

## Rezistif Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcı MATLAB/Simulink Modeli ve Uygulaması

Buğra YILMAZ<sup>1\*</sup>, Muhsin GENÇOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> b.yilmaz@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 29/12/2022;

Kabul/Accepted: 01/05/2022)

**Öz:** Günümüzde, nüfus artışı, yerleşim yerlerinin ve endüstriyel alanların genişlemesi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrik tüketiminde önemli bir artış görülmektedir. Buna paralel olarak üretim kapasitelerinin de artması ile elektrik güç sistemlerinde çeşitli sebeplerle meydana gelen arızaların sebep olduğu yüksek akım seviyeleri, sistemdeki elemanlar için tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Arıza akımlarının sınırlandırılması, bu akımların zorlayıcı termal, dinamik ve elektromanyetik etkilerinden sistemin ve sistem elemanlarının korunmasını sağlar. Bu çalışmada, modern arıza akımı sınırlandırma yöntemlerinden biri olan Rezistif Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcıların (R-SFCL) yapısı ve çalışma prensibi incelenmiştir. Ayrıca, bir R-SFCL tasarımı yapılmış ve oluşturulan deney sisteminde arızalar gerçekleştirilerek elde edilen gerçek veriler ile MATLAB/Simulink’de gerçekleştirilen simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Arıza akımı, Arıza akımı sınırlandırma, Rezistif SFCL, Simülasyon, Tasarım.

### Resistive Superconductor Fault Current Limiter MATLAB/Simulink Model and Application

**Abstract:** Today, there is a significant increase in electricity consumption with population growth, expansion of residential areas and industrial areas, and the development of technology. Parallel to this, with the increase in production capacity, high current levels caused by faults in the system for various reasons create dangerous situations for the system and the elements in the system. Limitation of fault currents provides protection of the system and system elements from the compelling thermal, dynamic and electromagnetic effects of these currents. In this study, the structure and working principle of Resistive Superconducting Fault Current Limiters (R-SFCL), which is one of the modern fault current limiting methods, are investigated. In addition, the real data obtained by performing the R-SFCL design in the laboratory environment and performing the faults in the created experimental system, and the simulation results performed with MATLAB/Simulink are compared.

**Key words:** Fault current, Fault current limitation, Resistive SFCL, Simulation, Design.

### 1. Giriş

Güç sistemleri çok geniş alanlara yayıldığı için bu sistemlerde, manevra hareketleri, atmosferik olaylar, canlıların teması veya diğer dış etkenler nedeniyle çeşitli arızalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu arızalar sırasında, arıza akımı nominal akımın 5 ile 20 katına kadar çıkabilmektedir [1] ve yüksek seviyeli arıza akımları sisteme ve sistem elemanlarına geri dönüşü olmayan zararlar verebilmektedir. Bu yüzden güç sistemi kesicileri arıza akımını mümkün olan en kısa sürede kesmek zorundadır. Ancak açma hızı yüksek kesiciler, arıza akımlarının DC bileşeninin etkisi ile daha büyük arıza akımlarıyla karşı karşıya kaldıklarında, teknik ve ekonomik problemler meydana gelmektedir. Elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla güç sistemlerine eklenen yeni sistemler, arıza akımı seviyelerini giderek artırması sonucunda tipik yüksek gerilim kesicilerinin kesme yeteneğini aşacaktır [2]. Bu durumda arıza temizlenmesi, izolasyonun sağlanması ve güç sisteminin güvenliği için yeni ve daha büyük elemanlara ihtiyaç duyulacaktır. Bahsedilen sorunları ortadan kaldırmak için çeşitli arıza akımı sınırlandırma yöntemleri geliştirilmiştir.

Arıza akımı sınırlayıcılar (FCL-Fault Current Limiters), güç sistemlerinde meydana gelen büyük arıza akımlarını sınırlandırarak ve tehlikeli olmayacak seviyede tutarak, arıza akımlarının sisteme verebileceği zararlı etkileri önleyen elemanlardır. Akım sınırlandırma reaktörleri ve yüksek empedanslı transformatörler gibi geleneksel yöntemler normal çalışma şartlarında gereksiz güç kaybı ve gerilim düşümüne neden olurken, yeni nesil arıza akımı sınırlayıcıları, arıza durumu oluşuncaya kadar düşük bir empedans gösterirler [2]. Ancak herhangi

\* Sorumlu yazar: byilmaz@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1910-1816, <sup>2</sup> 0000-0002-1774-1986

bir arıza anında yüksek empedans göstererek arıza akımını sınırlarlar. Böylece normal çalışma sırasında sistemde ihmal edilebilir bir güç kaybı oluşur ve büyük gerilim düşümleri meydana gelmez.

Geliştirilen modern yöntemlerden biri olan SFCL, süperiletken malzemenin süperiletken ve rezistif bölgeleri arasındaki geçiş özelliğini kullanarak arıza akımını etkin ve hızlı bir şekilde sınırlamaktadır [3]. Bu özelliği ile SFCL, arıza akımı seviyesini sınırlar ve böylece hem kesicileri hem de güç sistemi bileşenlerini korumaktadır [4] [5] [6] [7]. Son yıllarda güç elektroniği anahtarları kullanan hibrid SFCL tipleri geliştirilmiş olsa da, SFCL Rezistif ve İndüktif Tip olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Bu iki tip arasında, Rezistif SFCL (R-SFCL), İndüktif SFCL'ye (I-SFCL) kıyasla düşük maliyet, küçük boyut, basitlik ve daha az bakım gibi avantajlara sahiptir [8] [9] [10]. Öte yandan, I-SFCL, ağır olan ve demir kayıplarına neden olan bir demir çekirdeğe sahiptir. Ayrıca, bazen manyetik alan girişimi ve harmonikler de üretirler. Avantajları, R-SFCL'yi güç sistemi uygulamalarında önemli bir noktaya taşımakta ve R-SFCL birçok ülkede giderek daha popüler hale gelmektedir [11] [12] [13] [14].

R-SFCL, süperiletken malzemenin doğal karakteristiğine dayandığı için gösterdiği hızlı tepki ile sınırlandırma işlemini ilk yarım periyot içerisinde gerçekleştirmektedir. Arıza sırasında sistemde akacak olan akım R-SFCL'nin kritik akımını aştığı anda, süperiletken malzeme rezistif duruma geçecek ve sınırlama işlemini yapacaktır. Arıza sona erdiğinde ise kriyojenik (özel soğutma) sistemiyle rezistif durumdaki malzeme kısa sürede süperiletkenlik bölgesine geçecektir. Böylece normal işletme durumunda ve arıza temizlendikten sonra, akım sınırlayıcı reaktörlerin ve yüksek empedanslı transformatörlerin aksine ihmal edilebilir gerilim düşümü ve güç kayıplarına neden olacaktır.

Literatürde de R-SFCL hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Leung tarafından, rezistif SFCL ve indüktif SFCL teorik olarak ele alınmıştır. Daha sonra PSCAD yardımıyla oluşturulan sistemdeki doyurulabilir çekirdekli indüktif SFCL'nin ters elektromotor kuvveti incelenmiştir [1].

