

AA Gerilim Düzenleyici Devrelerinin Kısa Bir Derlemesi ve Faz Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonlu 20 kVA Gücünde Bir AA Gerilim Düzenleyicinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

A Short Review AC Voltage Regulators and Design and Implementation of a 20 kVA, Phase Shifted PWM AC Voltage Regulator

Faruk Keskin¹, Hüseyin Köse², Harun Gül², M. Timur Aydemir¹

^{1,2}Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
farukkeskin@gmail.com, aydemirmt@gazi.edu.tr

²GESS OES Ortadoğu Elektronik San. Tic. Ltd. Şti
huso481@gmail.com, harungul@gess.com.tr

Özet

Teknolojideki gelişmeler daha hassas cihazların üretimine olanak tanımıştır. Bu hassas cihazların zarar görmeden, verimli bir şekilde kullanılabilmesi için uygulanan gücün kalitesinin korunması gereklidir. Üretim santralleri ile iletim ve dağıtım hatlarındaki arızalar ve doğrusal olmayan yüklerin artması güç kalitesinde önemli bozulmalara sebep olmaktadır. Mekanik ve elektrikli transformatör kademe değiştiriciler veya doyurmalı reaktörler gibi geleneksel yöntemler artık istenilen güç kalitesini sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bunların yerine yarıiletken teknolojisinin kullanıldığı daha verimli sistemlerin kullanımı önerilmektedir. Yarıiletken teknolojisinin kullanıldığı birçok düzenleyici topolojisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada bu topolojilerin sınıflandırılması yapılmış, farklı topolojiler ele alınarak olumlu ve olumsuz yanları belirtilmiştir. Ayrıca faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu ile gerçekleştirilen gerilim düzenleyici ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu topolojiye dayalı olarak 20 kVA gücünde bir düzenleyici tasarlanmış, benzetim ve deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur.

Abstract

Advances in technology have allowed the production of more sensitive equipment. In order to use these devices safely and efficiently, quality of the applied power needs to be preserved. Failures in the transmission lines, distribution lines and generation plants, and nonlinear loads are the main reasons causing power quality problems. Traditional devices such as mechanical and electronic transformer tap changers or saturated reactors are insufficient to ensure the required quality. More efficient systems utilizing semiconductor technology has been gaining importance. There are several regulator topologies proposed in the literature. Some of these topologies are analyzed in this paper. A comparison of these topologies is presented. One of them, phase shifted pulse width modulation regulator, is analyzed in detail. Simulation and experimental results of a 20 kVA regulator based on this topology are given.

1.Giriş

Yüksek teknolojinin kullanıldığı CNC tezgâhları, fabrikalardaki motor sürücüler, hastanelerdeki tıbbi cihazlar, haberleşme cihazları, işyerlerinde ve evlerimizde

kullanmakta olduğumuz bilgisayar ve elektronik cihazlar, evlerdeki elektronik beyaz eşyalar, klimalar ve kombiler gibi gelişen teknolojiyle beraber hayatımıza dâhil olan hassas cihazların uzun ömürlü ve verimli olması için yüksek güç kalitesiyle kullanılmaları gerekir. Hayatımızın vazgeçilmezleri arasına giren bu cihazlar güç kalitesinin de önemini arttırmıştır.

Elektrik güç sistemi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Güç sisteminin kalitesinde her bir aşamanın etkisi bulunmaktadır. Üretim veya tüketimin ani olarak artması veya azalması, iletim ve dağıtım sistemlerindeki arızalar, yüklerin doğrusal ve dengeli olmaması güç sistemindeki bozulmaların en önemli sebepleridir. Elektrik güç sistemindeki başlıca bozulmalar da gerilim çökmesi, gerilim kabarması, kesinti, gerilim darbeleri ve harmoniklerdir.

Gerilim çökmesi gerilimin bir periyottan daha uzun bir süreyle anma değerinin %80'inin altına düşmesi olarak tanımlanmıştır. Gerilim çökmesinin en önemli sebepleri özellikle demir-çelik sanayi gibi tüketimini hızlıca arttırabilen tüketiciler sebebiyle ani olarak tüketimin artması veya üretim merkezlerindeki veya iletim/dağıtım hatlarındaki arızalar sebebiyle üretimdeki azalma sonucu şebekenin yetersiz kalmasıdır.

Gerilim kabarması ise tam tersi olarak gerilimin bir periyottan daha uzun bir süre boyunca anma değerinin %110'undan daha yüksek bir değere kabarmasıdır. Gerilim kabarmasının en önemli sebepleri de yine demir-çelik sanayi gibi büyük güçlü sistemlerin tüketimlerini önemli ölçüde azaltmaları veya iletim/dağıtım hatlarındaki arızalar sebebiyle meydana gelen büyük güçteki tüketim azalmalarıdır. Bunların yanı sıra düzenleyici sistemlerin yanlış kullanımı da gerilim çökme ve kabarmalarına sebep olabilmektedir.

Kesinti de gerilimin en az yarım periyot süreyle sıfır değerini alması durumudur. En önemli sebepleri iletim dağıtım hatlarındaki arızalar ve üretim merkezlerindeki arızalar sebebiyle çevre iletim hatlarını korumak ve arızanın sınırlandırılması amaçlı koruma röleleri aracılığıyla yapılan bilinçli kesintilerdir.

Gerilimdeki kısa süreli ciddi değişimler darbe olarak adlandırılır. Kesici arızaları, iletim/dağıtım hatlarındaki kısa devreler ve yıldırımlar darbelerin başlıca sebepleridir.

Harmonik akım ve gerilimin dalga biçimindeki bozulma olup başlıca sebepleri de güç elektroniği devreleri ve doğrusal olmayan yüklerdir.

Güç sistemindeki başlıca bozulma türleri bunlar olup, bunlar arasında da gerilim çökmesi ve kabarması en sık karşılaşılan güç kalitesi problemleridir. Bu problemin çözümü için yaygın olarak mekanik veya elektriksel yöntemlerle transformatörün kademesinin değiştirilmesi ve böylelikle çıkış geriliminin ayarlanması sağlanmaya çalışılmıştır. Fakat kayıplarının, maliyetinin ve hacminin yüksek; veriminin ve hızının düşük olması sebebiyle bu sistemler istenilen güç kalitesini sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Gelişen yarıiletken teknolojisiyle beraber güç elektroniği devreleriyle oluşturulan farklı topolojiler tasarlanmıştır. Bu tasarımlar bağlantılarına göre doğrudan ve seri bağlı düzenleyiciler olarak, tasarımda transformatör kullanılıp kullanılmamasına göre de transformatörlü ve transformatörsüz düzenleyiciler olarak sınıflandırılabilirlerdir.

Bu makalede gerilim düzenleyici devre yapıları ele alınmakta ve özellikle yarıiletken teknolojisine dayalı topolojiler incelenerek karşılaştırılmaktadır. Makalenin ikinci bölümünde, literatürde önerilen düzenleyici topolojileri kısaca ele alınmakta, öne çıkan özellikler karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu topolojiler arasında bulunan faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (FK-DGM) devre, çift yönlü düzeltme özelliğine sahip olup, bu özellikleri nedeniyle üçüncü bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde 20 kVA gücünde tek fazlı bir düzenleyici devre tasarımı yapılmış, tasarlanan devrenin benzetim ve deneysel çalışma sonuçları verilmiştir.

2. Yarıiletken tabanlı düzenleyici topolojileri

[1]'de transformatör aracılığıyla şebekeye bağlı bir düzenleyici topolojisi önerilmiştir. Çalışmada düzenleyici devresi gerilim düşürücü olarak çalışmakta ve sonrasında yükseltici transformatör aracılığıyla şebekedeki gerilim değişimleri düzeltir. Ayrıca çalışmada kademeli transformatör ile dönüştürücünün bir arada kullanıldığı, transformatörle dönüştürücünün gerilimi anma değerindeyken dönüştürücünün bir anahtar aracılığıyla devre dışı bırakılarak bir arada kullanıldığı ve regülasyon için sadece AA dönüştürücünün kullanıldığı üç farklı topoloji karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sadece dönüştürücünün kullanıldığı topolojinin tepki süresinin daha kısa olduğu, bakım maliyetinin daha düşük olduğu, daha verimli, daha uzun ömürlü ve daha düşük maliyetli olduğu tespit edilmiştir.

[2]'de önerilen sistem, düzenleyici doğrultucu ve evirici kısımlarından oluşmaktadır ve düzenleyici gerilimi bir transformatör aracılığıyla şebekeye eklenmektedir. Şebeke gerilimi doğrultulduktan sonra gerilim çökme veya kabarmasını düzelterek evirici anahtarlama ile anahtarlama ve elde edilen gerilim şebekeye seri bağlı bir transformatör aracılığıyla verilerek gerilim düzeltmesi sağlanmaktadır. Ayrıca çalışmada çıkış gerilimindeki bozulmaların hızlı bir şekilde tespiti için de bir sistem önerilmiştir.

