

DC Raylı sistem trafo merkezlerinde geçici olayların analizi ve PLL tabanlı dinamik voltaj düzenleyici uygulaması

Mehmet Taciddin AKÇAY^{1,*}, Aysel ERSOY²

¹ Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul

² İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi., Elektrik-Elektronik, İstanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 06.03.2023

Kabul Tarihi (Accepted Date): 04.12.2023

Öz

Yıldırımlar, kısa devreler, arızalar ve anahtarlama güç sistemlerinde geçici olayların oluşumuna neden olmaktadır. Anlık oluşan bu durum akım veya gerilimde genlik değerinin yükselmesine veya düşmesine sebep olmaktadır. Elektrik güç sistemleri için kararlılık çok kritiktir. Bu yüzden güç sistemlerinde oluşan bu geçici durumların analiz edilerek gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Raylı sistemler için işletme sürekliliği kritik bir öneme sahip olduğu için işletmenin durmaması için bu tip elektriksel geçici durumlar özellikle dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada DC beslemeli raylı sistem trafo merkezlerinde bulunan orta gerilim sistemlerinde oluşabilecek geçici rejimlerin analizi ve bu durumun dinamik voltaj düzenleyici uygulaması ile ortadan kaldırılması araştırılmıştır. Orta gerilim sisteminde gerçekleşebilecek kısa devre arıza durumu ve gerilim yükselmesi durumları incelenmiştir. Voltaj düzenleyici devresi için IGBT'lerden oluşturulan güç elektroniği devresi kullanılmıştır. Geçici rejimlerin oluşturduğu etki ve voltaj düzenleyici devresinin sisteme bağlanmasından sonraki duruma ait benzetim yapılarak sağlanan iyileştirme durumu ortaya konulmuştur. Yüke uygulanan gerilimin genliği, kaynak geriliminin genliğiyle aynı seviyeye getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dinamik, Düzenleyici, Gerilim, Raylı, Trafo

*Mehmet Taciddin AKÇAY, mehmettaciddinacay@halic.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-1050-4566>
Aysel ERSOY, aersoy@iuc.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1164-7187>

Analysis of transient events in DC rail system substations and application of PLL based dynamic voltage regulator

Abstract

Short circuits, lightning, faults and switching cause transient cases in power systems. This Instantaneous situation give rise to change in the amplitude of the current and the voltage. Voltage regularity is critical in electrical power systems. Therefore this transient cases should be considered and analyzed for the prevention of these events. This kind of electrical transient events are especially must be studied because of the importance of the operation continuity in railway systems. In this study, transient analysis of medium voltage systems in DC rail system substations with a solution by dynamic voltage regulator application is researched. Medium voltage short circuit fault case and voltage swell are examined. Power electronic circuit with IGBT's is used for the voltage regulation circuit. Transient voltage and the electrical situation after the connection of the dynamic voltage regulator to the circuit are simulated and the results given with the restoration. Load voltage amplitude is leveled with the source voltage amplitude.

Keywords: *Dynamic, Rail, Regulator, Transformator, Voltage*

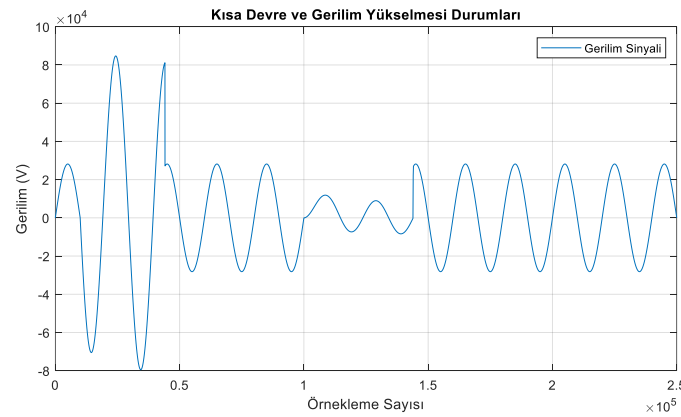
1. Giriş

Güç sistemlerinin ana görevi yüke ulaştırılması gereken gerilim sinyalinin sinüzoidal dalga şekline sahip olmasıdır. Şebekeye bağlanan tüm alt sistemlerin performansında herhangi bir problem yaşanmaması açısından bu durum çok önemlidir. Güç kalitesi probleminin temelinde gerilimde ve akımda oluşan düzensizlikler bulunmaktadır [1-2]. Şebekeye bağlanan nonlineer yükler de güç kalitesinin sorunları arasında yer almaktadır [3]. Elektriksel sistemlerin bazı bölgelerinde ya da bir bölgesinde bazen işletmeci ve tüketici tarafından istenmeyen geçici rejimler yaşanabilmektedir. Bu durumlar kısa devre durumları, yıldırımlar, arızalar ve anahtarlamalardan kaynaklanan elektriksel durumlardır. Bu tip geçici durumlar sistemde gerilim ve akım sinyallerinde yükselmelere ve alçalmalara neden olarak alt sistemlerin performansını ve ömrünü olumsuz etkilemektedir.