Khan vd. tarafından, Güney Afrika ulusal şebekesinde arıza akımı seviyelerinin kontrolü için Rezistif SFCL ile kullanılan geleneksel yöntemlerin finansal ve işletme açısından karşılaştırılması yapılan bir çalışmada, seçilen trafo merkezinin modeli oluşturulmuştur. Geleneksel yöntemler olarak, hava çekirdekli reaktör, yüksek empedanslı transformatör ve sistem elemanlarının yükseltilmesi ele alınmıştır. Modeller fotovoltaiik sistem ve senkron generatör ile yapılmıştır. SFCL'nin yatırım maliyetinin yüksek, ancak soğutma sistemi için gerekli olan enerjinin, hava çekirdekli reaktörün ve yüksek empedanslı transformatörün normal işletme sırasında harcadıkları enerjiye göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır [15].

Martini vd. tarafından, 1 MVA, üç fazlı rezistif SFCL prototipinin bazı elektriksel testlerinin yapıldığı bir çalışmada, 15.5 kA'lık bir kısa devre akımı 30-100 ms arasında süperiletken malzemeye uygulanmıştır. SFCL'nin akımı ve gerilim düşümü, 3.2 kV<sub>rms</sub> ve 65 °K sıcaklıkta, süperiletkenin direncinin değişimi ise 350 V<sub>rms</sub> ve 65 °K sıcaklıkta deneysel olarak gözlemlenmiştir [16].

Aly ve Mohamed tarafından, akım sınırlama yetenekleri açısından rezistif SFCL ve indüktif SFCL'yi karşılaştıran bir çalışmada, sınırlayıcıların yapıları incelenmiş ve eşdeğer devreleri elde edilmiştir. Aynı süperiletken malzemeler kullanılan bu iki sınırlayıcı aynı sistemde MATLAB/Simulink ile modellenerek arıza akımına olan etkileri, direnç ve sıcaklık değişimleri vb. sonuçlar elde edilmiştir [17].

Nemdili ve Belkhiat tarafından, rezistif SFCL'nin MATLAB/Simulink'de modellenmesinin ve simülasyonunun yapılması için öncelikle temel prensibinin ele alındığı çalışmada; sıcaklık, manyetik alan ve akım yoğunluğu ilişkisi incelenmiştir. MATLAB'da oluşturulan devrede öncelikle, SFCL'siz olarak arıza akımının ve kaynak geriliminin değişiminin dalga şekli elde edilmiştir. Daha sonra SFCL modülünün eklenmesi ile alınan sonuçlar SFCL'siz devredeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [18].

Fedasyuk ve Serdyuk tarafından, Rezistif SFCL'nin, FEMLAB ve MATLAB/Simulink birlikte kullanılarak modellendiği bir çalışmada, termal ve elektriksel karakteristiğinin matematiksel modeli elde edildikten sonra FEMLAB'da birbirleriyle olan bağlantıları kurulmuştur. Simulink'de tanımlanan bu modelle yapılan simülasyonlarda, SFCL'nin arıza akımının genliğine olan etkisi incelenmiştir [19].

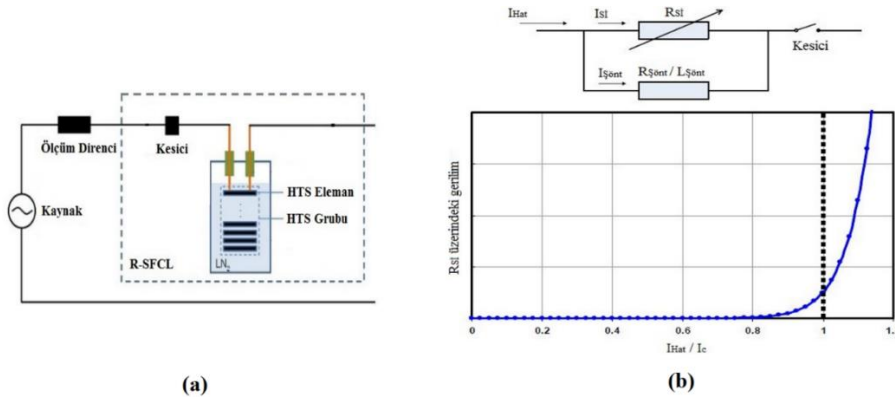
Rai vd. tarafından, SFCL'nin akıllı şebekedeki uygulamalarını ele alan bir çalışmada, öncelikle MATLAB/Simulink ile bir mikro şebeke modellenmiştir. Daha sonra ise üç fazlı rezistif SFCL'nin ana parametreleri göz önüne alınarak modellenmesi yapılmıştır. Farklı arıza noktaları belirlenerek yapılan simülasyonlarda, SFCL'nin yerinin arıza akımına ve faz gerilimlerine olan etkileri gözlemlenmiştir [20].

Bu çalışmada, kısa uzunlukta süperiletken şerit içeren örnek bir R-SFCL prototipi oluşturularak laboratuvar ortamında sınırlandırma analizi yapılmıştır. Bu prototip, R-SFCL'nin ülkemizdeki dağıtım ve iletim sistemleri için daha yüksek akım-gerilim seviyelerinde yeterli süperiletken uzunluğu ile güvenilir ve tercih edilmesi gereken bir sınırlandırma yöntemi olduğunu göstermektedir. R-SFCL'nin sağladığı yüksek verimlilik ve sınırlandırma performansının yanı sıra güç sistemlerimizde sadece nötr arızalarına tepki veren nötr direnç/bobinleri olduğu düşünülürse, bu modern yöntemin kendi sistemlerimize kazandırılması gelecek hedeflerimizden biridir.

Çalışma içeriğinde; ilk bölümde literatür taramış yapılmış olup ikinci bölümde R-SFCL yapısı ve çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışma sırasında kullanılan materyal ve metot hakkında bilgiler verilirken dördüncü bölümde MATLAB/Simulink modeli ele alınmıştır. Son olarak, beşinci bölümde deneyler sırasında elde sonuçlar ile simülasyon sonuçları gösterilmiştir, altıncı bölümde ise genel sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. Rezistif SFCL

R-SFCL, diğer tiplere göre daha basit yapı, daha küçük boyut ve daha düşük yatırım maliyeti vb. avantajlara sahiptir. Normal çalışma sırasında, süperiletken malzeme süperiletkenlik durumundadır ve nominal akım teorik olarak kayıpsız iletilmektedir. Arıza durumunda, akım hızla yükselir ve süperiletken malzeme süperiletkenlik bölgesinden çıkar. Böylece meydana gelen non-lineer direnç değeri arıza akımını sınırlandırmış olur [21]. İdeal olarak, yeni başlayan arıza akımı yarım periyottan daha kısa süre içerisinde sınırlanır. Şekil 1 (a)'da R-SFCL devresi ve Şekil 1 (b)'de devre akımı  $I_{Hat}$ 'ın, süperiletken malzemenin kritik akımı  $I_c$ 'ye oranının bir fonksiyonu olarak süperiletken direnci  $R_{si}$  üzerindeki gerilim gösterilmiştir. Burada süperiletken üzerindeki akım ve direnç arasındaki non-lineer ilişki görülmektedir. Bu eğri için veriler, süperiletken sabit manyetik alan ve sabit sıcaklıktayken kaydedilmiştir [1].



