

Güç Sistemlerinde Arıza Akım Sınırlama Yöntemlerinin İncelenmesi

Investigation of Fault Current Limiting Methods in Power Systems

Nihat AKAY¹, Oktay ARIKAN², Özgür KARACASU³

^{1,2}Elektrik-Elektronik Fakültesi
Yıldız Teknik Üniversitesi
akay.nihat@hotmail.com, orikan@yildiz.edu.tr

³Enerji Enstitüsü
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
ozgur.karacasu@tubitak.gov.tr

Özet

Elektrik enerjisine olan talebin artması, güç sistemlerinin sürekli genişlemesini ve karmaşıklaşmasını beraberinde getirmektedir. Yeni üretim santrallerinin, hatların ve yüklerin devreye girmesi sistemdeki güç akışını ve buna bağlı olarak herhangi bir arıza sırasında ortaya çıkacak kısa devre akımının seviyesini artırmaktadır. Bu durum belirli kısa devre akım büyüklüklerine göre tasarlanan ve/veya seçilen güç sistem ekipmanlarının dayanım sınırlarının zorlanmasına, hatta zarar görmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, arıza akımlarının sınırlandırılması her geçen gün önem kazanmaktadır. Bu bakış açısıyla, güç sistemlerinde kullanılan arıza akım sınırlama yöntemleri incelenmiş ve uygulanabilir olanları Türkiye iletim sisteminden seçilen bir trafo merkezinde yapılan benzetim çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, arıza akımı sınırlayıcılarının kısa devre akım sınırına yaklaşan trafo merkezleri için etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Abstract

The growing demand for electricity consumption results in increasing complexity and continuous expansion of power systems. By the connection of new power plants, lines and loads to grid, the level of transferred energy and fault currents increases accordingly. As a result of this phenomenon, equipment breakdowns and even system blackouts may occur. Thus, limiting of fault currents becomes a critical problem to be solved by system operators. Within this perspective, several fault current limiter methods are studied and an example on fault current limiting application on a sample part of Turkish Transmission System is presented. The results indicate that fault current limiters come out as an effective solution for transformer substations operating close to their short circuit withstand limits.

1. Giriş

Güç sisteminin büyümesine bağlı olarak Trafo Merkezlerinin (TM) kısa devre güçleri dolayısıyla kısa devre akım seviyeleri

her geçen gün yükselmektedir. Bununla birlikte her TM Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde gerilim seviyesine bağlı olarak tanımlanmış kısa devre akımı üst sınır değerlerine göre tasarlanmaktadır. Şebekenin bu gelişmesine bağlı olarak Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde de değişikliğe gidilmiş ve 400kV gerilim seviyesinde kısa devre akım üst sınır değeri 50kA'den 63kA'ye yükseltilmiştir [1]. Bu süreçte 154kV gerilim seviyesindeki kısa devre akım üst sınır değeri 31,5 kA olarak bırakılmıştır. Yönetmelikte yapılan bu değişikliğin resmi gazetede yayınlanmasından sonra kurulacak TM'lerin yeni sınıra uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Bununla birlikte işletmede olan TM'ler 50kA kısa devre akım sınırı ile işletilmektedir ve bu TM'lerin güncel yönetmeliğe göre tekrar yenilenmesi ekonomik bir yöntem olarak görülmemektedir. Sistem güvenliği ve sürekliliği göz önüne alındığında kısa devre akımlarının sınırlandırılması alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, arıza akımlarının sınırlandırılması için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir [2][3][4]. Tarihsel gelişime bakıldığında ilk çalışmaların kısa devre yolu üzerindeki ekipmanların empedanslarının artırılmasına veya yeni empedanslar eklenmesine odaklandığı görülmektedir. Geleneksel yöntemler olarak tanımlanabilecek bu yöntemlerde, şebekedeki sürekli empedans artışlarının kayıplar, geçici hal davranışı ve gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilemesi, sadece arıza sırasında devrede olan arıza akım sınırlayıcılarının geliştirilmesine yol açmıştır. İdealde normal işletme durumunda herhangi bir gerilim düşümüne sebep olmaması istenen modern arıza akım sınırlama yöntemleri, yarı iletken ve süper iletken teknolojilerindeki gelişime paralel olarak gelişmektedir. Geliştirilen cihazların büyük bir kısmı orta gerilim seviyesinde kullanılsa da yüksek gerilim seviyesi için de prototip cihazlar geliştirilmektedir [5] [6].