DC beslemeli raylı sistemlerde ana enerji temini şebekeden temin edilen orta gerilim ile gerçekleştirilmektedir. Bu enerji kullanarak trafo merkezlerinde bulunan dönüştürücü ekipmanlarla aracın ihtiyacı olan ilgili besleme gerilimi elde edilmektedir. Şebekeden temin edilen ve trafo merkezlerinde kullanılan 34.5 kV orta gerilim sisteminde gerçekleşecek bir kısa devre durumu ve gerilim yükselmesi durumu orta gerilim hücrelerinin arıza konumuna geçmesine neden olarak işletmenin durmasıyla sonuçlanabilecek olumsuz bir durumdur. Gerilim çökmesi ve yükselmesi bu olaylar arasında en sık rastlanan olaylardır [4]. Gerilim çökmesi sıklıkla sistemde gerçekleşen arıza durumlarında ya da büyük asenkron motorların devre alınması esnasında gerçekleşmektedir [5]. Gerilim çökmesinin karakteristiği ve gerilimdeki azalmanın etkin değeri IEEE 1159 standardında verilmektedir [6].

Dinamik voltaj düzenleyicinin işlevi gerilim alçalması ya da yükselmesi tespit edildiğinde hesaplanan gerilimin sisteme seri bağlı transformatör ile aktarılmasıdır [7]. Dinamik

voltaj düzenleyici (DVR) kritik yüklere dinamik olarak gerilim kompanse edebilen güç elektroniği ekipmanıdır [8]. Yüksek gerilim değişimleri kritik tüketici yüklere ait alt sistemlerde açmalara ve neticesinde ortaya çıkacak kayıplara neden olmaktadır [9]. Gerilim dalgalanmaları özellikle yarı iletken teknolojisi ile çalışan hassas ekipmanların zarar görmesine neden olmaktadır. Bu ekipman kontrol edilebilir röle, seri transformatöre bağlı gerilim hesap modülü ile gerilim kaynağından oluşmaktadır [10]. Bu yapıda transformatör, sistemin ihtiyacı olan gerilimi belirli aralıklarla sisteme enjekte ettiği için kritik bir öneme sahiptir [11]. Yük gerilimin düzeltilmesi için dağıtım barasına aktif ya da reaktif güç enjekte edilmektedir [9]. Bu ekipman için kompanzasyon kapasitesi eviricinin ulaşabileceği gerilim seviyesine bağlıdır [12]. Gerilim dalgalanmalarını önlemek için birçok yöntem kullanılmasına rağmen optimal çözüm olarak dinamik voltaj düzenleyiciler kullanılmaktadır [13]. Sistemdeki hassas ekipmanlar gerilim dalgalanmalarından daha çok etkilendiği için bu ekipman oluşan fark gerilimi sisteme enjekte etmek için çok hızlı bir şekilde devreye girmektedir [14]. Dinamik voltaj düzenleyici ile ilgili çeşitli gerilim kompanzasyon stratejileri ve kontrol teknikleri ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Dinamik voltaj düzenleyici için kullanılan en yaygın kontrol teknikleri klasik kontrol teorisi ya da modern kontrol teorisidir [15]. Optimize kontrol stratejileri sisteme enjekte edilen gerilimi azaltmaktadır. Dinamik voltaj düzenleyicide dalgalanma filtresinin tasarımı performansın artırılması için incelenmektedir [16]. Güç kalitesi elektrikli ekipmanlar ve son tüketici çok önemlidir [17]. Elektrikli hassasiyete sahip yüklerin sayısı arttıkça bu önem daha kritik bir seviyeye ulaşmaktadır [18]. Birden fazla hassas yükün korunması için gereken DVR cihazlarının genel ekonomik maliyetini azaltmak amacıyla DC dinamik gerilim düzenleyici kullanılmaktadır [19]. Güç sisteminde, reaktif güç üretimi ile tüketimi arasında dengesizliğe yol açan ve gerilim sapsmalarına neden olan doğal bir yük değişimi vardır [20]. Ani şebeke gerilimi bozulma koşulları altında üç fazlı yük gerilimini stabilize etmek için dinamik voltaj düzenleyici geliştirilmiştir [21]. Şekil 1. ile kısa devre ve gerilim yükselmesi durumları gösterilmektedir.