Şekil 1. (a) R-SFCL devresi (b)  $I_{Hat}/I_c$ 'nin fonksiyonu olan  $R_{si}$  üzerindeki gerilim [1]

Şekil 1 (b)'deki devrede gösterilen paralel kol üzerindeki eleman, bazı uygulamalarda süperiletken üzerindeki gerilimi sınırlandırmak için kullanılmaktadır. HTS (High Temperature Superconductors) gruplarındaki elemanlar gerilim seviyesi yükselirken birbirine seri, akım seviyesi artarken ise paralel olarak bağlanır. HTS malzemeler için iletken boyunca  $1 \mu V/cm$  gerilim düşümüne neden olan akım, kritik akım olarak tanımlanmaktadır [22]. Arıza durumunda akım veya sıcaklık, süperiletkenin kritik değerinden büyük bir değere ulaşınca malzeme rezistif bölgeye geçiş yapar. Böylece arıza akımının genliği çok kısa sürede sınırlanır. Arıza ortadan kalktıktan sonra süperiletken malzemenin arıza öncesindeki karakteristiğine getirilmesi için hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Aksi takdirde sistemde dikkate değer gerilim düşümü ve kayıplar oluşacaktır. Bu nedenle kriyojenik sistem en kısa süre içerisinde süperiletkeni kritik sıcaklığının altına soğutabilmelidir. Arızadan sonra kritik sıcaklığın altına inişe kadar geçen süreye toparlanma süresi (recovery time) adı verilir. R-SFCL uygulamalarında bu süre kısa tutulması gereken önemli bir tasarım parametresidir. R-SFCL yapısındaki kriyojenik sistemin maliyeti yüksek olup normal işletme sırasında da R-SFCL'nin enerji harcamasına neden olmaktadır. R-SFCL, sınırlama işlemi sırasında güç akışının devam etmesi, arızadan sonra kendiliğinden nominal çalışma durumuna geçmesi, kompakt olması, harmonik üretmemesi, çevreye zarar vermemesi ve yanmaz olması gibi özelliklere sahiptir [23]. Rezistif olması sayesinde ayrıca, X/R oranını azaltarak arızanın DC bileşeninin etkisini kısa tutmaktadır.

R-SFCL uygulamaları için BSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide), YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) ve  $MgB_2$  (Magnesium Diboride) dâhil olmak üzere birçok süperiletken malzeme kullanılmıştır. 2001 yılında keşfedilen  $MgB_2$ 'nin nispeten düşük maliyeti ve mekanik sağlamlığı nedeniyle uygulaması artmaktadır. Ancak, YBCO ve BSCCO ile karşılaştırıldığında çok daha düşük bir kritik sıcaklığa sahiptir [24]. YBCO, BSCCO'ya kıyasla daha hızlı bir şekilde rezistif duruma geçtiği için akım sınırlama uygulamalarında tercih edilirken, BSCCO günümüzde HTS kablo yapılarında kullanılmaktadır. R-SFCL, paralel bir empedansa

sahiptir. Bu empedans, sıcak noktaları (hot-spots) azaltmak için üretim sırasında süperiletkene bağlanan iletken katmanın direncinden kaynaklanabilir [25]. R-SFCL'nin diğer bir dezavantajı hot-spot problemidir. Hot-spot, süperiletken şerit boyunca homojen bir şekilde dağılmayan  $I_c$  sebebiyle meydana gelmektedir. Şeridin bazı kısımlarında kritik akım diğer bölgelere kıyasla daha küçük olduğu için herhangi bir arıza akımı  $I_{cmin}$  (minimum kritik akım) değerini geçince, o bölge rezistif özellik kazanmasına rağmen şeridin geri kalan kısmı halen süperiletkenlik bölgesindedir. Bu yüzden şerit üzerinde bölgesel aşırı ısınmalar meydana gelebilmekte ve bu da geri dönüşü olmayan zararlar verebilmektedir. Hot-spot probleminin meydana gelme olasılığı süperiletkenin uzunluğu arttıkça daha da artmaktadır. Mesela, SuperOx firması tarafından üretilen 220 kV 1200 A'lık SFCL uygulamasında 3 faz için yaklaşık 25 km uzunluğunda süperiletken şerit kullanılmıştır [26]. Genellikle R-SFCL uygulamalarında kilometrelerce uzunluklarda süperiletken şeritler kullanıldığı düşünülürse bu problemi aşmak büyük bir önem taşımaktadır.

R-SFCL tasarımlarında ayrıca, soğutma ortamının dışına, süperiletkende harcanan enerjiyi azaltmak ve üzerine düşen gerilimi sınırlamak için süperiletkene paralel olarak bir direnç veya reaktör de bağlanabilir [27]. Aynı zamanda paralel eleman, koruma rölelerinin mevcut tasarımları ile yeterli arıza akımını tespit etmesi için, R-SFCL'nin rezistif durumunda arıza akımının kendisine yönlendirilmesini sağlayarak, R-SFCL sisteminin etkin direncini kasıtlı olarak azaltabilir [25].

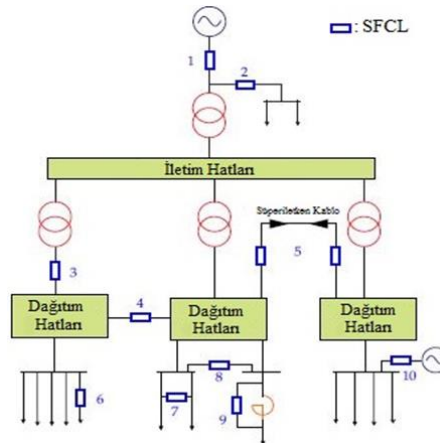
R-SFCL'nin en önemli avantajları şunlardır:

- Arıza akımının ilk tepe değerini sınırlar. Uygun bir şalt cihazına sahip bir R-SFCL, kesiciden çok daha hızlı hareket eder. Böylece arıza yerinden genliği önemli ölçüde azaltılmış bir akım akar [27]. R-SFCL, diğer elemanlar için güvenilirliğin artmasını ve özellikle kesicilerdeki yıpranmanın azalmasını sağlar.
- Daha düşük maliyetli, daha hafif ve daha düşük kesme yeteneğine sahip şalt cihazını kullanma olanağı sağlar. Ayrıca, sistemlerde R-SFCL kullanılması, sistem değişiklikleri veya dağıtık üretim (DG-Distributed Generation) bağlantıları nedeniyle arıza seviyelerinin artması durumunda mevcut şalt cihazlarının değiştirilmesini geciktirebilir veya önleyebilir [8].
- R-SFCL kullanılması, bir arıza nedeniyle sistemin arızasız kısımlarında meydana gelen gerilim bozulmalarını azaltır. Arıza akımı sınırlandırma güç sistemine bağlı dönen makinelerin geçici durum kararlılığının artmasını sağlar [28].

Genel olarak, R-SFCL arıza akımının hem AC hem de DC bileşenlerini sınırlandırır ve tüm geçici durum olaylarını söndürür.

HTS malzemeler kendi içerisinde 1G ve 2G olarak iki gruba ayrılmaktadır. 2G HTS malzemeler daha yüksek akım taşıma kapasitesi, kritik akım seviyesi, manyetik akım değeri ve mekanik dayanıma sahiptir. Ayrıca 2G malzemeler 1G malzemelere göre daha hızlı bir şekilde rezistif bölgeye geçmektedir [13, 14].