[3]'te önerilen düzenleyicinin giriş gerilimi bir ototransformatör tarafından sağlanmaktadır. Darbe genişlik modülasyonu ile regülasyon gerilimi elde edilerek şebekeye bir kondansatör aracılığıyla eklenmektedir. Sadece gerilim

çökmelerini düzeltebilen bu topolojide herhangi bir enerji depolama birimi bulunmamaktadır.

[4]'te gerilim düzeltmesi, transformatör aracılığıyla seri bağlı düzenleyici devresiyle sağlanmaktadır. Düzenleyici devresi doğrultucu ve evirici kısımlarından oluşmaktadır. Düzenleyicide DA kaynak bulunmamaktadır. Gerilim çökme ve kabarmalarını düzeltebilen bu topoloji bunu evirici kısmındaki darbe genişlik modülasyonu ile sağlamaktadır. Anahtarlama işaretinin doluluk oranı (duty cycle ratio) 0.5'in üzerinde iken gerilim çökmeleri, altında iken gerilim kabarmalarını düzeltmektedir. Bu tasarımın en önemli avantajı ise evirici kısmında faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi kullanılması ve böylece anahtarlama kayıplarının azaltılması ve düzenleyici çıkış frekansının iki katına çıkmasıdır.

[5]'te en az sayıda elemanı kullanılarak gerilim düzeltmesi gerçekleştirilmiştir. Giriş geriliminin diyotlarla doğrultulduğu çalışmada, evirici çıkışı filtrelenerek bir transformatör aracılığıyla şebekeye eklenmiştir. Bu yöntemle gerilim çökme ve kabarmalarını düzeltebilmektedir. Oldukça basit olan sistemin en önemli iki avantajının uygulanmasının basit ve verimli olması olduğu belirtilmiştir.

[6]'da gerilim anma değerinde iken bir anahtar aracılığıyla giriş geriliminin direkt olarak çıkışa verildiği gerilim çökmesi durumunda ise giriş geriliminin düzenleyici tarafından anahtarlama bir ototransformatör aracılığıyla çıkışa verildiği bir topolojiye yer verilmiştir. Düzenleyicinin en önemli avantajı sadece bir anahtarlama elemanı ile düzeltme gerçekleştirilmesidir. Bu da maliyeti oldukça düşürmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda düzenleyicinin tepkisinin de oldukça hızlı olduğu belirtilmiştir.

[7]'de şebekeden beslenen düzenleyici anahtarlama elemanlarıyla doğrultulmuş ve sonrasında evirici kısmında darbe genişlik modülasyonu yöntemiyle anahtarlama doğrultulmuş gerilim şebekeye bir transformatör aracılığıyla eklenmiştir. Gerilim çökmesi durumunda şebeke ile aynı fazda gerilim üreten evirici, gerilim kabarması durumunda da ters fazda gerilim üreterek gerilim regülasyonu sağlamaktadır. Tasarımın giriş ve çıkış akımının sinüzoidal olduğu, hızlı ve verimli regülasyon sağladığı, ayrıca DA kapasitör kullanılmamasının anahtarlama kayıplarını, filtre büyüklüğünü ve harmonik bozulmayı düşürdüğü belirtilmiştir.

[8]'de üç fazdan tek faza gerilim regülasyonu üzerine iki farklı topolojiye yer verilmiştir. Bir fazda gerilim çökmesi durumunda yine aynı fazdan şebeke gerilimi anahtarlama ile düzeltme yapılırken, gerilim kabarması durumunda da ters fazda gerilim şebekeye eklenmektedir. Tasarımın en önemli avantajı DA kaynak kullanılmaması ve bu sayede maliyetin çökmesi, hacim ve kütlenin küçülmesidir.

[9]'da iki kademeli transformatör ve AA kıyıcı devrelerinin sentezi yapılarak yeni bir düzenleyici topolojisi elde edilmiştir. Yeni bir anahtarlama metodunun önerildiği ve anahtarlamaların sıfır akımda yapıldığı tasarımda anahtarlar üzerindeki stres ve elektromanyetik yayımın da azaltılması sağlanmıştır.

[10]'da transformatörün düzenleyicinin girişinde bulunduğu ve doğrudan AA'dan AA'ya dönüştürmenin yapıldığı ve

düzenleyicinin çıkış geriliminin şebekeye bir kondansatör aracılığıyla aktarıldığı farklı bir düzenleyici topolojisine yer verilmiştir. DA kaynağın kullanılmadığı topolojinin uzun süreli düzeltme yapabileceği ve düzeltme aralığının transformatör tarafından belirlendiği belirtilmiştir.

[11]'de düzenleyicinin hem girişinde hem de çıkışında transformatör kullanılmış ve bu sayede yüksek güç uygulamaları düşük gerilim değerlerindeki anahtarlama elemanlarıyla gerçekleştirilebilmiştir. Regülasyon için AA/AA dönüştürücü kullanılmıştır. Bu çalışmada da DA kaynak kullanılmamış ve bu sayede uzun süreli düzeltme olanağı sağlanmıştır.

[12]'de dengeli ve dengesiz gerilim çökme kabarma ve salınımlarını düzeltmek için doğrudan üç fazdan üç faza gerilim düzeltmesi yapan yeni bir topolojiye yer verilmiştir. Önerilen tasarımda arada hayali bir DA kaynak olmak üzere doğrultucu ve eviriciden oluşan iki kısım yer almaktadır. Düzenleyicinin şebekeden beslendiği tasarımda DA kaynak kullanımına gerek kalmamıştır. Anahtarlama elemanlarının da tek yönlü olarak kullanılması maliyeti düşürmüştür.

[13]'te transformatörsüz doğrudan dönüştürücü topolojisine yer verilmiştir. Topolojide düzeltme düzenleyici devresinin girişinde bulunan şebeke gerilimine eşit iki kapasitör geriliminin şebekeye eklenmesi ve çıkarılmasıyla sağlanmaktadır. Böylece geniş bir regülasyon aralığı sağlanmıştır. Fakat uzun süreli regülasyon sağlayabilecek bir topoloji değildir.

[14]'te giriş gerilimi matris dönüştürücü devresiyle hesaplanan açılarda anahtarlanarak istenilen çıkış gerilimi elde edilmiştir. Topoloji giriş çıkış geriliminin ana genliğini düşürürken frekansını arttırmaktadır.

[15]'te az sayıda anahtarlama elemanı ile endüktif yüklü tek faz DGM AA kıyıcı topolojisi üzerine çalışılmıştır. Devre ile yapılan çalışmalar sonucunda giriş/çıkış gerilimi ve giriş/çıkış akımı sinüse yakın olarak elde edilmiş. Tristöre göre daha iyi giriş güç faktörü ve geçiş tepkisi elde edilmiş. Düşük dereceden harmonikler yok edilmiş. Daha küçük giriş/çıkış filtresi ve basit bir kontrol sistemi kullanılmıştır.

[16]'da AA-AA matris dönüştürücülerin yapısının basit fakat kontrol karışıklığının yüksek olduğu belirtilerek uygulamasının az olmasına sebep olarak da anahtarlama problemi ve kontrolünün karışıklığı gösterilmiştir. Çalışmada bu problemi gidermek için uygulanması kolay yeni bir anahtarlama tekniği önerilmektedir. Bu teknikte anahtarlama arası ölü zaman, akım ve endüktif yükler için akım yolu oluşturularak gerilim yükselmeleri önlenmiş. Anahtarlama tekniğinde uzay vektör modülasyonu ve histerezis akım kontrolü tekniklerinin faydalı yanları bir araya getirilmiştir. Tasarımda herhangi bir DA kaynak kullanılmaması sebebiyle tasarımın daha yüksek güçler için de kullanılabilmesi belirtilmiştir. Ayrıca geleneksel doğrultucu-dönüştürücü tasarımına göre daha az seri anahtar olması sebebiyle verimin yükseleceği, kontrolünün basitliği ve anahtarlanmanın uygun bir şekilde yapılmasıyla çıkış gerilimi ve giriş akımının sinüzoidal olacağı belirtilmiştir.

[17]'de doğrultucu ve dönüştürücü kısımlarının nötr uçları ortak olan bir düzenleyici topolojisi önerilmiştir. Önerilen tasarımda giriş akımı ve çıkış gerilimi sinüzoidal olarak elde

edilmiştir. Ayrıca tasarım çift yönlü güç akışı da sağlamaktadır. Çalışmada düzenleyici tasarımına ek olarak düşük maliyetli AA kapasitör tasarımı da önerilmiştir. Tasarımın testleri sonucunda anahtarlama elemanı sayısının düşürüldüğü, çıkış geriliminin genlik modülasyonu ile basitçe kontrol edilebileceği, güç faktörü kontrolünün ve çıkış gerilimi regülasyonunun başarılı bir şekilde sağlandığı, düşük maliyetiyle uygulanabilir olduğu görülmüştür.

