

GERİLİM SARKMALARINA KARŞI YÜK DUYARLILIKLARINI GÖSTERMEK İÇİN BULANIK MANTIK UYGULAMASI

Hakan ÖZTÜRK^{1*}, Ertan YANIKOĞLU²

¹ Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54187 Sakarya, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4568-7358>

² Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 54187 Sakarya, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-9224-383X>

Anahtar Kelimeler	Öz
Bulanık Mantık, Asenkron Motorlar, Gerilim Sarkmaları, Elektrik Güç Sistemleri, Hat Arızaları	<i>Gelişen teknolojiyle birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisinin dağıtımı sırasında birçok hata (gerilim yükselmeleri, gerilim sarkmaları, harmonikler) meydana gelebilmektedir. Bu hataları düzeltmek için STATCOM ve DVR gibi sistemler kullanılmaktadır. Böylece enerjinin kalitesi artırılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada; hata olarak gerilim sarkmasının meydana geldiği bir iletim hattına yük bağlanarak bu yükün gerilim sarkması karşısındaki durumu ve hassasiyeti, ardından düzeltici olarak DVR kullanıldığındaki durumu ve hassasiyeti araştırılmıştır. DVR sisteminin yükler karşısındaki durumu detaylı olarak incelenmiştir. İlgili veriler MATLAB/Bulanık Mantık uygulamasına aktararak analiz edilmiştir.</i>

FUZZY LOGIC APPLICATION TO SHOW LOAD SENSITIVITIES AGAINST VOLTAGE SAG

Keywords	Abstract
Fuzzy Logic, Induction Motors, Voltage Sags, Electric Power Systems, Line Faults	<i>With the developing technology, the need for electrical energy is increasing day by day. Many power quality problems such as voltage spikes, voltage sags, harmonics can occur during the distribution of electrical energy. Systems such as STATCOM and DVR are used to correct these problems. Thus, the quality of the energy is tried to be increased. In this study; By connecting a load to a distribution line where voltage sag occurs as an error, the condition and sensitivity of this load against voltage sagging, and then the condition and sensitivity when using DVR as a corrector, were investigated. The situation of DVR against the loads has been analyzed in depth. Relevant data have been transferred to MATLAB / Fuzzy Logic application and analyzed.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 10.04.2021	Submission Date : 10.04.2021
Kabul Tarihi : 16.08.2021	Accepted Date : 16.08.2021

1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisinin vazgeçilmez bir ihtiyaç olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Elektrik enerjisinin optimizasyonu için birçok çalışma yapılmaktadır. Elektrik enerjisinin kalitesindeki düşüslere ve arızalara müdahale edebilmek için birçok sistem tasarlanmaktadır. Böylece güç kalitesi artırılmaya çalışılmaktadır.

Bir sistemin gerilim kararlılığı, temel olarak sürekli hal gerilim kararlılığı ve geçici hal gerilim kararlılığı olayları meydana geldiğinde sistemin kendini belirli sınırlarda tutma becerisidir (Taylor, Balu ve Maratukulam, 1994). Sistem sınırlardan çıktığında arıza durumu meydana gelmektedir. Gerilim kararlılığı analizi için tam bir ağ gösterimine ihtiyaç duyulur (Cutsem ve Vournas, 1998). Gerilim kararsızlığı çoğunlukla yükten kaynaklanmaktadır. Yükler gerilim kararsızlığının itici

* Sorumlu yazar; e-posta : hakan.ozturk.eee@gmail.com



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

gücüdür. Bu nedenle yük kararsızlığı olarak da anılmaktadır. Yüklerde ve gerilimde meydana gelen problemler büyük önem arz etmektedir.

Gerilim sarkmaları, kısaca gerilimdeki kısa süreli düşüşlerdir (Heising, 2007). Bu süreler 0,5 ile 30 devir arasında değişebilmektedir. Gerilim sarkmaları, güç kalite problemlerinin başında gelmektedir (McGranaghan, Mueller ve Samotyj, 1993). Güç sistemindeki arızalardan doğmakta ve yük üzerinde etkileri bulunmaktadır (Lamoree, Mueller, Vinett, Jones ve Samotyj, 1997). Gerilim sarkmalarına karşı güç elektroniği tabanlı cihazlar kullanılmaktadır. Bunların başında DVR (Dinamik Gerilim Onarıcı) ve D-STATCOM (Dağıtım Sistemi Statik Senkron Kompanzator) gelmektedir. Bu cihazlar sisteme arıza boyunca gerilim enjekte etmektedir. DVR, bir AC gerilimi üreten ve gerilim sarkması gibi hataları telafi etmek için bir enjeksiyon transformatorü ile bu gerilimi enjekte eden bir seri cihazdır (Haque, 2001). Hem DVR'nin hem de D-STATCOM'un tepki süresi çok kısadır ve güç elektroniği cihazları ve voltaj düşüşü algılama süresi ile sınırlıdır (Haque, 2001; Weissbach, Karady ve Farmer, 1999). DVR yaygın olarak kullanılan güçlü bir kontrolördür. Bağlantı noktasında gerilim düşmeleri hafifletir. DVR, D-STATCOM ile aynı blokları kullanır (Hatami, Shahnia, Pashaei ve Hosseini, 2007). Temel olarak, bir seri dönüştürücü, dönüştürücü çıkış filtresi ve DC bağlantısına bağlı bir enerji depolama cihazından oluşur (Benachaiba ve Ferdi, 2009).

Literatürde konu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Babaei ve Kangarlu, (2012), DVR ile ilgili hassas yük kompanzasyonu gerçekleştirmiştir. Gerilim sarkması ve yükselmesi karşısındaki sonuçları Benachaiba ve Ferdi, (2008) tarafından açıklanmıştır. DVR sisteminin modellemesi Omar ve Rahim, (2008) tarafından yapılmıştır. DVR sisteminin diğer kompanzasyon metodlarına Sadigh ve Smedley, (2012) çalışmasında ulaşmak mümkündür. DVR sisteminin gerilim kontrolünü ve ayrı bir modellemesini Jowder, (2007) gerçekleştirmiştir. DVR performansının simülasyonu Salimin ve Rahim, (2011) çalışmasında mevcuttur. Bulanık mantık analizi DVR'ye konu olan alanlar arasındadır. Literatürde gerilim sarkması ve yükselmesinde bulanık mantık destekli analizi, Azim ve Hoque, (2011) tarafından yapılmıştır. Mithilesh ve Shubhrata, (2015) DVR ve D-STATCOM için güç kalitesi arttırma amaçlı simülasyonu yapmıştır.

Konu ile ilgili son çalışmalar arasında, Shukir, (2021) tarafından yapılan DVR için çeşitli kontrol tekniklerinin karşılaştırılması bulunmaktadır. İlgili çalışmada, Singh, Bhat ve Firdous, (2019) tarafından da tasarlanan bulanık mantık kontrolü gibi bir çok kontrol tekniği ele alınmaktadır. Pragna, Rani, Ramya ve Mohan, (2019), DVR sisteminde bulanık mantığa ek olarak PI kontrolü tasarlamışlardır. Singh ve Bhat, (2020) tarafından kendinden destekli DVR için performans değerlendirmesi yapılmıştır. Dhritlahre ve Pillai, (2021)

tarafından dağıtım sisteminde gerilim sarkmasını azaltmak için DVR kullanılmıştır. Kumar, Mercy ve Ebenezer, (2020), DVR ve bulanık mantığı kullanarak gerilim iyileştirmesi yapan son çalışmalar arasındadır. Bahsedilen çalışmalardaki analizler, yükün cinsine bağımlı değildir. Ayrıca ilgili çalışmalar yük ile ilgili detaylı bir açıklama yapmamaktadır.

DVR'nin etkisinin yükler üzerinden analizi önem arz etmektedir. Literatürdeki çalışmalar DVR sisteminin yüklerdeki ve farklı şartlardaki durumuna ilişkin detaylı analiz içermemektedir. Asenkron makine, enerjinin üretiminde ve tüketiminde en önemli paya sahip yüklerdendir. Asenkron makinenin performansındaki değişim elektrik enerji üretim ve dağıtımındaki değişime yol açmaktadır. DVR sisteminin kalitesinin en önemli çıktıları, asenkron makinenin çalışma durumunda görülmelidir.

Bu çalışmada, DVR'nin performansı yük olarak seçilen asenkron makine üzerinde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçlar bulanık mantık algoritmasına aktarılmıştır. Gerilim sarkmalarına karşı yükün tüm parametrelerinde verdiği tepkiler oransal olarak karşılaştırılıp analiz edildikten sonra arıza koşullardaki ve DVR kullanıldığında yükün hassasiyeti incelenecektir. Bulanık mantık sonuçlarıyla DVR'nin gerilim sarkması sırasında, asenkron makinenin durumu açıklanacaktır. Literatürde bulunan DVR'nin enerji kalitesinin geliştirilmesi ve yükler üzerinde analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

2. Yöntem

2.1 Gerilim Sarkmalarının Analizi

Bir gerilim sarkması 0,5 periyottan bir dakikaya kadar süreler için güç frekansındaki akım veya gerilimin etkin değerindeki bir azalmadır. Gerilim Sarkmaları, genel olarak büyüklüğü ve var olduğu süre parametrelerine göre incelenmektedir. Büyüklük oransal (%) olarak ifade edilmektedir. Literatürde büyüklüğü % 10 ile % 90 arasında incelenmektedir. Bu çalışmada değerler aza indirgenerek %10, %30, %50, %70 ve %90 olarak incelenecektir. Süresi 1,5 saniyeye kadar eşit adımla değerlendirilecektir. Bulanık mantık uygulamasındaki işlem ve kural karmaşıklığını azaltmak için orta değerler seçilmiştir.