Şekil 1. Kısa devre ve gerilim yükselmesi durumları

[1] ile farklı kontrol teknikleri kullanılarak DVR modellemesi yapılmıştır. [2]'de dengesiz yük koşullarında hızlı yük kompanzasyonu için Dstatkom uygulaması anlatılmıştır. [3] ile verilen çalışmada güç kalitesi problemi için Statkom uygulaması anlatılmıştır. [4] nolu çalışmada Bulanık Mantık tabanlı DVR konusu incelenmiştir. [5] nolu çalışmada ise ANFIS kontroller kullanılarak DVR tasarımı yapılmıştır. [6] nolu çalışma ile düşük maliyetli DVR konusu araştırılmıştır. [7] ile güç kalitesi problemi ele alınarak DVR modellemesi yapılmıştır. [8]'de güç dağıtım sistemlerinde Bulanık Mantık

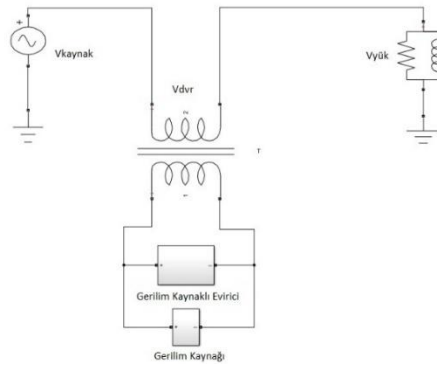
tabanlı DVR uygulaması anlatılmıştır. [9]'da güç kalitesinin artırılması için DVR çalışması anlatılmıştır. [10] ile alçak gerilim tarafına bağlı ANFIS tabanlı DVR konusu araştırılmıştır. [11]'de ise yüksek frekans tabanlı izole DC-DC dönüştürücü kullanan DVR sistemi anlatılmıştır. Bu çalışmada DC beslemeli raylı sistem trafo merkezlerinde bulunan orta gerilim sistemlerinde oluşabilecek geçici rejimlerin analizi ve bu durumun voltaj düzenleyici uygulaması ile ortadan kaldırılması matlab yardımıyla modellenmiştir. Raylı sistem elektrifikasyon sistemi için tasarlanan DVR sistemi PLL tabanlı olup sonuçlarda yüksek başarı elde edilmiştir. Benzetimle ilgili grafikler ve sonuçları kıyaslamalı olarak anlatılmıştır. Benzetimle sağlanan iyileştirme durumu sonuçlarla açıklanmıştır.

2. Metot

Bu kısımda ilgili çalışmaya ait matematiksel denklemlerle dinamik voltaj düzenleyici anlatılarak deneysel çalışmaya ait içeriklere yer verilmiştir.

2.1. Dinamik voltaj düzenleyici

Dinamik voltaj düzenleyici IGBT'lerden oluşur ve kontrol edilen role ile devreye girmektedir. Şekil 2.'de dinamik voltaj düzenleyicinin yapısı gösterilmektedir. Tek faz elektrik ağı kullanılmıştır. Sisteme enjekte edilecek gerilim referans kaynak geriliminden ölçülen gerilimin çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Referans gerilimin hesaplanması için faz kilitlemeli döngü (PLL) kontrol sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Dinamik voltaj düzenleyicinin yapısı [15]

Dinamik voltaj düzenleyici tarafından sisteme aktarılan gerilim V_{enj} ile ifade edilmekte olup denklem 1. eşitliği ile verilmektedir. V_Y ve V_K ise yük gerilimini ile kaynak gerilimini temsil ederken θ güç açısını ifade etmektedir.

$$V_{enj} = \sqrt{V_Y^2 + V_K^2 - 2V_Y V_K \cos(\theta_Y - \theta_K)} \quad (1)$$

Denklem 2. ile dinamik voltaj düzenleyicinin güç açısı hesaplanmaktadır.

$$\theta_{enj} = \tan^{-1} \frac{V_K \sin \delta}{V_K \cos \delta - V_Y} \quad (2)$$

Dinamik voltaj düzenleyicinin gerilimi denklem 3. eşitliğinde görüldüğü üzere yük geriliminden kaynak geriliminin çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır.

$$|V_{DVD}| = |V_Y| - |V_K| \quad (3)$$

Yük akımına ait denklem ise denklem 4. ile verilmektedir. Yükün aktif gücü P_Y , reaktif gücü ise Q_Y ile gösterilmektedir.

$$I_Y = \frac{P_Y + jQ_Y}{V_Y} \quad (4)$$

Dinamik voltaj düzenleyiciye ait görünür güç ise gerilimle yük akımının çarpımıyla bulunmaktadır. Bu eşitlik denklem 5. ile gösterilmektedir.

$$S_{DVD} = V_{DVD} I_Y \quad (5)$$

Dinamik voltaj düzenleyicinin çalışmasıyla ilgili oluşturulan sistem aşağıda algoritma 1'de gösterilmektedir.

