



Enerji Depolama Sistemini İçeren İletim Hattı için Uyarlanabilir Mesafe Koruması Röle Tasarımı

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 17.04.2024

Kabul/Accepted: 16.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

Design of Adaptive Distance Protection Relay for Transmission Lines Incorporating Energy Storage Systems

Medine İZGİ*, Mehmet Rıdâ TÜR

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi - Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Enerji depolama sistemleri entegre edilmiş güç sistemleri, gerçek gücün sistemde kesintisiz enerji iletilmesine olanak tanır, ayrıca hattın reaktans kompanzasyonunu sağlamaktadır. Bu durum, iletim sisteminde gerçek ve reaktif gücün daha iyi kontrol edilmesini mümkün kılar. Ancak, bu sistemlerin çalışması, geleneksel iletim hattı korumasının doğru çalışması için ek sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu makalede, hibrit seri kompanze model hat ortasına kurulu depolama sistemi tarafından simüle edilen reaktans ve direncin, uzak mesafe rölesinin performansı üzerindeki etkisinin analizi yapılmaktadır. Olası işletme modları ve depolama kontrol stratejileri ile birlikte bir inceleme gerçekleştirilerek uzak mesafe korumasının çalışma olasılığı Matlab/Simulink simülasyonu test modelinde araştırılmıştır. Seri kompanzasyon kullanarak enerji depolama/generatör entegrasyonunu içeren iletim sistemlerinin tamamını işletme kadranlarını kullanmasına yardımcı olacak EDS ile kompanze edilmiş hatların güvenilir korumasını sunmaktadır.

Abstract

Integrated energy storage systems in power grids facilitate continuous energy transmission and also offer compensatory measures for reactive power in the line. This results in enhanced management of both real and reactive power within the transmission network. Nevertheless, the operation of such systems introduces additional complexities that challenge the effectiveness of conventional transmission line protection mechanisms. In this paper, we delve into the implications of simulating reactance and resistance through a storage system placed centrally in the line, evaluating its impact on the performance of distance relay protection. We explore various operational modes and control strategies for storage, assessing the feasibility of distance protection within a Matlab/Simulink simulation framework. The primary objective of this study is to ensure robust protection for compensated lines utilizing EDS, thereby optimizing the operational spectrum of transmission systems incorporating energy storage/generator integration via series compensation.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama Sistemleri; Uzak Mesafe Rölesi; Adaptif Röle; İletim Hatları.

Keywords: Energy Storage Systems; Long Distance Relay; Adaptive Relay; Transmission Lines.

1. Giriş

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) kontrol cihazları, sistem kontrol edilebilirliğini ve güç transfer kapasitesini artırarak AC iletim sistemini esnek hale getirir (Padiyar 2007, Hingorani vd. 2011, Rao 2016). Seri FACTS kontrol cihazları, genellikle uzun iletim hatlarında hat reaktansını telafi etmek ve bu nedenle güç transferini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Seri FACTS kontrol cihazları aynı zamanda karmaşık AC/DC sistemlerinin geçici kararlılığını artırır (Bilel vd. 2018). Ekonomik nedenlerden dolayı, sabit bir seri kondansatör ile birlikte bir voltaj kaynağı kontrol cihazı (VSC) tabanlı bir kombinasyonunu kullanmak tercih edilir (Padiyar vd. 2003). Enerji Depolama Sisteminin (EDS) ek bir avantajı, (pil, yakıt hücresi veya süper iletken manyetik enerji depolama) entegre etme olanağıdır, bu da gerçek güç

sağlama açısından avantaj sağlar. Sonuç olarak, "güç transfer kontrolünün artırılması, geçici kararlılık iyileştirmesi ve güç salınımlarının sönümlenmesi" sağlanır (Beza vd. 2014). Ana iletim hattının kullanılmaması, sistemin büyük bir bölümüne güç kaybına ve tedarikçi ile müşteri arasında ekonomik kayba neden olabilir. Bu nedenle, kullanılan yöntem diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında, iletim hatları için koruma düzeni, hasarı yerinde sınırlamak ve geçici kararlılığı sürdürmek için güvenilir ve hızlı bir şekilde çalışmalıdır.

Uzak mesafe koruması, birincil iletim hatları için en çok tercih edilen şemadır ve mevcut uygulama, dijital koruma tekniklerini benimsemektir (Hossain vd. 2018, Babu vd. 2011). Sistemdeki bir bozulma sırasında, seri veya şönt bağlı FACTS kontrol cihazları tarafından iletim hatlarının telafisi, kontrol eylemleri nedeniyle birincil güç sistem

parametrelerinin değiştirilmesine yol açar. Geleneksel uzak mesafe rölesi performansının, FACTS kontrol cihazlarının işletme ve kontrolü tarafından etkilenacağı beklenmektedir. FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe rölesi işleminin doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Seri FACTS kontrol cihazlarının işletilmesine bağlı olarak dijital uzak mesafe rölesi etkinliği incelenmiştir (Dash *vd.* 2000, Singh *vd.* 2007, Abdollahzadeh *vd.* 2015, Purohit Purohi *vd.* 2019).