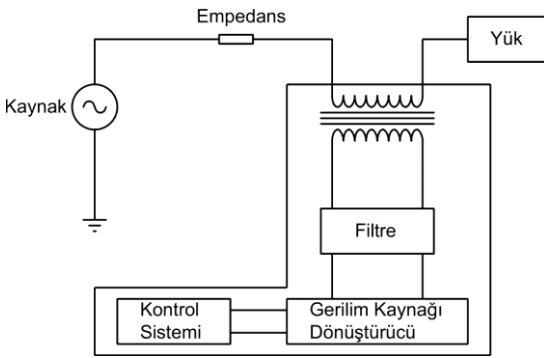
Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.2 Gerilim Sarkmalarına Karşı Korunma Yolları

Her ne kadar tüm güç kalitesi problemleri önemli olsa da gerilim sarkmaları daha sık meydana gelir ve ciddi sorunlara neden olur. Yıldırımlardan dolayı meydana gelen arızaların en yaygın sonucu havai hatlardaki gerilim sarkmalarıdır. Günümüzde, güç kalitesini iyileştirmek için D-STATCOM, Özel Güç Aygıtları (CPD),

Dinamik Gerilim Onarıcı (DVR) ve Statik Transfer Anahtar (STS) gibi birçok sistem geliştirilmiştir. D-STATCOM ve DVR en etkili gerilim kaynağı dönüştürücüdür. Gerilim Kaynağı Dönüştürücü (VSC) tabanlı cihazlar ve diğer türler arasında güç kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır.

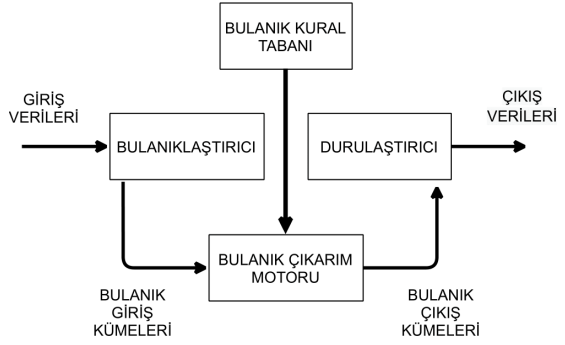
DVR sistemi, elektrik güç dağıtımında meydana gelen gerilim düşüşlerinin ve yükselmelerinin üstesinden gelmek için bir yöntemdir. DVR, sağlanan gücün fazını ve dalga şeklini etkileyebilecek gerilim yerleştirmeleriyle enerji tasarrufu sağlar (Choi, Li ve Vilathgamuwa, 2000). DVR, yük tarafı gerilimini düzenlemek için sisteme sırayla gerilim enjekte eden seri bağlı bir katı hal cihazıdır. Normalde besleme ile kritik yük besleyici arasındaki dağıtım sistemine kurulmaktadır. Yükte herhangi bir güç kesintisi olmaması için gerilim sarkması sırasında çalışır. Çeşitli devre topolojileri ve kontrol şemaları vardır (Chattopadhyay, Mitra ve Sengupta, 2011; Pal ve Gupta, 2020). Şekil 1'de DVR sistemin temel yapısı görülmektedir. DVR sisteminde bulunan iç sistemler ve güç kalitesi geliştirilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 1. Standart DVR Sisteminin Yapısı

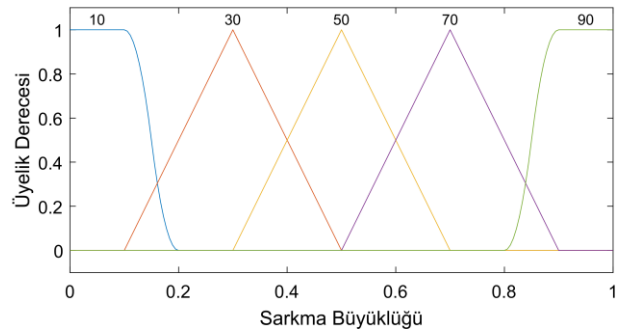
2.3 Matlab/Bulanık Mantık Uygulaması

Bulanık Mantık aracı 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından tanıtılmıştır. Belirsizlik ile başa çıkmak için bir matematik aracıdır. Kelimelerle hesaplamının önemli konseptini sunarak programlama yapar. Belirsizlikle başa çıkabilme tekniği sağlar. Bulanık teori "çok", "düşük", "orta", "sık sık", "az" gibi dil yapılarını temsil etmek için bir mekanizma sağlar. Bulanık mantık, genellikle uygun insani akıl yürütme yetenekleri etkin kılan bir çıkarım yapısı sağlar. Bulanık mantık sistemleri yaklaşık muhakeme için uygundur. Bulanık mantık sistemleri geleneksel sistemlerden daha hızlı ve akıcı bir cevaba sahiptir ve kontrol karmaşıklığı daha azdır (Roncero-Sanchez ve Acha, 2009) Şekil 2'de bulanık mantık sisteminin temel modeli görülmektedir.

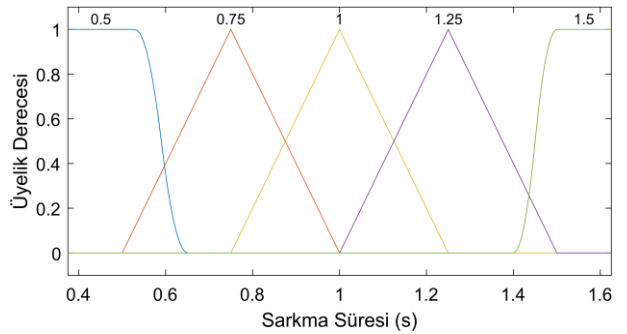


Şekil 2. Temel Bulanık Mantık Sistemi (Gonzalez ve Cerrada, 2010)

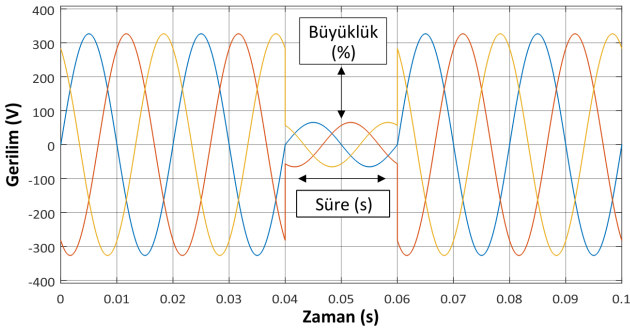
Bu çalışmada bulanık çıkarım analizi için Mamdani metodu seçilmiştir. Gerilim sarkması modelinden elde edilen veriler kaydedilmiştir. Ardından bu verilerden elde edilen sonuçlar kurallara girilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'de tasarlanan bir bulanık mantık üyelik fonksiyonu görülmektedir. Gerilim sarkmaları büyüklük ve süre parametreleri açısından incelenmiştir. Bu parametreler Şekil 5'de gösterilmiştir. Gerilim sarkmasının büyüklüğü %10 ile %90 arasındaki ortalama değerlerde seçilmiştir. Gerilim sarkmasının süresi ise 1,5 saniyeye kadar alınmıştır. Bulanık mantık sonuçları ara değerlerdeki durumu görmeye imkân vermektedir. Bulanık mantık algoritması asenkron motorun elektromanyetik torku, rotor hızı ve gücü için tasarlanmıştır.