Adım 1. Başlangıç değişkenlerinin atanması

Adım 2. V_c çıkış geriliminin ölçülmesi ve sinyal bilgisinin aktarılması

Adım 3. Kaynak voltaj sinyalinin girişi

Adım 4. V_{max} değerinin belirlenmesi

Adım 5. PLL kontrolörü ile frekansın hesaplanması

Adım 6. Tetikleme sinyalleri için V_r referans geriliminin hesaplanması

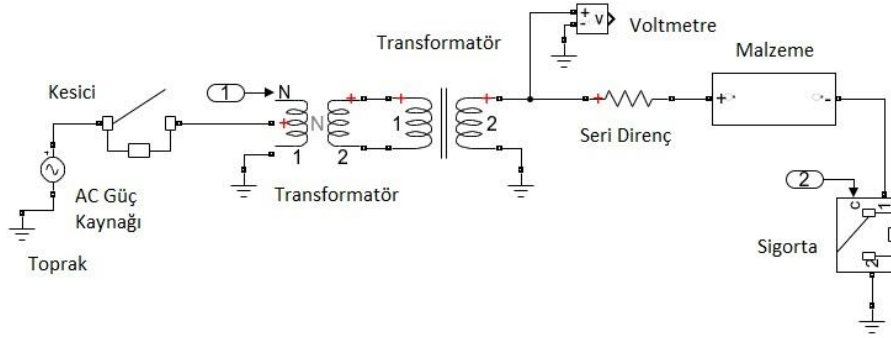
Adım 7. Tetikleme sinyalleri üretilmesi ile devrenin ilettime geçmesi

Adım 8. $V_r < \epsilon$ olana kadar çalışmanın sürdürülmesi

Bu döngü referans gerilim ϵ değerinden daha küçük oluncaya kadar devam ettirilirken sistem yüke gerilim enjekte ederken zamanda herhangi bir gecikme yaşanmaması hedeflenmektedir.

2.2. Deneysel çalışma

Bu çalışmada oluşturulan test düzeneği ile raylı sistemlerde kullanılan izole malzemenin elektriksel özellikleri test edilmiştir. Test düzeneği oluşturulurken IEC 587 standardından yararlanılmıştır. Elektrolitik iletkenliği ölçmek için damıtılmış su kullanılmıştır. Düzenek için 0.5 mm kalınlığında paslanmaz çelik elektrotlar kullanılmıştır. Yüksek gerilim elde etmek için 220 V / 10e3 V çevirme oranına sahip 1 kVA gücünde transformator kullanılmıştır. Giriş gerilimini sabitlemek için 230 V ve 7.5 kVA gücünde auto-transformatörden yararlanılmıştır. Test sırasında ortam sıcaklığı 25⁰ C (± 2) olarak seçilmiştir. Test düzeneğine ait elektriksel şematik şekil 3. ile verilmektedir.



Şekil 3. Deneysel çalışma

Test düzeneğine ait devrenin çalışma prensibi aşağıda algoritma 2 ile gösterilmektedir. Burada seri direnç akımı sınırlandırmak için kullanılırken sigorta emniyet açısından devreyi kesmek için yerleştirilmiştir. Ölçümler voltmeter ile alınırken yüksek gerilim transformatörünün seconder ucu topraklanmıştır. Devre güç kaynağından sonra bağlanan kesicinin pozisyonuna göre aktif hale gelmektedir.

Adım 1. Kesicilerin on pozisyonuna getirilmesi

Adım 2. 230 V AC gerilimin ratio transformatöre ulaşması

Adım 3. Güç transformatörü ile 10 kV yüksek gerilimin elde edilmesi

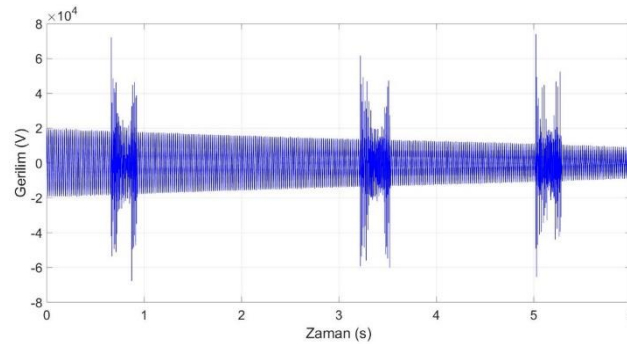
Adım 4. Seri direnç üzerinden akımın malzemeye ulaşması

Adım 5. Malzeme üzerinde oluşan elektriksel karakteristiklerin kayıt edilmesi

Adım 6. Akımın sigorta üzerinden toprağa ulaşması

Adım 7. Data setinin elde edilmesine kadar bu işlemin devam ettirilmesi

Devre bağlantısı gerçekleştirildikten sonra malzeme üzerinde ortaya çıkan kaçak akımlar kayıt edilerek gerilim geçici olayı durum analizi yapılmıştır. Bu durumun sonucu raylı sistem elektrifikasyon sisteminde eşdeğer dirençle birlikte hesaplanarak ortaya çıkan gerilim geçici olayı voltaj düzenleyeci ile kontrol altına alınmıştır. Bu durumda ortaya çıkan gerilim geçici olay sinyali şekil 4. ile gösterilmektedir.