Şönt bağlı FACTS kontrol cihazlarının etkisini tartışmış ve UPFC kompanse hatların uzak mesafe korumasını etkileyen faktörleri incelemiştir (Sidhu *vd.* 2005, Albasri *vd.* 2007, Niaki, *vd.* 2015, Mishra *vd.* 2020). FACTS kontrol cihazlarını içeren hatlar için adaptif uzak mesafe koruması tanımlanmıştır (Abidin *vd.* 2008, Dash *vd.* 2000, Dhenuvakonda *vd.* 2019). Rapor edilen çalışma, enerji depolama cihazı olmadan EDS ve STATCOM'un sınırlı bir aralıkta iki kadrant işlemlerini dikkate alınmaktadır. Enerji depolama cihazı olmadan EDS, sadece sınırlı bir reaktans telafisi aralığında çalışabilir (Çakmak *vd.* 2023, Oymak *vd.* 2022). Dönüştürücü ve kondansatör kayıplarını karşılamak için EDS, reaktif bir gerilim enjekte eder ve ihmal edilecek kadar küçük bir gerçek gerilim enjekte eder. Enjekte edilen gerilimin hat akımı ile olan açısı yaklaşık olarak 90 derecedir. Bir enerji depolama cihazı ile EDS tarafından enjekte edilen gerçek gerilim sıfır, büyük pozitif veya büyük negatif olabilir ve işletme bölgesi çok daha geniştir, tüm dört kadrantı kapsar. Enjekte edilen gerilimin açısı 0 ile 360 derece arasında olabilir (Paz *vd.* 2015).

Enerji depolama cihazlarını içeren FACTS kontrol cihazlarının güç sistemleri işletme ve kontrolü üzerindeki etkilerini analiz eden sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. "Enerji depolama ile donatılmış EDS'nin kararlı durum karakteristikleri" değişiklikleri vurgulanmıştır (Zhang *vd.* 2001). Birleşik bir STATCOM-yakıt hücresi ile geçici kararlılık artırımı tartışılmıştır (Stella *vd.* 2016). Ancak, FACTS kontrol cihazlarının DC hattına bağlı enerji EDS uzak mesafe rölesi işlemi üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. İlk çabalar, enerji depolama cihazının (SMES) EDS ve UPFC ile entegrasyonunun iletim hattı korumasının performansı üzerindeki etkisini biraz aydınlatmıştır (Kazemi *vd.* 2008, Jamali *vd.* 2008) Ancak, EDS tarafından simüle edilen reaktans ve direnç etkisi ile EDS'nin kontrol stratejisi uzak mesafe rölesi performansı üzerinde tam olarak analiz edilmemiştir. EDS tarafından simüle edilen reaktans ve direnç ile bir enerji depolama cihazına sahip EDS sunulmuştur (Rao *vd.* 2019). Ancak, hatada uzak mesafe rölesi performansı üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. Enerji depolama olmadan EDS, pozitif veya negatif reaktansı ve ihmal edilebilir pozitif direnç simüle eder ve

bu, EDS'nin kayıplarını karşılamak için kullanılır (Tur 2020). Bu nedenle, uzak mesafe rölesi tarafından görülen tek şeyin reaktansın değişeceği beklenir. Ancak, enerji depolama ile birlikte EDS, büyük pozitif veya negatif direnç simüle eder. Bu nedenle, uzak mesafe rölesi tarafından görülen hem reaktans hem de direnç önemli ölçüde değişir. EDS için uygun kontrol stratejisinin hatada ölçülen empedans üzerindeki etkisi tam olarak araştırılmamıştır. Simüle edilen reaktans ve direnç hesaplamasına dayalı adaptif röle ayarı için yeni bir metodoloji sunulmaktadır, böylece rölenin yanlış çalışması engellenir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde iletim hatlarına yönelik hazırlanmış test modeli sunulmuş, üçüncü bölümünde yöntemle ilişkin içerik hazırlanmış ve dördüncü bölümde de sonuç kısmı sunulmuştur.

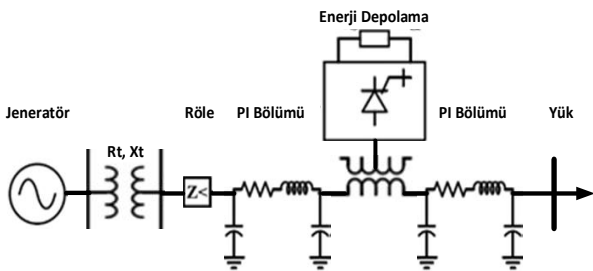
Yeni koruma yöntemleri tasarlanmanın yanı sıra, bazı araştırmacılar inverterin yüksek derecede kontrol edilebilir yeteneğine odaklanarak, koruma ve IIRG kontrolünü koordine ederek çözümü geliştirmişlerdir. (Liu *vd.* 20218) referansı, arıza sırasında sistem kararsızlık fenomeninin mekanizmasını incelemiş ve ortaya çıkan enerji depolama sistemine (ESS) dayalı bir kararlılık kontrol stratejisi önererek rüzgar güç sisteminin arıza sırasında kararlılığını sağlamıştır. Makine tarafı dönüştürücünün vektör kontrolünü rotor akım referans komutuna bir kompanzasyon terimi ekleyerek iyileştirmiş ve bu sayede DFIG'nin arıza döneminde röle koruması üzerindeki olumsuz etkiyi etkili bir şekilde azaltmıştır (Miao *vd.* 2020). Kontrol stratejisini dikkate alan matematiksel eşdeğer bir model oluşturulmuş ve bağlı olduğu IIRG'ye katkıda bulunan arıza akımının bir tahmini algoritması tanıtılmıştır (Han *vd.* 2018). Bu temelde, gelişmiş bir sanal çok terminall akım farklı koruma şeması önerilmiştir. Kendini senkronize etme teknolojisine dayanan adaptif bir frenleme akımını çıkış arıza akımının büyüklüğüne göre ayarlayabilen bir diferansiyel koruma yöntemi inverter kontrol stratejisi ile birlikte önermiştir (Zhou *vd.* 2021). Dağıtık Güç Üretimini Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi yapılmıştır (Gökçek, T., *vd.* 2019). Ayrıca şebekeye Bağlı ve Adalı Çalışma Modlarını Dikkate Alan Bir Dağıtım Sistemi için Uyarlanabilir Koruma Şeması tasarlanmıştır (Ateş Y, *vd.* 2016). Dağıtılmış üretim de dahil olmak üzere dağıtım sistemlerinde uyarlanabilir röle koordinasyonunun uygulanması gerçekleştirilmiştir (Ateş Y. *vd.* 2016).