Şekil 3. Bulanık Mantık Uygulamasındaki Sarkma Büyüklüğünün Üyelik Fonksiyonu



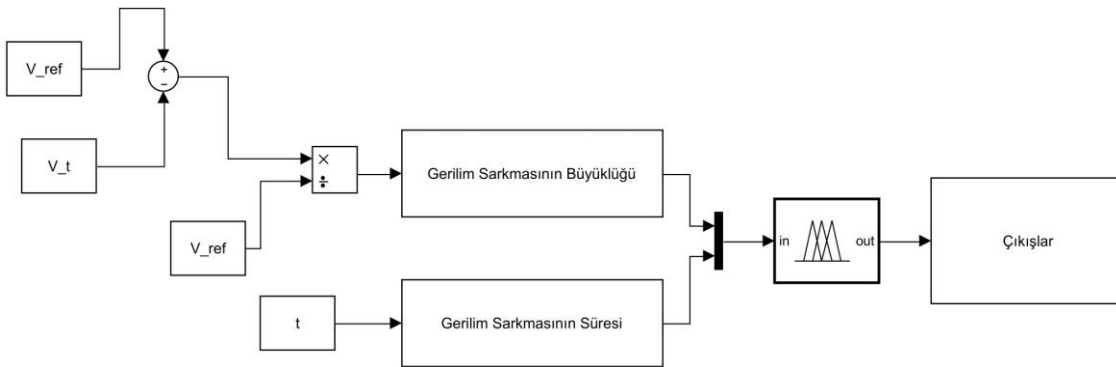
Şekil 4. Bulanık Mantık Uygulamasındaki Sarkma Süresinin Üyelik Fonksiyonu



Şekil 5. Gerilim Sarkmalarının Bulanık Mantıktaki Parametreleri

2.3.1 Tasarlanan Bulanık Mantık Sisteminin Modeli

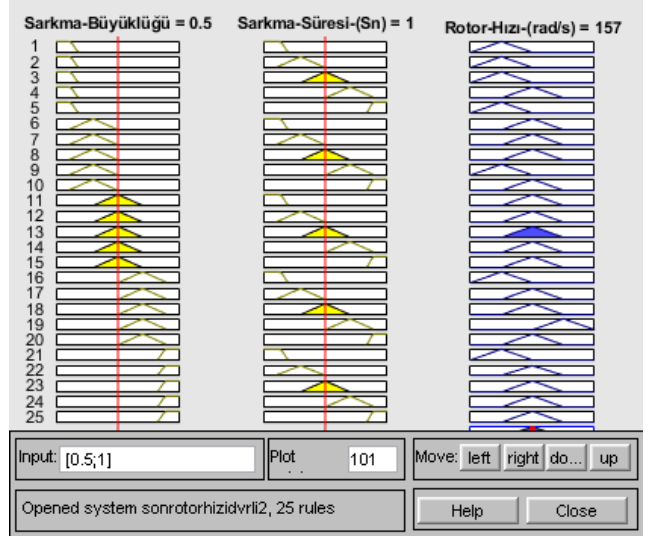
Çalışmada kullanılan bulanık mantık yapısı Şekil 6'da görülmektedir. Sistemdeki anlık gerilim, hedeflenen gerilim ile karşılaştırılarak gerilim sarkmasının büyüklüğü elde edilmektedir. Gerilim sarkmasının süresi de sisteme eklenerek bulanık mantık mekanizmasına alınmaktadır. Gerilim sarkması esnasında gerilim, bozulmalar ve osilasyonlar içerdiğinden belirli aralıkta büyüklüğü tam olarak net olmayabilir. Bu yüzden bulanık çıkarım için, Şekil 3'de gösterilen üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bulanık mantık tasarımının yardımıyla gerilim sarkmaları için daha ayrıntılı bir çıkarım yapılmaktadır.



Şekil 6. Sistemdeki Bulanık Mantık Çıkarım Yapısı

2.3.2 Tasarlanan Bulanık Mantık Sisteminin Kuralları

Çalışmadaki bulanık mantık kuralları, asenkron makineden elde edilen verilerden oluşturulmuştur. Bilimsel standartlardaki beşer adet gerilim sarkması büyüklüğü ve süresi için 25 adet veri bulanık mantık kurallarına girilmiştir (IEEE, 2019). Çalışmada kullanılan örnek bir bulanık mantık kural yapısı Şekil 7'deki gibidir. Asenkron makineden ilgili parametreler için alınan 25 adet veri FAM tablosu olarak kullanılmıştır.



Şekil 7. Sistemdeki Standart Bulanık Mantık Kuralları

2.3.3 Bulanık Mantık Algoritmasının İşleyişi

Sisteme gelen gerilim, Şekil 3'deki ilgili bulanık kümelere ulaşır. Ardından bulanık kurallar devreye alınır. Denklem 1'de verilen ağırlık merkezi metodu yardımı ile durulaştırma yapılmaktadır. Asenkron makineden elde edilen verilerin artırılması ve bulanık mantık verileriyle tutarlılığının sağlanması için üçgen üyelik fonksiyonları uygun bulunmuştur.

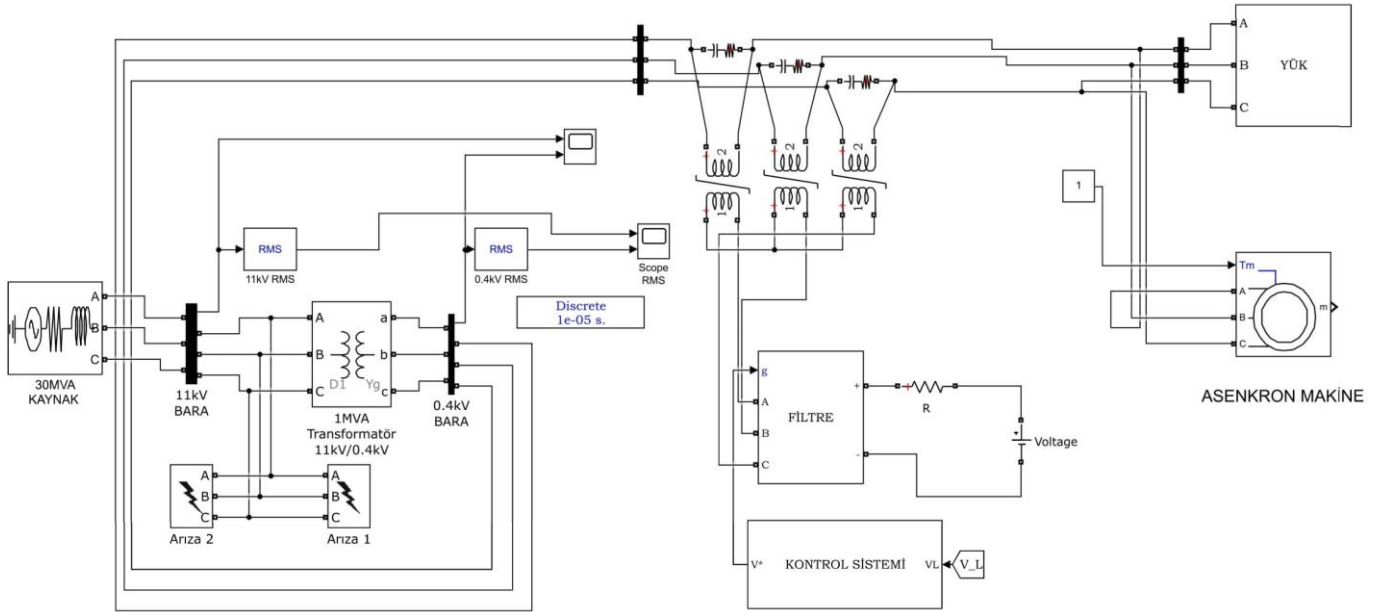
İşleme alınmayan değer aralıklarında da gerilim sarkmaları için doğruya çok yakın tahminde bulunabilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple bulanık mantık algoritması tasarlanmıştır.

$$V_{\text{merkez}} = \frac{\int \mu(V_i)VdV}{\int \mu(V)dV} \quad (1)$$

2.4 Asenkron Motor ve DVR Sistemi Analizi

Şekil 8'deki sistemde, iletim hattındaki arızadan kaynaklanan gerilim sarkmasını düzeltmek için

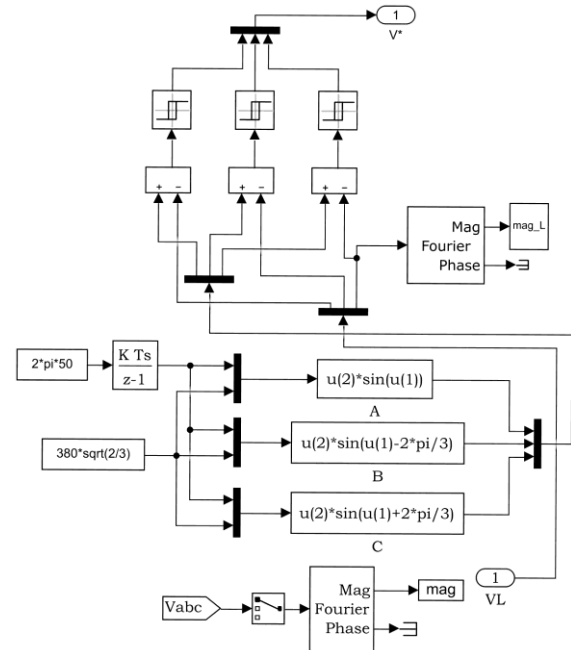
oluşturulan DVR sistemi asenkron motora bağlanmıştır. Burada, tasarlanan DVR'nin aktif olduğu sistemle olmadığı sistem arasındaki ilişki asenkron motor parametreleri üzerinde analiz edilecektir.



Şekil 8. Gerilim Sarkması Durumunda İletim Hattı, DVR Sistemi ve Asenkron Makine Modeli

Seçilen asenkron makinanın özellikleri Tablo 1'de görülebilmektedir. Sisteme uygulanan gerilim sarkmasının büyüklüğü ve süresi sürekli değiştirilmiştir. Gerilim sarkması, programlanabilir gerilim kaynağı yardımıyla iletim hattındaki arıza modelinden elde edilmiştir.