Bu çalışmada güç sistemlerinde kullanılan arıza akım sınırlama yöntemleri tanıtılmış ve Türkiye enerji iletim sisteminde seçilen pilot bir TM üzerinde modelleme ve analizlerle etkinlikleri değerlendirilmiştir.

2. Arıza akım sınırlama yöntemleri

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Arıza Akım Sınırlayıcılar (AAS)'ın genel olarak iki ana sınıf altında toplandığı görülmüştür. Bunlar normal çalışma ve arıza esnasında devre de olan geleneksel AAS'ler ile sadece arıza esnasında devrede olan modern AAS'lerdir. Modern AAS'lerin hepsi cihaz temelli yöntemler iken geleneksel AAS yöntemleri cihaz temelli veya sistem üzerinde topolojik değişiklik gerektiren yöntemler olabilmektedir. AAS'ler ile ilgili literatürde karşılaşılan yöntemler aşağıda verilmiştir [2][3][4].

Geleneksel AAS yöntemleri

- ✓ Cihaz temelli yöntemleri
 - Seri reaktör,
 - Yüksek empedanslı transformator,
 - Nötr reaktörü,
 - I_s akım sınırlayıcı,
 - Akım sınırlayıcı sigortalar,
 - Paralel transformator kullanımı
 - Transformator nötr noktasının reaktör ile topraklanması,
 - Generatör transformatorünün nötr noktasının reaktör ile topraklanması,
- ✓ Topolojik yöntemler
 - Güç sisteminin yeniden yapılanması,
 - TM'lerde bara ayırma,
 - TM'lerde kritik hatları ayırma,
 - Daha yüksek gerilim seviyesinde işletme,
 - Yüksek gerilim doğru akım (YGDA)
 - Nötr noktası izoleli sistem kullanımı,

Modern AAS yöntemleri:

- ✓ Katı Hal Arıza Akım Sınırlayıcılar (KHAAS)
 - Rezonans tipli KHAAS
 - Seri rezonanslı KHAAS
 - Paralel rezonanslı KHAAS
 - Seri-Paralel rezonanslı KHAAS
 - Bypass anahtarlı empedans KHAAS
 - Köprü tipi KHAAS
- ✓ Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılar (SAAS)
 - Rezistif SAAS
 - Endüktif SAAS
 - Korunmuş çekirdekli (Shielded-Core)
 - Doyurulabilir çekirdekli (Saturable-Core)
 - Hibrit AAS'lar
 - Elektromanyetik AAS'lar

Her bir yöntemin kendi içinde avantaj ve dezavantajları barındırmaktadır. Ancak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ideal arıza akım sınırlama cihazlarının karakteristik özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır [4][8].

- ✓ Kararlı durumda AAS üzerinde herhangi bir gerilim düşümü olmamalı,
- ✓ Arıza meydana geldiği zaman hemen yüksek empedans durumuna geçmeli,
- ✓ İlk periyotta arıza akımını tespit etmeli ve birkaç periyot içerisinde arıza akımını sınırlamalı,
- ✓ Kısa sürede meydana gelebilecek art arda arızalarda çalışabilmeli,

