



PID based control of regenerative inverter for DC rail transit

Mahmut Çağrı Ceylan^{1*}, Janset Daşdemir¹, Ufuk Dursun², İlker Üstoğlu³

¹Control and Automation Engineering Department, Faculty of Electric-Electronic, Yıldız Technical University, 34220, İstanbul, Türkiye

²Ford Otosan, 34885, İstanbul, Türkiye

³Control and Automation Engineering Department, Faculty of Electric-Electronic, İstanbul Technical University, 34469, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- A new PID based control mechanism for dynamic changes of line voltage in DC rail transit
- A new operating strategy for the regenerative inverter
- Higher energy efficiency with reversible substation compared to classical DC rail transit

Keywords:

- Energy efficiency
- DC rail transit
- Regenerative inverter
- PID controller
- Vector control

Article Info:

Research Article

Received: 25.12.2021

Accepted: 27.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1045506

Correspondence:

Author: Mahmut Çağrı

Ceylan

e-mail:

m.cagriceylan@gmail.com

phone: +90 532 771 5740

Graphical/Tabular Abstract

In this paper, a new control mechanism has been proposed for grid-connected three-phase inverter that provides regenerative energy recuperation in direct current (DC) rail transit. In DC rail transit, line voltage can change dynamically depending on the regenerative energy generated by the trains during braking. In order to respond rapidly to dynamic changes in line voltage, a proportional-integral-derivative (PID) controller designed based on the dominant pole assignment method has been used in the control structure of the inverter. In addition, a new operating strategy that considers two different voltage values, unlike the systems that operate at constant voltage value in the literature, is proposed. Wiring diagram of the regenerative inverter unit architecture for DC rail transit substation is shown in Figure A.

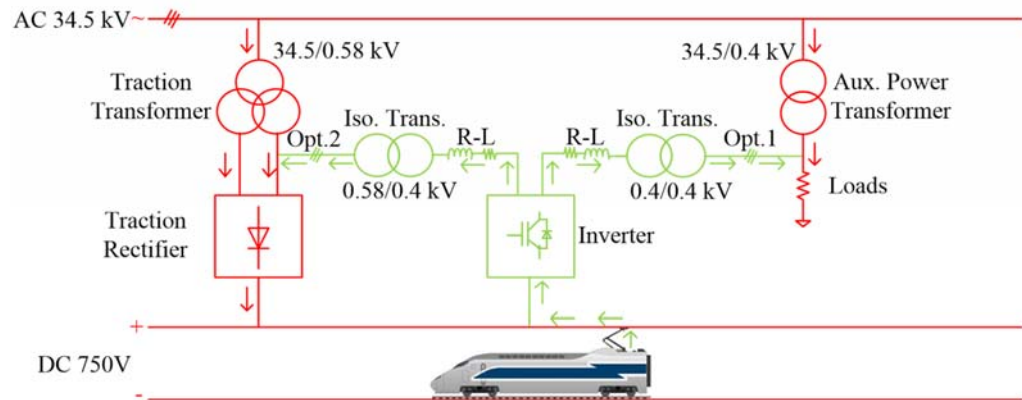


Figure A. The regenerative inverter unit architecture for DC rail transit substation

Purpose:

In order to obtain fast respond to dynamic changes in line voltage, a new PID-based control mechanism has been proposed. In addition, it is aimed to recover more regenerative energy with the proposed operating strategy.

Theory and Methods:

A PID controller has been designed based on the dominant pole assignment method considering the current loop. The proposed operating strategy that considers two different voltage values, unlike the systems that operate at constant voltage value in the literature, is proposed.

Results:

With the proposed control mechanism, the design accuracy has been increased. The derivative effect of the PID provides fast response to these changes in line voltage by increasing the speed of the system response and the slow dynamic response of PI-based control structure has been improved. This operating strategy provides more regenerative energy recovery by increasing the inverter operation region and contributes to energy efficiency.

Conclusion:

A detailed model of a real system has been developed in Matlab/Simulink environment. The simulation results comparing the performance of the PID-based control structure with the PI-based control has been presented to illustrate the feasibility and efficiency of the proposed method.



Doğru akım raylı ulaşım sistemleri için rejeneratif eviricinin PID tabanlı kontrolü

Mahmut Çağrı Ceylan^{1*}, Janset Daşdemir¹, Ufuk Dursun², İlker Üstoğlu³

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

²Ford Otosan, 34885, Sancaktepe, İstanbul, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- DA raylı ulaşım sisteminde hat gerilimi dinamik değişimleri için yeni bir PID tabanlı kontrol mekanizması
- Rejeneratif evirici için yeni bir çalışma stratejisi
- Klasik DA raylı ulaşım sistemine kıyasla çift yönlü trafo merkeziyle daha yüksek enerji verimliliği

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.12.2021

Kabul: 27.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1045506

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği
DA raylı ulaşım
Rejeneratif evirici
PID kontrolör
Vektör kontrol

ÖZ

Bu çalışmada, doğru akım (DA) raylı ulaşım sistemlerinde rejeneratif enerji kazanımını gerçekleştiren şebeke bağlantılı üç fazlı evirici birimine yönelik yeni bir kontrol mekanizması önerilmiştir. DA raylı ulaşım sistemlerinde trenlerin frenleme sırasında üretmiş olduğu rejeneratif enerjiye bağlı olarak hat gerilimi hızlı şekilde değişebilmektedir. Hat gerilimindeki bu değişimlere hızlı cevap vermek amacıyla evirici birimi kontrol yapısı içerisinde, baskın kutup atama yöntemine göre tasarlanan bir oransal-integral-türevsel (PID) kontrolör kullanılmıştır. Önerilen kontrol mekanizması ile akım çevrimi dikkate alınarak PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş böylece tasarım doğruluğu artırılmıştır. PID içerisinde yer alan türevsel etki ile sistem tepkisi hızlandırılarak hat gerilimindeki değişimlere daha hızlı cevap verilmesi sağlanmış ve PI tabanlı kontrol yapılarının yavaş dinamik tepkisi iyileştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki sabit gerilim değerinde çalışmasını gerçekleştiren sistemlerden farklı olarak iki farklı gerilim değerini dikkate alan yeni bir çalışma stratejisi önerilmiştir. Önerilen çalışma stratejisi ile evirici çalışma bölgesi artırılarak daha fazla rejeneratif enerji kazanımı gerçekleştirilmiş ve enerji verimliliğine katkı sağlanmıştır. Son olarak, Matlab/Simulink ortamında gerçek bir sistemin ayrıntılı modeli oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği ve etkinliğini göstermek amacıyla PID tabanlı kontrol yapısının performansını PI tabanlı kontrol ile karşılaştıran benzetim çalışmaları sunulmuştur.

PID based control of regenerative inverter for DC rail transit

HIGHLIGHTS

- A new PID based control mechanism for dynamic changes of line voltage in DC rail transit
- A new operating strategy for the regenerative inverter
- Higher energy efficiency with reversible substation compared to classical DC rail transit

Article Info

Research Article

Received: 25.12.2021

Accepted: 27.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1045506

Keywords:

Energy efficiency
DC rail transit
Regenerative inverter
PID controller
Vector control

ABSTRACT

In this paper, a new control mechanism has been proposed for grid-connected three-phase inverter that provides regenerative energy recuperation in direct current (DC) rail transit. In DC rail transit, line voltage can change dynamically depending on the regenerative energy generated by the trains during braking. In order to respond rapidly to dynamic changes in line voltage, a proportional-integral-derivative (PID) controller designed based on the dominant pole assignment method has been used in the control structure of the inverter. With the proposed control mechanism, the PID controller design has been performed considering the current loop. Thus, the design accuracy has been increased. The derivative effect of the PID provides fast response to these changes in line voltage by increasing the speed of the system response and the slow dynamic response of PI-based control structure has been improved. In addition, a new operating strategy that considers two different voltage values, unlike the systems that operate at constant voltage value in the literature, is proposed. This operating strategy provides more regenerative energy recovery by increasing the inverter operation region and contributes to energy efficiency. Finally, a detailed model of a real system has been developed in Matlab/Simulink environment. The simulation results comparing the performance of the PID-based control structure with the PI-based control has been presented to illustrate the feasibility and efficiency of the proposed method.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *m.cagriceylan@gmail.com, janset@yildiz.edu.tr, udursun1@ford.com.tr, ustoglu@itu.edu.tr / Tel: +90 532 771 5740