İletim hattında oluşan gerilim sarkması barayı geçtikten sonra yeni bir iletim hattına gelmektedir. Bu hattın direnci 1Ω ve kapasitesi $100 \mu\text{F}$ olarak seçilmiştir. Buradan transformatörler yardımıyla DVR sistemine kusursuz bir sarkmalı gerilim iletilmektedir. Kullanılan transformatörün gücü 4kVA, iç direnci $0,02 \Omega$ ve iç endüktansı $0,02 \text{ H}$ olarak seçilmiştir. Sarkmalı gerilim DVR sistemindeki filtreye ulaşmaktadır. Filtre sistemi $0,1 \Omega$ ve 700 V gerilimle çalışmaktadır. Filtre devresinde kullanılan IGBT'lerin iç direnci $0,001 \Omega$, anahtarlama direnci $100 \text{ k}\Omega$ ve anahtarlama kapasitesi sonsuz olarak alınmıştır. DVR sistemi için tasarlanan kontrol devresi Şekil 9'da görülmektedir. Güç kalitesini ve dinamik performansı arttırmak için yeni kontrol sistemleri tasarlanmaktadır.



Şekil 9. Tasarlanan Kontrol Modelinin Yapısı

Tablo 1

Seçilen Asenkron Makinenin Özellikleri

Parametre	Değeri
Sınıf	Sincap Kafesli
Güç	7.5 kW
Gerilim	400 V
Frekans	50 Hz
Hız	1440 RPM

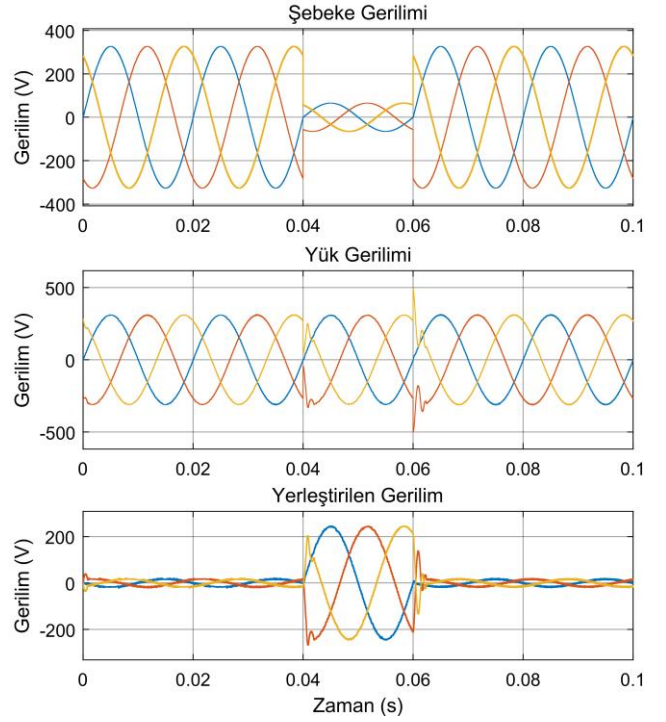
İletim hattında oluşan gerilim sarkması, tasarlanan DVR sistemine, DVR sisteminden de asenkron makineye bağlıdır. DVR'de bulunan kontrol sisteminin de yardımıyla gerilim sarkmalarına karşı koymaya çalışılmaktadır. Asenkron motorun duyarlılıkları, rotor akımları, stator akımları ve gerilimi, rotor hızı, elektromanyetik tork ve aktif güç üzerinden incelenmiştir.

3. Bulgular

Tasarlanan sistem MATLAB/Simulink'te 5 saniye süreyle 10^{-5} zaman adımıyla çalıştırılmıştır. İletim hattında meydana gelen arıza tasarlanan DVR ile düzeltilmeye çalışılmıştır. Asenkron makinenin gerilim sarkmalarına ve tasarlanan DVR sistemine göre durumu rapor edilmiştir.

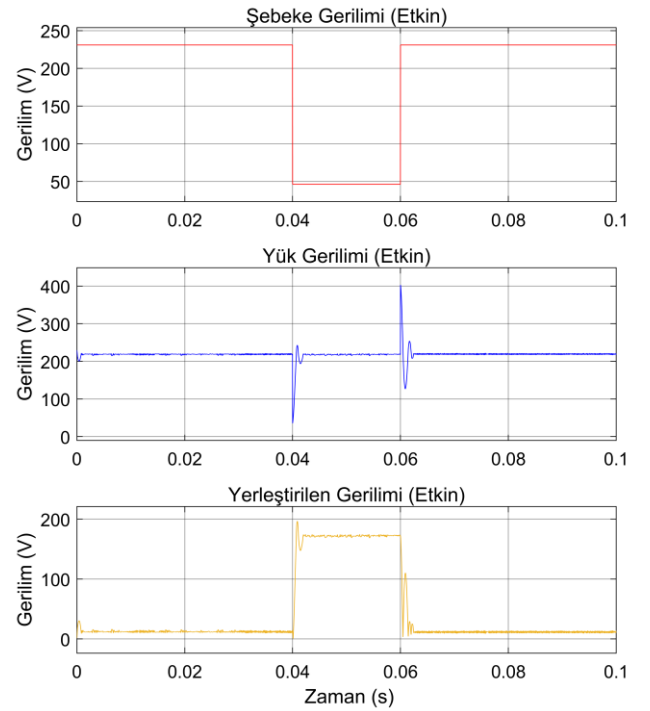
3.1 DVR Sisteminin Yükteki Gerilim Başarısı

Sistem çalıştığında %80 büyüklüğünde, 0.02 saniye süreli (0.04-0.06) gerilim sarkması için gerilimler Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Asenkron motora gelen ilk gerilim bu şekildedir. DVR kullanan sistemde gerilim sarkmasına karşı sistemdeki gerilimlerdir. DVR aktif iken asenkron makine Şekil 10 ve Şekil 11'deki yük gerilimiyle çalışacaktır. DVR aktif değilken ise, şebekeden alınan gerilime müdahale edilmediği için asenkron motor şebeke gerilimiyle çalışacaktır. Bulanık mantık uygulamasındaki ve tablodaki veriler arıza ortasındaki değerler için alınmıştır.



Şekil 10. Gerilim Sarkması Durumunda DVR Aktifken Şebekedeki, Yükteki, Yerleştirilen Gerilim

Sistemde bulunan gerilimlerin etkin değerleri Şekil 11'deki gibidir. Arızalı şebekeden alınan gerilim yüke ulaştığında, DVR sisteminin tam olarak arızayı ortadan kaldırmadığı görülmektedir. Gerilimde birtakım kalite eksiklikleri olduğu saptanmıştır.

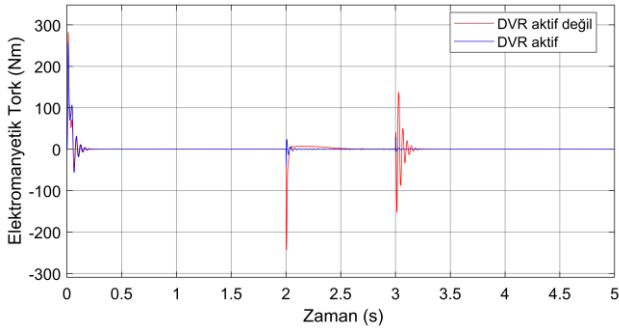


Şekil 11. Sırasıyla; Şebekedeki, Yükteki, Yerleştirilen Gerilimin Etkin Değerleri

DVR kullanıldıktan sonra elde edilen yük gerilimi grafiğine göre, iletim hattındaki sarkma büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Tasarlanan DVR sisteminin, sarkmanın başlangıç ve bitiş anlarında yük geriliminin değerlerinde aşırı yükselme ve düşüşler ortaya çıkarttığı Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir.

3.2 Elektromanyetik Tork Duyarlılığı

Sistem ilk önce %50 büyüklüğünde ve 1 sn süreli gerilim sarkmasıyla çalıştırılmıştır. Sistemde DVR kullanılmamış iken 2. Saniyede elektromanyetik tork 0,07901 Nm iken DVR kullanıldığında 0,1751 Nm'dir. DVR kullanılmamış iken 3. Saniyede elektromanyetik tork 0,07899 Nm iken DVR kullanıldığında 0,2933 Nm'dir. Bu şekilde 1 saniye sürede %50 büyüklükte sarkma için DVR elektromanyetik torku %121,62-%271,31 arttırmıştır. Çalışmada örnek olarak arıza ortasındaki, 2,5. saniyedeki değer alınmıştır. Benzer şekilde sistemdeki sarkmanın süresi ve büyüklüğü değiştirilip sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 12'de DVR'nin durumuna göre asenkron makinenin elektromanyetik torku görülmektedir. Bu durum %80 büyüklüğündeki, Şekil 11'deki gerilim sarkmasıyla çalışan asenkron makinenin sonuçlarıdır. Gerilim sarkmasının parametrelerine göre elektromanyetik torkun değeri Tablo 2' de verilmiştir. Bu veriler Mamdani yöntemiyle bulanık mantık algoritmasında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulanık mantık sonuçları Şekil 13 ve Şekil 14'de görülmektedir.