[18]'de doğrultucu ve evirici kısımlarından oluşan tek faz gerilim düzenleyicisinin incelemesi, tasarımı ve paralellenerek çalışması incelenmiştir. Tasarımda üç kollu doğrultucu-dönüştürücü devresi kullanılmıştır. Çıkış gerilimi ve giriş güç faktörü doğrultucu devresi tarafından kontrol edilmektedir. Makalede önerilen paralelleme işleminde herhangi bir kontrol bağlantısı gerekmemektedir. Paralel çalışma devreye hızlı tepki, hassas çıkış gerilimi, eşit ana ve harmonik akım dağılımı gibi özellikler kazandırmaktadır.

[19]'da sunulan çalışmada darbe genişlik modülasyonu AA dönüştürücü entegre çift yönlü güç modülleriyle (IBPM) gerçekleştirilmiştir. Modüller yapı bozucu endüktif etkileri de azaltmıştır. Topoloji başarılı bir şekilde tasarlanıp, geliştirilmiş ve test edilmiş 1:0.955'lik gerilim taşıma oranı elde edilmiştir. Böylece belki de literatürdeki en yüksek verimin elde edildiği öne sürülmüştür.

[20]'de ortak nötr noktasına sahip AA-AA dönüştürücü topolojisine yer verilmiş. Doğrultma için ortak nötr bağlantılı yarım köprü doğrultucu kullanılmış ve bu sayede anahtarlama elemanları üzerine düşen gerilim düşürülmüş. Akım ve gerilim kontrol çevrimleri için de PI kontrol yönteminden yararlanılmıştır. Bu sayede hat akımı oldukça sinüzoidal olarak elde edilmiştir.

[21]'de hat etkileşimli KGK yapısı kullanılarak gerilim düzenleyici elde edilmiştir. Geniş bir regülasyon aralığına sahip tasarımda düşük maliyet ve hacimle yüksek güç kalitesi elde edilmeye çalışılmıştır.

[22]'de seri bağlı AA gerilim düzenleyici daha düşük maliyetle gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Sürekli regülasyon sağlayan sistemde doğrultma için diyotlar, dönüştürme için darbe genişlik modülasyonu ile anahtarlama yöntemi kullanılmış ve tek yönlü yük akışı için kullanılacak bir transformatörsüz tasarım elde edilmiştir. Tasarımın basit olmasının verimi yükselttiği ve kontrol sistemindeki sadeliğin uygulanabilirliğini arttırdığı ifade edilmiştir.

[23]'te en az sayıda anahtarlama elemanı ile gerilim beslemeli Z kaynak dönüştürücü ve akım beslemeli Z kaynak dönüştürücü tasarımları ele alınmıştır. Tasarım geniş düzeltme aralığı, faz açısı düzeltme, ani akım yükselmelerini düşürme, harmonikleri elimine etme görevlerini yerine getirebilmektedir. Ayrıca tasarımın maliyetinin düşük ve hacminin küçük olduğu belirtilmiştir.

[24]'te Z kaynak tasarımının kullanıldığı düzenleyici topolojisine yer verilmiştir. İki anahtarlama elemanı sürekli devrede tutularak ve anahtarlama geriliminin sıfır geçişlerinde yapılarak anahtarlama kaybı düşürülmüş ve verim artırılmıştır. Böylelikle uygulanabilir ve yüksek verimli bir düzenleyici elde edilmiştir.

[25]'te eski sistemlerde doğrultucunun çıkışının kontrolsüz veya kontrollü fakat sabit büyüklükte olduğuna değinilerek

gerilim regülasyonu için kontrollü doğrultucuların kullanılması önerilmiştir. Transformatörsüz bir tasarımın önerildiği makalede tasarımın simülasyonu ve laboratuvar testleri yapılmıştır. Eski ve yeni tasarımlar karşılaştırılmış verimliliğin %89,1'den %96,1'e çıktığı görülmüştür.

[26]'da AA kıyıcı kullanılarak gerilim düzenleyici elde edilmiştir. Topolojinin geniş bir düzeltme aralığına sahip olduğu ve kontrolünün de basit olduğu belirtilmiştir. Transformatörün kullanılmadığı tasarımda anahtarlamalar darbe genişlik modülasyonu yöntemiyle yapılmıştır.

[27]'de geleneksel tek fazlı Z-kaynak dönüştürücünün avantajları ele alınmıştır. Tasarım gerilim çökme ve kabarmalarını faz açısını ters çevirerek veya aynı şekilde kullanarak düzeltmektedir. Buna ek olarak topolojide giriş ve çıkış ortak bir nötre sahiptir. Böylece tasarım sürekli akım modunda çalışmaktadır. Yapılan benzetim ve test çalışmaları göstermiştir ki önerilen tasarım geleneksel Z-kaynak dönüştürücülere göre daha düşük giriş akımı harmoniğine ve daha yüksek giriş güç faktörüne sahiptir. Ayrıca tasarımda DA kaynak ve DA kapasitör kullanılmamış ve bu da maliyetin ve tasarım hacminin çökmesini sağlamıştır. Ayrıca bu sayede uzun süreli regülasyona da imkan sağlanmıştır.

[28]'de önerilen AA kıyıcı iki yönlü güç akışı sağlamaktadır. Ana anahtarlama elemanlarının anahtarlanmasında devreye alma ve çıkarma için sıfır gerilimde anahtarlama, yardımcı anahtarlama elemanlarının devreye alınmasında sıfır akımda anahtarlama ve devreden çıkarılmasında sıfır gerilimde anahtarlama uygulanmıştır. Önerilen yüksek frekanslı tek faz yumuşak anahtarlama AA dönüştürücünün basit bir topoloji ve küçük bir hacme sahip olmak, karışık manyetik element bulundurmamak, tüm anahtarlarının yumuşak anahtarlama ile anahtarlanması, anahtarlama probleminin olmaması, düşük elektromanyetik emisyonuna sahip olması ve veriminin yüksek olması gibi avantajları bulunmaktadır.

[29]'da gerilim beslemeli Z-kaynak dönüştürücüden faydalanılarak gerilim çökme ve gerilim kabarması için fazlar arası bir sistemle gerilim düzenleyici elde edilmiştir. Darbe genişlik modülasyonunun kullanıldığı topolojide geniş bir düzeltme aralığı elde edilmiş, ani yükselme ve harmonik akımları düşürülmüş, pasif komponentlerin küçülmesi sağlanmış ve uygulanabilirliği geliştirilmiştir. İlave edilebilecek gerilim aralığı oldukça geniş olup, faz açısı da 0'dan 2π'ye kadar tüm değerler olabilmektedir. Geleneksel paralel/seri geri beslemeli düzenleyicilerle kıyasarsak Z-kaynak dönüştürücüler daha küçük endüktör ve kapasitör kullanmakta, ayrıca daha küçük anahtarlama gerilimi ve akım stresine çalışmaktadır. Makalede çalışma basit devre analizi, pasif komponent ve anahtarlama elemanları üzerindeki stresin geleneksel topolojilerle karşılaştırılması ve gerilim düzeltmesi yöntemi olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda önerilen tasarımın tek faz gerilim düşümlerinde %100'den fazla oranda, üç faz gerilim düşümlerinde ise %50'den fazla oranda regülasyon sağladığı görülmüştür.

[30]'da giriş endüktörü, çıkış süzgeci, küçük kapasiteli DA kapasitörü ve üç kollu güç dönüştürücüyü içeren otomatik gerilim düzenleyici üzerinde çalışılmıştır. Çalışılan topoloji gerilim çökme ve gerilim kabarmalarını düzeltebilmektedir. Bu tasarımın en önemli özelliği sadece bir koldaki anahtarlama elemanlarının yüksek frekansta anahtarlanması,

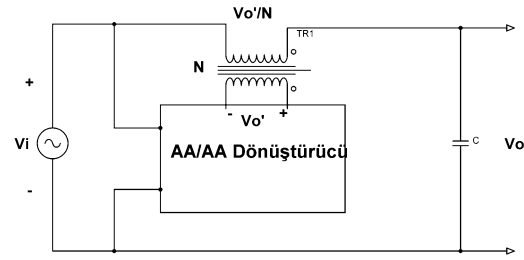
diğer iki koldaki anahtarlama elemanlarının düşük frekansta anahtarlanması ve böylece tasarımın anahtarlama kaybının düşük olmasıdır. Dahası kullanılan kapasitör de oldukça küçük olduğu için maliyeti düşük, uygulanabilirliği ve verimi oldukça yüksek bir düzenleyici elde edilmiştir.