1. Giriş (Introduction)

Elektrik enerjisi kullanımına dayalı raylı ulaşım sistemlerinde faaliyet gösteren trenler frenleme anında rejeneratif enerji üretebilirler. DA raylı ulaşım sistemlerinde enerji akışı şebekeden hatta diyot doğrultucular üzerinden gerçekleştiği için üretilen rejeneratif enerji şebekeye geri aktarılamaz. Böylece rejeneratif enerji sadece hatta bulunan diğer trenler tarafından kullanılabilir fakat her zaman tam olarak sönmülmemez bu durumda hat geriliminde yükselmeler meydana gelir. Genellikle hat gerilimindeki yükselmeleri sınırlamak ve maksimum çalışma gerilim değeri altında tutmak için frenleme dirençleri kullanılır [1]. Frenleme dirençleri üretilen rejeneratif enerjinin büyük bir kısmının boşa harcanmasına neden olur. Böylece enerji verimliliği ciddi oranda düşer. Ayrıca bu enerjinin ısı enerjisi olarak havaya salınımı ile çevreye önemli ölçüde zarar verilmektedir [2]. Bu sebeplerden dolayı, rejeneratif enerjinin geri kazanımı ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar son dönemlerde oldukça önem kazanmıştır. Bu çalışmalar arasında otomatik sürüş sistemleri, depolama sistemleri ve doğrudan şebekeye aktarım yolu ile rejeneratif enerjinin kazanımı en yaygın olanlarıdır [3]. Otomatik sürüş sistemlerinde, optimum sürüş planlamaları yaklaşımı ile bir tren tarafından üretilen rejeneratif enerjinin diğer trenler tarafından doğrudan kullanımı amaçlanır [4]. Bu yöntem ile toplam tüketilen enerjinin %14'e kadar bir oranda azaltılabileceği gösterilmiştir [5]. Fakat işletmeden kaynaklı sürüş planlamalarının değişmesi veya aksaması gibi sebeplerden dolayı bu kazanım her zaman sağlanamamaktadır. Bu durumlarda üretilen rejeneratif enerji tamamen kazanılamamakta böylece enerji verimliliğinin artışına katkı sunulamamaktadır.

Rejeneratif enerjinin batarya, süper kapasite bankaları veya motor volanı gibi enerji depolama sistemlerinde depolanarak kazanımı bir diğer uygulama yöntemidir. Enerji depolama sistemleri araç üzerinde veya istasyonlarda kullanılmak üzere iki farklı yolla uygulanabilir [3]. Bu sistemler yüksek güç ve enerji yoğunluğu gibi avantajlarına rağmen özellikle maliyetleri, düzenli bakım ihtiyaçları ve atık batarya hücrelerinin oluşturduğu çevresel zararlar gibi önemli dezavantajlara sahiptir.

Rejeneratif enerjinin doğrudan şebekeye aktararak kazanımı yaygın olarak uygulanan yöntemlerinden bir diğeridir. Bu yöntemde, üretilen rejeneratif enerjinin kazanımı, trafo merkezlerinde yer alan diyot doğrultuculara paralel bağlı DA hattından şebekeye enerji akışını sağlayan şebeke bağlantılı üç fazlı bir evirici birimi veya aktif diyot doğrultucular kullanılarak gerçekleştirilir [6]. Literatürde bu trafo merkezleri, çift yönlü trafo merkezleri (reversible substation) olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntem ile herhangi bir depolama sistemine gerek duymadan rejeneratif enerjinin doğrudan şebekeye aktarımı ile anlık kullanımı sağlanır. Ayrıca eviricilerin gelişen yarı iletken teknolojisi ile birlikte maliyetleri depolama sistemlerine göre oldukça düşüktür [7]. Bu yöntem, rejeneratif enerjinin işletmeye bağlı kalmaksızın geri kazanımı açısından otomatik sürüş sistemlerine göre ve sahip olduğu düşük maliyeti açısından depolama sistemlerine göre belirgin avantajlara sahiptir. Rejeneratif enerji kazanımı ve enerji verimliliğini artırmak için yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı bu çalışmada rejeneratif enerjinin doğrudan şebekeye aktararak kazanımı esas alınmış ve 750V DA raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan gerçek bir şebeke bağlantılı üç fazlı evirici birimi kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Kontrol yöntemi olarak vektör kontrol algoritmasına dayalı kaskat kontrol yapısı esas alınmıştır. Vektör kontrol metodu ile karmaşık yapıda olan üç fazlı sistem modelleri dq0 eksen takımında birbirinden bağımsız değişkenler ile ifade edilebilmektedir. Dinamik cevap verme yeteneği ve tasarım kolaylığından dolayı PID kontrolör ailesine dayalı

kaskat kontrol yapıları, yüksek anahtarlama frekansları sebebiyle hızlı kontrol çevrimlerine sahip güç dönüştürücüleri ve eviricilerde yaygın şekilde kullanılan kontrol yöntemi olarak literatürde önemli bir yere sahiptir. Kent içi DA raylı ulaşım sistemleri için geliştirilen çalışmada rejeneratif enerji kazanım sistemi DA bara gerilimi kararlılığı ve yüksek güç faktörü için PI kontrolöre dayalı kaskat kontrol yapısı kullanılmıştır [7]. Diğer bir çalışmada, üç fazlı gerilim kaynaklı güç dönüştürücüsü matematiksel modelleri elde edilmiş ve dq0 eksen takımına bağlı akım ve gerilim çevrimleri için PI kontrolörlerinden yararlanılmıştır [8]. Şebeke bağlantılı üç fazlı eviricilerde şebeke akımı içerisindeki harmoniklerin kontrol çevrimine olan etkisini azaltmak için kompanzasyon terimleri üzerine önerilen çalışmada ise dq0 eksen takımına bağlı kaskat PI kontrolörler kullanılmıştır [9]. Benzer şekilde kaskat PI kontrolörlere dayalı yeni bir kontrol yapısı öneren çalışmada DA raylı ulaşım sisteminde hattaki gerilim düşümü dikkate alınarak referans gerilimi üretilmiştir [10]. İdeal olmayan şebeke gerilim şartlarında şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklı eviricilerin kontrolü için kullanılan başka bir çalışmada ise PI tabanlı ikili akım kontrolörün yavaş dinamik tepkisi, kararlı hal hataları ve kompleks yapısı gibi dezavantajlarının giderilmesi için oransal-kompleks-integral (PCI) tabanlı akım kontrolcüsü önerilmiştir [11]. Bu çalışmada, evirici birimi kaskat kontrol yapısı gerilim çevrimi içerisinde literatürde yaygın olarak kullanılan PI kontrolör yerine PID kontrolör kullanılmıştır. PID içerisinde yer alan türevsel etki ile sistem tepkisi hızlandırılmış böylelikle hat gerilimindeki değişimlere hızlı cevap verilmesi sağlanmıştır. Böylece PI tabanlı kontrol yapılarının yavaş dinamik tepkisi iyileştirilmiştir. Literatürde eviricilerin kontrolünde kullanılan kaskat kontrol yapılarında dış gerilim çevrimi kontrolör tasarımı esnasında genellikle iç akım çevrimi ihmal edilerek ideal kabul edilir. Bu çalışmada akım çevrimi ihmal edilmeyerek tasarım içerisinde dâhil edilmiş ve tasarım doğruluğu artırılmıştır. Akım çevriminin dâhil edilmesi ile PID kontrolör tasarımı için yüksek dereceli bir sistem modeli elde edilmiştir. PID kontrolör elde edilen yüksek dereceli sisteme uygun baskın kutup atama yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntem ile bilinmeyenlerin serbest parametre cinsinden elde edildiği kutup atama problemine sembolik bir çözüm bulmak mümkündür. Böylece kutupların yerleri serbest parametre kullanılarak belirlenmiş olur ve sistem kontrol katsayıları elde edilir. Ayrıca literatürdeki DA raylı ulaşım sistemlerinde rejeneratif enerji kazanımı üzerine olan çalışmalarda çoğunlukla sabit bir gerilim değerine bağlı çalışma stratejileri yer almaktadır [7] ve [12]. Bu çalışmada, sabit gerilim değerinde çalışmasını gerçekleştiren sistemlerden farklı olarak devreye girme ve devreden çıkma olmak üzere iki farklı gerilim değerini dikkate alan yeni bir çalışma stratejisi önerilmiştir. Böylece, evirici çalışma bölgesi artırılmış ve daha fazla rejeneratif enerji kazanımı ile enerji verimliliğine katkı sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde 750V DA raylı ulaşım sistemi ve şebeke bağlantılı üç fazlı evirici birimi topolojisi hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen çalışma stratejisi detaylı olarak ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, evirici birimi üç faz devresi üzerinden dq0 eksen takımına ait matematiksel modeller çıkarılarak gerilim ve akım çevrimlerine ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir. PID kontrolör tasarımı için yüksek dereceli sistemlere uygun baskın kutup atama yöntemi detaylandırılmış, akım ve gerilim çevrimi için elde edilen transfer fonksiyonları üzerinden kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümde, gerçek bir sisteme ait detaylı model Matlab/Simulink ortamında oluşturularak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Altıncı bölümde ise çalışmaya ait genel sonuçlara yer verilmiştir.