Yenilenebilir enerjiyle ilgili güç sistemlerinin koruması için çağdaş çözümleri geniş kapsamlı olarak gözden geçirerek, yeni koruma yöntemleri tasarlama yöntemlerinin geleceğin sistem arıza özelliklerine karşılık verebileceği bulunmuştur. Ancak, güvenilirlik halen pratiğe yeterince güçlü değildir. Kontrol ve koruma arasındaki

koordinasyon bu tür zorluklar için iyi bir çözümdür. Ancak, bu yöntemin performansı, arızadan sonra kısa zaman ölçeğindeki koordinasyona büyük ölçüde bağlıdır. Ayrıca, her iki yöntem de güç sistemi için ekonomik değildir çünkü geleneksel koruma cihazlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Bu tür sorunları göz önünde bulundurarak ve yüksek kontrol edilebilirliğine güvenerek, bu makale, arızada yeni bir kontrol stratejisi tasarlayarak hem diferansiyel hem de mesafe koruma uygunluğunu ve performansını artırmayı önermektedir. Bu potansiyel ekonomik bir çözümdür çünkü mevcut koruma yöntemleri/cihazları değiştirilmesi gerekmez ve mevcut korumanın performansı hala garanti edilebilir. İzlenecek içerikler şöyle sıralanmıştır: Bölüm 2, İletim Hattı Test Modeli uygunluğunu açıklar. Bölüm 3, korumanın uygunluğunu artırmak için yeni enerji kontrol stratejisini açıklar, ardından simülasyon doğrulama ve analizleri gerçekleştirilmektedir. Son olarak, Bölüm 4'da bir sonuç çıkarılmaktadır.

2. İletim Hattı Test Modeli

Şekil 1, IEEE'in ilk ölçü modelinden uyarlanmış olan test sistemini göstermektedir (IEEE 1997). Burada R_t' ve X_t' , transformatörün direnci ve reaktansı temsil etmektedir. Şekil 1'de gösterilen röle ($Z <$), hattın jeneratör ucu üzerindeki bir mesafe rölesidir ve ölçülen empedans belirlenen empedandan daha düşük olduğunda devreye girer. Depolama 80 km'lik hattın ortasına yerleştirilmiştir. İletim hattı, depolama konumundan önce veya sonra istenilen hattın uzunluğunda bir hata simüle etmek için dört PI bölümüne ayrılmıştır.



Şekil 1. İletim Hattı Test Sistemi Modeli

2.1 Test Sistem Denklemleri

EDS, harmonikleri azaltmak için kullanılır (Padiyar vd. 2003). Sistemin analizi için bir DQ modeli kullanılmaktadır. EDS tarafından enjekte edilen gerilim aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir. V^i sistemin i anında gerilimini, V_A^i reaktifin anındaki gerilimini, V_Q^i reaktifin i anındaki gerilimini, K_m transformatörün sarım oranını tanımlamaktadır.

$$V^i = \sqrt{V_Q^{i2} + V_D^{i2}} \quad (1)$$

$$V_Q^i = K_m * V_{dc} * \sin(\varphi + \gamma) \quad (2)$$

$$V_A^i = K_m * V_{dc} * \cos(\varphi + \gamma) \quad (3)$$

$K_m = K * \rho_{se} * \cos \beta$; $K = \frac{2\sqrt{6}}{\pi}$ 12 darbeleri bir dönüştürücü için ρ_{se} transformatörün sarım oranıdır ve açısı aşağıda hesaplanmaktadır.

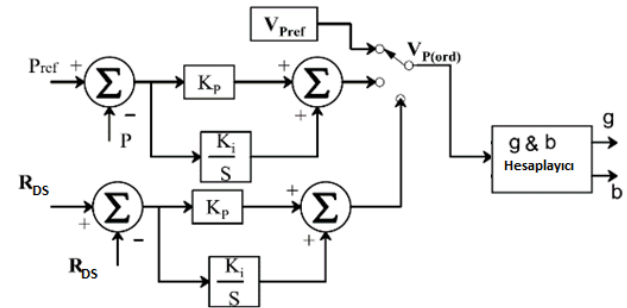
$$\varphi = \tanh^{-1}\left(\frac{I_D}{I_Q}\right) \quad (4)$$

Kontrol açısından bakıldığında, EDS için gerilimin aktif ve reaktif gerilimler şu şekilde tanımlanır ve aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$V_Q = V_A^i \sin \varphi + V_Q^i \cos \varphi \quad (5)$$

$$V_A = V_A^i \cos \varphi - V_Q^i \sin \varphi \quad (6)$$

V_A 'nin pozitif bir değeri, EDS'in gerçek güç emdiği anlamına gelir ve negatif VP, EDS'in gerçek güç sağladığı anlamına gelir. Kapasitif modda, V_Q negatifken, indüktif modda pozitiftir.