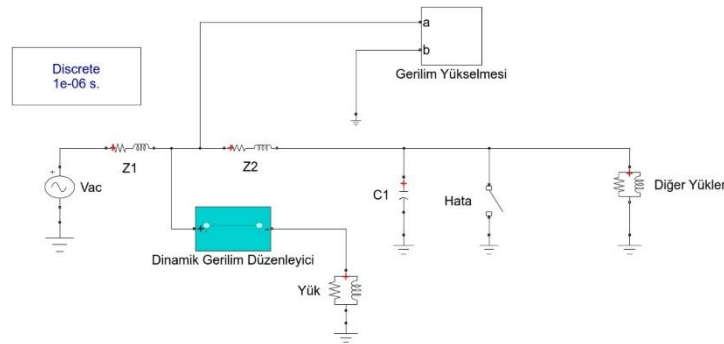


Şekil 4. Gerilim geçici olayı

Bu durumda oluşan gerilim geçici olayı üç farklı bölgede ortaya çıkmakta olup nominal gerilimin üç katına kadar salınım göstermektedir. Gerilim için nominal değer baz alınırken faz-toprak gerilimi baz alınmıştır. Bu değer 34.5 kV faz-faz gerilimi için 20 kV civarında olmaktadır. Bu durum 6 saniye için kayıt altına alınmıştır.

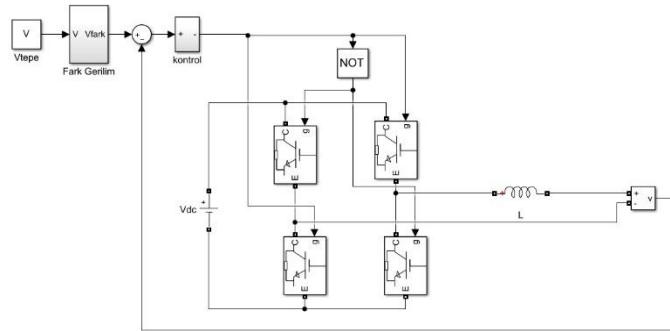
3. Bulgular

Bu çalışma ile dinamik voltaj düzenleyicinin raylı sistemler için kullanılması durumu incelenmiştir. Benzetim için DC beslemeli raylı sistemlere ait trafo merkezi modellenmiştir. Şekil 5.'de benzetim için kullanılan devreye ait modelleme gösterilmektedir. Gerilim yükselmesi, gerilim alçalması ve gerilim geçici olayı durumlarına ait iyileştirme sağlanarak sonuçlar ortaya konulmuştur.



Şekil 5. Dinamik gerilim düzenleyici devre modeli

Benzetimde kaynak gerilimi için cer merkezinde bulunan 34.5 kV orta gerilim sistemi kullanılmıştır. Trafo merkezinde gerçekleşen elektriksel gerilim geçici olayı incelenmiştir. Şekil 6. ile enjekte edilen gerilimlerin üretilmesinde kullanılan tetikleme sinyallerinin üretildiği bölüm verilmektedir. Kontrol bloğu ile sistem için üretilen control sinyali devreye aktarılmaktadır. Paralel kapasitör ile sistemin gerilim ihtiyacı karşılanmaktadır.



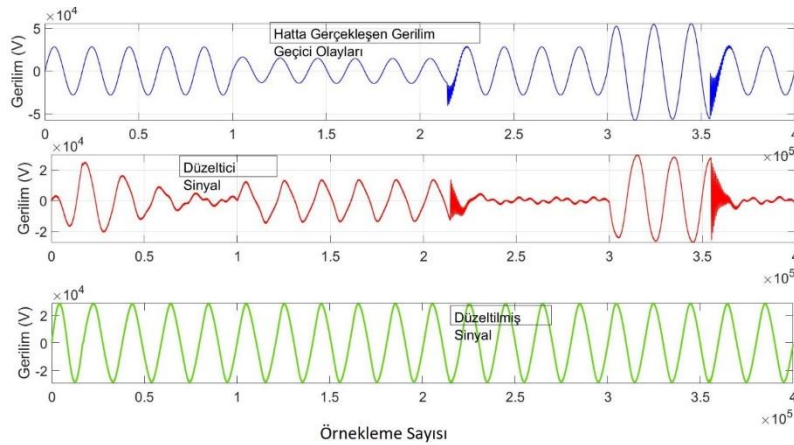
Şekil 6. Kontrol sinyallerinin üretilmesi

Dinamik voltaj düzenleyici ile fark gerilim hesaplamasında kullanılan referans sinyalleri bu kısımda üretilmektedir. Benzetim için örnekleme sayısı daha efektif sonuç elde etmek için $4e5$ seçilmiştir. Tablo 1.'de dinamik voltaj düzenleyici için önerilen dizayn parametreleri verilmektedir. Trafo merkezi besleme bölgesinden iki adet demiryolu aracının geçtiği durum incelenmiştir.