2. Sistem Mimarisi (System Architecture)

DA raylı ulaşım sistemleri dağıtılmış trafo merkezleri üzerinden beslenir. Trafo merkezleri, trenlerin güç ihtiyacını karşılayan cer

trafoları, istasyonlardaki yüklerin güç ihtiyacını karşılayan yardımcı güç trafoaları, diyot doğrultucular, devre kesicisi, sigorta ve izolatörler gibi koruma elemanlarından meydana gelmektedir [3]. EN 50163 standardında DA raylı ulaşım sistemleri gerilim seviyeleri 600V, 750V, 1.5kV ve 3kV olarak ve 750V sistemlerde sürekli çalışma gerilimi alt sınırı 500V, üst sınırı 900V olarak belirlenmiştir [13]. Bu gerilim seviyeleri genel güç tüketimi ve istasyonlar arası mesafeler hesaba katılarak belirlenmiştir. 750V DA raylı ulaşım sistemlerinde çift çıkış sargısına sahip cer trafosu ile AA 34.5kV giriş gerilimi düşürülerek iki adet 580V AA gerilim elde edilir. Elde edilen 580V AA gerilim çıkış sargıları diyot doğrultucular üzerinden DA gerilime dönüştürülür böylece hat gerilimi elde edilir. Ayrıca trafo merkezlerinde istasyonlarda bulunan aydınlatma, fan ve asansör gibi iç ihtiyaç yüklerinin güç ihtiyacını karşılamak üzere 400V AA çıkış gerilimi üreten yardımcı güç trafoaları bulunmaktadır.

Kontrolü gerçekleştirilen şebeke bağlantılı üç fazlı evirici, çıkışında yer alan bir bağlantı trafosu üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Elektriksel izolasyonu olan bağlantı trafosu ile sistem koruyuculuğu artırılmıştır. Bağlantı trafosu ile evirici çıkış gerilimi ayarlanarak farklı gerilim değerlerindeki cer veya yardımcı güç trafolarından herhangi birine bağlantı gerçekleştirilebilir. Şekil 1’de her iki bağlantı seçeneğini gösteren 750V DA raylı ulaşım sistemi trafo merkezinde kullanılan üç fazlı evirici birimi bağlantı şeması verilmiştir.

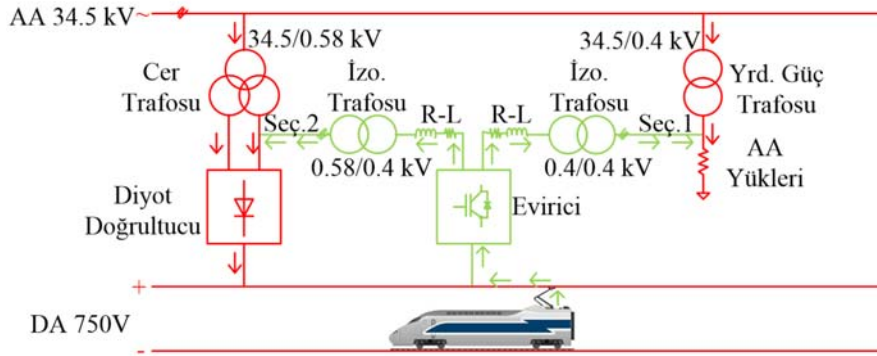
2.1. Evirici Birimi (The Inverter Unit)

Evirici birimi, izole kapılı bipolar transistör (IGBT) tabanlı anahtarlama elemanlarına dayalı gerilim kaynaklı iki seviyeli üç fazlı evirici, DA bara kondansatörü (C), R-L çıkış filtre yapısı ve izolasyon trafosundan meydana gelir. Şekil 2’de üç fazlı devre modeli üzerinden evirici birimi topolojisi gösterilmiştir. Yüksek frekansta anahtarlama

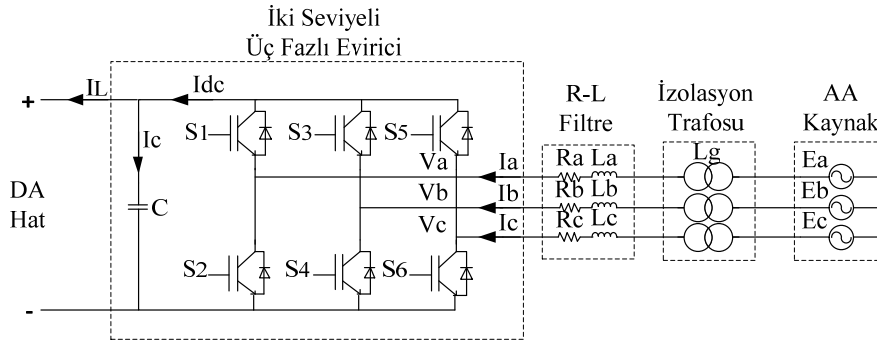
çalışmalarından dolayı güç dönüştürücüleri ve eviricileri çıkışlarında yüksek frekanslı harmoniklere sahip akımlar oluştururlar. Bu çalışmada, evirici birimi çıkışında oluşan harmonikleri gidermek amacıyla R-L filtre kullanılmıştır. Filtre elemanları güç gereksinimi, anahtarlama frekansı ve DA ile AA gerilim değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Benzer şekilde DA bara kondansatörü, hat gerilimindeki değişimleri takip edebilmesi için yeterince küçük, öte yandan hat gerilimindeki anlık gerilim düşümlerini sınırlayabilmek için yeterince büyük değerde olacak şekilde belirlenmiştir [7]. Şekil 2’de sırasıyla I_{dc} DA hat akımını, a, b, c fazlarına ait V_a, V_b, V_c evirici çıkış gerilimlerini, I_a, I_b, I_c faz akımlarını, E_a, E_b, E_c şebeke faz gerilimlerini R-L çıkış filtresi direnç ile endüktansını ve L_g izolasyon trafosu endüktansını temsil etmektedir.

3. Evirici Birimi Çalışma Stratejisi (The Inverter Unit Operation Strategy)

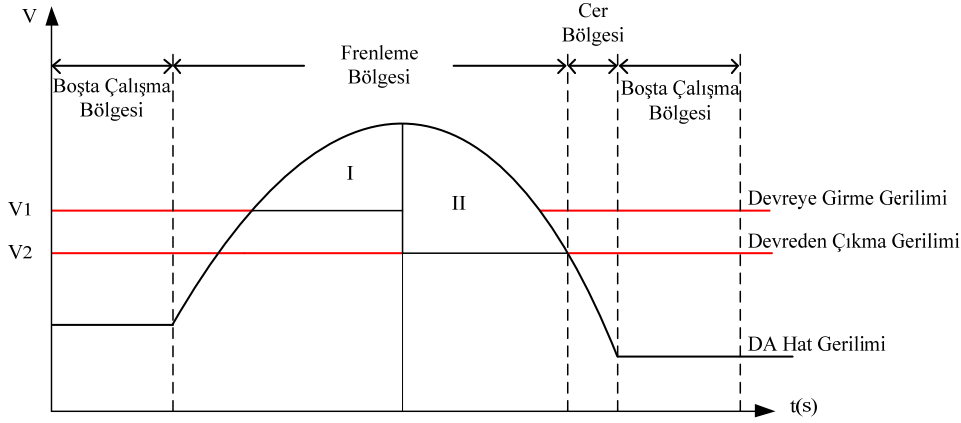
DA raylı ulaşım sistemlerinde trenler cer, boşa ve frenleme olmak üzere üç farklı bölgede çalışmalarını gerçekleştirirler [14]. Cer bölgesinde trenlerin hareketi için gerekli cer gücü ihtiyacından dolayı şebekeden trenlere doğru diyot doğrultucuları üzerinden enerji akışı gerçekleşir. Boşa çalışma bölgesinde hat gerilimi neredeyse sabit kalır ve çift yönlü olarak enerji akışı gerçekleşmez. Frenleme bölgesinde trenler rejeneratif enerji üretirler ve enerji akışı trenlerden hatta doğru gerçekleşir böylece DA hat gerilimi yükselir. Bu çalışmada frenleme bölgesinde evirici birimi, literatürde yer alan sabit bir gerilim değerinde çalışmasını gerçekleştiren sistemlerden farklı olarak devreye girme gerilimi V_1 ve devreden çıkma gerilimi V_2 olacak şekilde iki farklı gerilim değeri belirlenerek çalışmasını gerçekleştirir. Hat gerilimi üzerinden çalışma bölgeleri Şekil 3’de gösterilmiştir. Rejeneratif enerji kazanımını gerçekleştirmeden önce evirici birimi DA bara gerilimi şebeke üzerinden oluşturulur ve DA hattı senkronizasyonu gerçekleştirilerek çalışmaya hazır hale getirilir.



Şekil 1. 750V DA trafo merkezinde kullanılan evirici birimi bağlantı şeması (Wiring diagram of the inverter unit used in 750V DC rail transit substation)



Şekil 2. Evirici birimi topolojisi (The inverter unit topology)



Şekil 3. DA hat gerilimi değişimi ve çalışma bölgeleri (DC line voltage variation and operating regions)

Hat senkronizasyonu gerçekleştiikten sonra evirici birimi hat gerilimini takip eder ve hat gerilimi V_1 seviyesine ulaştığında çalışmasına başlayarak rejeneratif enerji kazanımını gerçekleştirir. Hat gerilimi devreden çıkma gerilimi V_2 seviyesine ulaştığında çalışmasını durdurur.