Şekil 2. Depolama Sistemi için denetleyici tasarım modeli

EDS enjekte edilen gerilimin açısı (γ) aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{V_{R(ord)}}{V_{P(ord)}}\right) \quad (7)$$

İşlevsiz açı olarak tanımlanan, β ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{V_{P(ord)}^2 + V_{R(ord)}^2}}{k * \rho_{se} * V_{dc}}\right) \quad (8)$$

Hat akımı (I), aktif ve reaktif akım değerlerine göre aşağıda gösterildiği üzere hesaplanmaktadır.

$$I = \sqrt{i_Q^2 + i_A^2} \quad (9)$$

R_{line} ve X_{line} iletim hattının direnci ve endüktif reaktansdır. Jeneratör geriliminin büyüklüğü ve jeneratör tarafından sağlanan güç aşağıdaki şekildedir.

$$V_{gm} = \sqrt{V_{gQ}^2 + V_{gD}^2} \quad (10)$$

$$P_g = V_{gQ} * i_Q + V_{gA} * i_A \quad (11)$$

EDS tarafından enjekte edilen reaktif gerilim,

$$V_Q = (X_{EDS} * I) = V_A^i * \cos \varphi - V_Q^i * \sin \varphi \quad (12)$$

EDS tarafından çekilen aktif güç,

$$P = i_A * V_A^i + i_Q * V_Q^i \quad (13)$$

3. Materyal ve Metot

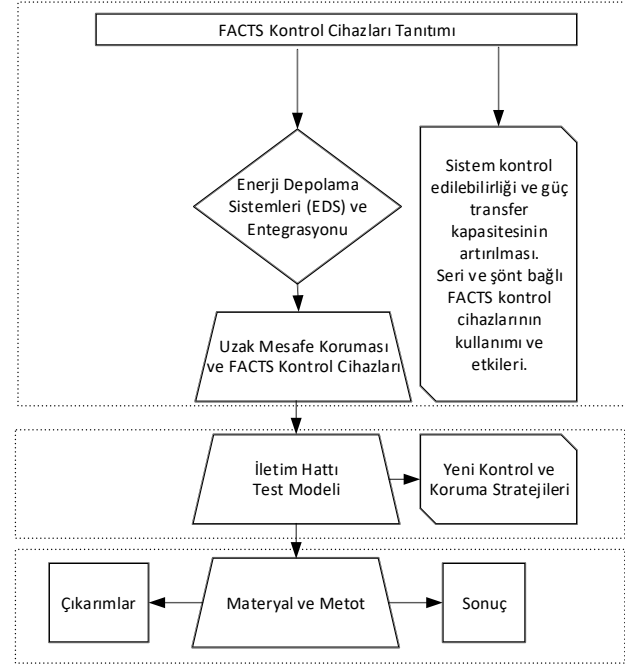
EDS enerji depolama ile entegre edildiğinde, genellikle hem V^i hem de γ 'yı kontrol etmek için depolama sistemi denetleyicisi kullanılır. Gerçek gerilim enjeksiyonunu belirlemek için V_A sabit tutulabilir veya sabit R_{EDS} kontrolü veya sabit PI kontrolü uygulanabilir. Benzer şekilde, reaktif gerilim enjeksiyonunu belirlemek için V_Q sabit tutulabilir veya sabit X_{EDS} kontrolü uygulanabilir, Şekil 2'de gösterildiği gibi. Tüm PI denetleyicilerinin K_P ve K_I değerleri kök yerleşim tasarımı ve geçici analiz ile elde edilir (Rao vd. 2015, Kirpane vd. 2016, Pandey 2014).

Yenilenebilir enerji tesisinin iletim hattı genellikle ana koruma olarak diferansiyel korumayı ve yedek koruma olarak mesafe korumasını benimser. Bu bölüm, önceki kontrol yönteminin ayarlamasına göre koruma düzenlemelerini ve koordinasyonunu tanıtır. Yukarıdaki analizden, geleneksel korumanın IIRG hattında yaşanan arızaların temel olarak açılı bozulmasına dayandığını görebiliriz. Önerilen yöntem, IIRG çıkış voltajının faz kontrolünü tanıttı, bu da hem diferansiyel hem de mesafe koruma yapılandırılmalarının temelini oluşturuyor.

Bu çalışma, FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe koruması üzerindeki etkilerini incelemektedir. Şekil 3'te gösterilen akış diyagramı, makalenin temel adımlarını ve ana noktalarını özetleyerek, FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe koruması üzerindeki etkilerini ve bu etkileri incelemek için kullanılan yöntemleri göstermektedir.

FACTS cihazları ve seri ve şönt kontrol cihazlarının rolü tanıtılmaktadır. IEEE'den uyarlanan test sistemi ve iletim hattı parametreleri açıklanmakta, 80 km'lik bir hattın ortasında EDS'nin yerleştirilmesi ve hata simülasyonu detaylandırılmaktadır. EDS'nin gerilim enjeksiyonu denklemleri ve empedans hesaplamaları sunulmaktadır. EDS'nin enerji depolama ile entegrasyonu, koruma düzenlemeleri ve koordinasyon yöntemleri ele alınmaktadır. Arıza sırasında koruma stratejileri ve

empedans hesaplamaları incelenmektedir. Jeneratör ve EDS parametreleri, reaktans kompensasyonu ve mesafe rölesi ayarları değerlendirilmektedir. Mesafe rölesi işlemi, EDS'nin nominal işletme aralığında performansı ve röle çalışmasının etkileri özetlenmektedir.



Şekil 3. Test sistemi akış diyagramı

3.1. Yenilenebilir enerji iletim hattı koruma yapılandırması

Önerilen aktif kontrol stratejisine göre, inverter çıkış akımının faz farkının, arıza noktasının her iki tarafındaki nokta terminallerinin faz açısı farkını azaltmak için ayarlanması gerektiği kabul edilmektedir. İşletme akımı ile frenleme akımı arasındaki faz açısı farkının 90°'den küçük olduğu durumlarda, iki fasörün toplamı farktan büyüktür ilkesine göre hareket edilir. Bu eylem kriterine uygun olarak, bu zaman itibarıyla akım diferansiyel koruması doğru şekilde çalışacaktır, ki bu da diferansiyel korumanın uygunluğunun arttığı anlamına gelmektedir (Liang vd. 2023).