Şekil 12. Gerilim Sarkması Durumunda DVR Aktif ve Aktif Değilken Elektromanyetik Tork

Tablo 2

DVR Aktif Değilken Sistemin Elektromanyetik Tork (Nm) Değerleri

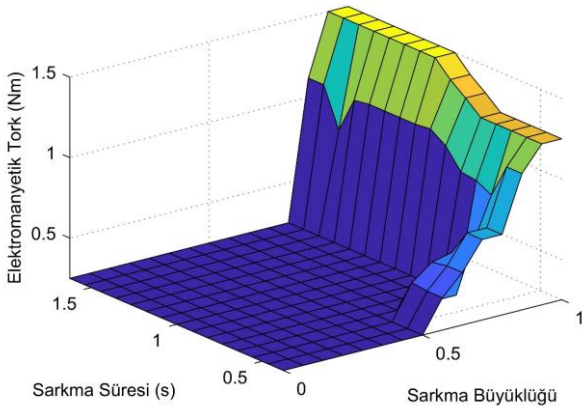
Sarkma Süresi (sn)	Sarkma Büyüklüğü(%)				
	10%	30%	50%	70%	90%
0.5	0.061	0.076	0.0789	0.8042	1.471
0.75	0.078	0.07901	0.0789	0.1031	1.486
1	0.078	0.079	0.0789	0.0797	1.595
1.25	0.079	0.079	0.0789	0.0789	1.637
1.5	0.079	0.079	0.0789	0.0789	1.672

Gerilim sarkmalarının, asenkron motordaki elektromanyetik torku, sarkmanın başlangıç ve bitiş noktalarında genliğini Şekil 12'deki gibi ani olarak fazla arttırdığı gözlemlenmiştir. Sarkma başlangıcında kısa süreli osilasyon, sarkma sonunda biraz daha uzun süreli osilasyon meydana gelmiştir. Gerilim sarkmasının meydana geldiği sürenin ortasında elektromanyetik tork duyarlılığı daha azdır. Gerilim sarkması %90 seviyelerindeyken elektromanyetik tork 20 katına çıkarak 1.7 Nm'ye ulaşmıştır. Sarkma büyüklüğünün veya süresinin artırılmasının sarkma ortasındaki elektromanyetik torku arttırdığı gözlemlenmiştir. DVR sistemi kullanmanın başlangıçtaki ve bitişteki osilasyonun büyüklüğünü yarisından azına indirmiştir. DVR ile elde edilen torklar daha kararlı ve şiddeti azdır. Elektromanyetik tork değerleri, Şekil 12'de görüleceği üzere-0.5 Nm ile 0.4 Nm seviyelerindedir.

Tablo 3

DVR Aktifken Sistemin Elektromanyetik Tork (Nm) Değerleri

Sarkma Süresi (sn)	Sarkma Büyüklüğü(%)				
	10%	30%	50%	70%	90%
0.5	0.022	0.030	-0.078	-0.171	-0.510
0.75	0.144	0.039	0.298	-0.176	-0.295
1	0.330	0.016	0.046	-0.297	0.068
1.25	-0.018	0.040	0.012	-0.162	-0.558
1.5	0.173	0.100	-0.152	-0.115	0.258



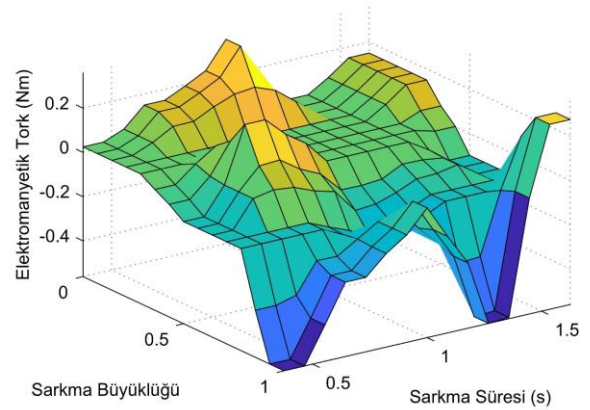
Şekil 13. DVR Aktif Değilken Sistemin Elektromanyetik Tork (Nm) Duyarlılığının Bulanık Mantık Çıktıları

DVR aktif değilken, sarkmanın belli bir büyüklüğü geçtikten sonra asenkron motorun tork değerinin çok arttığı gözlemlenmiştir. Bu, motorun aşırı akım çekmesine neden olur. Böylece motorda yanma olacağı öngörülmektedir. DVR kullanılan motorda ise anlık ve kısa süreli negatif tork elde edilmiştir. Bu negatif tork, DVR'nin elektromanyetik torkun yönünü değiştirdiği anlamına gelmektedir.

3.2 Rotor Hızı Duyarlılığı

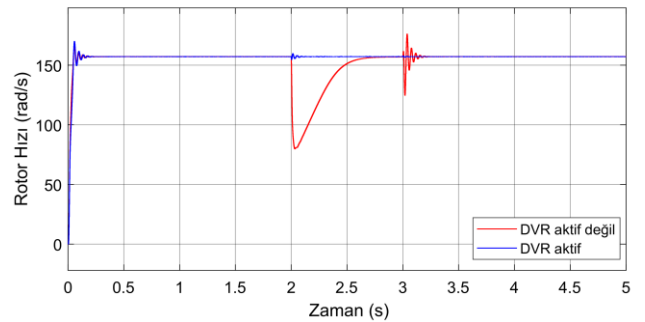
Gerilim sarkmasının rotor hızına etkisi Şekil 15'de görülmektedir. Burada %80 büyüklüğünde, 1 saniye süreli (2-3) gerilim sarkması kullanılmıştır. Rotor hızının nominal değeri 157.1 rad/sn'dir. Asenkron motordaki rotor hızının, sarkmanın başlangıcı noktasında aniden büyük ölçüde azaldığı görülmüştür.

Rotor hızı 79,87 rad/s'ye kadar düşmüştür. Bitiş noktasında başlayıp bir süre devam eden osilasyon gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Osilasyon sırasında rotor hızının büyüklüğü 176 rad/s'ye çıkabilmiştir. Gerilim sarkmasının bittiği 3. Saniyeden itibaren osilasyon 0,252 sn sürmüştür. Rotor hızındaki asıl etkilenme, gerilim sarkmasının başlangıcında olmaktadır.

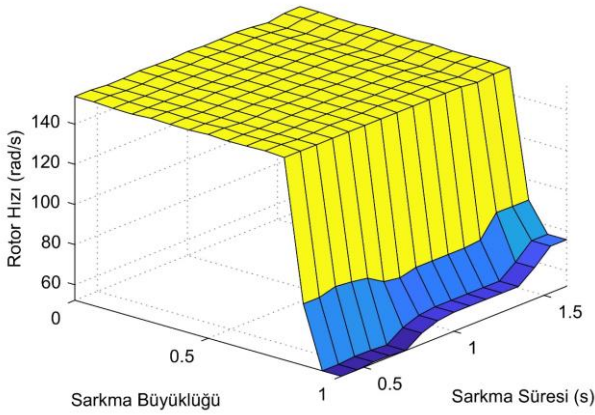


Şekil 14. DVR Aktifken Sistemin Elektromanyetik Tork (Nm) Duyarlılığının Bulanık Mantık Çıktıları

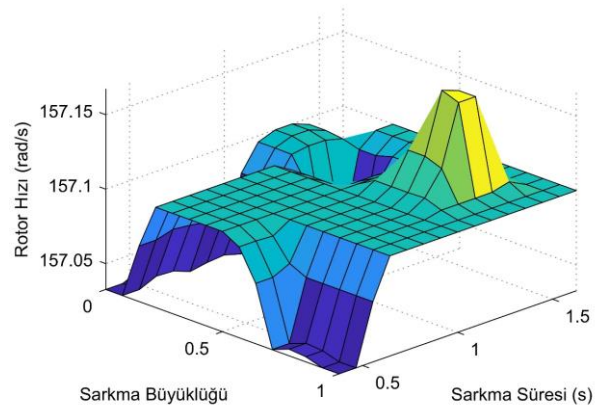
Rotor hızının bulanık mantık algoritması sonuçları Şekil 16'da görülmektedir. DVR sistemi kullandıktan sonraki bulanık mantık sonuçları Şekil 17'de görülmektedir. Sarkma büyüklüğünün %75-%80'i geçtiğinde rotor hızındaki azalma çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Asenkron motorda şiddeti %90 gerilim sarkmalarında, sarkma süresi atırılınca rotor hızındaki azalmanın küçüldüğü Tablo 4'deki gibi görülmektedir. Buradan asenkron motorun ani gerilim sarkmalarından daha çok etkilendiği sonucu çıkmaktadır. DVR sistemi kullanıldığında osilasyon çok büyük ölçüde azalmıştır. Rotor hızında, sarkma başlangıcındaki düşüş ve sarkma sonundaki osilasyon azalmıştır. Rotor hızı artıp rotor hızındaki değişimler 0,1 rad/s altına inmiştir.