Şekil 3'de evirici birimi çalışması, I. bölge (rejeneratif enerji artış bölgesi) ve II. bölge (rejeneratif enerji azalış bölgesi) olarak iki ayrı bölge üzerinden gösterilmiştir. V_1 ile üretilen rejeneratif enerji kaynaklı maksimum hat gerilimi arası I. bölgeyi, maksimum hat gerilimi ve V_2 arası II. bölgeyi temsil etmektedir. V_2 gerilimi V_1 değerinden daha düşük olacak şekilde belirlenerek II. bölgede rejeneratif enerji azalırken devrede kalma süresi uzatılmış maksimum kazanım sağlanmıştır. Böylece, evirici çalışma bölgesi artırılarak daha fazla rejeneratif enerji kazanımı ile enerji verimliliğine katkı sağlanmıştır. Diğer taraftan maksimum rejeneratif enerji kazanımı için trenler arası enerji aktarımına öncelik verilmelidir [3]. Bu amaçla, hatta bulunan diğer trenlerin kullanacağı rejeneratif enerjiyi maksimum seviyede tutmak için devreye girme ve devreden çıkma gerilim değerleri arasındaki bant genişliği yeterince dar tutulmalıdır. Bu nedenle V_1 , frenleme dirençlerinin aktif olduğu gerilim değerine yakın, V_2 hattın yüksüz gerilim değerinin üzerinde olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece rejeneratif enerjinin kazanımı için mümkün olan en uygun çalışma gerilim değerleri seçilmiştir.

4. Evirici Birimi Kontrol Yapısı (The Inverter Unit Control Structure)

Kontrol çevrimleri için gerekli olan matematiksel modeller Şekil 2'de verilen evirici birimi üç faz devresi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen üç faz denklem takımı Eş. 1'de verilmiştir. Burada R filtre direncini, L filtre ve trafo endüktansı toplam değerini temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Üç faz denklem takımına şebeke gerilim oryantasyonu tabanlı vektör kontrol yöntemi uygulanarak dq0 eksenlerine dayalı denklem takımları elde edilir. Dq0 eksen dönüşümleri Clarke ve Park dönüşümleri üzerinden elde edilir [15]. Şebeke gerilim oryantasyonunda dq0 eksen takımı, şebeke gerilimi açılma hızı (ω) ile dönmektedir. Literatürde park dönüşümü için gerekli şebeke gerilimi faz açısı (θ), faz kilitlemeli çevrim (Phase Lock Loop, PLL) algoritmaları kullanılarak elde edilir [16]. Eş. 2 ve Eş. 3'de Clarke ve Park dönüşüm matrisleri sırasıyla verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6'da dönüşüm matrisleri uygulanarak dq0 eksenlerine dayalı denklem takımları verilmiştir. Üç fazlı dengeli sistemlerde sıfır eksen bileşeni oluşmaz. Bu çalışma dengeli şebekede gerçekleştirildiği için sıfır eksen bileşeni kontrolü uygulanmamıştır.

$$V_d = -RI_d - L \frac{d}{dt} I_d + (E_d + \omega LI_q) \quad (4)$$

$$V_q = -RI_q - L \frac{d}{dt} I_q + (E_q - \omega LI_d) \quad (5)$$

$$V_0 = V_a + V_b + V_c = 0 \quad (6)$$

Eş. 4 ve Eş. 5'de eşitliğin sağında parantez içerisinde verilen son terimler gerilim kompanzasyon terimleri olarak ifade edilmektedir [17]. Şekil 4'de d ve q eksenlerine ait akım çevrimleri kontrol blok şeması gösterilmiştir. G_2 akım çevrimi transfer fonksiyonunu, C_2 akım çevrimine ait kontrolör yapısını, I_{dref} , I_{qref} referans akım değerlerini I_d , I_q ölçülen faz akımı tepe değerlerini temsil etmektedir.

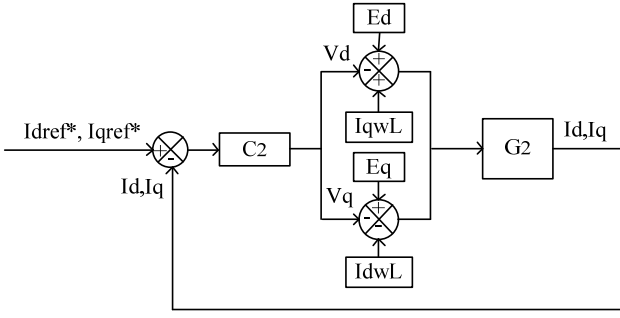
Kompanzasyon terimleri Şekil 7'de verilen kaskat vektör kontrol yapısı içerisinde ileri beslemeli kontrol yöntemi olarak kullanılmaktadır [18]. Bu terimlerin ihmal edildiği d ve q eksen akım çevrimlerine ait denklem takımları sürekli zaman modeli olarak Eş. 7 ve Eş. 8'de verilmiştir.

$$V_d(s) = RI_d(s) + LsI_d(s) \quad (7)$$

$$V_q(s) = RI_q(s) + LsI_q(s) \quad (8)$$

Eş. 7 ve Eş. 8 kullanılarak akım çevrimlerine ait sürekli zaman transfer fonksiyonu $G_2(s)$, Eş. 9'da verilmiştir.

$$G_2(s) = \frac{I_d(s)}{V_d(s)} = \frac{I_q(s)}{V_q(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (9)$$



Şekil 4. d-q eksenleri akım kontrol çevrimi blok şeması (d-q axis current control loop block diagram)

Evirici birimi rejeneratif enerji kazanımı DA bara gerilimi kontrolü üzerinden gerçekleştirilir. Böylece gerilim çevrimine ait transfer fonksiyonu, DA bara kondansatörü akım denklemi üzerinden elde edilir. Şekil 5’de gerilim çevrimine ait kontrol blok şeması akım çevrimi ile birlikte sunulmuştur.

Burada, G_1 gerilim çevrimi transfer fonksiyonunu, C_1 gerilim çevrimi kontrolör yapısını, V_{dref}^* referans gerilim değerini, I_{dc} ile I_L evirici DA ile hat akımını ve K , I_d ve I_{dc} akımlarına bağlı çarpanı temsil etmektedir. DA bara gerilimi, şebeke üzerinden I_{dc} akımı ile oluşturulur. G_1 tasarımı, $I_c = I_{dc}$ eşitliği kullanılarak gerçekleştirilir [16]. Şekil 6’da I_L değerinin ihmal edildiği durumdaki basitleştirilmiş gerilim çevrimi kontrol blok şeması yer almaktadır.

Blok diyagramda yer alan T_2 birim geri beslemeli akım çevrimine ait transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. DA bara kondansatörü akım denklemi Eş. 10’da zamana bağlı olarak verilmiştir.

$$I_c = I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt}, I_L = 0 \quad (10)$$

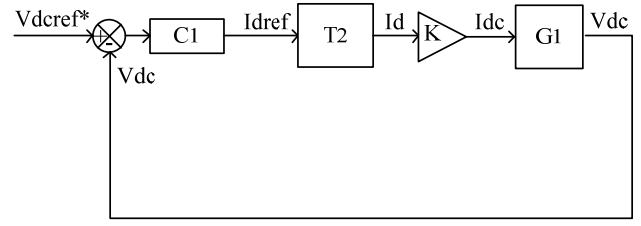
Gerilim çevrimine ait sürekli zaman modeli olarak Eş. 11’de verilmiştir.

$$I_c(s) = I_{dc}(s) = KI_d(s) = CsV_{dc}(s) \quad (11)$$

Eş. 11 kullanılarak gerilim çevrimine ait sürekli zaman transfer fonksiyonu $G_1(s)$, I_d akımına ve K çarpanına bağlı olarak Eş. 12’de ifade edilmiştir.

$$G_1(s) = \frac{V_{dc}(s)}{I_d(s)} = \frac{K}{Cs} \quad (12)$$

DA ve AA arasındaki güç eşitliği ise Eş. 13’de verilmiştir.



