



DC Beslemeli Raylı Sistemlerde Cer Gücü için Doğrultucu Parametrelerinin Araştırılması

Mehmet Taciddin AKÇAY^{1*}, İlhan KOCAARSLAN²

¹ İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Daire Başkanlığı, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Istanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2020) 2 (1): 07-13
DOI: xxxxxx/xxxxxxx

YAYIN BİLGİSİ	ÖZET
Yayın geçmişi:	Şehiriçi raylı sistemlerde EN standartları ve iş güvenliği kısıtlamalarından dolayı DC gerilim tercih edilmektedir. Şehiriçi enerji şebekesinden elde edilen gerilim sinusoidal dalga şekline sahip olduğu için DC gerilim elektrifikasyon sisteminde bulunan doğrultucu sistemi ile elde edilmektedir. Enerji hattından gelen gerilim orta gerilim seviyesinde olduğu için istasyon trafo merkezlerinde kurulu transformatörler yardımıyla doğrultucu sisteminin ihtiyacı olan seviyeye dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Doğrultucu sisteminden elde edilen DC gerilim yardımıyla katener hattına gerekli olan enerji iletimi sağlanarak araçlara güç temin edilmektedir. Bu çalışmada DC beslemeli bir raylı sistem hattında kullanılan doğrultucu parametrelerinin cer gücü sistemine etkisi araştırılarak sistem analiz edilmiştir. Çalışma için 12 km uzunluğunda ve 10 istasyondan oluşan bir raylı sistem hattı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden karşılaştırma yapılarak doğrultucu sistemi için optimal tasarım esasları ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.
Gönderilen tarih: 11 Aralık 2019	
Kabul tarihi: 12 Mart 2020	
Yayımlanma tarihi 30 Nisan 2020	
Anahtar kelimeler:	
Analiz	ABSTRACT DC voltage is preferred in urban rail systems due to EN standards and occupational safety restrictions. Since the voltage obtained from the urban energy network has a sinusoidal waveform, the DC voltage is also obtained by the rectifier system in the electrification system. Since the voltage coming from the power line is at medium voltage level, the transformer is transformed to the level required by the rectifier system with the help of transformers installed in the substation substations. With the help of the DC voltage obtained from the rectifier system, the vehicles are supplied with the necessary energy transmission to the catenary line. In this study, the effect of rectifier parameters used in a DC feed rail system on traction power system was investigated and the system was analyzed. For the study, a rail system line with a length of 12 km and consisting of 10 stations was used. By comparing the results obtained, suggestions for optimal design principles for rectifier system were made.
Besleme	
Güç	
Parametre	
Raylı Sistem	
Analysis	
Feed	
Power	
Parameter	
Rail System	

1. Giriş

Şehiriçi demiryollarında insan faktörü gözönünde bulundurulduğu için genellikle DC gerilim seviyesine sahip voltajlar tercih edilmektedir. Gerilim seviyesinin düşük tutulmasından ötürü hattan çekilen akım daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Akım daha yüksek seviyelere çıktığı için istasyon trafo merkezlerinde bulunan ve hattan çekilen akımı taşıyan kesiciler daha büyük seçilmektedir. Raylı sistem hatlarında, güç sistemi kendi ring besleme yapısını buldurmakta olup 34.5 kV TEİAŞ orta gerilim değerini kullanmaktadır. Doğrultucu gerilim seviyesine uygun olan gerilimin dönüşümü transformatörler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Enerji iletim hattının ihtiyacı olan DC gerilim ise doğrultucular vasıtasıyla elde edilmektedir. Enerji verimliliği açısından DC gerilim elde edilirken üretilen gerilimin dalgalanma faktörünün minimum seviyede olması beklenir. Dalgalanma faktörünün kontrolü için doğrultucu sisteminde LC filtre kullanılmaktadır. Giriş akımlarının THD değerini azaltmak için bir ve üç fazlı sistemlerde güç faktörü düzeltme özelliği olan veya çok darbeli (12 veya 18 darbeli) doğrultucular kullanılmaktadır (Kaya, 2005). Güç elektroniği ekipmanlarıyla ilgili teknolojik gelişmeler DGA (darbe genişlik ayarlı) doğrultucularla ilgili çalışmaların artırılmasını sağlamıştır (Şehirli & Altınay, 2008). Güç elektroniği çeviricileri

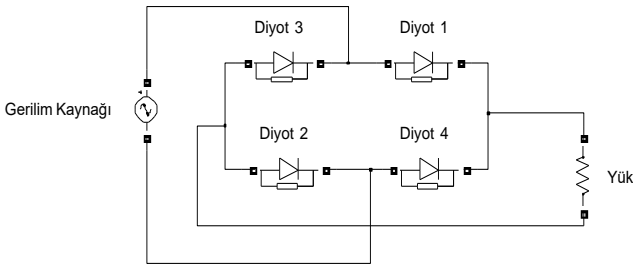
inde en çok tercih edilen dönüştürücü türü üç fazlı kontrollü doğrultucular olup bu tip doğrultucular birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Bakan vd., 2011). 6 darbeli kontrolsüz doğrultucular doğrusal olmayan yapısından ötürü güç faktörü problemlerine ve harmoniklere neden olmaktadır (Sefa & Altın, 2009). Tristör kontrollü doğrultucular aynı şekilde harmonik akımlarına neden olarak, şebeke üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır (Sefa & Altın, 2009), (Hava & Zubi, 2005). Doğrultucularda ilgili kısımda tercih edilen devrenin topolojisine göre giriş akım harmoniği azaltılabilmektedir (Hızarcıoğlu, 2005). DC tarafta harmonik azaltımı fazlar arası reaktör yardımıyla akım enjekte edilerek yapılabilmektedir (Lian vd., 2019).