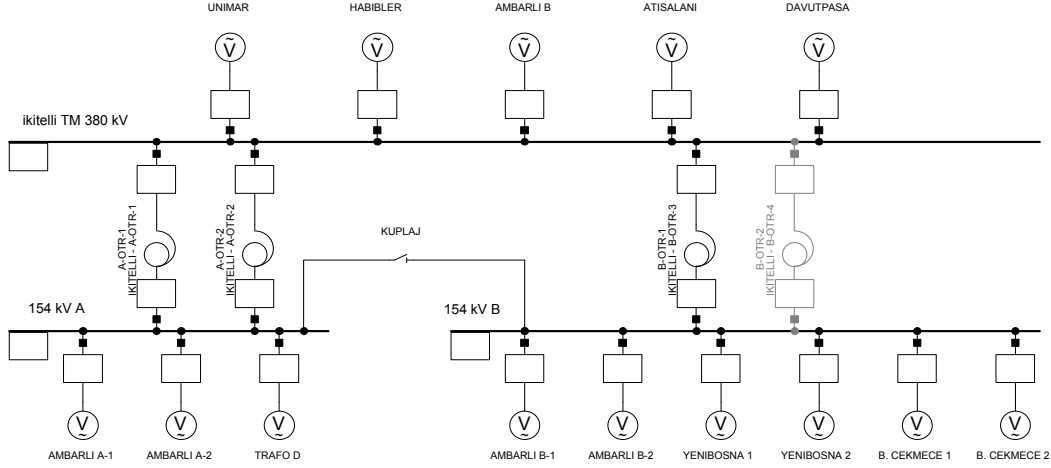
- ✓ Arıza temizlendikten sonra personel müdahalesine ihtiyaç duymadan arıza öncesi durumuna dönebilmeli,
- ✓ Gerilim ve güç faktörü kararlılığına etkisi olmamalı,
- ✓ Röle ve kesicilerin normal çalışmalarını etkilememeli,
- ✓ Boyutu küçük ve fiyatı uygun olmalıdır.

Literatürdeki AAS yöntemlerinin çoğu geliştirme aşamasındaki ticarileştirme potansiyeli olan sistemlerdir. Bu nedenle sadece yöntemlerin temel ilkeleri hakkında detay sunulmaktadır. Bu çalışmada AAS yöntemlerinden açık literatürde detaylarına ulaşılabilen ve yüksek gerilim seviyesinde kullanılmaya uygun olan bara ayırma, arıza akım sınırlama reaktörü kullanımı ve yüksek empedanslı transformator kullanımı yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemlerden bara ayırma geleneksel arıza akım sınırlama yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulaması en kolay yöntem olması sebebiyle sistem operatörleri tarafından sıkça tercih edilmektedir [3]. Arıza akım sınırlama reaktörü kullanımı ve yüksek empedanslı transformator kullanımı yöntemlerinin arıza akım seviyesini düşürmesi yönündeki olumlu etkisi bilinmektedir. Bununla birlikte, baralar arasına yerleştirilen reaktör hariç, yük akımına sürekli maruz kalmaları sebebiyle sistem kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Her üç yönteminde geçici hal ve gerilim kararlılığı noktasında olumsuz etkileri literatürde rapor edilmektedir [3]. Bu çalışmada her üç yöntemin kısa devre akımının sürekli hal durumundaki etkileri üzerinde çalışılmıştır. Geçici hal durumu, enerji kayıpları ve gerilim regülasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3. Benzetim çalışmaları

Bu bölümde benzetim çalışmalarında kullanılan bölge ve modellene çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Test sistemi olarak, TEİAŞ iletim sistemi içinde kısa devre akım değerlerinin yüksekliği ve fider-trafo sayısının fazlılığı gibi parametreler göz önünde tutularak belirlenen İkitelli TM'nin benzetim çalışmaları için seçilmiştir. İkitelli TM'de 1 adet 380 kV ve 2 adet 154 kV bara bulunmaktadır. 380 kV barası, 2 adet 250 MVA transformator üzerinden 154 kV A barasına bağlanırken, 2 adet 250 MVA trafo üzerinden 154 kV B barasına bağlanmaktadır. 380 kV barasında 5 adet fider, 154 kV A barasında 3 fider ve 154 B barasında 6 adet fider olmak üzere toplamda 14 fider bara kısa devre akımına katkıda bulunmaktadır. İkitelli TM'ye ait 3 faz ve faz-toprak kısa devre akım değerleri Çizelge 1'de verilmiştir [9].