Tablo 1. Dinamik voltaj düzenleyici parametreleri

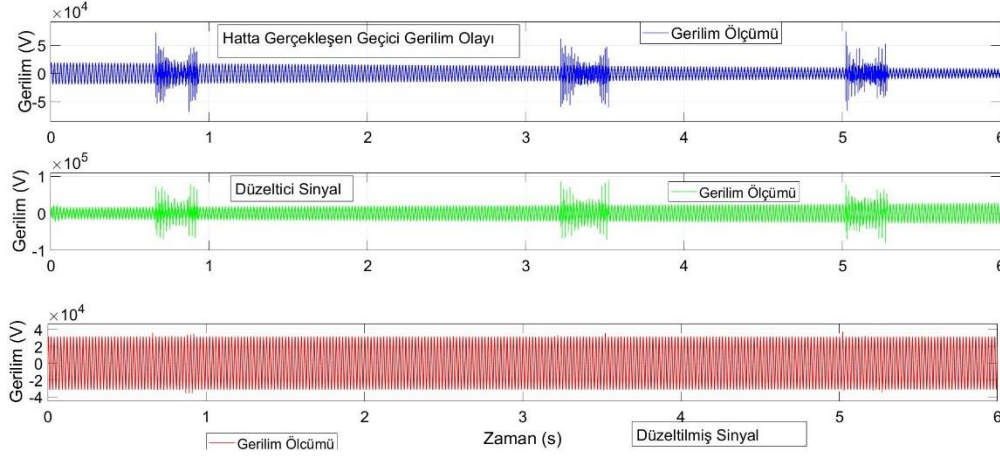
Parametre	Değer
Kaynak Gerilimi V_k	34.5 kV V_{rms} Faz-Faz
Kaynak Frekansı	50 Hz
Kaynak Empedansı (R_k, L_k)	10e-5 Ω 1e-4 H
Yük Gücü ($S_{yük}$)	5 MVA, 250 kVAR
Tek Faz Hata Direnci (R_h)	1e-2 Ω
Statkom Anahtarlama Frekansı	3 kHz
Gerilim Yükselmesi V_p	3 V_k
Bağlantı Transformatorü Çevirme Oranı	1
Evirici Filtresi (L_f)	1e-7 H

Şekil 7. ile kısa devre ve gerilim yükselmesi gerilim geçici olayı durumlarının yaşandığı esnada kaynak geriliminin davranışı, enjekte edilen gerilim ve düzeltilen gerilim gösterilmektedir. Sistemde önemli seviyede ani gerilim dalgalanmaları oluşurken dinamik gerilim düzenleyici ile bu durum ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 7. Kaynak gerilimi

Mavi sinyal ile gerilim geçici olayı gerilimleri gösterilirken, kırmızı sinyalle enjekte edilen gerilim ifade edilmiştir. Yeşil sinyalle ise yüke gelen düzeltilmiş gerilim gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 1-2.1 aralığında kısa devreden kaynaklı gerilim çökmesi yaşanırken 3-3.5 aralığında ise gerilim yükselmesi yaşanmaktadır. Bu durumda sisteme 1-2.1 aralığında 10 kV seviyelerinde gerilim enjekte edilirken 3-3.5 aralığında ise 25 kV-28 kV seviyelerinde gerilim aktarılmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere dinamik voltaj düzenleyici ile yüke iletilen gerilim temiz sinüzoidal şeklini getirilmiştir. 1-2.1 aralığında gerçekleşen kısa devre durumuna ve 3-3.5 aralığında gerçekleşen gerilim yükselmesi durumuna rağmen yük bu durumdan etkilenmemiştir. Şekil 8. ile bu duruma ait sinyallerin durumu daha fazla sayıda örnekleme sayısı ile gösterilmektedir.



Şekil 8. Düzeltilmiş, düzeltici ve gerilim geçici durumlarına ait sinyaller

Tablo 2.'de dinamik gerilim düzenleyici ile sağlanan başarı durumlarına ait bilgiler özet tablo ile verilmektedir.

Tablo 2. Dinamik voltaj düzenleyici parametreleri

Ölçüm Noktaları	Kısa Devre Durumu	Gerilim Yükselmesi Durumu	Deneysel Gerilim Geçici Olayı
Kaynak Gerilimi	18 kV (Düşük Gerilim)	58 kV (Yüksek Gerilim)	20-72 kV (Salınım)
Yük Gerilimi	28 kV (Nominal)	28 kV (Nominal)	28 kV (Nominal)
Katkısal İyileştirme Oranı	% 55	% 55	% 40- %61

Dinamik voltaj düzenleyici kullanıldığı durumda gerçekleşen iyileşme hali bu tabloda net bir şekilde görülmektedir. Bu şekilde yükün geçici rejimlerin oluşturduğu herhangi bir olumsuz durumdan etkilenmesi engellenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere orta gerilim sistemi kısa devre, gerilim yükselmesi ve deneysel gerilim geçici olayı durumlarında olumsuz etkilenirse de yüke gelen gerilim nominal değerini korumayı sürdürmüştür.