Yukarıda belirtilen analize göre, inverter çıkış akımının referans değerleri $i_{dref} + q_{ref}$ alındığında, inverter istasyon tarafındaki çıkış arıza akımını sistem tarafındakiyle eşit hale getirebilir. Bu nedenle, sistem tarafı arıza akımı ile istasyon tarafı arıza akımı arasındaki faz farkı nedeniyle oluşan dirençli-kapasitif veya dirençli-indüktif ek bir empedans, saf dirençli ek bir empedansa dönüştürülür.

Şekil 4'te, Z_m ölçülen empedansı, Z_k etkili arıza empedansını ve ΔZ ek arıza empedansını temsil eder. ϕ_s etkili arıza empedans açısını, ϕ_m ölçülen empedans açısını ve ϕ_z arıza ek empedans açısını temsil eder; ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3

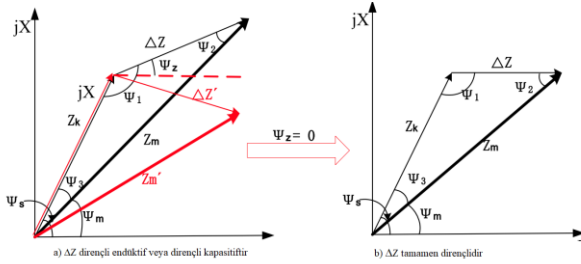
ise sırasıyla ΔZ , Z_m ve Z_k arasındaki açıyı temsil eder. Şekil 4'te, katı siyah çizgi ek arıza empedansının dirençli-indüktif olduğunu, katı kırmızı çizgi ise dirençli-kapatif olduğunu gösterir. Şekil 4'ten görülebileceği gibi, ϕ_1 ve ϕ_2 'nin aşağıdaki ilişkiyi izlediği görülmektedir:

$$\varphi_1 = \pi - \varphi_s \text{ ve } \varphi_1 = \varphi_m$$

$\varphi_m = \arg(Z_m)$ ve $\varphi_s = \arg(Z_f)$ olarak tanımlansın. Karmaşık empedans düzleminde Z_m ve Z_k arasındaki matematiksel geometrik ilişkiye göre şunu elde edebiliriz:

$$\frac{|Z_m|}{|\sin\varphi_1|} = \frac{|Z_k|}{|\sin\varphi_2|}$$

$\varphi_s = \arg(Z_{set})$ ve Z_{set} ayar empedansı olarak tanımlansın. Arıza noktasından koruma kurulumuna kadar olan gerçek etkin empedans (Z_k), yukarıdaki formülle elde edilebilir. Arıza meydana geldiğinde, yarı-dörtgen karakteristikli empedans elemanı kullanılarak etkin arıza empedansı elde edilir ve ayar değeriyle karşılaştırılır. Eğer eylem bölgesi içindeyse, koruma doğru şekilde çalışır; aksi takdirde, arıza meydana gelir.



Şekil 4. Arıza ek empedansının dönüşüm akış şeması.

3.1 İletim Hattı Kontrol Stratejileri

Generatör tarafından sağlanan güç (P_g), 0.9 pu olarak sabitlenmiştir. EDS'nin DC gerilimi, enerji kaynağı tarafından 0.7 pu olarak sabitlenmiş kabul edilmektedir. Analiz için dikkate alınan sistemde, EDS'nin derecesi 150 MVA'dır. Temel MVA'sı 892.4 MVA ve hattın akımı 1 pu'dur. V_{max}^i 0.16809 pu olarak bulunmuştur. Sistemin sabit bir seri kondansatörü vardır ve kapasitif reaktansı 0.45 pu'dur. X_{EDS} 'nin -0.15 pu (kapasitif) ile 0.15 pu (endüktif) arasında değişen bir seri reaktans telafi aralığı olduğu kabul edilmektedir. P_{ref} aralığını sabitlemek için çeşitli işletme modları için V_i belirlenir ve elde edilen değerler Çizelge 1'de tablo halinde sunulmuştur (tüm değerler pu cinsindedir).

Çizelge 1. Sabit Durum Koşulları Altında EDS Parametreleri.

Çalışma modu	V^i	I
$X_{EDS} = -0.1, P_{ref}=0$	$0.129 \angle -90^\circ$	$0.89 \angle 17^\circ$
$X_{EDS} = -0.1, P_{ref}=0.05$	$0.159 \angle -56^\circ$	$0.89 \angle 26^\circ$
$X_{EDS} = 0, P_{ref}=0.1$	$0.159 \angle 0^\circ$	$0.89 \angle 34^\circ$

Verilen denklemler, EDS tarafından sağlanan empedans katkısını belirlemek için kullanılır ve aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$R_{EDS} = \frac{V_P}{|I|} \text{ ve } X_{EDS} = \frac{V_R}{I} \quad (14)$$

Reaktans telafisi sağlandığında EDS ile P_{ref} 'in aralığı -0.05 pu ile 0.05 pu arasında olur. Öte yandan, EDS olmadan ($X_{EDS}=0$), $P_{refmax}=0.1$ pu'dur. Başlangıçta, herhangi bir sistem bozulması olmadan (arıza yok) analiz yapılır. Yönlü dörtgen mesafe rölesi, -10 derece yönlü açı ayarı ve 110 derece negatif kısıtlama açı ayarı içermektedir (Oza vd. 2010). Hattın empedansı $Z = (0.05 + j1)$ pu olarak kabul edilir. Mesafe rölesinin 1. bölge erişimi, korunan hattın %80'i olarak kabul edilir. Bu nedenle mesafe rölesi için reaktans ayarı $X_{set} = 0.5$ pu olarak kabul edilir.