Şekil 6. Basitleştirilmiş gerilim çevrimi kontrol blok şeması (Simplified voltage loop control block diagram)

$$P = V_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}V_dI_d \quad (13)$$

Eş. 13’ten yararlanılarak I_{dc} akımı I_d akımına bağlı olarak Eş. 14’deki gibi ifade edilebilir.

$$I_{dc} = I_d \left(\frac{3}{2} \frac{V_d}{V_{dc}} \right) \quad (14)$$

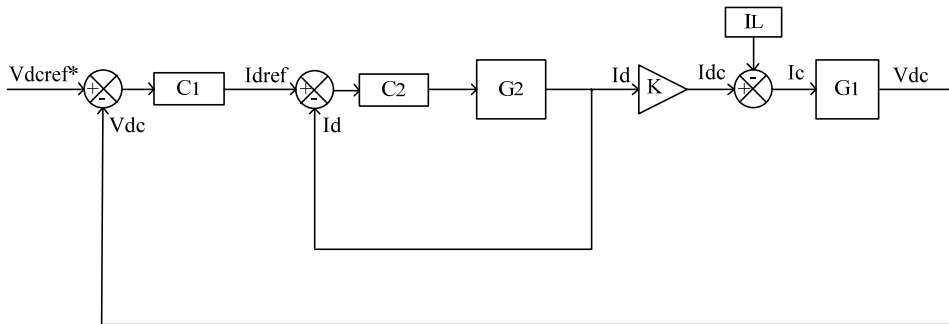
Eş. 14 kullanılarak gerilim çevrimi transfer fonksiyonu çarpanı K , Eş. 15’deki gibi elde edilir.

$$K = \frac{I_{dc}}{I_d} = \left(\frac{3}{2} \frac{V_d}{V_{dc}} \right) \quad (15)$$

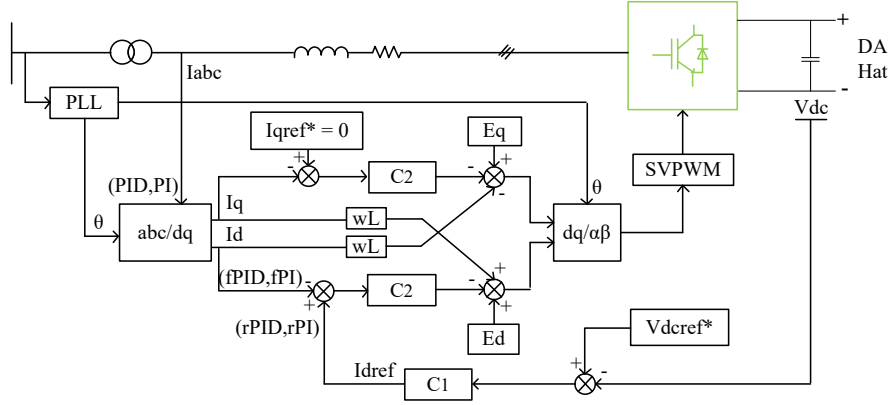
Evirici birimi kontrolü şebeke gerilim oryantasyonu tabanlı vektör kontrol algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece aktif güç kontrolü d eksen, reaktif güç kontrolü q eksen üzerinden kontrol edilir [19]. Rejeneratif enerji kazanımı tamamen aktif güç çevrimi üzerinden gerçekleştirildiği için q eksen akım referansı I_{qref}^* sıfırdır. Şekil 7’de evirici birimi kontrolü için kullanılan vektör kontrol yöntemine dayalı kaskat kontrol yapısı gösterilmiştir. Kontrol yapısı içerisinde anahtarlama sinyallerinin üretiminde uzay vektör darbe-genişlik-modülasyonu (SVPWM) metodu kullanılmıştır.

4.1. PID Kontrolör Tasarım Yöntemi (PID Controller Design Method)

Hat gerilimindeki dinamik değişimlere hızlı cevap vermek için evirici birimi kontrol yapısı gerilim çevrimi içerisinde baskın kutup atama yöntemine göre tasarlanan PID kontrolör kullanılmıştır. PID içerisinde yer alan türevsel etki ile sistem tepkisi hızlandırılmış böylelikle hat gerilimindeki değişimlere hızlı cevap verilmesi sağlanmıştır. Kaskat kontrol yapılarında dış çevrim iç çevrime göre daha yavaştır. Literatürde eviricilerin kontrolünde kullanılan kaskat kontrol yapılarında dış gerilim çevrimi kontrolör tasarımı yapılırken genellikle iç akım çevrimi ihmal edilerek ideal kabul edilir. Bu çalışmada, akım çevrimi dikkate alınarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş böylece tasarım doğruluğu artırılmıştır. Akım çevriminin tasarıma dâhil edilmesi ile PID kontrolör tasarımı için



Şekil 5. Gerilim kontrol çevrimi blok şeması (Voltage control loop block diagram)



Şekil 7. Evirici birimi kaskat kontrol yapısı (Cascade control structure of the inverter unit)

yüksek dereceli bir sistem modeli elde edilmiştir. Bu nedenle PID kontrolör yüksek dereceli sistemlere uygun baskın kutup atama yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır.

Yüksek dereceli bir sistemin transfer fonksiyonunun genel ifadesi Eş. 16'da verilmiştir.

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (16)$$

PID kontrolör ile birlikte Eş. 16'da verilen sistemin birim geri beslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonuna ait karakteristik polinomu Eş. 17'deki gibi elde edilir [20].

$$P_c(s, q) = N(s)(k_d s^2 + k_p s + k_i) + sD(s) = [1 s \dots s^{n+1}] \left(\delta_0 + N_1 \begin{bmatrix} k_i \\ k_p \end{bmatrix} + N_2 k_d \right) \quad (17)$$

Eş. 17'de yer alan δ_0 , N_1 , N_2 Eş. 18'de verilmiştir.

$$\delta_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad N_1 = \begin{bmatrix} b_0 & 0 \\ b_1 & b_0 \\ \vdots & \vdots \\ b_m & b_{m-1} \\ 0 & b_m \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n+2) \times 2}, \quad N_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Sisteme ait transfer fonksiyonunun sıfırları Eş. 19'da verilen polinom kökleri bulunarak elde edilir.

$$P_z(s, q) = N(s)(k_d s^2 + k_p s + k_i) \quad (19)$$

Eş. 17'de verilen karakteristik polinom baskın kutuplara ait polinom ve artık polinom türünden Eş. 20'deki gibi yazılabilir [19].

$$P_c(s, q) = P_d(s)P_e(s) \\ P_d(s) = (s - p_1)(s - p_2) \triangleq s^2 + d_1 s + d_0 \quad (20) \\ P_e(s) = e_{n-1} s^{n-1} + \dots + e_1 s + e_0$$

Eş. 20'de p_1 ve p_2 istenilen sönüm oranını (ζ) ve çevrim doğal frekansını (ω_n) belirleyen sistemin baskın kutuplarını temsil etmektedir. Sistemin geriye kalan baskın olmayan kutupları artık polinom $P_e(s)$ üzerinden elde edilir. Eş. 20'de verilen karakteristik polinom matris formda Eş. 21'deki gibi ifade edilir.

$$P_d(s)P_e(s) = [1 s \dots s^{n+1}] D e, \\ D = \begin{bmatrix} d_0 & 0 & \dots & d_0 \\ d_1 & d_0 & \dots & \vdots \\ 1 & d_1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & d_0 \\ \vdots & \vdots & \dots & d_1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(n+2) \times n}, \quad e = \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_{n-2} \\ e_{n-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Eş. 21 karakteristik polinom eşitliği Eş. 17'de yerine koyulursa Eş. 22 elde edilir.

$$\left(\delta_0 + N_1 \begin{bmatrix} k_i \\ k_p \end{bmatrix} + N_2 k_d \right) = D e, \\ \begin{bmatrix} e \\ k_i \\ k_p \end{bmatrix} = [D \quad -N_1]_{(n+2) \times (n+2)}^{-1} (\delta_0 + N_2 k_d)_{(n+2) \times 1} \quad (22)$$

Eş. 22 çözülerek, bilinmeyenlerin serbest parametre cinsinden elde edildiği kutup atama problemine sembolik bir çözüm bulmak mümkündür. Böylece serbest parametre belirleyerek yerleri bilinmeyen kutuplara sembolik kutup atama yapılması mümkün olur. Bu sembolik sonuçların artık polinomda yerine koyulması, serbest parametre k_d 'ye bağlı bir polinom ile sonuçlanmaktadır. Yerleştirilen kutupların baskınlığını garanti etmek için, artık polinomun köklerinin reel kısımları negatif reel sayı olarak sınırlandırılabilir. Eş. 22'den yararlanılarak artık polinom katsayıları Eş. 23'deki gibi ifade edebilir.

$$e = [I_n \quad 0][D \quad -N_1]^{-1} (\delta_0 + N_2 k_d) \quad (23)$$

Burada I_n $n \times n$ boyutunda birim matrisi temsil eder. Artık polinom ise k_d 'ye bağlı olarak Eş. 24'deki gibi elde edilir.

$$P_e(s) = A(s) + k_d B(s), \\ A(s) = S_n [I_n \quad 0][D \quad -N_1]^{-1} (\delta_0) \quad (24) \\ B(s) = S_n [I_n \quad 0][D \quad -N_1]^{-1} (N_2)$$

Eş. 24'de k_d artık polinom içerisine lineer olarak dâhil olur ve böylece baskın olmayan kutupları sol yarı düzlemde sınırlama problemi, kararlılığı sağlayan k_d kazanç aralıklarının bulunması problemine eş değer hale gelir. Baskın olmayan kutuplar k_d 'ye bağlı olarak sol yarı düzlemde mümkün olan en uzak noktada yerleri belirlenerek etkinlikleri azaltılır. Böylece kontrolör katsayıları ζ ve ω_n 'e bağlı baskın kutuplar etkin şekilde elde edilir.