Tüm bu topolojilerin karşılaştırılması Çizelge 1'de yapılmıştır.

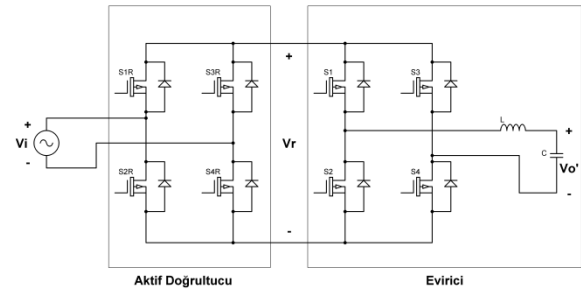
3. Faz Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonlu AA/AA Gerilim Düzenleyicinin Ayrıntılı İncelenmesi

3.1. Düzenleyicinin genel yapısı

Bu bölümde, önceki bölümde özetlenen [4] numaralı makaledeki çalışma ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada hızlı gerilim kontrolü sağlayan ve toplam harmoniğin düşürüldüğü faz kaydırmalı bir otomatik gerilim düzenleyici önerilmektedir. Önerilen düzenleyicinin genel yapısı Şekil 1'de, güç devresi ise Şekil 2'de verilmektedir. Bu düzenleyici iki yönlü AA/AA gerilim düzeltilmesi sağlayabilmekte ve seri kompanzasyon için transformatör kullanılmaktadır. Önerilen devre güç katsayısı düzeltme problemini sebep olmayan bir anahtarlama çalışmaktadır. Önerilen yöntem anahtarlama kayıplarının, toplam harmonik bozulmanın ve LC süzgeç boyutunun azalmasını sağlamakta ve böylece tek fazlı düzenleyicinin verimliliği artmaktadır. Bu bölümde, sözü edilen topolojinin analizi ve 20 kVA için benzetim ve test sonuçları yer almaktadır.



Şekil 1: Önerilen tasarımın genel yapısı



Şekil 2: Önerilen düzenleyici devresi

Şekil 1'deki devre için

$$V_o = V_i + \frac{V_o'}{N} \quad (1)$$

yazılabilir. Bu bağıntıdaki değişkenler aşağıda açıklanmaktadır:

V_i : Düzensiz giriş gerilimi

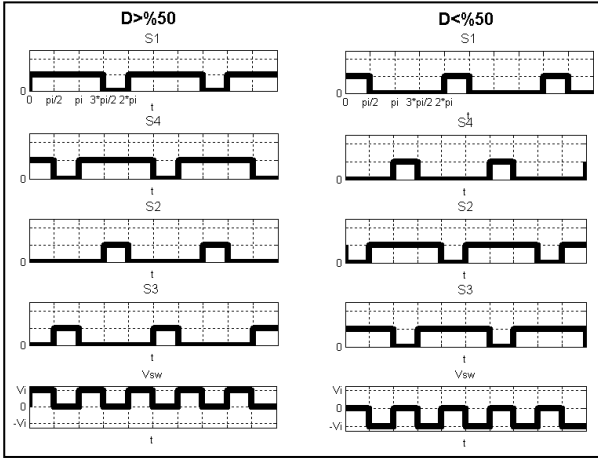
V_o : Düzenli çıkış gerilimi

V_o' : AA/AA düzenleyici çıkışı

N : Transformatörün sarım oranı

	Transfor- matör Var/Yok	Anahtarlama Elemanı Sayısı	Süzgeç Elemanları			Diğer Elemanlar	Alçaltma Yükseltme		Kontrol Karmaşıklık Derecesi	f_s (kHz)	Geliştirilen Dönüştürücü Metodu	Güç (kVa)	Anma Giriş Gerilimi (Vrms)
			C_f (μ f)	L_f (mH)	R_f (Ω)		↓	↑					
[1]	+	4 IGBT-4 Diyot	100	0,33	-	-	-	+	Düşük	-	Buck Dönüştürücü	-	208
[2]	+	8 IGBT-8 Diyot	20	1	-	$C_b=1 \mu F$	+	+	Düşük	15	AA/DA-DA/AA	10	220
[3]	+	4 IGBT-4 Diyot	30	0.1	-	$L_i=50 \mu H, C_i=10 \mu F$	-	+	Orta	10	-	5	230
[4]	+	8 IGBT-8 Diyot	10	1	-	-	+	+	Orta	20	AA/DA-DA/AA	10	110
[5]	+	2 MOSFET-2 Diyot	30	2	-	$C_{dc}=1200 \mu f$	+	+	Düşük	10	AA/DA-DA/AA	1	100
[6]	+	1 IGBT-4 Diyot-2 Tristör	-	20	-	$R_s=7 \Omega, C_s=20 \mu f$ $L_s=10 mH$	+	+	Yüksek	1.5	-	-	120
[7]	+	8 IGBT-8 Diyot-1 Triyak	10	-	-	$C_{p1,p2}=1 \mu f$	+	+	Düşük	20	AA/DA-DA/AA	5	220
[8]	+	8-12 IGBT-8-12 Diyot	11	8	0,1	-	+	+	Orta	4	Doğrudan 3 faz-1 faz	-	220
[9]	++	4 IGBT-4 Diyot	6	10,7	-	$C_{i1}=5 \mu f, C_{i2}=8 \mu f$ $C_{aux}=82 \eta F, R_{aux}=680 \Omega$ $L_{aux1}=23 \mu H, L_{aux2}=110,4 \mu H$	+	+	Yüksek	5	-	1	230
[10]	+	4 IGBT-4 Diyot	11	8	0,1	-	+	+	Orta	4	Doğrudan	-	220
[11]	++	4 IGBT-4 Diyot	35	3	0,85	-	+	+	Orta	4	Doğrudan	-	220
[12]	+	9-12 IGBT-9-12 Diyot	11	5	0,1	-	+	+	Yüksek	4	Doğrudan 3 faz-3 faz	-	110
[13]	-	4 IGBT-4 Diyot	100	3	-	$C_{i1,i2}=225 \mu F, C_s=40,000 \mu f$	+	+	Orta	3	-	1	115
[14]	-	4 MOSFET-16 Diyot	-	-	-	-	+	-	Orta	1	Matris	-	50
[15]	-	3 IGBT-6 Diyot	40	0,5	-	$C_f=1 \mu f$	+	-	Düşük	10	AA Kıyıcı	1.1	110
[16]	-	4 IGBT-4 Diyot	-	-	-	-	+	-	Yüksek	15.4	Matris-AA Kıyıcı	5	120
[17]	-	6 IGBT-6 Diyot	47	0,5	-	$L_i=0,5 mH$	+	+	Orta	5	AA/DA-DA/AA	1	100
[18]	-	6 IGBT-6 Diyot	40	1	-	$C_d=1200 \mu f$	+	+	Yüksek	20	AA/DA-DA/AA	1	112
[19]	-	2 IGBT-2 Diyot	-	-	-	-	-	+	Yüksek	2-15	-	-	-
[20]	-	8 IGBT-12 Diyot	18	1	-	$C_{1,2}=2200 \mu F, L_i=5 mH$	+	+	Orta	18	AA/DA-DA/AA	1	110
[21]	-	4 IGBT-2 Diyot	30	2	-	$C_b=1200 \mu f, Akü$	+	+	Düşük	11	Hat Etkileşimli KGK	1	110
[22]	-	2 IGBT-2 Diyot	30	2	-	$C_{dc}=1200 \mu f$	+	+	Orta	10	AA/DA-DA/AA	1	100
[23]	-	2 MOSFET-8 Diyot	15	1,5	-	$C_{1,2}=3,3 \mu F, L_{1,2}=0,8 mH$	+	+	Düşük	10	Z kaynak	3	220
[24]	-	4 MOSFET-4 Diyot	15	0,6	-	$L_{1,2}=500 \mu H, C_{1,2}=6 \mu F$	+	+	Düşük	20	Z kaynak	-	110
[25]	-	2 IGBT-4 Tristör	-	0,75	-	$C_{1,2}=4700 \mu f$	+	+	Düşük	20	Değişken DA Barası	2	200
[26]	-	2 IGBT-10 Diyot	-	-	-	C_1, C_2, L_1, L_2	+	+	Düşük	-	AA Kıyıcı	-	-
[27]	-	4 IGBT-4 Diyot	10	1,4	-	$L_{1,2}=1 mH, C_{1,2}=6,8 \mu f$	+	+	Orta	20	Z kaynak	-	84
[28]	-	8 MOSFET-4 Diyot	-	-	-	$L=100 \mu H, L_s=3,3 \mu H$	+	+	Yüksek	250	-	1	110
[29]	-	2 IGBT-8 Diyot	10	1	-	$C_{1,2}=10 \mu F, L_{1,2}=1 mH$	+	+	Orta	10	Z kaynak	-	120
[30]	-	6 IGBT-6 Diyot	20	0,4	-	$C_d=20 \mu f, L_d=0,4 mH$	+	+	Düşük	20	AA/DA-DA/AA	-	110