Diodyot elemanlı doğrultuculu sistemlerde yüksek miktarda akım harmoniği üretilmektedir (Davari vd., 2015). 5., 7., 11. ve 13. harmonikler için harmoniklerin ortadan kaldırılması için paralel pasif filtre yönteminin kullanımı mümkün olabilmektedir (Dixon, 2018). 6 darbeli doğrultucularda harmonik akımlarının hesaplanması için en basit olarak fourier serisi yöntemi kullanılmaktadır (Gao vd., 2012). 6 darbeli doğrultucu dalgalanma faktörünü üç darbeli doğrultucuya göre önemli oranda azaltmaktadır (Naing, 2018). Pasif dönüştürücüler 12 darbeli doğrultucudaki gibi sinusoidal giriş akımına sahip orta ve yüksek güçlü uygulamalarda

*Sorumlu yazar.

E-mail adresi: taciddin.akcay@ibb.gov.tr (M. Taciddin AKÇAY)

kullanılmaktadır (Gong vd., 2003). Sabit frekanslı şebeke ağlarında yoğun olarak transformatör doğrultucu ünitesi kullanılmaktadır (Vitoi, 2018). Teknolojik gelişmelerle birlikte güç sistemleriyle ilgili çalışmalar daha verimli enerji dönüşümü için güç elektroniğine doğru yönelmektedir (Hernadi, 2008). 12 darbeli ve 6 darbeli doğrultucular düşük dalgalanma oranına sahip sistemlerden oluşmaktadır (Truong & Birchenough, 2004). Sivil uçakların elektrifikasyon sisteminde yoğun olarak 12 darbeli doğrultucular tercih edilmektedir (Setlak & Kowalik, 2017). IEEE 519-1992 standardına göre güç faktörünü düzelter ve harmonikleri azaltan ekipmanların elektrik sistemine bağlanması gerekmektedir (Freitas vd., 2005). Doğrultucu sistemi IGBT, mosfet, diyot gibi çeşitli güç elektroniği devre elemanlarından oluşmaktadır. Doğrultma işlemi diyotlar yardımıyla kontrolsüz ya da tristör ve diğer kontrol edilebilen yarı iletken devre elemanlarıyla kontrollü yapılarak alternatif akımın doğru akıma çevrilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Doğrultucular yarım dalga doğrultucular, tam dalga doğrultucular ve köprü tipi doğrultucular şeklinde çeşitlendirilmektedir. Şekil 1 ile tek fazlı köprü doğrultucuya ait devre şeması verilmektedir. Alternatif gerilim kaynağına dört adet diyotun bağlanmasıyla tam dalga doğrultma sağlanmaktadır.



Şekil 1. Tek Fazlı Köprü Dalga Doğrultucu

Doğrultucular endüstride AC gerilimi DC gerilime dönüştürmek için kullanılan güç elektroniği devreleridir. Bu dönüşüm için özellikle dalgalanma oranının, anahtarlama hızının yüksek, devre elemanlarının ısınmasının ise minimum olması beklenmektedir. DC demiryollarında ise üç fazlı tam dalga doğrultucu kullanılmaktadır. 3 fazlı gerilimin mevcut olduğu endüstriyel uygulamalarda, üç faz doğrultucular, tek faza oranla daha çok tercih edilen bir doğrultucu cinsidir. Bunun nedeni üç faz doğrultucuların çıkışta daha düşük gerilim salınımları vermesiyle daha yüksek güçler taşıyabilmesidir. Trafo merkezlerinde bulunan cer transformatörlerinde çift sekonder bulunduğu için aralarında 300 faz farkı olan iki farklı AC gerilim DC gerilime dönüştürülerek dalgalanma faktörünün minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır. (1) eşitliği ile doğrultucunun ortalama çıkış gerilimi V_{dc} hesaplanmaktadır. V_m ile maksimum gerilim ifade edilirken T periyodu simgelemektedir.

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{3} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

(1) eşitliği daha sade bir biçimde yazılmak istenirse (2) ile verilen denklem elde edilmektedir.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \quad (2)$$

I_{dc} ile ortalama çıkış akımı hesaplanırken, I_m ile maksimum akım belirtilmektedir.