R-SFCL, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde birçok farklı yerde uygulanabilmektedir. R-SFCL, genellikle iletim hatlarında ve 66-230 kV gerilim seviyelerinde kullanılır. %50 veya daha fazla oranda akım sınırlama yeteneğine sahiptir [30]. Aynı zamanda, 380-500 kV gerilim seviyesinde de uygulamaları bulunmaktadır. Şekil 2'de R-SFCL'nin güç sistemlerindeki bazı tipik uygulama yerleri gösterilmiştir [31].



Şekil 2. R-SFCL'nin uygulama yerleri

### 3. Materyal ve Metot

Güç sistemlerinde R-SFCL mevcudiyetinin sağladığı güvenilirlik ve artırdığı güvenlik çeşitli ülkelerde uygulama örneklerini de sürekli olarak arttırmaktadır. Ülkemizde elektrik tesislerinde nötr topraklama direnci/bobini dışında herhangi bir sınırlandırma elemanı bulunmaması ve bu direnç veya bobinin sadece toprak arızalarına tepki verebilmesi büyük bir risk oluşturmaktadır. Özellikle sıklıkla meydana gelen 2 faz arızaları sırasında kesici kontakları arasında ark sönmeye kadar arızanın zorlayıcı etkileri elamanlara tesir etmeye devam etmektedir. Bu nedenle ülkemizin de modern sınırlandırma yöntemlerinin sağladığı avantajlardan yararlanması gerekmektedir. Bu çalışma ile laboratuvar ortamında örnek bir R-SFCL'nin arıza tepkilerinin gözlemleneceği deney sistemi oluşturulmuştur. Deney sisteminde kullanılan cihaz ve malzemeler Tablo 1'de verilmiştir.

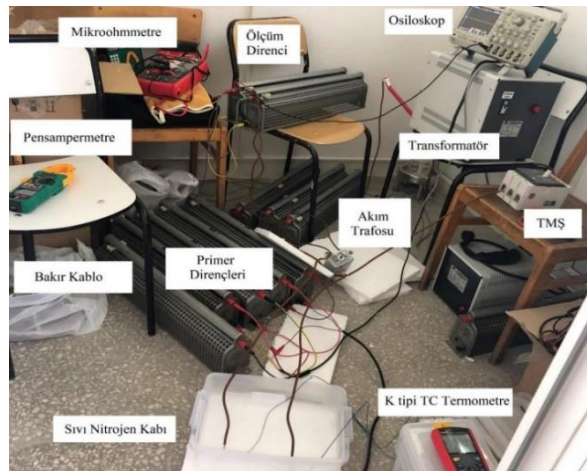
**Tablo 1.** Deney sistemi elemanları

Eleman Adı	Özellik
Kaynak Transformatörü	3 kVA, 220/5 V
Akım Transformatörleri	250/5 A ve 500/5 A
Primer Direnci	21.39 $\Omega$
Ölçüm Direnci	1 $\Omega$
Bakır Kablolar	10 mm <sup>2</sup>
Termik Manyetik Şalter (TMS)	250 A

Aynı zamanda osiloskop ve USB bağlantılı pensampermetre, mikroohmmetre, K tipi thermocouple termometre deney sonuçlarını gözlemlmek ve kaydetmek için kullanılmıştır.

R-SFCL tasarımında öncelikle SuperPower firması tarafından üretilen 2 m uzunluğunda 6 mm genişliğindeki 2G HTS şerit sınırlandırma analizinde 40 cm'lik uzunluklara ayrılarak kullanılmıştır. 2G HTS şerit ile ilgili bilgiler Ek-1'de verilmiştir. Sistemdeki tüm bağlantılar, anlık kısa devre dayanım akımı 1 kA olan 10 mm<sup>2</sup> kesite sahip, yedi damarlı bakır kablo ile yapılmaktadır. Kablo yalıtkanı PVC'dir ve 180 °C sıcaklığa kadar yalıtkanlık özelliğini korumaktadır. Süperiletken şeritin içine yerleştirileceği ve istenen soğutmanın yapılacağı kap yumuşak plastik olarak seçilmiş olup, hacmi 6 litredir. LN<sub>2</sub> için ise 10 litrelik hacme sahip özel soğutucu tank kullanılmaktadır.

Sınırlandırma analizi için yapılacak arıza şartları, kaynak transformatörünün sekonderinin kısa devre edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sekonderdeki kısa devre akımının efektif değeri 400 A'e yaklaştığı için akım transformatörlerinin doyuma gitmesini ve süperiletken şeritin zarar görmesini engellemek amacıyla kaynak transformatörünün primer tarafı, yaklaşık 21.39  $\Omega$ 'luk primer direnci üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Böylece arıza akımının efektif değeri maksimum 250 A'in altına indirilmiştir. Ayrıca, kaynak transformatörünün primerinde koruma amacıyla 16 A'lik otomatik sigorta kullanılırken, sekonderinde beklenmedik bir sorunla karşılaşma ihtimaline karşılık ise 250 A'lik TMS koruma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen deneyler sırasında süperiletken şeritlerde hot-spot meydana geldiği için arıza süresi 80-100 milisaniye (4-5 periyot) seviyesinde tutulmuştur. Deney sisteminin genel görüntüsü Şekil 3'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Deney sistemi

Deneyler sonucunda kaydedilen akım dalga şekilleri, 1  $\Omega$ 'luk ölçüm direnci üzerindeki gerilimin osiloskop ekranında gözlemlenmesi ile elde edilmiştir. Akım, ayrıca pensampermetre yardımıyla da anlık olarak efektif değer şeklinde kaydedilmiştir. Sistemde enerji yokken şerit ile yapılan direnç ölçümleri mikroohmmetre ile gerçekleştirilirken, bu ölçümler hem oda sıcaklığında hem de LN<sub>2</sub> içinde yapılmıştır. Süperiletkenin arıza sırasındaki sıcaklık değişimi de K tipi thermocouple termometre ile anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu işlem, şerit üzerindeki kapton bandın kaldırılması termometrenin bağlantı uçlarının temas ettirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