Çizelge 1: Düzenleyici topolojilerinin karşılaştırma çizelgesi

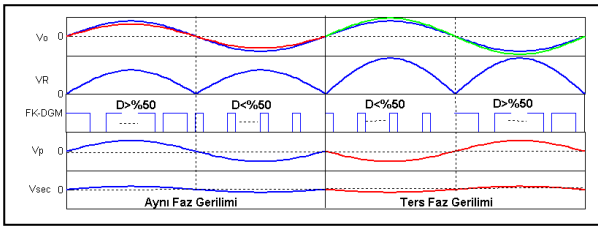


Şekil 3: Önerilen Anahtarlama Yöntemi

Şekil 3'te tasarım için önerilen faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi gösterilmiştir. Gerilim çökmesi gerçekleştiği durumda S1 ve S4 anahtarlarının doluluk oranı gerilim çökmesinin büyüklüğüne göre 0.5'in üzerinde olacak; gerilim kabarması gerçekleştiği durumda da yine kabarmanın büyüklüğüne göre S1 ve S4 anahtarları 0.5'in altında bir doluluk oranıyla anahtarlama yapacaktır. Böylece gerilim çökmesi durumunda şebeke gerilimiyle aynı fazda bir gerilim üretilerek şebeke gerilimine eklenir ve yüke nominal değerde bir gerilim sağlanır, gerilim kabarması durumunda da şebeke gerilimine ters fazda gerilim üretilerek şebeke gerilimine eklenir ve yine yüke nominal değerde gerilim sağlanmış olur. Anahtarlama şekil 3'te görüldüğü gibi S1 S2'nin tamamlayıcısı, S3 de S4'ün tamamlayıcısı olacak şekilde yapılır. Ayrıca S4, S1'in ve S3 de S2'nin 90 derece faz kaydırılmış halidir.

Anahtarlama doluluk değerleri Eş. (2)'den hesaplanabilir. Burada V_o düzenleyicinin çıkışında istenen gerilim, V_i şebeke gerilimi, D , S1 anahtarının pozitif çevrimdeki anahtarlama doluluk oranı ve n düzenleyici transformatörünün sarım oranıdır.

$$V_o = [V_i * (2 * D - 1)] / n \quad (2)$$



Şekil 4: Faz kaydırmalı düzenleyici devresi gerilim dalga şekilleri

Şekil 4'te mavi dalga şekli nominal çıkış gerilimini, kırmızı dalga şekli gerilim çökmesinin gerçekleştiği giriş gerilimini ve yeşil dalga şekli de gerilim kabarmasının gerçekleştiği giriş gerilimini göstermektedir. İkinci grafikte düzenleyicinin

doğrultucu çıkış gerilimi, üçüncü grafikte düzenleyicinin S1 anahtarı için anahtarlama sinyalleri, dördüncü grafikte düzenleyici transformatörünün primer gerilimi ve beşinci grafikte de düzenleyici transformatörünün sekonder gerilimi görülmektedir.

3.2. Tasarım

Bu çalışmada, düzeltme aralığı $\pm\%20$ olan, tek fazlı, 220 V, 20 kVA gücünde bir düzenleyici devre tasarımı öngörülmüştür. Akımın en büyük değeri giriş geriliminin en düşük değerinde olacağından, giriş akımının tepe akımının en yüksek değeri 160.6 A olarak hesaplanır. Yarıiletken üzerinde görülecek gerilimin en yüksek değeri de

$$V_s^{max} = V_{nom} \left(1 + \frac{\% \text{ düzeltme}}{100}\right) \quad (3)$$

bağıntısından 264 V-rms veya 374 V-p olarak elde edilir.

Deneyel çalışmada kullanılan elemanların değerleri Çizelge 2'de verilmektedir.

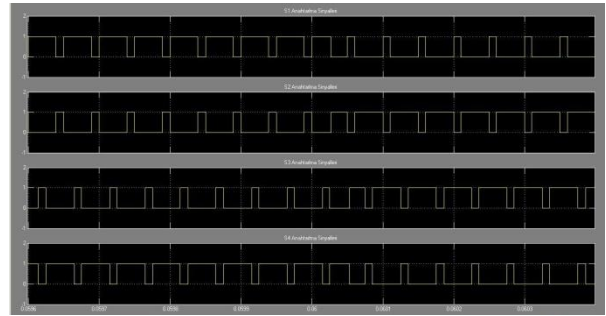
Çizelge 2. Deneyel Çalışmada Kullanılan Eleman Değerleri

Doğrultucu IGBT	2 × CM200DY-24A, 1200 V 200 A
Evirici IGBT	2 × CM200DY-24A, 1200 V 200 A
Çıkış Süzgeci	2 × 30 µF 470 V paralel kondansatör (çıkış faz ile nötr arasında)
Giriş Süzgeci	1 × 30 µF 470 V (giriş faz ile nötr arasında)
Bastırıcı (Snubber)	3 µF 1000 V DA kondansatör
Transformatör	Primer: 68 × 21 mm ² bakır Sekonder: 25 × 42 mm ² alüminyum

3.3. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde MATLAB/Simulink ortamında benzetimi gerçekleştirilen faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonlu düzenleyici devresinin $\%20$ ve $\%10$ 'luk gerilim çökme ve kabarması için elde edilen grafikler paylaşılmıştır.

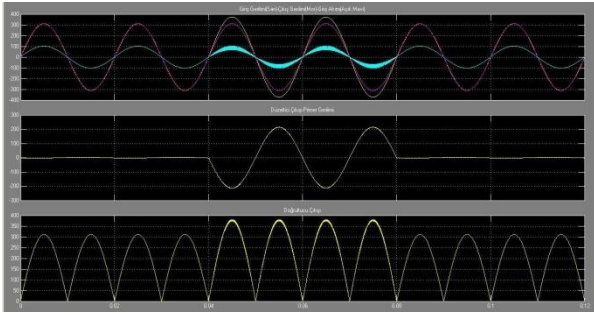
Şekil 5'te $\%20$ 'lik gerilim kabarması durumunda S1,S2,S3 ve S4 anahtarlarının pozitif ve negatif çevrimlerdeki anahtarlama doluluk oranları gösterilmektedir.



Şekil 5: $\%20$ 'lik gerilim kabarmasının evirici anahtarlama sinyalleri

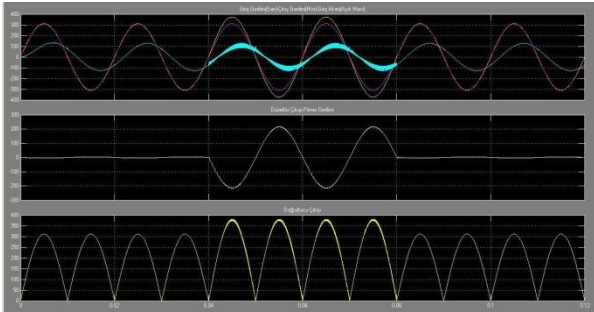
Şekil 6'da güç katsayısının bir olduğu durum için, ilk grafikteki sarı sinyal giriş gerilimini, mor sinyal çıkış

gerilimini ve mavi sinyal ise giriş akımını göstermektedir. İkinci grafikte düzenleyicinin çıkış gerilimi ve üçüncü grafikte de doğrultucu çıkış gerilimi görülmektedir.



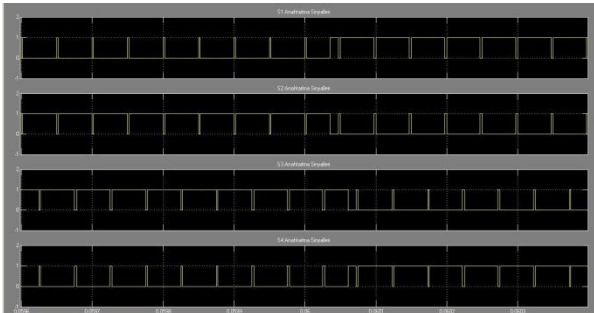
Şekil 6: %20'lik gerilim kabarmasının gerilim-akım sinyalleri(Güç katsayısı 1)

Şekil 7'de ise güç katsayısının 0.8 endüktif olması durumu için Şekil 6'da verilen grafikler tekrar ölçülmüştür.