4.2. Akım Çevrimi Kontrolör Tasarımı (Design of Current Loop Controller)

Şekil 7'de gösterilen kaskat kontrol yapısı akım ve gerilim çevrimi olmak üzere iç içe çevrimlerden oluşmaktadır. Kaskat kontrol

yapılarında kontrolör tasarımları içten dışa doğru olacak şekilde gerçekleştirilir. Bu doğrultuda önce iç akım çevrimi kontrolör tasarımı daha sonra dış gerilim çevrimi kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kaskat kontrol yapıları iç çevrimin hızlı olmasını gerektirir. Bu nedenle iç çevrimler temel olarak hızlı yanıt alabilme üzerine tasarlanırlar [21]. Akım çevriminde kullanılan PI kontrolör $C_2(s)$ ve birim geri beslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_2(s)$ Eş. 25 ve Eş. 26'da sırasıyla verilmiştir.

$$C_2(s) = \frac{k_{pc}s + k_{ic}}{s} \quad (25)$$

$$T_2(s) = \frac{C_2(s)G_2(s)}{1 + C_2(s)G_2(s)} = \frac{k_{pc}s + k_{ic}}{Ls^2 + (R + k_{pc})s + k_{ic}} = \frac{\frac{(k_{pc}s + k_{ic})}{L}}{s^2 + \frac{(R + k_{pc})}{L}s + \frac{k_{ic}}{L}} \quad (26)$$

K_{pc} ve K_{ic} sırasıyla akım çevrimi kontrolörüne ait oransal, integral katsayılarıdır. İkinci dereceden elde edilen $T_2(s)$ transfer fonksiyonu maksimum aşım değeri ve yerleşme süresi kullanılarak kontrolör katsayıları belirlenir. Rejeneratif enerji kazanımı kısa bir sürede ve hızlı gerçekleşmektedir. Akım çevrimi bu hıza uyum sağlayacak şekilde yeterince hızlı olmalıdır. Bununla birlikte sistemin izin verdiği akım sınır değerleri gözetilmek zorundadır. Bu bilgiler kullanılarak ve sistem sınırları dikkate alınarak akım çevrimi aşım yapmayacak şekilde aşırı sönümlü sistem olarak ve yerleşme süresi 5ms olarak belirlenmiştir. Eş. 27'de $T_2(s)$ karakteristik polinomu ζ ve ω_n 'e bağlı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$s^2 + \frac{(R + k_{pc})}{L}s + \frac{k_{ic}}{L} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (27)$$

Akım çevrimi hızı gerilim çevrimi hız bandından daha yüksek olacak şekilde ω_n , yerleşme süresi ve aşım dikkate alınarak ζ belirlenir.

4.3. Gerilim Çevrimi Kontrolör Tasarımı (Design of Voltage Loop Controller)

Gerilim çevrimi için kullanılan PID kontrolör transfer fonksiyonu $C_1(s)$ Eş. 28'de verilmiştir. k_{pv} , k_{iv} , k_{dv} sırasıyla oransal, integral ve türev katsayılarıdır.

$$C_1(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} + k_{dv}s \quad (28)$$

Evirici birimi çalışmasını sistemin izin verdiği sınırlar içerisinde maksimum hat gerilim değerine yakın gerilim değerinde gerçekleştirir. Sistem referans gerilim değeri ve maksimum hat gerilim değeri gözetilerek gerilim çevrimi maksimum aşım değeri belirlenmiştir. Kaskat kontrol yapılarında iç çevrim her zaman dış çevrimden hızlı olmalıdır. Bu nedenle gerilim çevrimi yerleşme süresi akım çevrimine göre daha yavaş aynı zamanda çok hızlı değişen hat gerilimini takip edebilmesi için yeterince hızlı olmalıdır. Bu bilgiler kullanılarak gerilim çevrimi için maksimum yüzde aşım değeri %5 ve yerleşme süresi 200ms olarak belirlenmiştir. Gerilim çevrimi açık çevrim transfer fonksiyonu $H_1(s)$ Eş. 29'da verilmiştir.

$$H_1(s) = \frac{(k_{dv}s^2 + k_{pv}s + k_{iv})K}{Cs} \quad (29)$$

$H_1(s)$ ve $T_2(s)$ kullanılarak elde edilen gerilim çevrimine ait birim geri beslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_1(s)$, Eş. 30'da verilmiştir.

$$T_1(s) = \frac{H_1(s)T_2(s)}{1 + H_1(s)T_2(s)} = \frac{\frac{(k_{dv}s^2 + k_{pv}s + k_{iv})K}{Cs} \frac{(k_{pc}s + k_{ic})}{Ls^2 + (R + k_{pc})s + k_{ic}}}{1 + \frac{(k_{dv}s^2 + k_{pv}s + k_{iv})K}{Cs} \frac{(k_{pc}s + k_{ic})}{Ls^2 + (R + k_{pc})s + k_{ic}}} \quad (30)$$

Eş. 30'da elde edilen transfer fonksiyonu karakteristik polinomu için baskın kutup atama yöntemi ile k_{dv} katsayısı serbest bırakılarak baskın olmayan kutupların yerleri tespit edilir. Tespit edilen kutuplar ile gerilim çevrimi kontrolör katsayıları elde edilir. Eş. 31'de gerilim çevrimine ait kapalı çevrim transfer fonksiyonu karakteristik polinomu verilmiştir.

$$P_c(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(e_0s^2 + e_1s + e_2) \quad (31)$$

Eş. 31'de yer alan karakteristik polinom $P_c(s)$ sistem gereksinimlerden gelen ζ ve ω_n 'e bağlı olarak baskın kutuplara ait polinom ve artık polinom türünden ifade edilmiştir.

Eş. 24'de k_d katsayısına bağlı verilen $P_e(s)$ artık polinomu birim geri beslemeli sistem modeli üzerinden Eş. 32'deki gibi ifade edilir.

$$P_e(s) = 1 + k_{dv} \frac{A(s)}{B(s)} \quad (32)$$

Böylece artık polinom kutuplarının yeri, birim geri beslemeli sistem kutuplarının sol yarı düzlemde olabileceği en uzak noktanın bulunması problemine dönüşür. Köklerin yer eğrisi yaklaşımıyla kutupların yerleri belirlenir. Bu çalışmada, artık polinom kutuplarını reel eksen sol yarı s-düzleminde en uzak noktada tutacak k_{dv} katsayısı belirlenmiştir. Bu sistemde Eş. 32 kullanılarak k_{dv} 'ye göre köklerin geometrik yeri incelendiğinde en uygun noktanın kopma noktası olduğu gözlenmiştir. Ayrıca k_{dv} 'ye göre kararlık analizi yapıldığında sistemi kararlı kılan tüm k_{dv} aralıkları belirlenebilir. Bu koşulu sağlayan k_{dv} katsayısı kullanılarak gerilim çevrimi kontrolörüne ait k_{pv} ve k_{iv} katsayıları belirlenir.

5. Benzetim Çalışması (Simulation Analysis)

Bu bölümde, gerçek bir sisteme ait detaylı model Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş önerilen kontrol yapısı ile birlikte sistemin kararlılık analizi yapılmış ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen PID tabanlı kontrol yapısı performansı literatürde yaygın olarak kullanılan PI tabanlı kaskat kontrol yapısı ile karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Buna göre, benzetim çalışmaları PID-PI ve PI-PI kaskat kontrol yapıları kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her iki kontrol yapısı ideal, gürültü ve bozucu etkilerin yer aldığı çalışma koşullarında test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları 10s süresince, örnekleme süresi 1µs ve Şekil 1'de verilen evirici birimi sistem mimarisinde yer alan 400V yardımcı güç trafosu üzerinden şebeke bağlantısı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. 750V DA raylı ulaşım sistemi gerilim sınırları ve kontrolör tasarım kısıtları dikkate alınarak devreye girme gerilimi $V_1=860V$, devreden çıkma gerilimi $V_2=850V$ olarak belirlenmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan sistem parametreleri, güç değeri kilowatt (kW), DA ve AA gerilimleri Voltaj (V), filtre endüktansı Henry (H), filtre direnci Ohm (Ω), DA barak kondansatörü Farad (F), anahtarlama frekansı f_{sw} Kilohertz (kHz), örnekleme zamanı T_s mikrosaniye (μs) olarak Tablo 1.'de verilmiştir.

Sistemin kararlılık analizi Mathematica programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda $k_{dv} > -0.0095$ olması gerektiği belirlenmiştir. Kontrol kazancı $k_{dv} = 0.1$ seçilerek artık polinom kutuplarının baskın kutuplara göre mümkün olan en uzak noktada yer almaları sağlanmıştır.