Şekil 15. Gerilim Sarkması Durumunda DVR Aktif ve Aktif Değilken Rotor Hızı



Şekil 16. DVR Aktif Değilken Sistemin Rotor Hızı (rad/s) Duyarlılığının Bulanık Mantık Çıktıları



Şekil 17. DVR Aktifken Sistemin Rotor Hızı (rad/s) Duyarlılığının Bulanık Mantık Çıktıları

Tablo 4

DVR Aktif Değil İken Sistemin Rotor Hızı (rad/s) Değerleri

Sarcma Süresi (sn)	Sarcma Büyüklüğü(%)				
	10%	30%	50%	70%	90%
0.5	157.1	157.1	157.0	156.2	48.71
0.75	157.1	157.1	157.0	156.9	54.14
1	157.1	157.1	157.0	157.0	59.81
1.25	157.1	157.1	157.0	157.0	65.60
1.5	157.1	157.1	157.0	157.0	71.50

Tablo 5

DVR Aktif İken Sistemin Rotor Hızı (rad/s) Değerleri

Sarcma Süresi (sn)	Sarcma Büyüklüğü(%)				
	10%	30%	50%	70%	90%
0.5	157.0	157.1	157.1	157.0	157.0
0.75	157.0	157.1	157.1	157.1	157.1
1	157.0	157.1	157.1	157.1	157.1
1.25	157.1	157.0	157.1	157.2	157.1
1.5	157.0	157.1	157.1	157.1	157.1

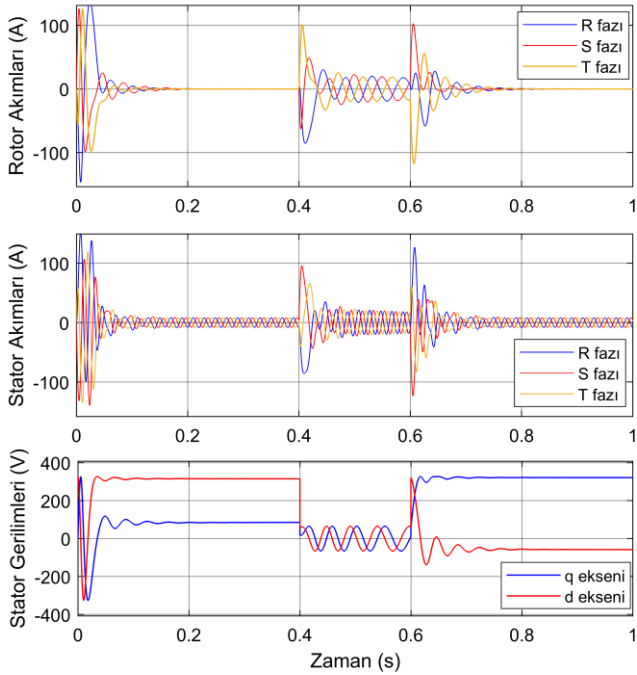
3.2 Yükün Elektrik ve Enerji Duyarlılıkları

3.2.1 Yükün İç Duyarlılıkları

Sistemde %80 büyüklüğünde, 1 saniye süreli gerilim sarkmasıyla çalışan asenkron motordaki rotor ve stator durumları Şekil 18 ve Şekil 19’da gösterilmiştir. Şekil 18’de DVR’nin aktif olmadığı sistem, Şekil 19’da ise DVR’nin aktif olduğu sistemin sonuçları verilmiştir. Şekil 18’de görüldüğü üzere stator akımları rotor akımlarından daha az etkilenmiştir. Rotor akımı ani bir şekilde 101,6 A’e çıkmıştır. Ardından 29,79 A genliğinden başlayıp azalan osilasyon yapmaya başlamıştır. Gerilim sarkmasının ortasına denk gelen 2,5. saniyede osilasyon durmuştur. Gerilim sarkmasının sonu olan 3. saniyede aniden tekrar osilasyona başlamıştır. DVR sistemi kullanılmak başlangıç ve bitişteki akım değerlerini sırasıyla 11,08 A ve 9,846 A altına çekmiştir. Gerilim sarkması ortasındaki rotor akımının genliği yaklaşık 0,6588 A değerinin altına inmiştir.

Stator akımları, rotor akımlarına benzer olarak gerilim sarkmasının başlangıcında ani yükselme ve gerilim sarkması ortasına kadar osilasyon göstermiştir. Stator akımlarının nominal değeri yaklaşık 8,174 A’dır. Gerilim sarkması başlangıcında stator akımı 95,76 A değerine ulaşmıştır. Gerilim sarkması sonunda stator akımının genliği 117,4 A değerine kadar yükselmiştir. DVR sistemi aktifleşince stator akımları neredeyse normal haline dönmüştür. Sadece gerilim sarkması başlangıcında ve sonunda akımda 16 A değerine kadar yükselme oluşmuştur. Stator akımları, asenkron makinanın akımına eşittir.

Stator gerilimleri d ve q eksenini olmak üzere 2 faz olarak sunulmuştur. Gerilim sarkmasından asenkron makinanın stator geriliminin fazları birbirinden ayrı etkilenmiştir. Farklı büyüklükteki iki faz gerilimleri,

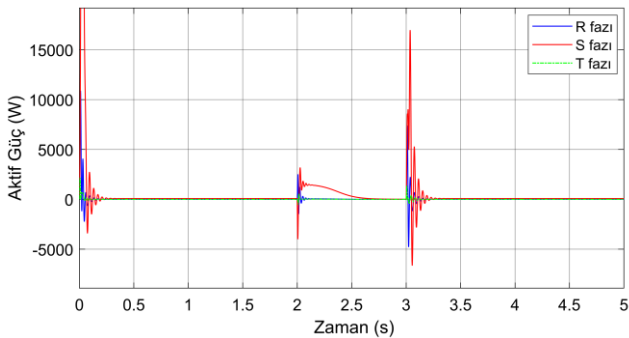


Şekil 18. DVR Aktif Değilken Sırasıyla Rotor, Stator Akımları ve Stator Gerilimleri

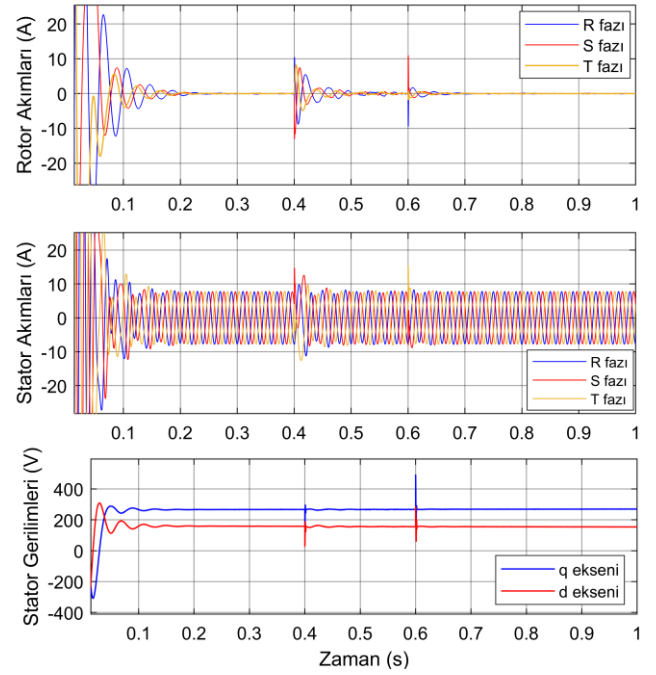
sarkma sırasında aynı seviyelere yaklaşmıştır. V_q gerilimi, sarkma sonucunda 21 V seviyesine inmiştir. V_d gerilimi nominal değerlerinden çok azalıp -326,1 V seviyesine inmiştir. DVR sistemini aktifleştirmek stator gerilimlerini, gerilim sarkmasının başlangıç ve bitiş anlarında sırasıyla 506,6 V ve 261,3 V değerlerine çıkarmıştır. Diğer zamanlarda gerilim sarkmasına karşı DVR sistemi, stator gerilimlerini oldukça değiştirmiştir.

3.2.2 Yükün Güç Duyarlılığı

Asenkron makinede DVR sisteminin durumuna göre aktif gücü Şekil 20 ve Şekil 21’de görülmektedir. Sistemin DVR kullanıldıktan sonra sistemdeki arıza başlangıç ve bitiş kısımlarındaki aşırı yükselme azalmıştır.