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{3} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

(3) ile verilen ifade çözüldürse (4) ve (5) ile verilen eşitlikler elde edilmektedir.

$$I_{dc} = \frac{3\sqrt{3} I_m}{\pi} \quad (4)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (5)$$

Ortalama çıkış gücü ise P_{dc} ile bulunmaktadır. Bu denklem (6) ile gösterilmektedir.

$$P_{dc} = I_{dc} V_{dc} \quad (6)$$

$I_A(rms)$ ile akımın etkin değeri hesaplanmakta olup bu ifade (7) ile verilmektedir. K katsayısı akımın etkin periyodunu ifade etmektedir.

$$I_{A(rms)} = I_m \sqrt{k} \quad (7)$$

$P_A(rms)$ etkin gücü belirtmekte olup (8) eşitliği ile hesaplanmaktadır. V_f burada etkin gerilimi ifade etmektedir.

$$P_{A(rms)} = I_{A(rms)} V_{f(rms)} \quad (8)$$

Kaynaktan çekilen toplam etkin güç değeri $P_S(rms)$ değeri ise (9) ile bulunmaktadır.

$$P_{S(rms)} = 3 P_{A(rms)} \quad (9)$$

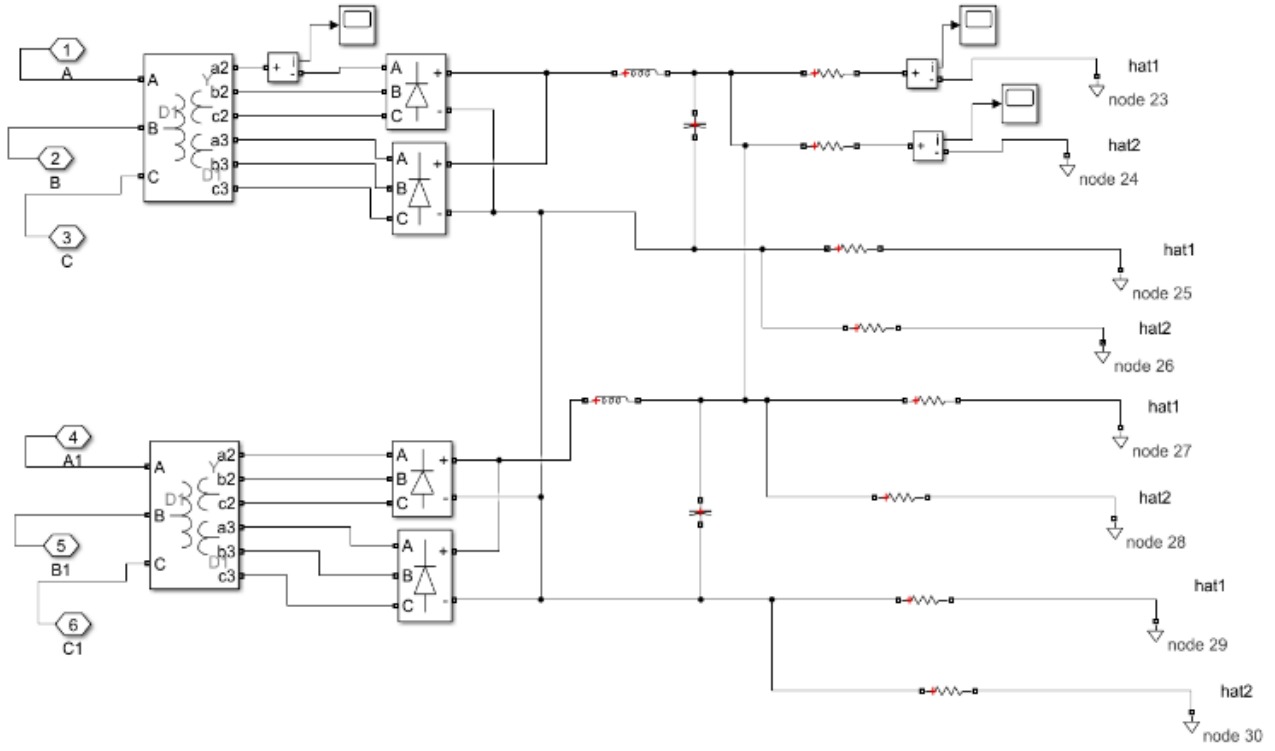
P_S gücü üç faza ait güç bilgisini ifade etmektedir. Cer transformatörün primer sargısı üçgen bağlanırken sekonder sargıları yıldız ve üçgen şeklinde bağlanmaktadır. Raylı sistemlerde elektrifikasyon sisteminde kurulu cer transformatörlerinin güçleri 2 MW ile 4 MW arasında değişmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada bir raylı sistem hattına ait veriler kullanılarak matlab/simulink ortamında benzetim yapılmıştır. Benzetimle doğrultucu parametrelerine bağlı olarak cer sistemi analiz edilmiştir. Raylı sistem hattına ait gerçek veriler kullanılarak sistem modellenmiştir. Raylı sistem elektrifikasyon parametreleri, araç özellikleri ve sinyalizasyon sistemine ait bilgiler sisteme tanımlanmıştır. Sistemin farklı parametre özelliklerine göre nasıl davranış sergilediği araştırılmıştır. Benzetim için 1500 V DC ile beslenen bir hat seçilerek bu gerilimin kullanılması durumu için sistem test edilmiştir.