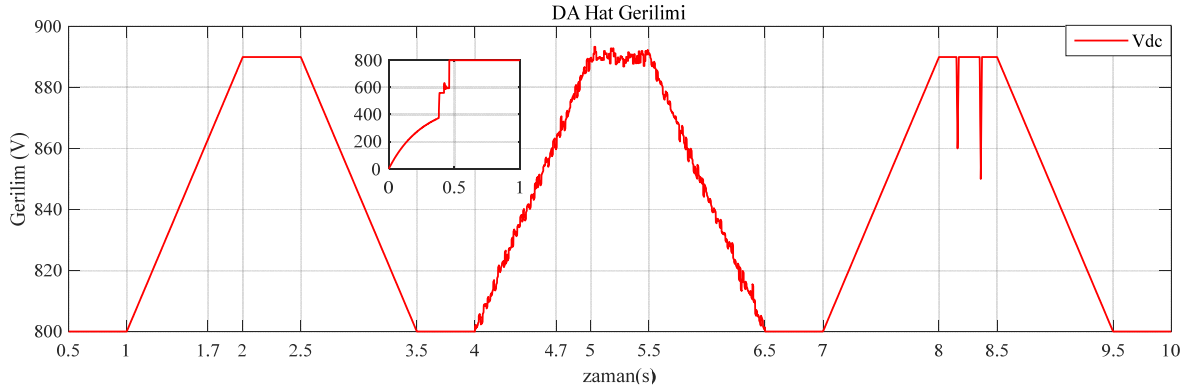
Tablo 1. Sistem parametreleri (System parameters)

Parametre	Sayısal Değer
P	100 kW
DA Hat, Şebeke Gerilimi	750V, 400V
Trafo Sargı Oranı	400V/400V
L; R	1×10^{-3} H; $0,1\Omega$
C	$5,6 \times 10^{-3}$ F
f_{sw} ; T_s ; K	4kHz; 250 μ s; 0,57
G_1	$\frac{0,0056s}{1}$
G_2	$\frac{0,001s + 0,1}{1}$
k_{pc} ; k_{ic}	1,49; 150
k_{pv} ; k_{iv} ; k_{dv}	4,38; 92; 0,1

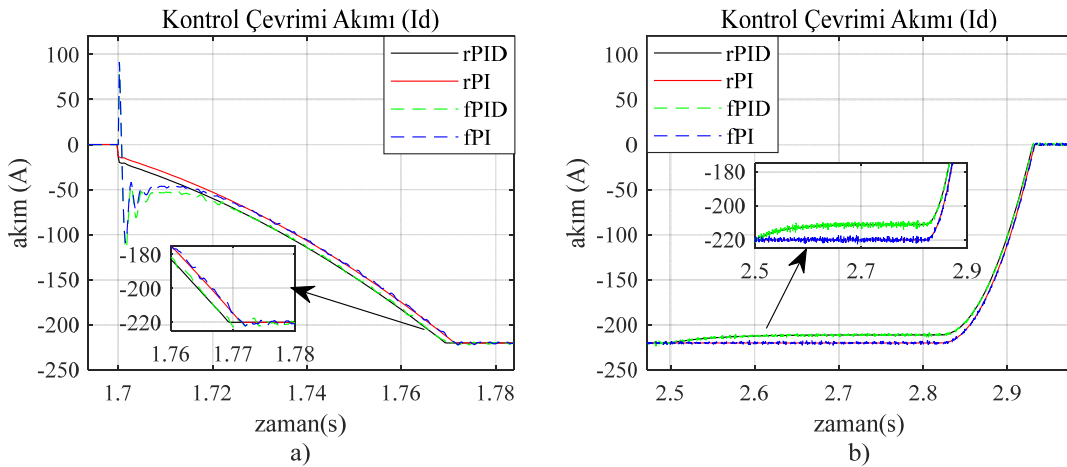
Benzetim çalışmalarında 0-1s arasında evirici birimi DA bara gerilimi şebeke üzerinden oluşturulmuş, evirici birimi ile DA hattı senkronizasyonu gerçekleştirilerek sistem çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Belirlenen test koşulları Şekil 8’de verilen hat gerilimi değişimi üzerinden oluşturulmuştur. 1-3,5s arası ideal, 4-6,5s arası gürültü ve 7-9,5s arası bozucu etki altında çalışma olmak üzere oluşturulan üç ayrı test koşulunu kapsamaktadır. Her üç test koşulunda hat gerilimi 800V ile 890V arasında değiştirilerek rejeneratif enerji oluşumu sağlanmıştır. Hat gerilimi maksimum değeri, 750V DA raylı ulaşım sistemi sürekli çalışma üst sınır gerilimi 900V altında 890V olarak belirlenmiştir. Her iki kontrol yapısı performansı, Şekil 2’de verilen I. bölge ve II. bölge ayrı ayrı olmak

üzere üç test koşulu için kontrol çevrimi akımı ve a-faz akımı üzerinden karşılaştırmalı gösterilmiştir. Her iki kontrol yapısı içerisinde kullanılan kontrol çevrimleri referans akımları (rPID, rPI), geri besleme akımları (fPID, fPI) ve a-faz akımları (PID, PI) ismiyle verilmiştir (Şekil 7). Ayrıca her iki kontrol yapısının performansları üç test koşulu için kontrol işaretleri üzerinden karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Rejeneratif enerji kazanımı sırasında enerji akışı evirici biriminden şebekeye doğru negatif yöndedir. Bu nedenle Clarke-Park dönüşüm matrisleri ile elde edilen kontrol çevrimi akımları negatif değerlidir. Şekil 9 ve Şekil 10’da ideal çalışma test koşulu altında her iki kontrol yapısı için elde edilen kontrol çevrimi akımı I_d ve faz akımı I_a değişimleri sırasıyla gösterilmiştir.

Şekil 10 a’da ideal çalışma test koşulu altında I. bölgede her iki kontrol yapısı faz akımı cevaplarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat Şekil 9a’da kontrol çevrimi akımı cevapları incelendiğinde önerilen PID-PI kontrol yapısının PI-PI kontrol yapısına göre yaklaşık 2ms daha önce yerleştiği görülmektedir. Şekil 9b ve Şekil 10b’de II. bölgede 2,5.s’de hat gerilimi azalmaya başlamasıyla birlikte PID-PI kontrol çevrimi akımı azalmaya başlamış PI-PI kontrol çevrimi akımı ise hat gerilimi $V_1=860V$ gerilim değeri altına indiği anda 2,85.s’de azalmaya başladığı gözlenmiştir. Böylece önerilen kontrol yapısının hat gerilimindeki değişimle beraber kontrol çevrimi akımını azaltarak PI-PI kontrol yapısına göre daha hızlı cevap verdiği gözlenmiştir. İdeal çalışma test koşulundan sonra hat gerilimine 4,5s ile 6s zaman aralığında gürültü eklenerek yeni test koşulu oluşturulmuştur.



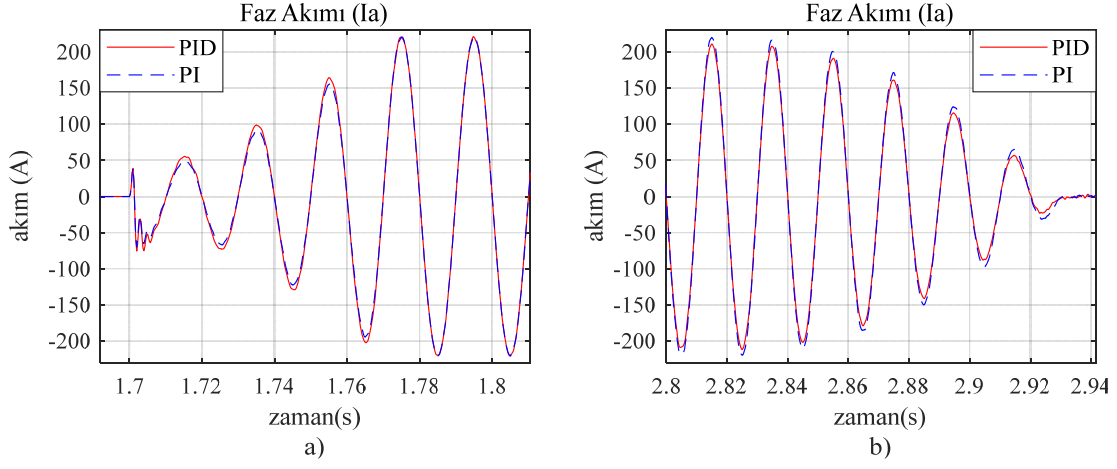
Şekil 8. DA hat gerilimi değişimi (Variation of DC line voltage)