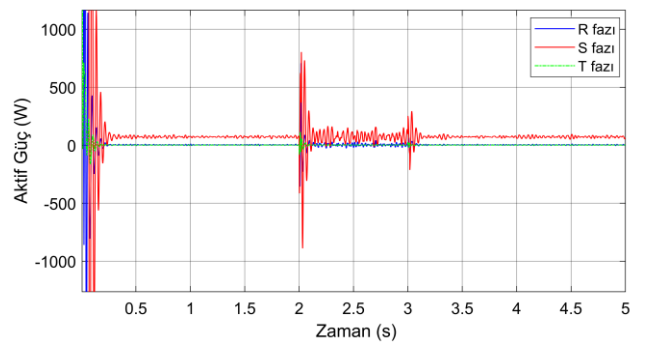


Şekil 20. DVR Aktif Değilken Asenkron Makine Gücü



Şekil 19. DVR Aktifken Sırasıyla Rotor, Stator Akımları ve Stator Gerilimleri

Arıza ortalarındaki daha az genlikli aşırı güç çekimleri azalmıştır. İlgili asenkron makinedeki aktif güç değerleri Tablo 6’ da gösterilmiştir. Verilerin bulanık mantığa aktarılmış hali Şekil 22’deki gibidir. Elde edilen bulanık mantık sonuçlarına göre, asenkron makinedeki ani akım ve güç yükselmelerinin büyüklüğü arıza süresinden bağımsızdır. Gerilim sarkmasının büyüklüğünün artması çekilen ani akımları çok arttırmıştır. Arıza sırasında çekilen en büyük aktif güçler Şekil 20 ve Şekil 21’e göre sırasıyla 7405 W ve 707,3 W olmaktadır. DVR sistemi, arızanın en büyük etkisini yaklaşık %90,4 azaltmıştır.



Şekil 21. DVR Aktif İken Asenkron Makine Gücü

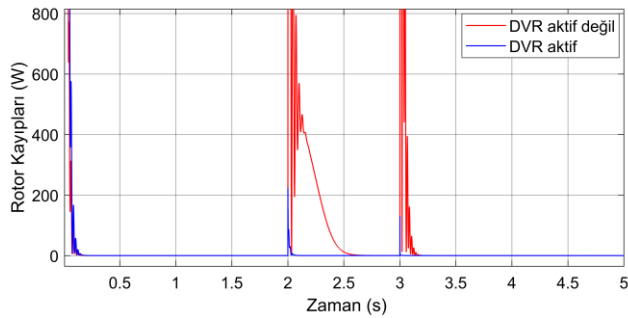
Tablo 6

DVR Aktif İken Sistemin Gücünün (W) Etkin Değeri

Sarkma Süresi (sn)	Sarkma Büyüklüğü(%)				
	10%	30%	50%	70%	90%
0.5	52.29	117.1	229.0	378.0	552.3
0.75	59.50	127.6	269.5	476.5	783.2
1	54.30	113.8	231.6	374.9	570.6
1.25	56.20	114.3	260.5	474.6	743.5
1.5	63.46	134.2	255.8	413.5	594.0

3.2.3 Yükün Kayıpları ve Verimi

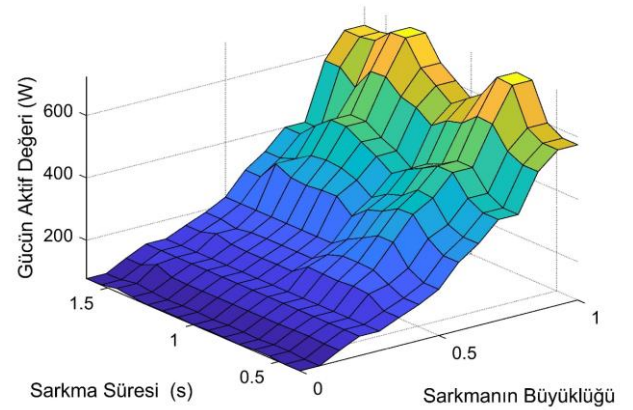
Asenkron motordaki stator ve rotor kayıpları, DVR sistemine bağlı olarak Şekil 23 ve Şekil 24'de görülmektedir. Makinenin nominal rotor kayıpları 0,74 mW'dır. Gerilim sarkması meydana geldiğinde, asenkron motorun rotor kayıpları 11,5 kW değerine yükselmiştir. Gerilim sarkmasının ara süresini geçtikten sonra güç yükselmesi sonlanmıştır.



Şekil 23. Gerilim Sarkması Durumunda DVR Aktif ve Aktif Değilken Rotor Kayıpları

DVR sistemi aktif edildiğinde gerilim sarkması başlangıç ve sonundaki rotor kayıpları 224,2 W ve 131 W değerine düşmüştür. Sürekli halde DVR ile birlikte rotor kayıplarının değeri 1 W gücün altındaki osilasyonlar ile devam etmiştir.

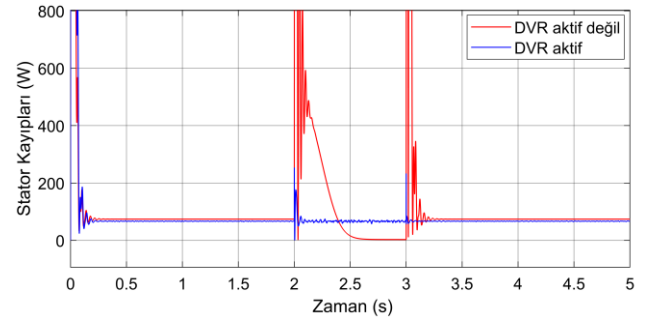
Stator Kayıpları da rotor kayıplarına benzer şekilde duyarlılıklar göstermiştir. Ancak, bir süre sonra gerilim sarkması, stator kayıplarını azaltmıştır. Arızanın orta noktasından bitiş noktasına kadar, DVR sisteminin aktif edilmesinin, asenkron motorun toplam kayıplarını arttırıp verimini azalttığı bulunmuştur. DVR sisteminin aktif etmek, gerilim sarkması başlangıç ve bitiş noktasındaki aşırı kayıpları büyük ölçüde azaltmıştır.



Şekil 22. DVR Aktifken Sistemin Aktif Güç (W) Duyarlılığının Bulanık Mantık Çıktıları

4. Sonuçlar

Bu çalışmada gerilim sarkmalarına karşı ve tasarlanan DVR'ye karşı asenkron makinenin özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, gerilim sarkmalarının asenkron makinede ani, kısa süreli, çok



Şekil 24. Gerilim Sarkması Durumunda DVR Aktif ve Aktif Değilken Stator Kayıpları

yüksek genlikli ve ters yönde tork yükselmelerine neden olduğu ortaya çıkmıştır. Gerilim sarkmasından sonra bozucu bir osilasyon meydana gelmiştir. DVR sistemi kullanmak tork yükselmesinin yönünü düzeltmiş ve genliğini azaltmıştır. Sonraki osilasyon çok azalmıştır.

Gerilim sarkmasının rotor hızında büyük bir düşüşe sebep olduğu görülmüştür. DVR sistemi kullandıktan sonra gerilim sarkmasının rotor hızı üzerindeki etkisi neredeyse kalkmıştır. DVR sisteminin yük üzerindeki arıza durumunda performansı araştırılmıştır. İlgili duyarlılıklar bulanık mantık algoritması kullanılarak sunulmuştur. Gerilim sarkmasının asenkron makinenin iç akımları ve iç gerilimleri üzerindeki etkileri de açıklanmıştır.

Asenkron makinenin nominal elektromanyetik torku 0,079 Nm'dir. Örnek olarak alınan %80 büyüklüğünde ve 1 saniye süreli gerilim sarkması meydana geldiğinde asenkron makinenin elektromanyetik torku arıza ortasında 1,919 Nm'ye yükselmiştir. Arıza ve başında sonunda ise -243,5 Nm ve 137,7 Nm genliğine ulaşan osilasyonlar oluşturmuştur. DVR sistemi kullanınca arıza ortasındaki elektromanyetik tork 1,034'dir. DVR arızanın etkisini %46,2 azaltmıştır. En büyük osilasyon genliği ise sırasıyla -40,26 Nm ve 30,96 Nm'dir. DVR'nin arıza düzeltme oranları sırasıyla %83,47 ve %77,52 olarak hesaplanır.

Tasarlanan DVR sistemi asenkron makinenin rotor hızını arıza ortasında 151,2 rad/s'den 157 rad/s'ye çıkarmıştır. Asenkron makinenin nominal rotor hızı 157,1 rad/s'dir. Arıza başında asenkron makinenin rotor hızı 79,87 rad/s'ye kadar düşmüştür. DVR, bunu 155,5 değerine yükseltmiştir. DVR, arıza sonunda meydana gelen osilasyonu DVR 157 rad/s'ye ulaştırmıştır. DVR rotor hızında en az %98 başarılı olmuştur. DVR rotor hızındaki arıza etkisini neredeyse tamamen ortadan kaldırmıştır.

Asenkron makinedeki nominal gerilimin etkin değeri 230,9 V'dur. %80 büyüklüğündeki arıza durumunda bu değer 46,18 V değerine inmektedir. DVR sistemi kullanmak bu değerde 7 V tepeden tepeye değerinde osilasyonlar oluşturur. DVR kullanılıyorken arıza ortasındaki gerilim 218,8 V'dur. Arıza ortasındaki düzeltme oranı %94,76'dır. Fakat DVR sistemi arıza başlangıcında değeri 35,65 V ve 403,1 V olan sonunda ani ve aşırı gerilimlere neden olmuştur.