2.1 AC/DC doğrultucu modeli

İstasyon trafo merkezlerinde bulunan doğrultucu sistemi ile AC gerilim DC gerilime dönüştürülmektedir. Bunun için 12 darbeli doğrultucu sistemi kullanılmaktadır. Aralarında 30 derece faz farkı bulunan üç fazlı iki gerilim doğrultucu vasıtasıyla DC gerilime dönüştürülerek dalgalanma oranı düşürülmektedir. Bunun neticesinde daha saf bir DC gerilim elde edilmektedir. Şekil 2 ile doğrultucu sistemine ait bağlantı şeması verilmektedir.

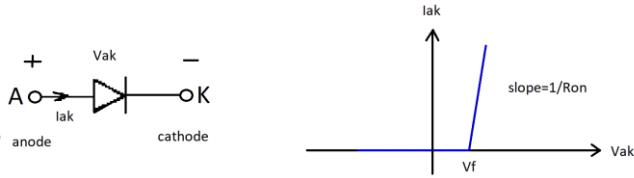


Şekil 2. Doğrultucu Sistemi

Bu tasarımla verilen sistemde iki adet cer transformatörü bulunmakta olup doğrultucu sistemlerinin çıkışları birbirine paralel olarak bağlanmaktadır. Doğrultucu sisteminin çıkışına DC gerilim dalgalanmasını azaltmak için LC filtre eklenmektedir. İstasyon trafo merkezlerinde bulunması gereken cer transformatörü sayısı cer gücü simülasyonu yapılarak belirlenmektedir.

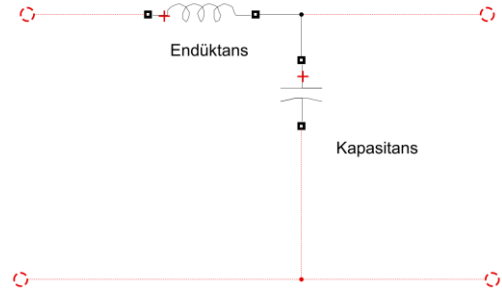
2.1.1 Analiz parameteleri

Doğrultucu sistemi altı adet güç anahtarından oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında anahtarlama elemanı olarak diyot belirlenmiştir. Doğrultucu devresinin performansı için uygun parametreler seçilerek sistem tasarlanmaktadır. Parametrelerin doğru seçilmesi ile uygun çıkış gerilimi elde edilerek sistemin verimi sağlanmaktadır. Doğrultucu sisteminin tasarımı için kullanılan parametreler; sönümlenme direnci, sönümlenme kapasitesi, diyot direnci, diyot endüktansı, ileri yönde besleme gerilimi ve diyot köprü kolu sayısıdır. Şekil 3 ile diyotun çalışmasına ait karakteristik eğrisi verilmektedir.



Şekil 3. Diyot Karakteristiği [Matlab]

Bu çalışmada 6 darbeli doğrultucu için diyot köprü kolu sayısı 3 seçilmiştir. LC filtreye ait olan parametreler endüktans ve kapasitans değerlerinden oluşmaktadır. Şekil 4 ile LC filtresine ait şekil gösterilmektedir.



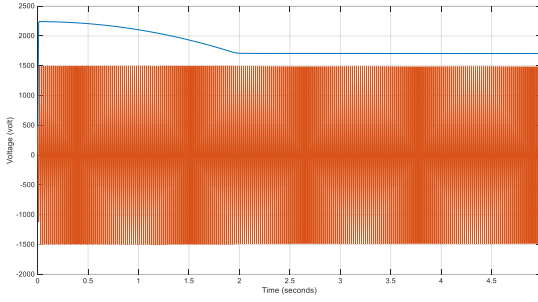
Şekil 4. LC Filtre

2.2 DC çıkış gerilimi

DC doğrultucu grubunun çıkışı katener gerilimini oluşturmaktadır. Doğrultucu sistemi tarafından üretilen bu gerilim aracın hareketi ve sistemin sürekliliği için gereklidir. DC gerilim seviyeleri hat özelliklerine bağlı olarak değişmekte olup bu çalışmada 1500 V DC besleme gerilimi için analizler yapılmıştır. (10) eşitliği ile araca ulaşan gerilim değeri hesaplanmakta olup V_{arac} araca ulaşan gerilimi ifade etmektedir. ΔV ile $V_{çıkış}$ ise gerilim düşümü ile doğrultucu çıkış gerilimini ifade etmektedir. Hatta ait besleme noktasının sayısı ve besleme sisteminin verimi arttıkça hatta oluşan gerilim düşümü ile hat kayıpları azalmaktadır (Kocaarslan vd., 2017).

$$V_{arac} = V_{çıkış} - \Delta V \quad (10)$$

Şekil 5 ile doğrultucu tarafından üretilen DC gerilime ve AC çıkış faz-faz gerilimine ait dalga şekli verilmektedir.



Şekil 5. Doğrultucu Giriş ve Çıkış Gerilimleri

1500 V DC sistemlerde doğrultucu girişinde bulunan AC gerilimin etkin değeri 1220 V AC olarak cer transformatöründen elde edilmektedir.

2.3 EN standartlarına ait kriterler

Doğrultucu tarafından üretilen DC çıkış gerilimi tasarım parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterirken elde edilen gerilimin belirli limitler içerisinde kalması hedeflenmektedir. Demiryollarında besleme gerilimleri ile ilgili sınırlar EN 50163 ile belirlenmiştir. Bu çalışmada DC gerilim ile ilgili olan kısım tablo 1'de gösterilmektedir. Araç işletmesinin verimi için besleme geriliminin bu limitlerin içerisinde kalması gerekmektedir (Kocaarslan vd., 2017).