Elde edilen sonuçlar iyileştirme oranlarının yüksek olduğunu ortaya koyarken yüke gelen gerilimin nominal değerler içerisinde kaldığını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan PLL tabanlı dinamik gerilim regülatörü ile yüksek başarı elde edilerek gerilim geçici olayı durumlar kontrol altına alınmıştır. [1] nolu çalışmada önerilen yöntemle gerilim iyileştirmesinde % 35 oranında başarı elde edilmiştir. [2] nolu çalışma ile kullanılan Dstatkom ile kaynak akımına ait THD değeri % 7'ye düşürülerek reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. [3] ile FACT tabanlı statkom ile büyük ölçekli güç sistemlerinde yüksek performans elde edildiği belirtilmiştir. [4]'de Nominal geriliminin %40 'ı ile % 60'ı oranında gerçekleşen gerilim çökmelerinde iyileştirme sağlanmıştır. [5] ile yapılan çalışma ile nominal gerilimin % 10'u kadar gerilim enjekte edilerek 0.1 mertebelerin hata elde edilmiştir. [6] nolu çalışmada % 5 tolerans ile gerilim düzeltmesi yapılmıştır. [7] ile yapılan çalışmada % 85 oranında başarı elde edilerek harmonik probleminin altı çizilmiştir. [8]'de üç faz-toprak hata akımı ve çift faz-toprak hata durumlarında sistemin nominal besleme gerilimini elde etmesi sağlanmıştır. [9] nolu

çalışmada DVR tasarımların kullanılan kontrol yöntemleri için minimum power enjekte edilmesinin, enerji tasarrufuna yönelik faydaların önemi vurgulanmıştır. [10] ile ANFIS yöntemi ile DVR tasarımında şebeke geriliminin % 20'si oranında gerilim seviyesinde iyileştirme sağlanmıştır. [11]'de % 30 oranında düşen gerilim DVR ile nominal seviyesine çıkarılmıştır. [12] nolu çalışmada 0.4 pu miktarındaki gerilim çökmesi durumuyla ilgili iyileştirme ortaya konulmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada DC beslemeli bir demiryolu trafo merkezinde oluşacak geçici rejimlerin dinamik voltaj düzenleyici ile ortadan kaldırılması araştırılmıştır. Orta gerilimde oluşan kısa devre durumu ve gerilim yükselmesi durumu incelenmiştir. Sistem ve alt sistemler modellenerek benzetim yapılmıştır. Benzetim sonucunda yüke ait gerilimin dalga işaretinin saf sinüzoidal dalga işaretinde olması sağlanmıştır. Benzetim sonuçlarıyla ilgili kıyaslamalı sonuçlar ve iyileştirme durumu tabloda özet halinde verilmiştir. Kısa devre bölgesinde gerilim 18 kV seviyelerine kadar düşerken dinamik voltaj düzenleyicinin devreye girdiği bölgede 28 kV nominal tek faz gerilimi elde edilmiştir. Gerilim yükselmesinin olduğu durumda ise gerilim 58 kV'lara kadar çıkarken dinamik voltaj düzenleyici ile bu değer nominal değerini almıştır. Yüke ulaşan gerilimin saf sinüzoidal şeklinde olduğu ve gerçekleşen iyileştirme durumu grafiklerden anlaşılmaktadır. Bu çalışma ile deneysel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen dotalar yardımıyla bir raylı sistem trafo merkezinde gerçekleşecek gerilim değişimlerinin yük tarafına yansımadan iyileştirilmesi sağlanarak, DVR uygulaması raylı sistemler alanının en kritik problemlerinden biri olan elektrifikasyon gerilim dengesizliği probleminin çözümü için kullanılmıştır. Bu çalışmanın raylı sistemler alanına özgün bir algoritma ile DVR uygulaması ve deneysel çalışmaların kullanılması yönüyle ilgili çalışmanın literatüre etkin katkıları bulunmaktadır.

Ekipmanların arızaya geçmemesi ve herhangi bir aksaklık yaşanmaması açısından gerilim düzenliliği çok önemlidir. Sistemlerde gerilim alçalmaları veya yükselmeleri yüzünden maddi ve manevi kayıpların yaşanabilmesi söz konusudur. Raylı sistemlerde kesintisiz işletme hali mevcut olduğu için sistem sürekliliği açısından bu konuların özellikle dikkate alınarak çözüme kavuşturulması gerekmektedir. Dinamik voltaj düzenleyici gerilim dalgalanmaları için kullanılan en etkili güç elektroniği ekipmanıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni kontrol tekniklerinin ortaya çıkmasıyla dinamik voltaj düzenleyicinin performansının artırılması için çalışmalar sürdürülmektedir.