Bir arıza direnci olarak 15 ohm (0.05 pu) düşünülerek bir direnç ayarı seçilir. Bu nedenle röle için direnç ayarı $R_{set} = 0.03 + 0.04 = 0.07$ pu olarak kabul edilir. Bu değerler, analiz için düşünülen çeşitli durum çalışmalarında jeneratör ucu rölesi için 1. bölge röle ayarları olarak kullanılır. Analitik olarak, empedans değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilebilir. EDS tarafından sunulan empedans;

$$Z_{SSSC} = \frac{V^i}{I} \quad (15)$$

Röle tarafından görülen görünür empedans;

$$Z_{relay} = Z_{line} + Z_{SSSC} - jX_C + jX_{S_{sys}} + \frac{E_b}{I} \quad (16)$$

Seri kondansatör ile reaktans kompensasyonunu %50'te sabit tutarken, net reaktans kompensasyonu %40 ila %40 arasında değiştirilebilir. %80 ve %40 net kompensasyon seviyeleri için elde edilen empedans değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Normal durum, reaktans, empedans ve direnç simülasyonu

Çalışma modu	Z_{EDS}	$Z_{röle}$
Durum 1 EDS yok	$0+j0$	$1+j0.18$
Durum 2 $X_{EDS}=0, P_{ref}=0.05$	$0.09+j0$	$1+j0.05$
Durum 3 $X_{EDS}=0, P_{ref}=-0.05$	$-0.08+j0$	$0.9+j0.28$

EDS'in işletme koşullarındaki değişiklik, hat akımında bir değişikliğe neden olacaktır (bkz. Çizelge 2). Bu nedenle, denklem (16) uyarınca, EDS'in çeşitli işletme modları için röle tarafından görülen hem direnç hem de reaktans farklı olacaktır. $Z_{röle}$ 'nin röle karakteristikleri dışında olduğundan röle çalışmaz. Ölçülen $Z_{röle}$ ayarlanan empedansın dışında olduğundan mesafe rölesi çalışmayacaktır. Yapılan çalışmaların temelinde, aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

- Durağan durum koşulları altında, nominal işletme aralığı içinde kullanıldığında mesafe rölesi işlemi EDS tarafından etkilenmez,
- EDS hat döngüsünde olmadığına, mesafe rölesinin işlemi EDS tarafından etkilenmez. EDS hat döngüsünde olduğunda, $Z_{röle}$ işletme moduna ve EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlıdır. Bu nedenle, standart ayarlarla çalışan geleneksel mesafe rölesi işlemi güvenilir değildir,
- Kapasitif işletme modunda, mesafe rölesi negatif reaktans simülasyonunda aşırıya geçebilir ve indüktif işletme modunda pozitif reaktans simülasyonunda röle aşağıya geçebilir,
- Gerçek güç emilirken, mesafe rölesi pozitif direnç simülasyonunda aşağıya geçebilir ve gerçek güç sağlanırken, negatif direnç simülasyonunda aşırıya geçebilir.

Aşırıya geçme ve aşağıya geçme derecesi aynı zamanda EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlıdır. Belirli bir EDS işletme modu ve hata konumu için, $Z_{röle}$ hat tipinden etkilenmez. Sabit reaktans ve sabit direnç kontrol stratejisine dayalı adaptif röle ayarıyla donatılmış sayısal dörtgen mesafe rölesi, mesafe rölesi yanlış işlemlerini önleyecektir. FACTS kontrol cihazları, AC iletim sistemlerinin kontrol edilebilirliğini ve güç transfer kapasitesini artırarak esnek hale getirir. Seri FACTS cihazları uzun iletim hatlarında hat reaktansını telafi etmek ve geçici kararlılığı artırmak için kullanılır. Ekonomik nedenlerle, sabit bir seri kondansatör ile VSC kombinasyonu tercih edilir. EDS, enerji depolama cihazlarıyla entegrasyon imkanı sunarak güç transfer kontrolünü ve kararlılığı artırır. Uzak mesafe koruması, iletim hatları için yaygın olarak kullanılır ve dijital koruma teknikleriyle daha da geliştirilir. FACTS cihazlarının uzak mesafe röle performansını etkileyebileceği belirtilmiştir. Seri ve şönt bağlı FACTS cihazlarının etkileri ve adaptif uzak mesafe koruması incelenmiştir. Enerji depolama cihazları olmadan EDS'nin sınırlı reaktans telafisi sağlayabildiği, ancak enerji depolama cihazlarıyla birlikte dört kadrantta çalışabildiği ve empedans değişimlerinin önemli ölçüde farklı olduğu vurgulanmıştır.