Eşdeğer devre modeli oluşturmak amacıyla TEİAŞ tarafından yayınlanan 2014 Puant (Kış) yük Şartlarında Yük Akışı, Üç faz- Faz toprak Kısa Devre Etüdü raporundan [9]. Digsilent Power Factory ortamında oluşturulan İkitelli TM'ye ait eşdeğer devre modeli Şekil 1'de verilmiştir. TEİAŞ kısa devre etüt raporunda, 30.07.2015 günü saat 14.20 de gerçekleşen puant durumu için İkitelli TM'nin 154 kV B barasını besleyen Ototrafo-2 devre dışı bırakılmıştır. Bu sebepten dolayı tüm analizlerde Ototrafo-2 devre dışı bırakılmıştır. Eşdeğer devre modelinde kuplajın açık olduğu durumda 380 kV, 154 kV A ve 154 kV B baralarında hesaplanan kısa devre akımları sonuçlarının, TEİAŞ kısa devre etüdünde belirtilen kısa devre akımları ile kıyası Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1: İkitelli TM eşdeğer devre modeli

Çizelge 1: İkitelli TM'ye ait 3 faz ve faz-toprak kısa devre akımları

Bara Adı	Gerilim (kV)	Kısa Devre Etüt Raporu (kA)	Eşdeğer Devre Modeli (kA)
İkitelli	380	30.02	31.36
İkitelli A	3 Faz	154	21.70
İkitelli B	154	26.80	27.74
İkitelli	Faz	380	30.80
İkitelli A	Toprak	154	20.80
İkitelli B	154	24.90	26.18

Eşdeğer devre modeli ile yapılan çalışmanın 3 faz ve faz toprak kısa devre hesabı bakımından gerçek sistemi yansıttığı Çizelge 1'den görülmektedir. Eşdeğer devre modeli ile TEİAŞ kısa devre etüt raporu sonuçları arasındaki en büyük yüzdesel fark % 4.88 ile faz toprak kısa devre hesaplanmasında meydana gelmiştir.

4. Analiz çalışmaları

Bu bölümde İkitelli TM için oluşturulan eşdeğer devre modeli üzerinde bara ayırma, transformatör empedansı artırma ve seri reaktör kullanımının kısa devre akımını sınırlama konusundaki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

4.1. Bara ayırmanın etkileri

İkitelli TM 154 kV gerilim seviyesinde 154 kV A ve 154 kV B baraları kuplaj üzerinden anahtarlanmaktadır. Analiz ortamında bara ayırmanın etkisinin incelenmesi için 154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olduğu, bara bölme işleminin 154 kV kuplaj noktasından yapıldığı varsayılmıştır. 154 kV A ve 154 kV B baraları kuplajın kapalı veya açık olması durumları için 154 kV A ve 154 kV B baralarında 3 faz ve faz-toprak kısa devre arızası yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. 154 kV baralarda meydana gelen kısa devre akım değerlerinin farklı olması, 154 kV B barasını besleyen transformatörlerden birinin devre dışı olmasından kaynaklanmaktadır.