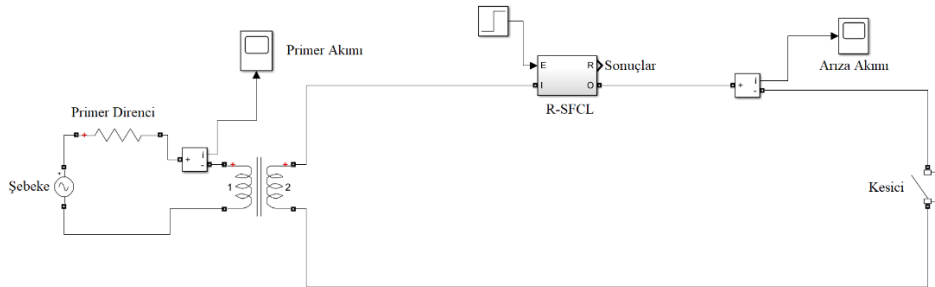
Süperiletken şerit ile kablo bağlantıları arasında daha iyi bir iletim sağlanabilmesi için süperiletkenler bakır plakaların bir ucuna lehimlenmiştir. Bakır plakaların diğer ucuna ise kablo uçları bağlanmıştır. Bakır plaka ile süperiletken bağlantısı Şekil 4'de gösterilmiştir. Soğutma kabı içerisinde bulunan şerit normal durumda, arıza sırasında ve arızadan sonra süperiletkenlik bölgesine geri dönmek için LN<sub>2</sub> ile soğutulmaktadır. Arıza meydana geldiği anda hızlı bir şekilde artan direnç değeri, artan bir sıcaklığa da sebep olmak ile beraber, K tipi thermocouple bağlantı uçlarının bağlı olduğu noktalardaki sıcaklıklar 77-340 °K arasında değişmiştir. Bu sıcaklık değerlerine çıkıldıktan sonra şeritin hızlı ve etkili bir şekilde soğutulması gerekmektedir, nitekim bazı deneylerde süperiletken zarar görüp yanmıştır. Bunun sebebi deney süresi boyunca bakır plakaların kablolarla bağlı olduğu uçlar soğutma kabının dışında kaldığı için bu noktada soğutma performansı azalması ve soğutma sisteminin açık yapıda olmasıdır. Bakır plakaların kablo ucunun dışarıda olması, gerçek R-SFCL uygulamalarındaki akım çubuğu (current lead) dezavantajının bir benzerini oluşturmuştur. Deneyler arasında birkaç dakikalık soğuma süresi bulunmaktadır.



Şekil 4. Bakır plaka ile süperiletken şerit bağlantısı

### 3.1. R-SFCL E-J Modeli

R-SFCL modeli ve benzetimler MATLAB-Simulink'de gerçekleştirilmiş olup, deney sistemin simülasyon devresi Şekil 5'de verilmiştir. Modelleme için süperiletken malzemenin Elektrik Alan (E) – Akım Yoğunluğu (J) eğrisi temel alınmıştır. Gerçekleştirilen R-SFCL modelinde, sistem akımının efektif değeri her an SuperPower firmasının ürettiği 6 mm 2G HTS şeridin minimum kritik akım değeriyle karşılaştırılmaktadır. Modellenen bu HTS şeritte YBCO süperiletken malzeme kullanılmıştır. Normal durumda, 2G HTS şeridin kritik akımı aşılmadığı için R-SFCL tarafından çok düşük bir empedans değeri gösterilir. Arıza durumunda ise sistemden akan akım, kritik akımı (180 A) aştığı anda süperiletken malzemede faz değişimi olur ve bunun sonucunda direnci artar. Arıza sona erdiğinde R-SFCL'deki süperiletken malzeme, LN<sub>2</sub> kullanılan soğutma sistemi ile hızlı bir şekilde soğutulup tekrar süperiletkenlik bölgesine geçer ve minimum direnç gösterir. Süperiletken malzemenin E-J eğrisine göre üç bölge bulunmaktadır: süperiletkenlik, flux-flow ve rezistif. Matlab/Simulink'de M-Function olarak bu üç bölge formülleri modelleme algoritmasına göre oluşturulmuştur. Süperiletkenler için genel E-J eğrisi Şekil 6'da gösterilirken, bu eğrideki bölgelere göre yapılan modelleme algoritması ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Deney sistemi simülasyon devresi

İlk olarak, tüm bölgeler için R-SFCL direnci Denklem (1) ile hesaplanmaktadır. Anlık akım yoğunluğu ise Denklem (2) ile hesaplanarak kritik akım yoğunluğu ile karşılaştırılmaktadır.

$$R_{R-SFCL}(t) = \frac{E(J,T) \cdot L_{si}}{J(t) \cdot A_{si}} \quad (1)$$

$$J(t) = \frac{I_{R-SFCL}(t)}{A_{si}} \quad (2)$$

Burada;

$R_{R-SFCL}$ , direnç ( $\Omega$ )

$L_{si}$ , şerit uzunluğu (m)

$A_{si}$ , şerit kesiti ( $m^2$ )

E, J ve T'nin fonksiyonu olarak elektrik alan şiddeti (V/m)

T, süperiletken sıcaklığı ( $^{\circ}K$ )

$I_{R-SFCL}$ , akım (A)

J, akım yoğunluğu ( $A/m^2$ ) olarak verilmiştir.

**3.1.1. Süperiletkenlik Bölgesi**

Bu bölgede,  $J \ll J_c$  ve  $T \ll T_c$ 'dir. R-SFCL direnci çok düşüktür. Elektrik alan şiddeti (E), Denklem (3) ile hesaplanır.

$$E(J, T) = E_c \left( \frac{J}{J_c(T)} \right)^\alpha \quad (3)$$

Burada;

$E_c$ , kritik elektrik alan şiddeti ( $1 \mu V/cm$ )

$\alpha$ , süperiletkenlik bölgesi üs değeridir, 1G HTS malzemeler için 5-15, 2G HTS malzemeler için  $\alpha$  değeri 15-40 arasında değişmektedir [32]. T'nin fonksiyonu olarak kritik akım yoğunluğu Denklem (4) ile hesaplanmaktadır.

$$J_c(T) = J_c \cdot [(T_c - T)/(T_c - T_0)] \quad (4)$$

$J_c(T)$ , T'nin fonksiyonu olarak kritik akım yoğunluğu ( $A/m^2$ )

$J_c$ ,  $77 \text{ }^{\circ}K$ 'deki kritik akım yoğunluğu ( $A/m^2$ )

$T_c$ , kritik sıcaklık ( $^{\circ}K$ )

$T_0$ ,  $77 \text{ }^{\circ}K$  olarak tanımlanmıştır.

**3.1.2. Akı Geçiş Bölgesi**

Bu bölgede,  $J > J_c$  ve  $T < T_c$ 'dir. Akım yoğunluğu kritik değeri aştığında, R-SFCL bu bölgeye girer ve E artmaya başlar. Hemen ardından, R-SFCL'nin direnci ve sıcaklığı da artmaya başlar. Sıcaklık artışı  $J_c(T)$ 'nin düşmesine neden olur ve böylece E sürekli olarak artar [33]. E, Denklem (5) ile hesaplanır.

$$E(J, T) = E_0 \cdot \left( \frac{E_c}{E_0} \right)^{\beta/\alpha} \cdot \frac{J_c}{J_c(T)} \cdot \left( \frac{J}{J_c} \right)^\beta \quad (5)$$

Burada;

$E_0$ , süperiletkenlik durumundan akı geçiş bölgesine geçiş boyunca elektrik alan şiddeti (V/m)

$\beta$ , akı geçiş bölgesinin üs değeridir, 1G ve 2G HTS malzemeler için  $\beta$  değeri 1-4 arasında değişmektedir [32].

**3.1.3. Rezistif (Normal) Bölge**

Bu bölgede,  $T > T_c$ 'dir. R-SFCL'nin direnci ani bir şekilde artar. Direnç ile E, akım yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. E, Denklem (6) ile hesaplanır.

$$E(J, T) = \rho(T_c) \cdot J \cdot \frac{T}{T_c} \quad (6)$$

Burada,

$\rho(T_c)$ , normal durumdaki süperiletken özgül direnci ( $\Omega \cdot m$ ) olarak tanımlanmıştır.