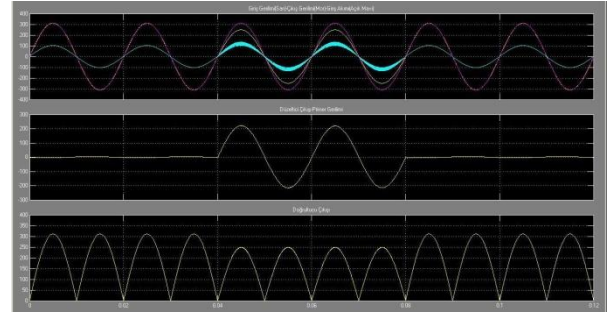
Şekil 7: %20'lik gerilim kabarmasının gerilim-akım sinyalleri (Güç katsayısı 0.8 endüktif)

Şekil 8'de %20'lik gerilim çökmesi durumunda S1,S2,S3 ve S4 anahtarlarının pozitif ve negatif çevrimlerdeki anahtarlama doluluk oranları gösterilmektedir



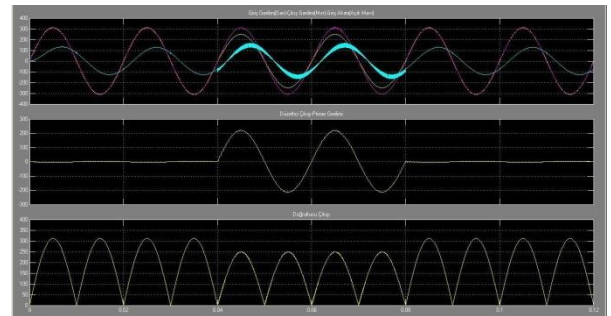
Şekil 8: %20'lik gerilim çökmesinin evirici anahtarlama sinyalleri

Şekil 9'da güç katsayısının bir olduğu durum için, ilk grafikteki sarı sinyal giriş gerilimini, mor sinyal çıkış gerilimini ve mavi sinyal ise giriş akımını göstermektedir. İkinci grafikte düzenleyicinin çıkış gerilimi ve üçüncü grafikte de doğrultucu çıkış gerilimi görülmektedir.



Şekil 9: %20'lik gerilim çökmesinin gerilim-akım sinyalleri (Güç katsayısı 1)

Şekil 10'da ise güç katsayısının 0.8 endüktif olması durumu için Şekil 9'da verilen grafikler tekrar ölçülmüştür.

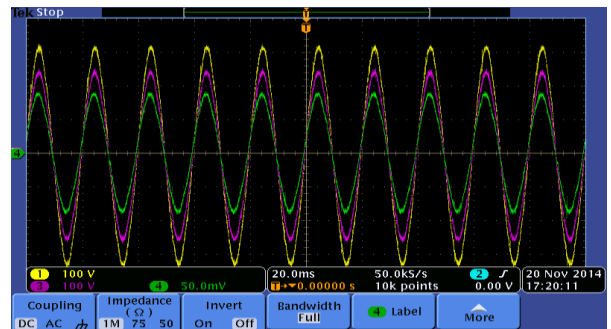


Şekil 10: %20'lik gerilim çökmesinin gerilim-akım sinyalleri (Güç katsayısı 0.8 endüktif)

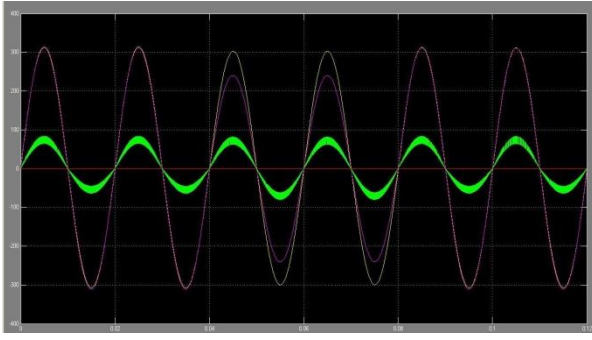
3.5. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar ve deneysel sonuçların Simulink programı aracılığıyla benzetimleri gerçekleştirilerek benzetim sonuçları paylaşılmıştır.

Şekil 11'de tam yük durumunda gerçekleşen %22'lik gerilim çökmesi durumu için test sonucu paylaşılmıştır. Grafikte sarı sinyal çıkış gerilimini, mor sinyal giriş gerilimini ve yeşil sinyal de giriş akımını göstermektedir. Şekil 12'de ise deneysel değerler kullanılarak gerçekleştirilen benzetim için sonuçlar görülmektedir.

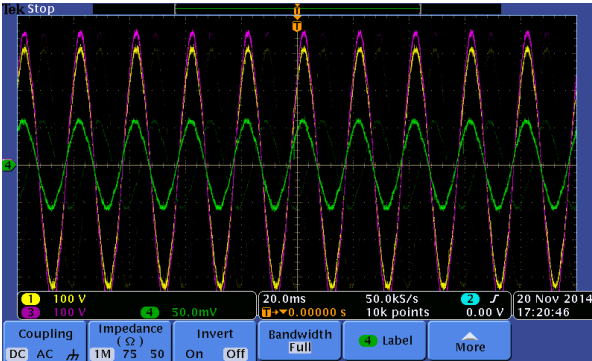


Şekil 11: %22'lik gerilim çökmesi tam yük grafikleri(Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

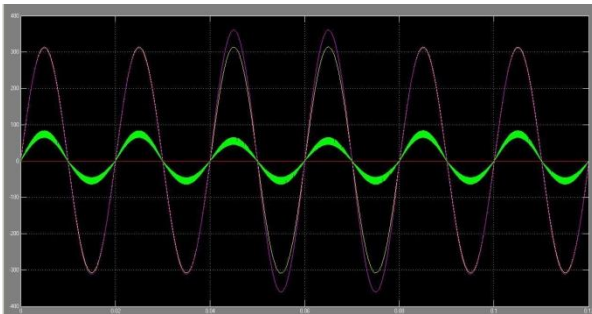


Şekil 12: %22'lik gerilim çökmesi tam yük grafikleri- Benzetim (Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

Şekil 13'de tam yük durumunda gerçekleşen %16'lık gerilim kabarması durumu için test sonucu paylaşılmıştır. Grafikte sarı sinyal çıkış gerilimini, mor sinyal giriş gerilimini ve yeşil sinyal de giriş akımını göstermektedir. Şekil 14'te ise deneysel değerler kullanılarak gerçekleştirilen benzetim için sonuçlar görülmektedir.



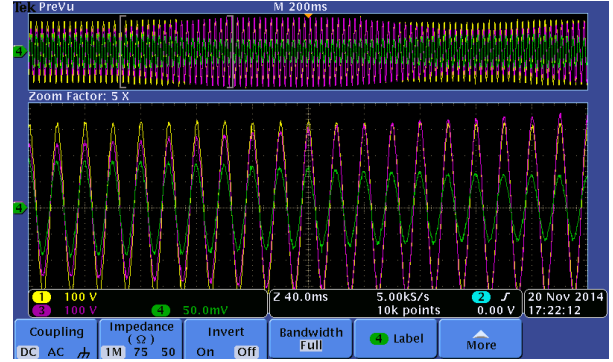
Şekil 13: %16'lık gerilim kabarması tam yük grafikleri(Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)



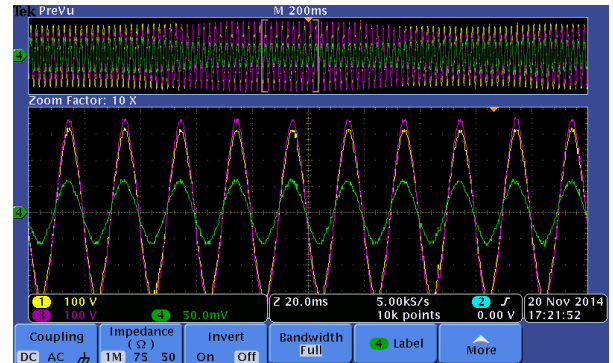
Şekil 14: %16'lık gerilim kabarması tam yük grafikleri- Benzetim (Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

Şekil 15, 16, ve 17'de sırasıyla gerilimin kabarması, gerilimin kararlı olarak yüksek olduğu ve gerilimin çökmeye başladığı süreçlerde düzenleyicinin tepkisi için deney sonuçları paylaşılmıştır. Grafiklerden de görülebileceği üzere düzenleyici çıkış gerilimini kararlı bir şekilde anma değerinde tutmaktadır.

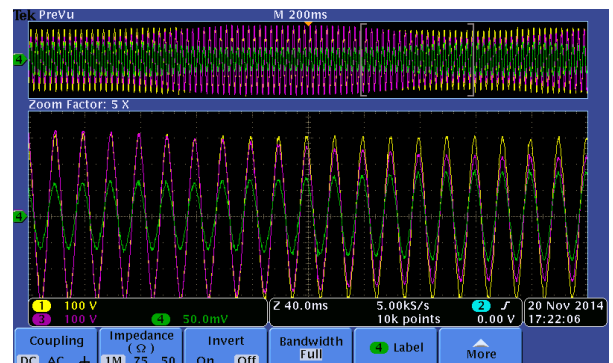
Şekil 18'de gerilim kabarması durumunda giriş akımı ve düzenleyici transformatörünün sekonderindeki gerilim bir arada görülmektedir. Şekil 19'da de bu durumun benzetimi yapılmıştır. Burada akım ile gerilim arasındaki faz kaymasının sebebi gerilim kabarması durumunda düzenleyicinin şebeke gerilimine ters fazda gerilim üretmesi ve böylece çıkış gerilimini nominal değere getirmesi sebebiyledir.