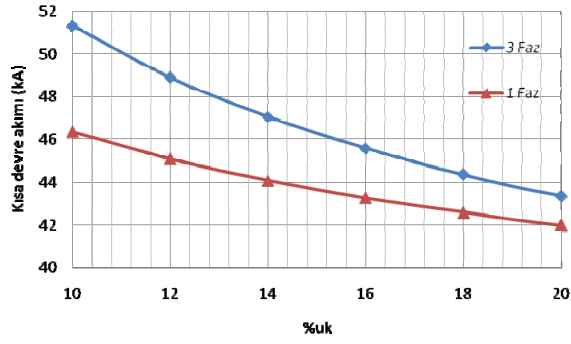
Çizelge 2: 154 kV Bara ayırma kısa devre sonuçları

Bara Adı	Arıza Tipi	Kuplaj Kapalı	Kuplaj Açık
154 kV A (kA)	3 Faz	48.24	22.75
154 kV B (kA)		48.24	27.74
154 kV A (kA)	Faz	45.02	21.11
154 kV B (kA)	Toprak	45.02	26.18

TM'lerde bara ayırma işleminin yapılacağı noktanın belirlenmesinde, bara güçlerinin dengeli olarak belirlenmesi kadar önemli bir diğer noktada baraların bağlı olduğu karşı TM'lerin kısa devre akım katkılarıdır. Bu iki parametrenin fiderlerin fiziksel koşulları ile eş zamanlı olarak değerlendirilmesi neticesinde bara kısa devre akımları arasındaki farklar azaltılabilecektir. Bu çalışma sırasında pilot bölge tesisinde aktif olarak kullanılmakta olan bara ayırma noktası ile çalışılmış, fiziksel koşullar bilinmediği için alternatif bara ayırma senaryosu üzerinde çalışılmamıştır.

4.2. Transformatör empedansı artırmanın etkileri

Transformatörlerin %uk değerinin artmasının, sistemdeki empedans artışına bağlı olarak kısa devre akımlarının azalmasına neden olduğu bilinmektedir. Ancak, empedansındaki bu artış transformatör kayıplarının da artmasına neden olmaktadır. Baralar arasındaki kuplajın kapalı olması durumunda 154 kV barasını besleyen bütün transformatörlerin %uk değerleri 10 ile 20 arasında değiştirilmiştir. Transformatörlerin %uk değerindeki değişime bağlı olarak 154 kV barasında meydana gelen 3 faz ve faz-toprak kısa devre akım değerinin değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde İkitelli TM'de bulunan bütün transformatörlerin %uk değerlerinin 20'e çıkarılması ile 154 kV barada meydana gelen kısa devre akımını azalmış ancak yine de 31.5 kA sınır değerinin üstünde kaldığı görülmüştür. Transformatör empedansı artırma sonucunda kısa devre akım seviyesi sınır değerinin altına düşürülebilir, mevcut işletmedeki transformatörler yerine daha yüksek %uk değerine sahip transformatörlerin kullanılması ekonomik açıdan da uygun değildir.



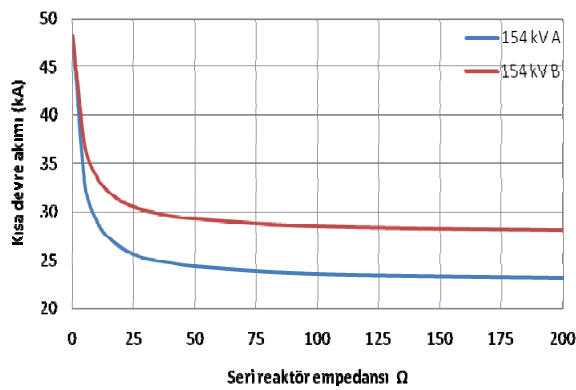
Şekil 2: Transformatör %uk değerlerine bağlı olarak 154 kV barasındaki kısa devre akım değişimi.