Tablo 1. 1500 V DC Beslemeli Demiryolu için Belirlenen Limitler (TS EN 50163)

Elektrik Sistemi	En küçük Süreksiz Gerilim	En küçük Sürekli Gerilim	Nominal Gerilim	En büyük Sürekli Gerilim	En büyük Süreksiz Gerilim
1500 V DC	1000 V DC	1000 V DC	1500 V DC	1800 V DC	1950 V DC

Tablo 1'de görüldüğü gibi 1000 V'un altında ve 1800 V'un üstünde sürekli gerilimlerde sistemin çalıştırılmasına müsaade edilmemektedir. Doğrultucu sisteme ait tasarım kriterleri belirlenirken bu limitlere uygun olarak sistem testlerinin yapılması gerekmektedir.

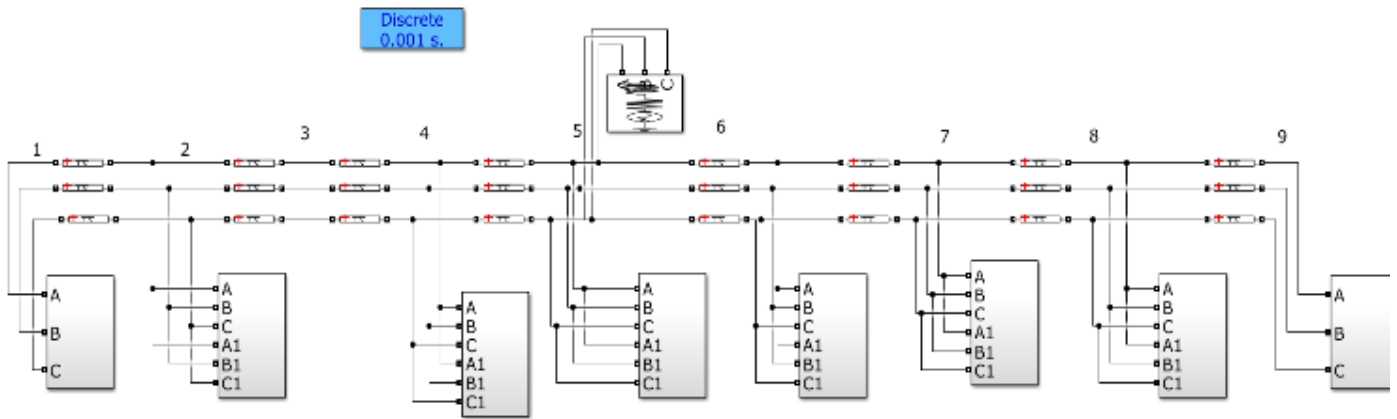
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma ile doğrultucu parametreleri bağlı olarak DC gerilimde meydana gelen değişim incelenmiştir. Benzetim için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. İlgili parametreler değiştirilerek sisteme olası etkileri araştırılmıştır. Tablo 2'de doğrultucu parametrelerine ait detaylı bilgi verilmektedir

Tablo 2. Doğrultucu Parametreleri

Doğrultucu parametreleri	değer
Sönümlenme Direnci (R_s)	1e5
Sönümlenme Kapasitesi (C_s)	250e-9
Diyot Direnci (R_d)	1e-3
Diyot Endüktansı (L_d)	0
İleri Yönde Besleme Gerilimi (V_f)	0
Diyot Kolu Sayısı	3
LC Filtre Endüktansı (L_f)	0.1e-3
LC Filtre Kapasitesi (C_f)	4e-2
Giriş Gerilimi	1220 V AC
Çıkış Gerilimi	1500 V DC
AC Cer Transformatörü Çevirme Oranı	28.27

Benzetim için belirlenen parametreler ile doğrultucu sistem tasarlanarak cer benzetimi çalıştırılmıştır. Benzetim için araç hareketlerinin oluşturduğu etkinin gözlemlenmesi için işletme koşullarına uygun olarak veriler kullanılmıştır. Şekil 6 ile benzetim ekranına ait görüntü verilmektedir.



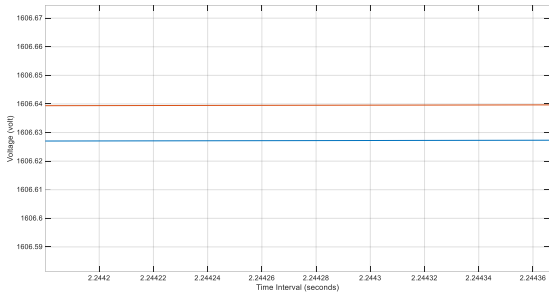
Şekil 6. Benzetim Ekranı

Benzetimi yapılan raylı sistem hattı 12 km uzunluğuna sahip olup 8 adet trafo merkezinden oluşmaktadır. Benzetim için orta gerilim hattı ayrıca konumlandırılmış olup hattın orta gerilim enerji besleme girişi dördüncü trafo merkezinin bulunduğu noktadan yapılmıştır.