### 3.1.4. Termal Hesaplamalar

Tüm bölgelerde meydana gelen ısı difüzyonu aşağıda verilen denklemler ile hesaplanabilir. M-Function içerisinde süperiletken tarafından yayılan ısı enerjisi Denklem (7), soğutucu tarafından alınan ısı enerjisi Denklem (8), süperiletken ile soğutma kabı arasındaki termal direnç Denklem (9), R-SFCL anlık sıcaklığı Denklem (10) ve süperiletkenin ısı kapasitesi Denklem (11) ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{SI}(t) = \int I_{R\_SFCL}(t)^2 \cdot R_{R\_SFCL}(t) dt \quad (7)$$

$$Q_{soğutucu}(t) = \int \frac{T(t) - T_0}{\theta_{SI}} dt \quad (8)$$

$$\theta_{SI} = \frac{1}{2 k L_{SI} t_{SI} w_{SI}} \quad (9)$$

$$T = T + (Q_{SI} - Q_{soğutucu}) / c_{SI} \quad (10)$$

$$c_{SI} = L_{SI} \cdot A_{SI} \cdot c_h \quad (11)$$

Burada,

$Q_{SI}$ , süperiletken tarafından yayılan ısı enerjisi (Joule)

$Q_{soğutucu}$ , soğutucu tarafından alınan ısı enerjisi (Joule)

$\theta_{SI}$ , süperiletken ile soğutma kabı arasındaki termal direnç (K/W)

$k$ , soğutma kabına olan ısı transfer katsayısı ( $W/K \cdot m^2$ )

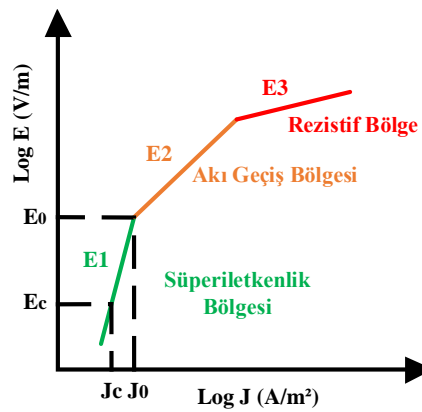
$t_{SI}$ , süperiletken telin kalınlığı (mm)

$w_{SI}$ , süperiletken telin genişliği (m)

$c_{SI}$ , süperiletkenin ısı kapasitesi (J/K)

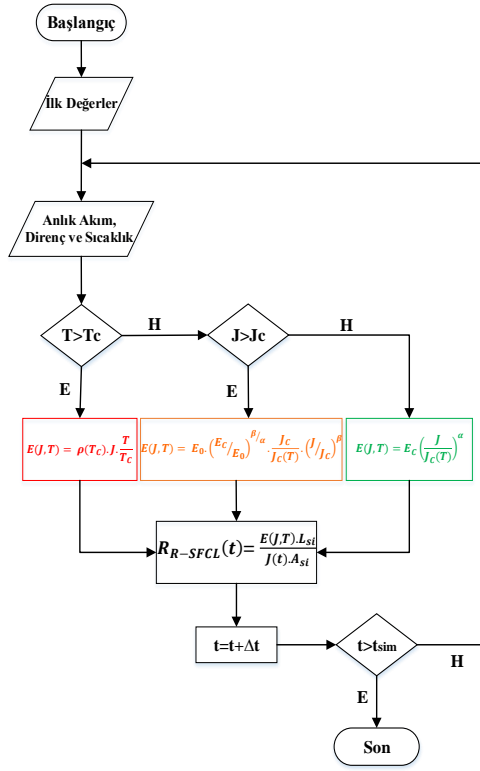
$c_h$ , süperiletken hacimsel özgül ısı ( $J/K \cdot m^3$ )

$T$ , R-SFCL anlık sıcaklığı ( $^{\circ}K$ ) olarak verilmiştir.



Şekil 6. Süperiletken E-J eğrisi





Şekil 7. R-SFCL modelleme algoritması

## 5. Bulgular ve Tartışma

Sınırlandırma analizini yapmak için, transformatör primerine eklenen  $21.39 \Omega$ 'luk primer direnciyle  $225 A_{rms}$  seviyesinde bir kısa devre akımı sağlanmıştır. Öncelikle deney sisteminde R-SFCL olmadığı durum için arıza akımı gözlemlenmiştir. Şekil 8'de 500/5 A'lik akım transformatörü ve  $1 \Omega$  ölçüm direnci üzerinden ölçülen arıza akımının dalga şekli gösterilmiştir.

Şekil 8'de görüldüğü gibi arıza akımının tepe değeri  $3.12 A$ 'dır. Akım transformatörünün dönüştürme oranı 100 olduğu için gerçek tepe değer  $312 A$  ve RMS değer  $220.6 A$  olarak hesaplanmıştır. Akım değeri  $225 A_{rms}$  seviyesine oldukça yakındır. Daha sonra sisteme,  $40 \text{ cm}$  uzunluğunda SuperPower'ın ürettiği  $2G$  HTS şerit eklenerek aynı arıza deneyi tekrar edilmiştir. Bu durumda osiloskop ekranında gözlemlenen arıza akımı Şekil 9'da gösterilmiştir.



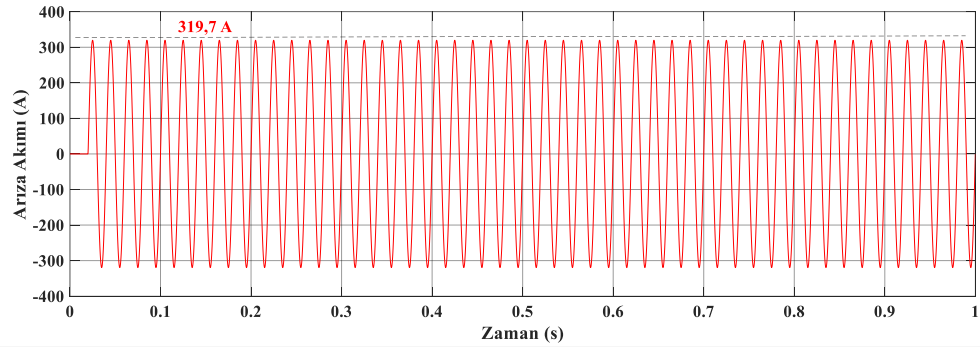
Şekil 8. Arıza akımının osiloskop görüntüsü



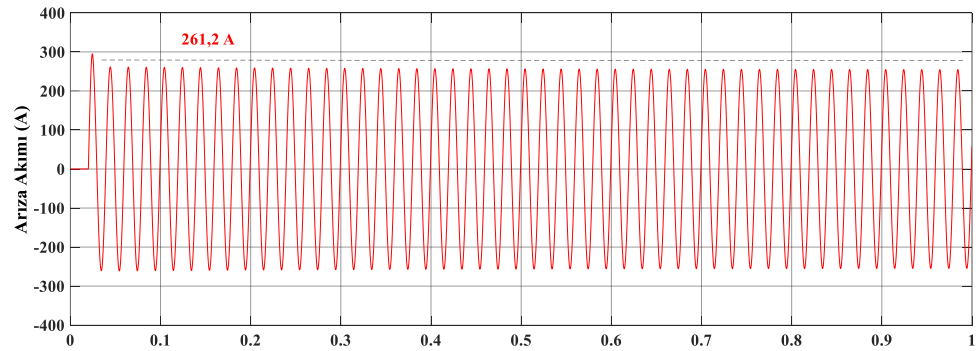
Şekil 9. R-SFCL’li sistemdeki arıza akımının osiloskop görüntüsü

Şekil 9’da, arıza akımının tepe değeri 2.60 A’dir. Akım transformatörünün dönüştürme oranı 100 olduğu için gerçek tepe değer 260 A ve RMS değer 183.75 A olarak hesaplanmıştır. R-SFCL’siz sisteme göre sadece 40 cm uzunluğundaki 2G HTS şerit ile arıza akımı 36.85 A azalmıştır. Kısaca, R-SFCL’nin sisteme eklenmesi ile arıza akımı, sınırlandırma yapılmayan duruma göre %16.7 azalmıştır. Arıza sırasında ölçülen gerilim ve akım verilerinden, arıza direncinin 8.7 m $\Omega$  ile 8.8 m $\Omega$  arasında değiştiği görülmüştür.