4.3. Seri reaktör kullanmak

Seri reaktör uygulaması, AAS konusundan en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Seri reaktörlerin normal işletme koşulunda da devrede olmalarından dolayı sistem üzerinde ilave enerji kaybına neden olmaktadır. Seri reaktörlerin TM içerisinde farklı şekillerde kullanılabilir. Bunlar;

- ✓ İki ana bara arası
- ✓ Ana bara transfer bara arası
- ✓ Kritik fider girişleri
- ✓ TM'ler arası veya bara grupları arası
- ✓ Transformator çıkışları

olarak sıralanabilir. Çalışma koşullarına göre özel imal edildikleri için değerinin düzgün belirlenmesi önem arz etmektedir. Seri reaktörün değeri kullanıldığı yere ve sınırlanmak istenen akım miktarına bağlıdır. Eşdeğer devre modelinde 154 kV baralarda meydana gelen kısa devre akım katkıları incelendiğinde en fazla kısa devre akım katkısı baraları birbirine bağlayan kuplaj üzerinde oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı 154 kV baralar seri reaktör ile birbirine bağlanmıştır. Seri reaktör empedansı 2-200Ω arasında değiştirilmiştir. Seri reaktörün empedansının değerine bağlı olarak 154 kV A ve 154 kV B baralarında meydana gelen kısa devre akımlarını değişimleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: Seri reaktör değerine bağlı olarak 154 kV A ve 154 kV B baralarında meydana gelen 3 faz kısa devre akım değişimi.

Seri reaktör empedansının artması ile kısa devre akımı azaldığı, bununla birlikte empedansın belli bir değerinden

sonra kısa devre akımındaki değişimin azaldığı Şekil 3'ten görülmektedir. Seri reaktör empedansının 25-50Ω değer aralığından sonra kısa devre akımının sınırlanması konusundaki etkisinin azaldığı belirlenmiş ve bu nedenle analizlerin seri reaktör empedansının 25Ω olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

Empedansı 25Ω olarak belirlenen reaktörün TM'de farklı noktalara bağlanması durumunda 154 kV A barasında meydana gelen kısa devre akım değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

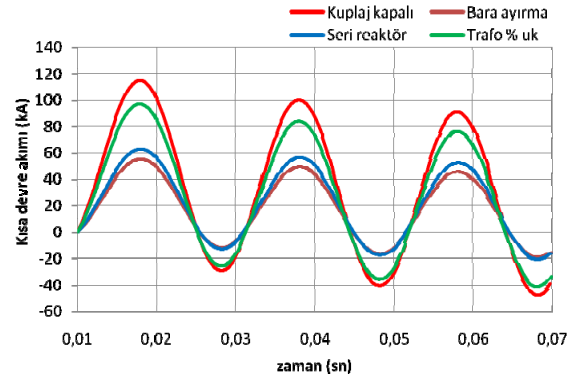
Çizelge 3: Seri reaktörün bağlantı yerine göre 154 kV A barasındaki kısa devre akım değerleri

Seri Reaktör Yeri	3 Faz (kA)	Faz Toprak (kA)	Reaktör Sayısı
Reaktör yok*	48.24	45.02	0
Baralar arasında	25.64	23.97	1
Ototrafo 1 çıkışında*	44.79	41.65	1
Ototrafo 1-2 çıkışlarında*	39.74	37.94	2
Ototrafo 1-2-3 çıkışlarında*	33.86	33.68	3
Ambarlı A-1 fider başında*	45.52	43.03	1
Yenibosna 1 fider başında*	45.58	42.80	1

*154 kV baralar arası kuplajın kapalı olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 3'deki sonuçlar incelendiğinde seri reaktörün baralar arasında kullanılması sonucunda kısa devre akım seviyesinin sınır değer altına çekildiği görülmüştür. Fider başına yerleştirilen seri reaktörlerin etkilerinin az olmasının nedeni ise ilgili hatların 154 kV A barasında meydana gelen 3 faz kısa devre akımına katkısının az olmasından kaynaklanmaktadır.

