökçek, T, Ateş, Y. (2019). Dağıtık Güç Üretimine Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 216-228. DOI: 10.31590/ejosat.521350
- Jiajun ve diğ. (2018). Simulation of a DC Superconducting Fault Current Limiter for the Design of Online Monitoring System. *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 10-13 Eylül, Greece. [10.1109/ICHVE.2018.8642248](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642248)
- Khan, U. A., Seong, J. K., Lee, S. H., Lim, S. H. & Lee, B. W. (2011). Feasibility analysis of the positioning of superconducting fault current limiters for the smart grid application using simulink and simpowersystem, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21 (3). [10.1109/TASC.2010.2089591](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2089591)
- Kheybargir, D., Heydari, H. & Babadi, A. N. (2016). Effects of resistive SFCL on frequency stability of synchronous generators, *International Power System Conference*, Iran.
- Kim, J. H., Park, M., Ali, M. H., Kim, A. R., Lee, S. R., Yoon, J. Y., Cho, J., Sim, K. D., Kim, S. H. & Yu, I. K. (2008). A SFCL modeling and application with real HTS material connecting to real time simulator, *Physica C*, 468, 2067–2071. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.128>

- Lee, B. W., Sim, J., Park, K. B. & Oh, I. S. (2008). Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power systems, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18 (2), 620-623. [10.1109/TASC.2008.920784](https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920784)
- Nasiri, A. & Barahmandpour, H. (2006). Fault current limitation of ramtin power plant, *21st International Power System Conference (PSC)*, Tehran.
- Peddakapu, K., Mohamed, M.R., Sulaiman, M.H., Srinivasarao, P. Rajasekhar Reddy, S. (2020). Design and simulation of resistive type SFCL in multi-area power system for enhancing the transient stability, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 573 1353643. [10.1016/j.physc.2020.1353643](https://doi.org/10.1016/j.physc.2020.1353643)
- Peelo, D. F., Polovick, G. S., Sawada, J. H., Diamanti, P., Presta, R., Sarshar, A. & Beauchemin, R. (1996). Mitigation of circuit breaker transient recovery voltages associated with current limiting reactors, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (2), 865-871. [10.1109/61.489345](https://doi.org/10.1109/61.489345)
- Seyedi, H. & Tabei, B. (2012). Appropriate placement of fault current limiting reactors in different hv substation arrangements, *Circuits and Systems*, 3, 252-262. <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2012.33035>
- Sung, B. C., Park, D. K., Park, J. W. & Ko, T. K. (2009). Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: modeling, simulation, and experimental verification, *IEEE Trans Ind Electron* 56(7):2412–2419. [10.1109/TIE.2009.2018432](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2018432)
- Şen, M, Özcan, M. (2020). Implementation of Simulation of Possible Short Circuit Fault Situations in Wind Energy Plants By Power Analysis Program. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Özel Sayı 2020 (ICCEES), 196-201. DOI: 10.31590/ejosat.803127
- Terzioğlu, R. (2017). Merkez iletkeni bakır olan süperiletken CORC kabloların alternatif akım kayıpları, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Website: Power system test case archive, Erişim Tarihi: 20.12.2020 <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- Zadeh, M. R. D., Pasand, M. S. & Kadivar, A. (2008). Investigation of neutral reactor performance in reducing secondary arc current, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 23 (4), 923089. [10.1109/TPWRD.2008.923089](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923089)
- Zhang, J. J., Liu, Q., Rehtan, C. & Rudin S. (2006). Investigation of several new technologies for mega city power grid issues, *International Conference on Power System Technology*, Chongqing, 22-26 Ekim 2006.
- Zhang, X., Ruiz, H. S., Gen, J., Shen, B., Fu, L., Zhang, H. & Coombs, T. A. (2016). Power flow analysis and optimal locations of resistive type superconducting fault current limiters, *SpringerPlus*, 5:1972. Doi: 10.1186/s40064-016-3649-4
- Zhua, J., Zhen, X., Qiu, M., Zhang, Z., Li, J. & Yuan, W. (2015). Application simulation of a resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) in a transmission and wind power system, *Energy Procedia* 75, 716-721. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.498>