Enerji depolama cihazlarının FACTS kontrol cihazlarıyla entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. EDS ve STATCOM'un kararlılık artırıcı etkileri tartışılmış, ancak DC hatlarına bağlı enerji depolama cihazlarının uzak mesafe rölesi üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. Uygun kontrol stratejileriyle adaptif röle ayarları sunulmuş ve sistem kararlılığını artıran stratejiler önerilmiştir. Kontrol ve koruma arasındaki koordinasyonun, ekonomik zorluklara rağmen, gelecekteki güç sistemleri için önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, arızalarda diferansiyel ve mesafe koruma performansını artırmak için yeni kontrol stratejileri önerir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu makalede, EDS içeren kademeli işletiminde simüle edilen reaktans ve direncin iletim hattı korumasına etkisi analiz edilmiştir. Hattın üzerinde simetrik ve asimetrik hatalarla bir araştırma yapılmıştır. Açıkça gösterilmiştir ki EDS, hata döngüsü dışındayken mesafe rölesi performansını etkilememektedir. EDS hat döngüsünde olduğunda, REDS, XEDS değerleri ve dolayısıyla $Z_{röle}$, EDS'nin işletme moduna ve EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlı olarak önemli ölçüde değişecektir. Tüm bunlar, mesafe rölesi ayarını zor bir görev haline getirir ve geleneksel mesafe rölesi standart ayarlarla yanlış çalışma gösterir, yani aşağıya veya aşırıya geçmektedir. EDS için sabit reaktans ve sabit direnç kontrol stratejisine dayalı sayısal dörtgen mesafe rölesi için yeni bir adaptif ayar, mesafe rölesi yanlış çalışmasını önlemek amacıyla sunulmuştur. EDS'ye enerji depolama cihazı eklenmiş bir DQ modeli ve EDS'nin işletme modunun ve kontrol stratejisinin, mesafe rölesinin performansına dört işletme kadranındaki etkisinin analizi yapılarak kesintisiz enerji destekli depolama teknolojisinin katkısı sunulmuştur. EDS ile kompanse edilmiş hatlarda dörtgen sayısal mesafe rölesinin yanlış çalışmasını önlemek için emüle edilmiş REDS ve XEDS kontrolüne dayalı yeni bir adaptif röle ayarları konusunda uygun parametreler sunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan EDS ile kompanse edilmiş hatların güvenilir koruması, iletim sistemlerinin enerji depolama/generatör entegrasyonunu içeren VSC tabanlı seri kompanzasyonu kullanarak işletme kadranlarının tamamını kullanmasına yardımcı olacaktır. Bu çalışma özetle, geleneksel koruma yöntemlerinin, enerji depolama ve FACTS cihazlarının entegrasyonu ile ortaya çıkan yeni zorluklara nasıl yanıt verdiğini incelemektedir. Özellikle, seri kompanzasyon ve enerji depolama entegrasyonunun, iletim hattı reaktansı ve direnci üzerindeki etkilerini simüle ederek, uzak mesafe rölesi performansını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu da, enerji depolama cihazlarının entegre edildiği iletim sistemlerinin güvenilir ve verimli bir şekilde korunması için yeni adaptif koruma stratejileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Gelecek çalışmalarda, EDS ve FACTS cihazlarının entegrasyonu ile ilgili daha sofistike kontrol stratejileri geliştirmek, koruma sistemlerinin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırabilir. Bu, dinamik durumlarda bile daha kararlı bir sistem sağlamak için oldukça önemlidir. EDS ve FACTS cihazlarının entegre edilmesinin ekonomik etkilerini inceleyen çalışmalar, bu teknolojilerin maliyet etkinliğini değerlendirmeye yardımcı olabilir. Bu da, geniş çaplı uygulamalar için daha uygun maliyetli çözümler geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, çalışmada kullanılan enerji depolama teknolojilerinin çeşitlendirilmesi ve farklı teknolojilerin (örneğin, lityum iyon piller, süper iletken manyetik enerji depolama)

etkilerinin incelenmesi, koruma sistemlerinin performansını ve etkinliğini artırabilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Yazma

Yazar 2: Bıçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Oymak, A., Tür, M. R. and Hossain, E., 2022. Modeling of STATCOM Connected System to Microgrid, *Global Energy Conference (GEC)*, Batman, Turkey, 202-207, <https://doi.org/10.1109/GEC55014.2022.9986624>
- Abdollahzadeh, H., Mozafari, B., and Jazaeri, M., 2015. Realistic insights into impedance seen by distance relays of a SS-compensated transmission line incorporating shunt capacitance of line. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **1(65)**, 394-407, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.037>
- Abidin, A. F. B., Al-Dabbagh, M., and Mohamed, A., 2008. Adaptive distance protection relays: An Overview. *In Proc. Eng. Postgraduate Conf.(EPC)* 1-8.
- Albasri, F. A., Sidhu, T. S., & Varma, R. K., 2007. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines. *IEEE transactions on Power delivery*, **22(4)**, 2116-2125. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900283>
- Ates Y, Boynuegri AR, Uzunoglu M, Nadar A, Yumurtacı R, Erdinc O, Paterakis NG, Catalão JPS., 2016. Adaptive Protection Scheme for a Distribution System Considering Grid-Connected and Islanded Modes of Operation. *Energies*, **9(5)**, 37-38, <https://doi.org/10.3390/en9050378>
- Ates, Y., Uzunoglu, M., Karakas, A., Boynuegri, A. R., Nadar, A., & Dag, B., 2016. Implementation of adaptive relay coordination in distribution systems including distributed generation. *Journal of Cleaner Production*, **1(12)**, 2697-2705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.066>
- Pandey Protection Subcommittee B.S., 2014. NRPC, New Delhi
- Babu, K. V., Tripathy, M., & Singh, A. K., 2011. Recent techniques used in transmission line protection: a review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **3(3)**, 1-8, <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68416>
- Beza, M., & Bongiorno, M., 2014. An adaptive power oscillation damping controller by STATCOM with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30(1)**, 484-493. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2320411>
- Bilel, A., Boukadoum, A., Leulmi, S., & Boukra, T., 2018. Improving the transient stability of the mixed AC/DC networks with FACTS. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, **6(4)**, 477-485. <https://doi.org/10.52549/ijeel.v6i4.473>
- Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R., 2023. Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>
- Dash, P. K., Pradhan, A. K., Panda, G., & Liew, A. C., 2000. Adaptive relay setting for flexible AC transmission systems (FACTS). *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15(1)**, 38-43. <https://doi.org/10.1109/61.847226>
- Dash, P. K., Pradhan, A. K., Panda, G., & Liew, A. C., 2000. Digital protection of power transmission lines in the presence of series connected FACTS devices. *In 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)* **1(3)**, 1967-1972. <https://doi.org/10.1109/PESW.2000.847655>
- Dhenuvakonda, K. R., Singh, A., Thakre, M. P., Karasani, R. R., & Naidoo, R., 2019. Adaptive digital distance relay for SS-based double-circuit transmission line using phasor measurement unit. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **29(4)**, 27-87. <https://doi.org/10.1002/etep.2787>
- Gökçek, T., & Ateş, Y., 2019. Dağıtık Güç Üretimini Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, **1(15)**, 216-228. <https://doi.org/10.31590/ejosat.521350>
- Han B, Li H, Wang G, Zeng D, Liang Y., 2018. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators. *IEEE Trans Smart Grid*, **9(5)**, 5418-5431. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2749450>
- Hingorani N.G. & Gyugyi L., 2011. Understanding FACTS. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, ITth Floor, New York, NY 10016-5997.