Bu şekilde enerji akışının daha etkili ve verimli bir şekilde olması hedeflenmektedir.

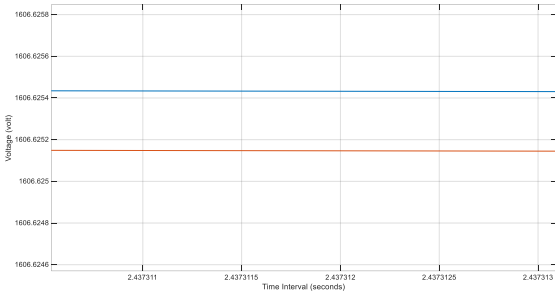
3.1 Sönümlenme parametrelerine bağlı benzetim sonuçları

Sönümlenme parametreleri sönümlenme direnci ve sönümlenme kapasitansından oluşmaktadır. Sönümlenme direnci farklı değerler alarak çıkış geriliminin değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 7 ile bu değişime ait grafik verilmektedir.



Şekil 7. Sönümlenme Direncine Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

Sönümlenme direnci arttıkça çıkış gerilimi azalma eğilimi göstermektedir. Mavi ile gösterilen değişim sönümlenme direncinin daha yüksek olduğu doğrultucu grubunu ifade ederken kırmızı ile gösterilen değişim daha düşük sönümlenme direncinin olduğu durumu temsil etmektedir. Şekil 8 ile sönümlenme kapasitansına bağlı olarak çıkış geriliminin değişimi gösterilmektedir.

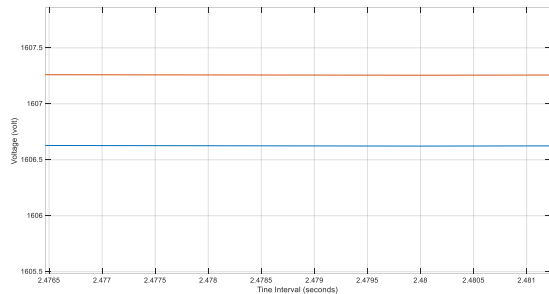


Şekil 8. Sönümlenme Kapasitansına Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

Sönümlenme kapasitansı artarken çıkış gerilimi azalmaktadır. Mavi ile gösterilen durum sönümlenme kapasitansının daha düşük olduğu durumu simgelemektedir.

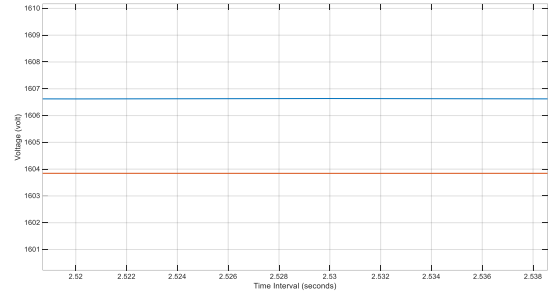
3.2 Filtre parametrelerine bağlı benzetim sonuçları

Doğrultucu sistemine bağlanan LC filtre elemanı çıkış gerilimini etkilemektedir. Filtre devresi seri endüktans ve paralel kapasitans elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 9 ile filtre endüktansının değişimine bağlı olarak çıkış geriliminin aldığı değerler gösterilmektedir.



Şekil 9. Filtre Endüktansına Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

Seri endüktans değeri azaldıkça doğrultucu çıkış gerilimi artma eğilimi göstermektedir. Mavi ile belirtilen veriler yüksek endüktansın olduğu devreye ait sonuçları göstermektedir. Şekil 10 ile filtre kapasitansının değişimine bağlı olarak çıkış geriliminin aldığı değerler elde edilmiştir.

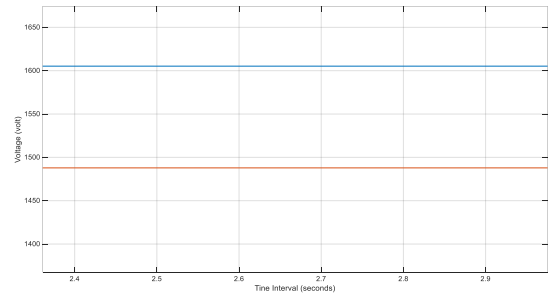


Şekil 10. Filtre Kapasitansına Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

Paralel kapasitans azaldıkça doğrultucu çıkış gerilimi azalmaktadır. Kırmızı ile gösterilen değerler kapasitansın daha düşük değer aldığı devreyi temsil etmektedir.

3.3 Doğrultucu giriş gerilimine bağlı benzetim sonuçları

Doğrultucu girişinde bulunan AC giriş gerilimi belirtilmektedir. 1500 V DC beslemeli elektrifikasyon sisteminin bulunduğu sistemler için 1220 V AC etkin değeri belirlenmiştir. Şekil 11'de doğrultucu giriş gerilimine bağlı olarak çıkış geriliminin değişimi gösterilmektedir.