MATLAB-Simulink kullanılarak yapılan benzetim ve modellemelerde hem deney sisteminden elde edilen veriler hem de R-SFCL’nin E-J eğrisi temel alınarak R-SFCL’nin dinamik davranışı oluşturulmuştur. Şekil 10’da R-SFCL’siz deney sistemin arıza akımının dalga şekli gösterilirken, Şekil 11’de R-SFCL’li sistemin arıza akımının dalga şekli gösterilmiştir.



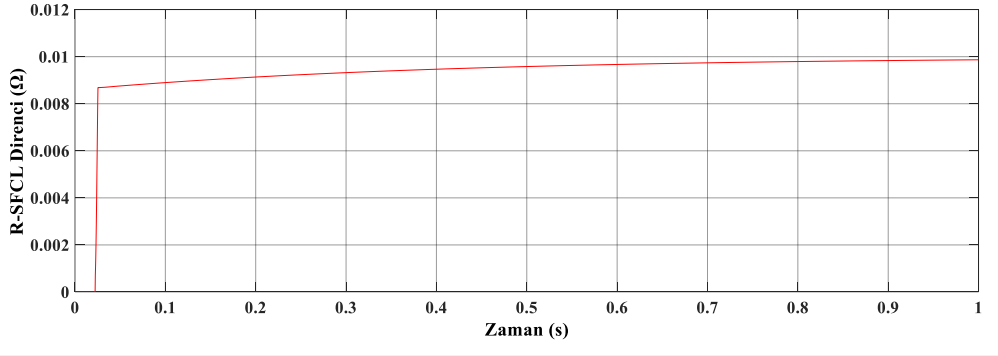
Şekil 10. R-SFCL’siz sistemdeki arıza akımı



Şekil 11. R-SFCL’li sistemdeki arıza akımı

Şekil 10 ve 11’de görüldüğü gibi, R-SFCL’siz sistemde arıza akımının tepe değeri 319.7 A olup RMS değeri 226.06 A’dır. R-SFCL’li arıza akımının tepe değeri ise 261.2 A olup RMS değeri 184.7 A olarak hesaplanmaktadır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın ve uyumludur.

Şekil 12’de modellenen R-SFCL’nin arıza sırasındaki direnç değişimi gösterilmiştir. Deneysel ölçülen direnç değeri 8.7-8.8 mΩ iken, simülasyonda bu değer aynı seviyenin biraz üstünde seyretmiş olup, değerler arasında çok az fark vardır.



Şekil 12. R-SFCL direnç değişimi

## 6. Sonuçlar

Güç sistemlerinde, arıza akımlarının kesiciler tarafından en kısa sürede ortadan kaldırılması istenir. Ancak, rölelerin algılama süresi, kesiciye açma sinyalinin gönderilmesi ve mekanik sınırlamalar, arıza akımının sistemde belli bir süre daha akmasına sebep olmaktadır. Ark kesilinceye kadar güç sistemi elemanlarına tesir eden arıza akımları bazen geri dönüşü olmayan zararlara neden olmaktadır. Günümüzde en hızlı güç sistemi kesicileri 70-80 milisaniye içerisinde açma işlemi yapabilir de birçok ülkede sınırlandırma yöntemleri kullanılmaktadır.

Sınırlandırma yöntemleri arasında en çok tercih edilenlerden biri olan R-SFCL, avantajları medeniyle çeşitli güç sistemlerinde kullanılmaktadır. R-SFCL yaklaşık 4-5 milisaniye içerisinde tepki göstererek arızayı sınırlandırabilmektedir. Güç sisteminin güvenliğini, güvenilirliğini ve kararlılığını arttıran R-SFCL uygulamaları geleneksel yöntemlere göre normal işletme sırasında ihmal edilebilir güç kaybına sebep olarak görünmez olarak davranmaktadır ve nominal akımı etkilememektedir. Ayrıca, R-SFCL, harmonik üretmeme, manyetik alan girişimine sebep olmama ve X/R oranını azaltma gibi özellikleri sayesinde giderek popüler hale gelmektedir.

Bu çalışmada laboratuvar ortamında gerçekleştirilen R-SFCL örneği ve MATLAB-Simulink’de yapılan benzetimlerle henüz ülkemizde uygulaması bulunmayan R-SFCL’nin etkin, verimli ve güvenilir bir sınırlandırma elemanı olduğu gösterilmiştir. Hem arıza anında sistemi koruyan hem de normal işletme sırasında gereksiz güç kaybına yol açmayan R-SFCL, ülke ekonomisine ve güç sistemi güvenliğine önemli bir katkı sağlayacaktır.

Gelecek çalışmalarda daha uzun süperiletken şeritler kullanarak özellikle R-SFCL’nin en büyük dezavantajı sayılabilecek toparlanma süresinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilecek çalışma sonuçları paydaşlarla paylaşılarak, güç sistemlerinin verimliliğini ve güvenliğini arttıran R-SFCL’nin avantajlarının elektrik sistemimize de kazandırılması amaçlanmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma FÜBAP MF.20.02 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

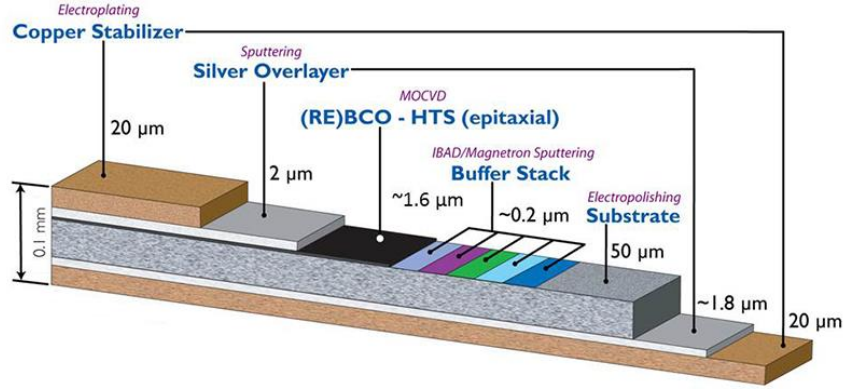
- [1] E. M. Leung, “Superconducting fault current limiters,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 20, no. 8, pp. 15–18, 30, 2009, doi: 10.1109/39.857449.
- [2] H. Seyed and B. Tabei, “Appropriate Placement of Fault Current Limiting Reactors in Different HV Substation Arrangements,” *Circuits Syst.*, vol. 03, no. 03, pp. 252–262, 2012, doi: 10.4236/cs.2012.33035.
- [3] C. Method, “Numerical Study on Transient State of Inductive Fault Current Limiter Based on Field-Circuit,” 2019.