Şekil 15: Gerilim kabarması sırasında düzenleyicinin tepkisi- Tam yük (Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)



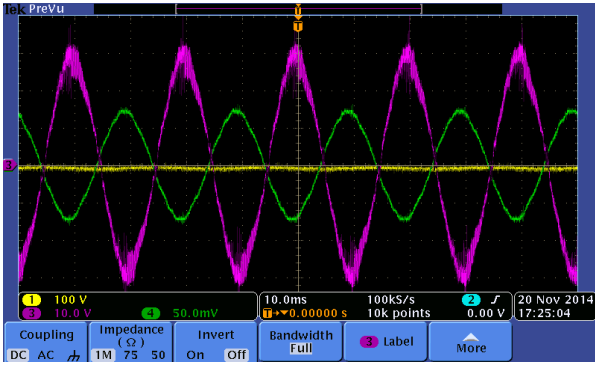
Şekil 16: Gerilimin yüksek olduğu süreçte düzenleyicinin tepkisi- Tam yük (Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)



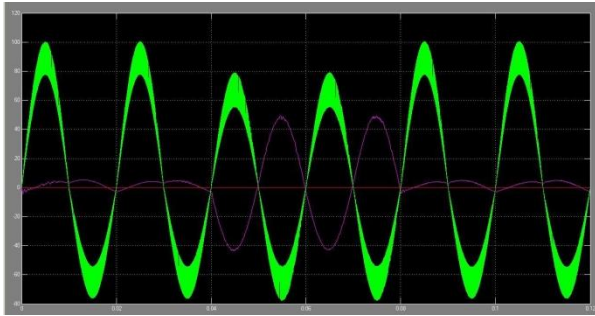
Şekil 17: Gerilim çökmesi sırasında düzenleyicinin tepkisi- Tam yük (Sarı: Çıkış gerilimi, Mor: Giriş gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

Şekil 18'de gerilim kabarması durumunda giriş akımı ve düzenleyici transformatörünün sekonderindeki gerilim bir

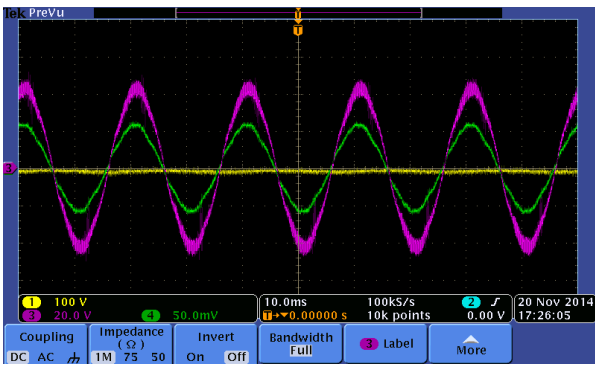
arada görülmektedir. Şekil 19’da ise bu durumun benzetimi yapılmıştır. Burada akım ile gerilim aynı fazdadır. Bunun sebebi de gerilim çökmesi durumunda düzenleyicinin giriş gerilimine eklemeye yaparak çıkış gerilimini anma değerine ulaştıracağı olmasıdır.



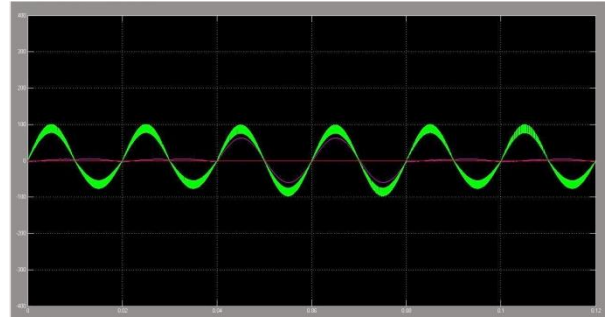
Şekil 18: Gerilim kabarması durumunda giriş akımı ile düzenleyici transformatörünün sekonder geriliminin grafikleri (Mor: Sekonder gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)



Şekil 19: Gerilim kabarması durumunda giriş akımı ile düzenleyici transformatörünün sekonder geriliminin grafikleri – Benzetim (Mor: Sekonder gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)



Şekil 20: Gerilim çökmesi durumunda giriş akımı ile düzenleyici transformatörünün sekonder geriliminin grafikleri (Mor: Sekonder gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

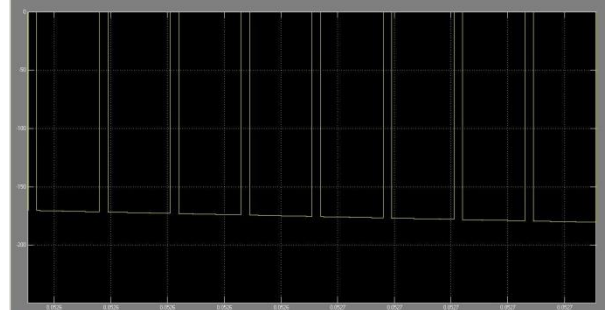


Şekil 21: Gerilim çökmesi durumunda giriş akımı ile düzenleyici transformatörünün sekonder geriliminin grafikleri – Benzetim (Mor: Sekonder gerilimi, Yeşil: Giriş akımı)

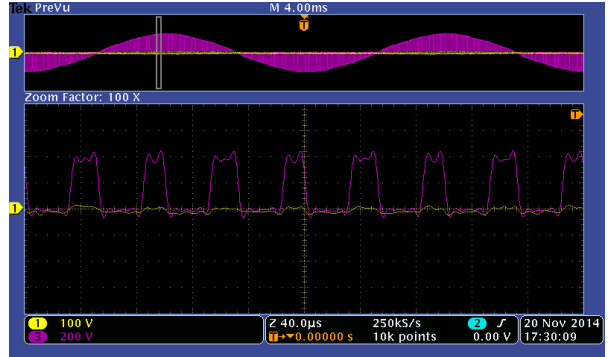
Şekil 22 ve 23’de gerilim çökmesi durumunda anahtarlanan gerilim sinyalleri ve Şekil 24 ve 25’te de gerilim kabarması durumunda anahtarlanan gerilim sinyalleri görülmektedir.



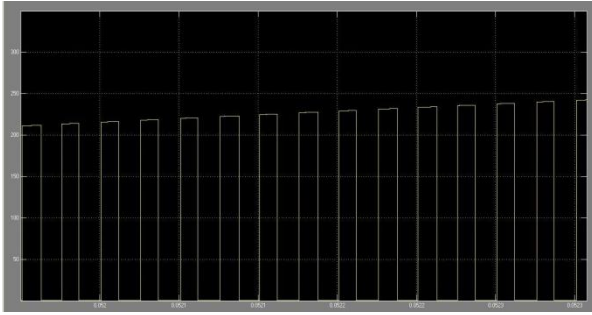
Şekil 22: Gerilim çökmesi durumu, tam yük, negatif çevrim DGM anahtarlaması



Şekil 23: Gerilim çökmesi durumu, tam yük, negatif çevrim DGM anahtarlaması- Benzetim

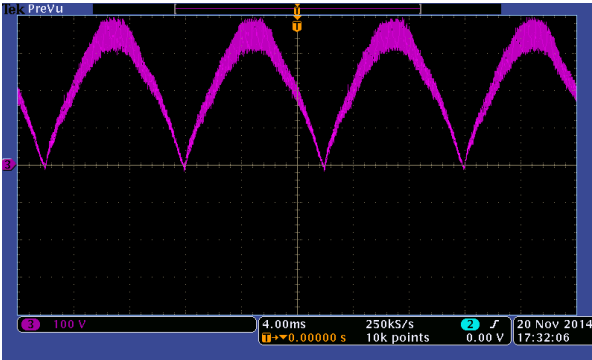


Şekil 24: Gerilim kabarması durumu, yarı yük, pozitif çevrim DGM anahtarlaması

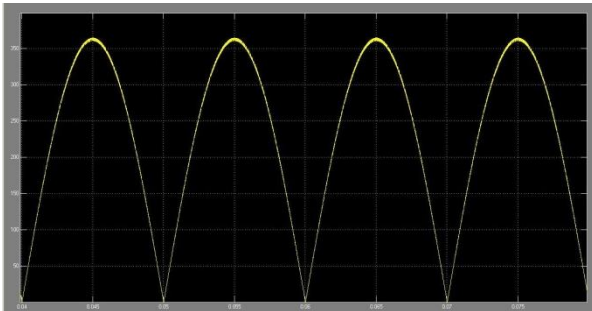


Şekil 25: Gerilim kabarması durumu, yarı yük, pozitif çevrim DGM anahtarlama-Benzetim

Son olarak şekil 26 ve 27’de ise gerilim kabarması durumunda, tam yükte düzeltinin doğrultucu çıkışında oluşan DA bara gerilimleri paylaşılmıştır.