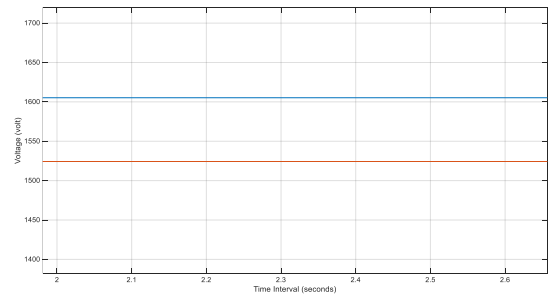


Şekil 11. Doğrultucu Giriş Gerilimine Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

AC giriş gerilimi azalırken DC çıkış gerilimi azalmakta olup AC girişteki 100 V değerindeki azalma DC çıkışta 118 V değerinde azalmaya neden olmaktadır. Mavi ile AC giriş geriliminin daha yüksek olduğu değerler gösterilmektedir.

3.4 AC cer transformatörü çevirme oranına bağlı benzetim sonuçları

Doğrultucu grubunun AC girişi cer transformatü ile elde edildiği için transformatör çevirme oranı çıkış gerilimini etkilemektedir. Şekil 12'de çevirme oranının çıkış gerilimine etkisi grafikte gösterilmektedir.



Şekil 12. Transformatör Çevirme Oranına Bağlı Çıkış Geriliminin Değişimi

Çevirme oranının artmasıyla primer kısmına giriş yapan 34.5 kV AC gerilimi sekonder kısımda daha düşük bir AC gerilime dönüştürülmektedir. Transformatör çevirme oranı arttıkça DC çıkış

gerilimi azalmaktadır. Kırmızı ile belirtilen değerler çevirme oranının daha yüksek olduğu devreyi ifade etmektedir.

3.5 Sonuçlara ait karşılaştırmalı durum

Elde edilen sonuçlara ait özet durum tablo 3 ile verilmektedir. İlgili parametrelerin davranış karakteristiğine göre cer gücüne etkisi bu tablo ile açıklanmıştır.

Tablo 3. Parametrelere Bağlı Olarak Değişen Koşullara Ait Özet Durum

Parametre	Cer Gücüne Etkisi
Sönümlenme Direnci (R_s)	Ters karakteristiktir
Sönümlenme Kapasitesi (C_s)	Ters karakteristiktir
LC Filtre Endüktansı (L_f)	Ters karakteristiktir
LC Filtre Kapasitansı (C_f)	Aynı karakteristiktir
Giriş Gerilimi	Aynı karakteristiktir
AC Cer Transformatörü	Ters karakteristiktir
Çevirme Oranı	

Cer gücü sistemine sönümlenme direnci, sönümlenme kapasitesi ve filtre endüktansı ve transformatör çevirme oranı ters karakteristikte etki sergilerken filtre kapasitansı ve doğrultucu giriş gerilimi aynı karakteristikte etki sergilemektedir. Önceki yapılan çalışmalarla karşılaştırmalar yapıldığında; Dursun, Varbak Nese, ve Kılıç (2020) tarafından yapılan çalışmada yeşil bina sertifikasyonunun raylı sistemler özelinde mevcut durum analiz edilerek enerji verimliliği kriterleri oluşturulmuştur. Gökdag ve Gülbudak (2020) tarafından yapılan çalışmada geliştirilen öngörücü modelle kaynak akımının toplam gerilim bozulma (THD) değeri azaltılarak sistemin verimi düşük akımları da kapsayacak şekilde artırılmıştır. Takır, Bayar ve Dursun (2019) tarafından yapılan çalışmada bir rüzgar santraline ait reaktif güç kapasitesi simüle edilerek verimlilik koşulları ortaya konulmuştur. Karafil ve Özbay (2019) tarafından yapılan çalışmada tek fazlı aktif doğrultucunun güç kontrolü yapılarak güç faktörü düzeltilimi yapılmıştır. Bu çalışmada ise DC doğrultucu parametreleri incelenerek DC iletim sisteminin verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma ayrıca DC parametrelerinde gerçekleştirilecek optimizasyon ile DC gerilimde % 10 değerinde bir iyileşme olduğunu ortaya koyarak önceki çalışmalara göre DC sistemde spesifik analizi içermektedir.

4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma ile DC beslemeli raylı sistemlerde doğrultucu parametrelerinin cer gücü sistemine etkisi araştırılarak sonuçlar üzerinden analiz yapılmıştır. Çalışma kapsamında 12 km, 10 istasyon ve 8 cer merkezine sahip bir raylı sistem hattına ait veriler kullanılmıştır. Doğrultucu sisteminin devresi ve özellikleri anlatılarak çıkış geriliminde etkisi olan parametreler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Sönümlenme direnci, sönümlenme kapasitesi, filtre endüktansı, transformatör çevirme oranı, filtre kapasitansı ve doğrultucu giriş gerilimi parametrelerinin etkileri analiz edilmiştir. Çıkış gerilimi analiz edilirken EN 50163 de belirtilen ve çalışmada ifade edilen limitlerin içerisinde kalınması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlarla DC beslemeli raylı sistemler için enerji verimliliğinin artırılması ve enerji tüketim değerlerinin optimizasyonu problemine çözüm sağlanmaktadır. Doğrultucu sistemi 12 darbeli doğrultucu grubundan oluşmakta olup cer gücü sistemi için kritik bir ekipmandır. Tasarım öncesinde bu parametrelerin efektif seçimi sistem için çok önemlidir.