Asenkron makinenin nominal akımının etkin değeri 5,780 A'dir. Arıza ortasında bu değer 2,669 A değerine düşmüştür. Arıza başlangıcında ve sonunda genliği 70,96 A ve 86,96 A olan osilasyonlar meydana gelmiştir. DVR ile arıza ortası akım 5,417 A'dir. DVR sistemi akımı %93,72 başarı ile düzeltmiştir. DVR ile osilasyonlar 10,70 A ve 10,26 A genliğindedir.

Asenkron makinenin aktif gücü 78,81 W'dır. Arıza ortasında bu değer 311,2 W değerine yükselmiştir. DVR sistemi aktifleştirilince aktif güç 26,27 W'dır. Arıza başlangıcında ve sonunda 4002 W ve 16,97 kW değerine yükselmiştir. DVR ile aktif güç osilasyon genlikleri 460,9 W ve 147,7 W'dır.

Yapılan çalışmadan çıkarılabilecek ana sonuçlar şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Gerilim sarkmalarının asenkron makinede ani, kısa süreli, çok yüksek genlikli ve ters yönde tork yükselmelerine neden olduğu ortaya çıkmıştır.
- Gerilim sarkmasından sonra bozucu bir osilasyon meydana gelmiştir. DVR sistemi kullanmak tork yükselmesinin yönünü düzeltmiş ve genliğini azaltmıştır. Sonraki osilasyon çok azalmıştır.

- Gerilim sarkmasının rotor hızında büyük bir düşüşe sebep olduğu görülmüştür. DVR sistemi kullandıktan sonra gerilim sarkmasının rotor hızı üzerindeki etkisi neredeyse kalkmıştır.
- DVR sistemi kullanmanın gerilimi düzeltmedeki başarısı büyüktür. Fakat çok yüksek ve ani gerilimlere neden olur.
- DVR sisteminin yükün akımındaki başarısı arıza ortalarında yüksek iken arıza başlangıç ve sonlarında düşmüştür.
- Güç değerleri gerilim sarkmalarından oldukça fazla etkilenip yükselmiştir ve DVR sistemi fazla başarılı olamamıştır.
- Asenkron makinenin gerilim sarkmasının daha çok büyüklüğünden etkilendiği sonucuna varılabilir. Asenkron makinenin durumu olumsuz yönde değişmiştir. DVR sistemlerini kullanmak gerilim sarkmalarını büyük ölçüde azaltır. Ancak yüklerde istenmeyen değişikliklere neden olabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Hakan ÖZTÜRK, literatür araştırması, deneysel ve teorik araştırma, sistemin tasarımı, programlama; Ertan YANIKOĞLU, problemin seçimi, çözüm metodunun bulunması ve açıklanması konularında katkı sağlanmışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Azim, M.R. ve Hoque, M.A.J.I.J.o.C.A. (2011). A fuzzy logic based dynamic voltage restorer for voltage sag and swell mitigation for industrial induction motor loads. *International Journal of Computer Applications*, 30(8), 9-18. doi: <https://dx.doi.org/10.5120/3672-5120>
- Babaei, E. ve Kangarlu, M.F. (2012). Sensitive load voltage compensation against voltage sags/swells and harmonics in the grid voltage and limit downstream fault currents using DVR. *Electric Power Systems Research*, 83(1), 80-90. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.09.013>
- Benachaiba, C. ve Ferdi, B. (2008). Voltage quality improvement using DVR. *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, 14(1), 39-46. Erişim adresi:

- <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta.1.element.baztech-article-BAT2-0004-0015>
- Benachaiba, C. ve Ferdi, B. (2009). Power quality improvement using DVR. *American Journal of Applied Sciences*, 6(3), 396-400. doi: <https://dx.doi.org/10.3844/ajassp.2009.396.400>
- Chattopadhyay, S., Mitra, M. ve Sengupta, S. (2011). Electric power quality. In *Electric Power Quality*, (pp. 5-12). Springer, Dordrecht. doi: https://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4_2
- Choi, S.S., Li, B.H. ve Vilathgamuwa, D.M. (2000). Dynamic voltage restoration with minimum energy injection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 51-57. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/59.852100>
- Cutsem, T.V. ve Vournas, C. (1998). Voltage stability of electric power systems. Springer Science & Business Media. 441. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75536-6>
- Dhritlahre, A. ve Pillai, A.G. (2021). Reduce voltage sag in distribution system using fuzzy logic controller based dynamic voltage restorer (DVR). *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 19(1), 101-106. doi: <https://dx.doi.org/10.26634/jps.7.4.17438>
- Gonzalez, P.G. ve Cerrada, A.G. (2010). Analysis of a neutral-point-connected DVR and comparison with a conventional and a transformer-less DVR. *Internal report*. Erişim adresi: <https://scholar.google.com/scholar?cluster=17866846668114248843&hl=en&oi=scholar>
- Haque, M.H. (2001). Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM. In *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502)*, 1, 5, Porto, Portugal. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/PTC.2001.964609>
- Hatami, H., Shahnia, F., Pashaei, A. ve Hosseini, S.H. (2007). Investigation on D-STATCOM and DVR operation for voltage control in distribution networks with a new control strategy. In *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2207-2212. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/PCT.2007.4538661>
- Heising, C. (2007). IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. IEEE Inc., New York.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. in *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, 1-98, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
- Jowder, F.A. (2007). Modeling and simulation of dynamic voltage restorer (DVR) based on hysteresis voltage control. In *IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1726-1731. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/IECON.2007.4459890>
- Kumar, B., Mercy, E.L. ve Ebenezer, R.S. (2020). Voltage enhancement of SMES based interline DVR using fuzzy logic controller. *Recent Trends in Control and Converter*, 3(2). doi: <https://dx.doi.org/10.47392/irjash.2020.80>
- Lamoree, J., Mueller, D., Vinett, P., Jones, W. ve Samotyj, M. (1994). Voltage sag analysis case studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(4), 1083-1089. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/28.297926>
- McGranaghan, M.F., Mueller, D.R. ve Samotyj, M.J. (1993). Voltage sags in industrial systems. *IEEE Transactions on industry applications*, 29(2), 397-403. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/28.216550>
- Mithilesh, S. ve Shubhrata, G. (2015, April). Fuzzy logic based simulation of DVR and DST ATCOM in power systems for power quality improvement. In *National Conference on Knowledge, Innovation in Technology and Engineering (NCKITE)*, 10-11. Erişim adresi: <https://www.ijsr.net/conf/NCKITE2015/31.pdf>
- Omar, R. ve Rahim, N.A. (2008, December). Modeling and simulation for voltage sags/swells mitigation using dynamic voltage restorer (DVR). In *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, 1-5. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4812976>
- Pal, R. ve Gupta, S. (2020). Topologies and control strategies implicated in dynamic voltage restorer (DVR) for power quality improvement. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 44(2), 581-603. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s40998-019-00287-3>
- Pragna, R.N., Rani, L.P., Ramya, K., ve Mohan, T.K. (2019). Dynamic voltage restorer using pi & fuzzy logic control. *IJRAR-International Journal of Research and Analytical Reviews*, 6(1), 143-151. Erişim adresi: <https://www.ijrar.org/papers/IJRAR1ACP026.pdf>
- Roncero-Sanchez, P. ve Acha, E. (2009). Dynamic voltage restorer based on flying capacitor multilevel converters operated by repetitive control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2), 951-960. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2005885>
- Sadigh, A.K. ve Smedley, K.M. (2012, July). Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR). In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345153>
- Salimin, R.H. ve Rahim, M. (2011). Simulation analysis of DVR performance for voltage sag mitigation. In *2011 5th International Power Engineering and*

- Optimization Conference*, 261-266. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/PEOCO.2011.5970386>
- Shukir, S.S. (2021). Comparison the performance of the dynamic voltage restorer based on PI, fuzzy logic, and fuzzy neural controller. *International Journal of Engineering Management*, 5(1), 1. doi: <https://dx.doi.org/10.11648/j.ijem.20210501.11>
- Singh, S.P. ve Bhat, A.H. (2020). Design and performance evaluation of self-supported dynamic voltage restorer for mitigating various power quality problems. *International Journal of Power Electronics*, 12(1), 54-84. doi: <https://dx.doi.org/10.1504/IJPELEC.2020.108386>
- Singh, S.P., Bhat, A.H. ve Firdous, A. (2019). A novel reduced-rule fuzzy logic based self-supported dynamic voltage restorer for mitigating diverse power quality problems. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, 11(1). doi: <https://dx.doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.1.4>
- Taylor, C., Balu, N. ve Maratukulam, D. (1994). *Power system voltage stability*. New York: McGraw-Hill.
- Weissbach, R.S., Karady, G.G. ve Farmer, R.G. (1999). Dynamic voltage compensation on distribution feeders using flywheel energy storage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2), 465-471. doi: <https://dx.doi.org/10.1109/61.754090>