Şekil 26: Gerilim kabarması durumu, tam yükte bara gerilimi



Şekil 27: Gerilim kabarması durumu, tam yükte bara gerilimi- Benzetim

3. Sonuç

Hassas cihazların sürekli arttığı günümüzde bu cihazların uzun ömürlü ve verimli olabilmesi için güç kalitesinin de önemi artmaktadır. Güç kalitesi problemlerinin başında gelen gerilim çökmesi ve gerilim kabarması için kullanılan geleneksel yöntemler artık yetersiz kalmaktadır. Geleneksel yöntemlerin yerini yarıiletken teknolojisinin kullanıldığı topolojiler almaktadır. Bu topolojilerin tasarımında da anahtarlama eleman sayısının düşük olması, anahtarlama elemanları üzerinde düşük stres oluşumu, boyutunun küçük olması, geniş düzenleme aralığı sağlaması, kontrol basitliği, filtreleme elemanlarının küçük olması, düşük harmonik, birim güç faktörü, hızlı tepki gibi özellikler aranmaktadır. Çalışmamızda bu topolojiler incelenmiş ve bir tabloyla özetlenmiştir. Sonrasında faz kaydırmalı, darbe genişlik modülasyonlu AA gerilim düzenleyicisi ayrıntılı olarak ele

alınmış, benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilerek sonuçları paylaşılmıştır. Burada ele alınan faz kaydırmalı topolojinin en önemli özelliği çıkış frekansının anahtarlama frekansının iki katı olarak gerçekleşmesi ve böylece daha az anahtarlama kaybıyla daha yüksek frekansta çıkış elde edilebilmesidir.

4. Kaynaklar

- [1] Hietpas, S.M.; Naden, M.; "Automatic voltage Regulator using an AC voltage-voltage converter," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.36, no.1, pp.33-38, Jan/Feb 2000.
- [2] Bong-Hwan Kwon, Gang-Youl Jeong, Sung-Hoon Han, Duk-Ho Lee, "Novel line conditioner with voltage up/down capability", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.49, Issue.5, pp.1110, 2002, ISSN: 02780046.
- [3] Aeloiza, E.C.; Enjeti, P.N.; Montero, O.C.; Moran, L.A.; "Analysis and design of a new voltage sag compensator for critical loads in electrical power distribution systems," Industry Applications Conference, 2002.37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, vol.2, no., pp.911-916 vol.2, 13-18 Oct. 2002.
- [4] Kuo-Kai Shyu; Ming-Ji Yang; Jing-Heng Hong; Bau-Hung Lin; "Automatic voltage regulator using a novel phase-shifted PWM single-phase inverter," Industrial Electronics Society, 2004.IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE, vol.2, no., pp. 1851- 1855 Vol. 2, 2-6 Nov. 2004.
- [5] Ming Tsung Tsai, "Design of a compact series-connected AC Voltage regulator with an improved control algorithm", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, page(s): 933 - 936 Volume: 51, Issue: 4, Aug. 2004.
- [6] Dong-Myung Lee, Habetler, T.G., Harley, R.G., Keister, T.L., Rostron, J.R., "A Voltage Sag Supporter Utilizing a PWM-Switched Autotransformer", Power Electronics, IEEE Transactions on, On page(s): 626 - 635 Volume: 22, Issue: 2, March 2007.
- [7] Çolak, I.; Ertike, S.; "A new type single phase switching voltage regulator," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, vol., no., pp.1778-1785, 12-16 Sept. 2010.
- [8] Babaei, E.; Kangarlu, M.F.; Sabahi, M.; "Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.25, no.4, pp.2676-2683, Oct. 2010.
- [9] Rodriguez, J.C.C.; Lopez, J.V.; Olay, C.C.; Fernandez, S.M.; Garcia, R.V.; Garcia, S.M., "Dual-Tap Chopping Stabilizer With Subcyclic AC Soft Switching", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue.9, pp.3060, 2010.
- [10] Babaei, E., Kangarlu, M. F." Operation and control of dynamic voltage restorer using single-phase direct converter", Energy Conversion and Management, Volume.52, Issue.8-9, pp.2965, 2011, ISSN: 01968904.
- [11] Kangarlu, M. F., Babaei, E.; "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, Volume.83, Issue.1, pp.80, 2012, ISSN: 03787796.
- [12] Babaei, E., Kangarlu, M.F.; "Voltage quality improvement by a dynamic voltage restorer based on a direct three-phase converter with fictitious DC link", IET Generation Transmission & Distribution, Volume.5, Issue.8, pp.814, 2011, ISSN: 17518687.

- [13] Chingchi Chen; Divan, D.M.; "Simple topologies for single phase AC line conditioning," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.30, no.2, pp.406-412, Mar/Apr 1994.
- [14] Zuckerberger, A.; Weinstock, D.; Alexandrovitz, A.; "Single-phase matrix converter," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol.144, no.4, pp.235-240, Jul 1997.
- [15] Ahmed, N.A.; Amei, K.; Sakui, M.; "A new configuration of single-phase symmetrical PWM AC chopper voltage controller," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.46, no.5, pp.942-952, Oct 1999.
- [16] Jang-Hyoun Youm; Bong-Hwan Kwon; "Switching technique for current-controlled AC-to-AC converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.46, no.2, pp.309-318, Apr 1999.
- [17] Han-Woong Park; Sung-Jun Park; Jin-Gil Park; Cheul-U Kim; "A novel high-performance voltage regulator for single-phase AC sources," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.48, no.3, pp.554-562, Jun 2001.
- [18] Chiang, S.J.; Yen, C.Y.; Chang, K.T.; "A multimodule parallelable series-connected PWM voltage regulator," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.48, no.3, pp.506-516, Jun 2001.
- [19] Jie Chang; Sun, T.; Anhua Wang; "Highly compact AC-AC converter achieving a high voltage transfer ratio," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.49, no.2, pp.345-352, Apr 2002.
- [20] Bor-Ren Lin; Yung-Chuan Lee; Der-Jan Chen; "Implementation of a single-phase AC/AC converter with neutral-point-clamped scheme," *Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on*, vol.2, no., pp. 780- 785 vol.2, 11-14 Dec. 2002.
- [21] Ming Tsung Tsai, Chia Hung Liu, "Design and implementation of a cost-effective quasi line-interactive UPS with novel topology", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 1002 - 1011 Volume: 18, Issue: 4, July 2003.
- [22] Tsai, M.T.; "Analysis and design of a cost-effective series connected AC voltage regulator," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol.151, no.1, pp. 107- 115, 9 Jan. 2004.
- [23] Xu Peng Fang; Zhao Ming Qian; Fang Zheng Peng; "Single-phase Z-source PWM AC-AC converters," *Power Electronics Letters, IEEE*, vol.3, no.4, pp. 121- 124, Dec. 2005.
- [24] Yu Tang; Chaohua Zhang; Shaojun Xie; "Z-Source AC-AC Converters Solving Commutation Problem," *Power Electronics Specialists Conference, 2007.PESC 2007.IEEE*, vol., no., pp.2672-2677, 17-21 June 2007.
- [25] Guochun Xiao, Zhiliang Hu, Lei Zhang, Beihai Chen, Zhaoan Wang, "An Active Voltage Quality Regulator with variable dc-bus voltage topology", *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, page(s): 932 - 937.
- [26] Flores-Arias, J.-M., Moreno-Munoz, A., Real-Calvo, R., Sanchez, J.R., "Transformerless power line voltage conditioner and regulator based on CA PWM Chopper", *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, page(s): 3304 - 3307.
- [27] Minh-Khai Nguyen; Young-Gook Jung; Young-Cheol Lim; "Single-Phase AC-AC Converter Based on Quasi-Z-Source Topology," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.25, no.8, pp.2200-2210, Aug. 2010.
- [28] Safaee, A., Yazdani, D., Bakhshai, A., Jain, P., "A bidirectional single-phase soft-switched AC-AC converter", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, On page(s): 1400 - 1404.
- [29] Qin Lei; Peng, F.Z.; "Four quadrant voltage sag/swell compensation with interphase quasi-Z-source AC-AC topology," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, vol., no., pp.2013-2019, 6-11 March 2011.
- [30] Wu, Jinn-Chang Jou, Hurng-Liahng Wu, Kuen-Der Jan, Shiue-Jung, "Three-Arm AC Automatic Voltage Regulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.58, Issue.2, pp.567, 2011, ISSN: 02780046*.