Kaynaklar

Kaya, Z. (2005). Control applications for 12 pulse three phase uninterruptible power supply. MSc, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

Şehirli, E., Altınay, M. (2008). Simulation of Three-phase Voltage Source Pulse Width Modulation (PWM) Rectifier Based on Vector Control. Symposium of

Electric-Electronic-Computer Engineering (ELECO 2008), November 2008, Bursa, Turkey, 341-345.

Bakan, A. F., Zenginç, H., Girgin Ö. (2011). Çok Darbeli Doğrultucularda Çok Seviyeli Akım Enjeksiyonu ile Harmonik Eliminasyonu, EVK 2011, May 2011, Kocaeli, Turkey, 69-73.

Sefa, İ., Altın, N. (2009). 30 Pulse Rectifier Design For Grid Interfaces Of The Variable Speed Drives. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 24, 675-685.

Sefa, İ., Altın, N. (2006). An 18 Pulse Rectifier for Uninterruptible Power Supplies. Journal of Polytechnic, 2006, 9, 147-152.

Hava, A., M., Zubi, H. (2005). Üç Fazlı Doğrultucularda Güç Kalitesini Düzeltici Filtrelerin Başarımlarının Karşılaştırılması. 11. Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Ulusal Kongresi, Eylül, İstanbul, Turkey, 1-4.

Hızarcıoğlu, H. (2005) Harmonic analysis in three phase static uninterruptible power supply with IGBT rectifier. MSc, Halic University, Istanbul, Turkey.

Lian, Y., Yang, S., Ben, H., Yang, W. (2019). A 36-Pulse Diode Rectifier With An Unconventional Interphase Reactor. Energies, 12, 820-838.

Davari, P., Zare, F., Blaabjerg, F. (2015). A Smart Current Modulation Scheme For Harmonic Reduction In Three-Phase Motor Drive Applications. 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), September, Geneva, Switzerland, 1-10.

Dixon, J. (2018). Three-Phase Controlled Rectifiers. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. Chapter 12.

Gao, L., Tong, W., Meng, F. (2012). Analytical Model Of 12-Pulse AC-DC Converter Based On Switch Function. Applied Mechanics and Materials, 143, 223-227.

Naing, T., L. (2018). Analysis of 12-pulse Controlled Rectifier Performance and its Impacts on Power System, Mandalay Technological University, 1-8

Gong, G., Drogenik, U., Kolar, J.W. (2003). 12-Pulse Rectifier for More Electric Aircraft Applications. IEEE International Conference on Industrial Technology, December, Maribor, Slovenia, Slovenia, 1-6.

Vitoli, L., A. (2018). Analysis of 12 and 24-pulse diode rectifiers operating in aircraft systems with constant and variable frequency. MSc, University of Campinas, Campinas, R. da Reitoria, Brasil.

Hernadi, A., Taufik, Anwari, M. (2008). Modeling and Simulation of 6-Pulse and 12-Pulse Rectifiers under Balanced and Unbalanced Conditions with Impacts to Input Current Harmonics. Second Asia International Conference on Modelling & Simulation, May, Kuala Lumpur, Malaysia, 1034-1038.

Truong, L., V., Birchenough, A., G. (2004). Simulation and Analysis of Three-Phase Rectifiers for Aerospace Power Applications. Second International Energy

Conversion Engineering Conference, August, Providence, Rhode Island,1-15.

- Setlak, L., Kowalik, R. (2017). Comparative characteristics, analysis, mathematical model and simulation of selected energy-electronic converters of modern aircraft in line with the concept of a more electric aircraft MEA/ AEA. *International Journal of Energy*, 11, 7-18.
- Freitasi, L., C., G., Coelho, E., A., A., Parreira, E., F., Oliveira, M., A., G., Freitasi, L., C. (2005). Multipulse power rectifier without using multiphase transformers. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, November, Raleigh, NC, USA, 519-524.
- Kocaarslan, İ., Akçay, M., T., Akgündoğdu, A., Tiryaki, H. (2017). The comparison of the ANN and ANFIS methods for the prediction of voltage drop on an electric railway line. *Journal of Electrical & Electronics Engineering (IUJEEEE)*, 18, 26-35.
- Kocaarslan, İ., Akçay, M., T., Akgündoğdu, A., Tiryaki, H. (2017). The comparison of the ANN and SVM Methods for the Prediction of Voltage Drop on a Subway Line, *International Journal of Engineering Research and Advanced Development (IJERAD)* , 10, 57-65 .
- Dursun, E , Varbak Nese, S , Kılıç, B . (2020). Green building certification of urban public railways transport systems for sustainable cities. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* , 8 (1) , 7-15.
- Gökdağ, M , Gülbudak, O . (2020). Model Predictive Control of an Indirect Matrix Converter with Active Damping Capability". *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8, 31-39.
- Takır, O., Bayar, H., & Dursun, E. (2019). Integration of Wind Power Plants To The Grid And Reactive Power Support. *European Journal of Technique*, 9 (2), 186-196.
- Karafil, A , Özbay, H . (2019). Power Control of Single Phase Active Rectifier. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* , 7 (3) , 332-336 .