154 kV barada 4 adet 3 faz kısa devre arızası yapılmıştır. Birinci arızada 154 kV baralar arasında kuplajın kapalı olması durumunda 154 kV A barasında 3 faz kısa devre arıza yapılmıştır. İkinci arızada 154 kV baralar arasındaki kuplaj açılarak sadece 154 kV A barasında 3 faz kısa devre arızası yapılmıştır. Üçüncü arızada 154 kV baralar arasında seri reaktör yerleştirilip 154 kV A barasında 3 faz kısa devre arızası yapılmıştır. Son olarak dördüncü arızada ise 154 kV baralar arasındaki kuplajın kapalı olması durumunda bütün transformatorlerin %uk değeri 20 yapılarak 154 kV A barasında 3 faz kısa devre arızası yapılmıştır. Dört arıza durumu içinde 154 kV A barasındaki kısa devre akımları Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4: Arıza akım sınırlama yöntemlerinin karşılaştırılması.

Analiz çalışmalarında kullanılan yöntemlerin arıza akımını sınırlama miktarları yüzdesel olarak Çizelge 4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4: AAS yöntemlerin kısa devre akım sınırlama etkilerinin karşılaştırılması

AAS Yöntemi	Kısa devre akımı (kA)	Kısa devre akımındaki azalma (%)
Bara ayırmak	22.75	%52
Seri reaktör kullanmak	25.64	%46
Transformatör empedansı artırma	41.46	%14

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, güç sistemlerinin önemli problemlerinden bir olan arıza akımlarının sınırlanması için kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Sistem yapısı ve ihtiyacına bağlı olarak seçilen çözüm yöntemlerinin etkinliklerinin kıyaslanabilmesi için pilot TM üzerinde modelleme ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler için Türkiye enerji iletim sisteminde yer alan İkitelli TM’nin eşdeğer devre modeli Digsilent Power Factory programında oluşturulmuş ve bara ayırma, transformatör empedansı artırma, seri reaktör kullanma yöntemlerinin etkinliği analiz edilmiştir.

Arıza akımı sınırlama açısından bakıldığında, analiz sonuçları en etkili yöntemin bara ayırma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sistem güvenilirliği üzerindeki olumsuz etkisi dikkate alındığında seri reaktör kullanımının daha uygun bir çözüm olduğu düşünülmektedir.

İleriki çalışmalarda, AAS yöntemlerinin geçici hal cevapları incelenecek ve TM’ler için izolasyon-koordinasyon yönünden değerlendirmelerde bulunulacaktır.

Teşekkür

Analiz çalışmaları sırasında kullanılan şebeke modelinin oluşturulması sürecinde desteklerinden dolayı TEİAŞ 1. Bölge Müdürlüğü’ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] “Elektrik Şebeke Yönetmeliği”, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2016,
- [2] "Application and Feasibility of Fault Current Limiters in Power Systems", *Cigre Working Group, A3.23, June 2012*
- [3] H. Seyedi, B. Tabei, “Appropriate Placement of Fault Current Limiter Reactor in Different HV Substation Arrangements”, Scientific Research, July 2012
- [4] S. Yadav, G. K. Choudhary, R. K. Mandal, “Review on Fault Current Limiters”, International Journal of Engineering Reserch & Technology (IJERT), Vol. 3 Issue 4, April 2014
- [5] G. G. Karady, “Principles of Fault Current Limitation by a rezonans LC Circuit”, IEEE Proceedings-C, Vol.139, No1, January 1992
- [6] H. Hong, B. Su, “Desing Fabrication and Operation of the Cryogenic Systemfer a 220 kV/300 MVA Saturated Iron Core SCFL”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.25, No5, October 2014
- [7] M. Verma, “A Comprehensive Overview Behavioral Model and Simulation of a Fault Current Limiter”, 2009
- [8] S. A. Franke, “Fault Current Control in the Transmission Network”, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delf Universty of Technology, June 2012
- [9] “2014 Puant (Kış) yük Şartlarında Yük Akışı, Üç faz-Faz toprak Kısa Devre Etüdü”, TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, İşletme ve Koordinasyon Müdürlüğü, SE-2015/2