Kaynaklar

- [1] D. V. Tien, R. Gono, Z. Leonowicz, "A multifunctional dynamic voltage restorer for power quality improvement," **Energies**, no. 11, pp. 1351-1368, 2018.
- [2] W. N. Chang, K. D. Yeh, "Design and implementation of DSTATCOM for fast load compensation of unbalanced loads," **Journal of Marine Science and Technology**, no. 17, pp. 257-263, 2009.
- [3] R. Jadeja, S. Patel, S. Chauhan, "STATCOM, a preface to power quality in power systems performance," **Engineering, Technology & Applied Science Research**, vol. 6, no. 1, pp. 895-905, 2016.

- [4] R. Azim, A. Hoque, "A fuzzy logic based dynamic voltage restorer for voltage sag and swell mitigation for industrial induction motor loads," **International Journal of Computer Applications**, no. 30, pp. 9-18, 2011.
- [5] M. Suliman, "Design of fast real time controller for the dynamic voltage restorer based on instantaneous power theory," **International Journal of Energy and Power Engineering**, vol. 5, no. 2, pp. 1-6, 2016.
- [6] M. E. C. Brito, M. Cavalcanti, M. C. Limongi, L. R. Neves, F. A. S. Neves, "Low cost dynamic voltage restorer," **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, 2012, pp. 28-30.
- [7] N. L. Ismail, H. D. M. Hidzir, S. Thanakodi, N. S. M. Nazar, P. Ibrahim, C. Ali, "Modelling voltage sag mitigation using dynamic voltage restorer and analyzing power quality issue," **AIP Conference Proceedings 1930**, pp. 1-8, 2018.
- [8] K. Askar, "Simulation of p1 with fuzzy logic controller based dynamic voltage restorer as voltage sag restorer in distribution system," **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, no. 4, pp. 6257-6267, 2015.
- [9] R. Pal., S. Gupta, "State of the Art: Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement," **Electrical & Computer Engineering: An International Journal**, no. 4, pp. 79-98, 2015.
- [10] A. Tavakoli, M. K. Sani, H. Eisazadeh, S. S. Malfejani, B. T. , Mozan, M. Hatef, "Design of anfis controller for dynamic voltage restorer in order to improve ivrt," **Palma Journal**, vol. 16, no. 2, pp. 268-278, 2017.
- [11] M. Banaei, E. Salary, "Dynamic voltage restorer based on high-frequency isolated dc-dc converter," **Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation**, vol. 1, no. 3, pp. 47-39, 2013.
- [12] C. Ratna, T. Kishore, "Improving the compensation capacity of interline dynamic voltage restorer," **International Journal on Information Theory**, no. 6, pp. 1-12, 2017.
- [13] D. Samira, F. Brahim, B. Chellali, "Adaptive neuro-fuzzy inference system based dvr controller design," **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, no. 10, pp. 49-64, 2010.
- [14] O. Patrick, R. Tiako, I. Davidson, "Application of dynamic voltage restorer for power quality improvement in low voltage electrical power distribution network: an overview," **International Journal of Engineering Research in Africa**, no. 28, pp. 142-156, 2017.
- [15] V. Latha, P. Valsalal, "Performance enhancement of a dynamic voltage restorer," **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, no. 25, pp. 2293-2307, 2017.
- [16] B. Singh, P. Jayaprakash, D. P. Kothari, A. Chandra, K. Haddad, "New control algorithm for capacitor supported dynamic voltage restorer," **Journal of Electromagnetic Analysis and Application**, no. 3, pp. 277-286, 2011.
- [17] M. Aswathy, R. Jayabarathi, "Low cost embedded system for voltage sag analysis," **International Journal of Computer Applications**, no. 98, pp. 10-15, 2014.
- [18] S. Kiranmai, A. Laxmi, "Hardware for classification of power quality problems in three phase system using microcontroller," **Cogent Engineering**, no. 4, pp. 1-10, 2017.
- [19] X. Chen, Q. Xie, X. Bian and B. Shen, "Energy-saving superconducting magnetic energy storage (SMES) based interline DC dynamic voltage restorer," **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, vol. 8, no. 1, pp. 238-248, 2022.

- [20] S. Ranjan, D. C. Das, A. Latif, N. Sinha, S. M. S. Hussain and T. S. Ustun, "Maiden Voltage Control Analysis of Hybrid Power System With Dynamic Voltage Restorer," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 60531-60542, 2021.
- [21] K. H. Tan, J. H. Chen and Y. D. Lee, "Intelligent Controlled Dynamic Voltage Restorer for Improving Transient Voltage Quality," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 74686-74701, 2023.