- Hossain, E., Tür, M. R., Padmanaban, S., Ay, S., & Khan, I., 2018. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *IEEE Access*, **6(1)**, 16816-16833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981>
- IEEE SSR working group, 1977. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, **96(5)**, 1565-1572.
- Jamali, S., Kazemi, A., & Shateri, H., 2008. Effects of SMES equipped UPFC on distance relay tripping characteristic. In *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2008.4745270>
- Kazemi, A., Jamali, S., & Shateri, H., 2008. Effects of SMES equipped SS on distance relay tripping characteristic. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517157>
- Kirpane, R., & Bedekar, P. P., 2016. Removal of DC offset using digital mimic filtering technique. In *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, 470-475. <https://doi.org/10.1109/ICGTSPICC.2016.7955347>
- Liang, J., Yiqi T., Zilin Y., Enyu J., Ruiling X., Jiaming Y., Yang F., 2023. A control based protection adaptability improving strategy for transmission line with renewable energy integration, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **1(49)**, 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109009>
- Liu J., Yao W., Fang J., Wen J., Cheng S., 2018. Stability analysis and energy storage-based solution of wind farm during low voltage ride through. *Int J Electr Power Energy Syst*, **1(1)**, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.03.013>
- Miao Y., Yafang T., Yixin H., Junwei L., Guolong M., 2020. Research on the influence of double-fed fan control mode on relay protection. *Power Syst Protect Control*, **48(02)**, 180-187, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109009>
- Mishra, S., Gupta, S., & Yadav, A., 2020. Study on factors affecting distance protection scheme of UPFC compensated transmission lines. In *2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)* 143-148. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071515>
- Niaki, A. M., & Amiri, I. D., 2015. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance. In *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)* 348-354. <https://doi.org/10.1109/KBEI.2015.7436070>
- Oza, B. A., Nair, N. C., Mehta, R. P., & Makwana, V. H. 2010. Power system protection and switchgear. In Chapter-1, Introduction and Philosophy of a Protective Relaying System. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Padiyar, K. R., 2007. FACTS controllers in power transmission and distribution. K. R. Padiyar, *Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science, Bangalore-560 012, India*
- Padiyar, K. R., & Prabhu, N., 2003. Analysis of subsynchronous resonance with three level twelve-pulse VSC based SS. In *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region* 76-80. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2003.1273229>
- Paz, M. C. R., Leborgne, R. C., & Bretas, A. S., 2015. Adaptive ground distance protection for UPFC compensated transmission lines: A formulation considering the fault resistance effect. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **7(3)**, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.04.008>
- Purohit, A., & Gohokar, V., 2019. Maloperation of distance relay under faulty conditions in presence of static synchronous series compensator. In *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 66-70. <https://doi.org/10.1109/ICPEA.2019.8818520>
- Rao, H. G., Prabhu, N., & Mala, R. C., 2015. Investigations on stability of a hybrid series compensated system with SS. In *2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*, 57-64. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2015.7229593>
- Rao, H. G., Prabhu, N., & Mala, R. C., 2019. Emulated reactance and resistance by a SS incorporating energy storage device. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, **9(2)**, 8-40. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp840-850>
- Rao, M. V., Sivanagaraju, S., & Suresh, C. V., 2016. Available transfer capability evaluation and enhancement using various FACTS controllers: *Special focus on system security. Ain Shams Engineering Journal*, **7(1)**, 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.006>
- Sidhu, T. S., Varma, R. K., Gangadharan, P. K., Albasri, F. A., & Ortiz, G. R., 2005. Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power delivery*, **20(3)**, 1837-1845. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848641>
- Singh, M., Panigrahi, B. K., & Maheshwari, R. P., 2011. Transmission line fault detection and classification. In *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology* 15-22.

<https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760084>

Stella, M., Ezra, M. A., Fathima, A. P., & Jiunn, C. K., 2016. Research on the efficacy of unified Statcom-Fuel cells in improving the transient stability of power systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41(3)**, 1944-1957.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.130>

Tur, M. R. 2020. Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique. *IEEE Access*, **8(1)**, 77962-77971.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990345>

Zhang, I., Crow, M. L., Yang, Z., & Chen, S., 2001. The steady state characteristics of an SSSC integrated with energy storage. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (Cat. No. 01CH37194), 1311-1316.
<https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917271>

Chenghan, Z. H. O. U., Guibin, Z. O. U., Lindong, Z. A. N. G., Xuhui, W. E. N., Liangzhi, S. U. N., & Xiaogong, D. U., 2021. Novel differential protection for distribution network with inverter-interfaced distributed generations. In *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 19-23.
<https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436957>

7