- [4] P. Ju, T. Ma, J. Zhang, Y. Xu, and S. Dai, "Influence of Interface Resistance on Current Distribution and Inhomogeneity Effect on Quench Characteristics in REBCO Coated Conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 1, 2022, doi: 10.1109/TASC.2021.3132011.
- [5] B. Xiang *et al.*, "A CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixed Gas DC Circuit Breaker with Superconducting Fault Current-Limiting Technology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 4, pp. 1960–1967, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2957499.
- [6] B. Xiang *et al.*, "DC Interrupting With Self-Excited Oscillation Based on the Superconducting Current-Limiting Technology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 1, pp. 529–536, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2718589.
- [7] J. Zhu *et al.*, "Magneto-Thermal Coupling Design and Performance Investigation of a Novel Hybrid Superconducting Fault Current Limiter ( SFCL ) With Bias Magnetic Field Based on MATLAB / SIMULINK," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/TASC.2019.2892295.
- [8] M. Noe and M. Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters: Concepts, applications, and development status," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 3, 2007, doi: 10.1088/0953-2048/20/3/R01.
- [9] A. Morandi, "State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system," *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 484, pp. 242–247, 2013, doi: 10.1016/j.physc.2012.03.004.
- [10] B. Xiang *et al.*, "Study on the Parameter Requirements for Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiters Combined with Mechanical DC Circuit Breakers in Hybrid AC/DC Transmission Grids," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 35, no. 6, pp. 2865–2875, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2981870.
- [11] L. Siyuan *et al.*, "Physica C : Superconductivity and its applications A novel simplified modeling method based on R – Q curve of resistive type SFCL in power systems," vol. 563, no. April, pp. 82–87, 2019, doi: 10.1016/j.physc.2019.04.016.
- [12] P. T. Pascal, A. Badel, G. Auran, and G. S. Pereira, "Superconducting Fault Current Limiter for Ship Grid Simulation and Demonstration," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 2, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2674964.
- [13] K. Yang *et al.*, "Direct-Current Vacuum Circuit Breaker with Superconducting Fault-Current Limiter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/TASC.2017.2767500.
- [14] S. Yadav, K. Bharati, and V. Tewari, "Superconducting Fault Current Limiter-A Review," vol. 14, no. 2, pp. 1–6, 2019.
- [15] M. F. Khan, A. L. L. Jarvis, E. A. Young, and R. G. Stephen, "Comparison of Superconducting Fault Current Limiters against Traditionally Employed Practices in the Management of Fault Levels in the South African National Grid," no. January, 2015.
- [16] L. Martini, M. Bocchi, and R. Dalessandro, "Electrical testing of 1 MVA-class three-phase superconducting fault current limiter prototypes," no. April, 2007.
- [17] M. M. Aly and E. A. Mohamed, "Comparison between resistive and inductive superconducting fault current limiters for fault current limiting," *Proc. - ICCES 2012 2012 Int. Conf. Comput. Eng. Syst.*, no. May, pp. 227–232, 2012, doi: 10.1109/ICCES.2012.6408518.
- [18] S. Belkhat, "Modeling and Simulation of Resistive Superconducting Fault-Current Limiters," no. June, 2015, doi: 10.1007/s10948-012-1685-z.
- [19] D. Fedasyuk and P. Serdyuk, "Simulation of Superconducting Fault Current Limiter Behaviour in Matlab / Femlab / Simulink Environment," no. 1, pp. 77–80, 2006.
- [20] S. Rai, U. Prasad, and V. K. Jain, "Application of Superconducting Fault Current Limiters in Smart Grid System," vol. 4, no. 12, pp. 5738–5747, 2015, doi: 10.15680/IJIRSET.2015.0407051.
- [21] M. Firouzi, S. Aslani, G. B. Gharehpetian, and A. Jalilvand, "Effect of Superconducting Fault Current Limiters on Successful Interruption of Circuit Breakers," *Renew. Energy Power Qual.*, no. May 2014, pp. 120–124, 2012, doi: 10.24084/repqj10.245.
- [22] Sander A. Franke, "Master of Science Thesis Fault Current Control in the Transmission Network," 2012.
- [23] SuperOx, "Superconducting Fault Current Limiters." <http://www.superox.ru/upload/FCL-full-information.pdf>.
- [24] M. J. Bright C.G., Hirst M., Husband M., Mackay A., "The design and benefits of MgB<sub>2</sub> Superconducting Fault Current Limiters for future Naval applications," 2011.
- [25] R. Dommerque *et al.*, "First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: Production, test and installation," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1–9, 2010, doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034020.
- [26] M. Moyzykh *et al.*, "First Russian 220 kV superconducting fault current limiter for application in city grid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, no. August 2017, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3066324.
- [27] C. Schacherer, J. Langston, M. Steurer, and M. Noe, "Power Hardware-in-the-Loop testing of a YBCO coated conductor fault current limiting module," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, no. 3, pp. 1801–1805, 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018048.
- [28] M. Tsuda, Y. Mitani, K. Tsuji, and K. Kakihana, "Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, no. 1 II, pp. 2122–2125, 2001, doi: 10.1109/77.920276.
- [29] S. Y. Kim and J. O. Kim, "Reliability evaluation of distribution network with DG considering the reliability of protective devices affected by SFCL," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 5, pp. 3561–3569, 2011, doi: 10.1109/TASC.2011.2163187.
- [30] M. Akbari, H. Chavda, J. Chitroda, and N. Kothadiya, "Review paper on Fault analysis and its Limiting Techniques

- .,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 566–571, 2017, [Online]. Available: <https://irjet.net/archives/V4/i2/IRJET-V4I2107.pdf>.
- [31] W. T. B. de Sousa, “Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters,” *Saf. Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.023.
- [32] K. Qian, Z. Guo, Y. Terao, and H. Ohsaki, “Electromagnetic and thermal design of superconducting fault current limiters for DC electric systems using superconducting,” 2017.
- [33] S. Xue, F. Gao, W. Sun, and B. Li, “Protection principle for a DC distribution system with a resistive superconductive fault current limiter,” *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 4839–4852, 2015, doi: 10.3390/en8064839.

### EK-1

#### Şerit Yapısı



#### Şerit Özellikleri

Parametre	SCS6050
MİNİMUM $I_c$	150 A
Genişlik	6 mm
Toplam Kalınlık	0.1 mm
Toplam Bakır Stabilizer Kalınlığı	0.04 mm
Kritik Çekme Gerilimi	> 550 MPa
Kritik Eksenel Çekme Gerilmesi (77 °K)	% 0.45
Kritik Büküm Çapı (40µm-Oda Sıcaklığı)	11 mm
Kritik Bükme Çapı (40µm-Oda Sıcaklığı)	11 mm

#### Şerit I-V Grafiği