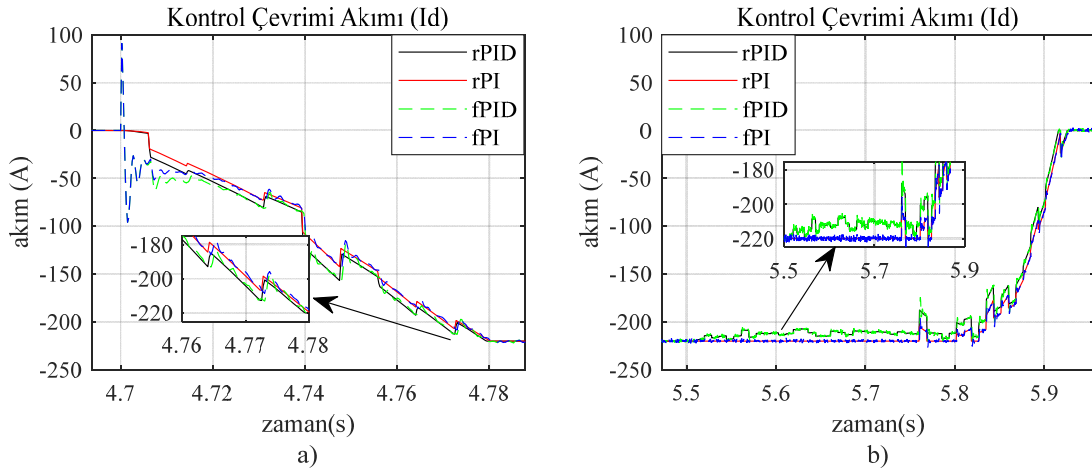
Şekil 9. İdeal çalışma test koşulu kontrol çevrimi akımı performansı a) I. bölge b) II. bölge (Performance of control loop current in ideal operating condition a) region I b) region II)

Şekil 11 ve Şekil 12’de gürültülü test koşulu altında her iki kontrol yapısına ait kontrol çevrimi akımı ve faz akımı değişimleri gösterilmiştir. Hat gerilimindeki gürültü kaynaklı değişimlere karşı

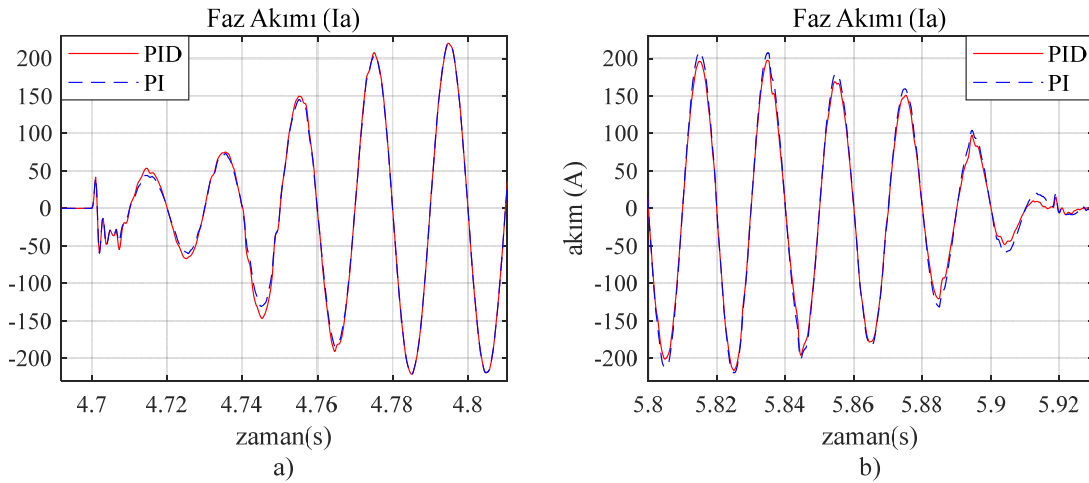
kontrol yapılarının performansı ideal çalışma test koşuluna benzerdir. Fakat önerilen kontrol yapısının yüksek genlikli gürültüler ile hat geriliminde oluşan dinamik değişimlere daha hızlı cevap verdiği



Şekil 10. İdeal çalışma test koşulu faz akımı performansı) I. bölge b) II. bölge
(Performance of phase current in ideal operating condition a) region I b) region II)



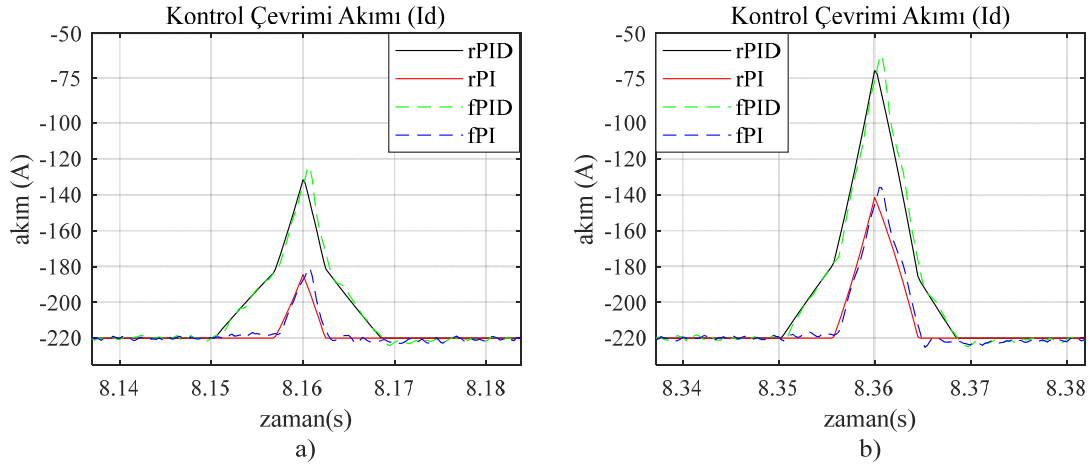
Şekil 11. Gürültü altında çalışma test koşulu kontrol çevrimi akımı performansı a) I. bölge b) II. bölge
(Performance of control loop currents in noisy operating condition a) region I b) region II)



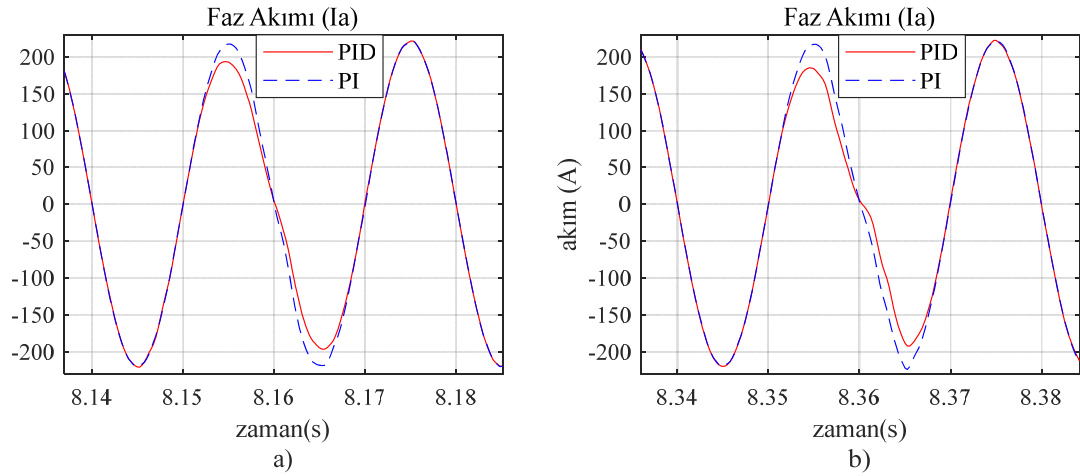
Şekil 12. Gürültü altında çalışma test koşulu faz akımı performansı a) I. bölge b) II. bölge
(Performance of control loop currents in noisy operating condition a) region I b) region II)

gözlenmiştir. Ayrıca bu test koşulunda da, II. bölgede hat geriliminin 5,5.s'de azalmaya başlamasıyla birlikte önerilen kontrol yapısının PI-PI kontrol yapısına göre daha hızlı cevap verdiği görülmektedir. Son olarak hat gerilimi 8,15s ve 8,35.s'de anlık olarak değiştirilerek bozucu etki altındaki çalışma test koşulu oluşturulmuştur. Şekil 13 ve Şekil 14'te her iki kontrol yapısı için elde edilen kontrol çevrimi akımı ve faz akımı değişimleri gösterilmiştir. Hat gerilimi öncelikle 8,15-8,16s arasında 890V seviyesinden 860V seviyesine düşürülmüş, sonrasında 8,16-8,17s arasında tekrar 890V seviyesine yükseltilmiştir. Daha sonra hat gerilimi 8,35-8,36s arasında 890V seviyesinden 850V seviyesine düşürülmüş, sonrasında 8,36-8,37s arasında 890V seviyesine yükseltilerek iki ayrı bozucu etki altında her iki kontrol yapısına ait akım değişimleri elde edilmiştir. Söz konusu bozucu etki altında hat gerilimindeki anlık değişimlere karşı önerilen kontrol yapısına ait kontrol çevrimi ve faz akımı cevap performansının çok daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 13'te kontrol çevrimi akımları üzerinden önerilen kontrol yapısı 8,17 ve 8,37s arasında hat gerilimindeki ani değişimlere çok hızlı cevap vererek akım değerini önce azaltarak sırasıyla -130A ve -70A seviyelerine, daha sonra yine çok hızlı cevap vererek maksimum akım değeri -220A seviyesine getirmiştir. PI-PI kontrol yapısı hat gerilimindeki ani değişimlere daha yavaş tepki göstermiş ve akım değerleri önce sırasıyla -180A ve -140A seviyelerine daha sonra benzer tepki süresiyle maksimum akım değeri -220A seviyesine gelmiştir. Diğer taraftan Şekil 14'te kontrol

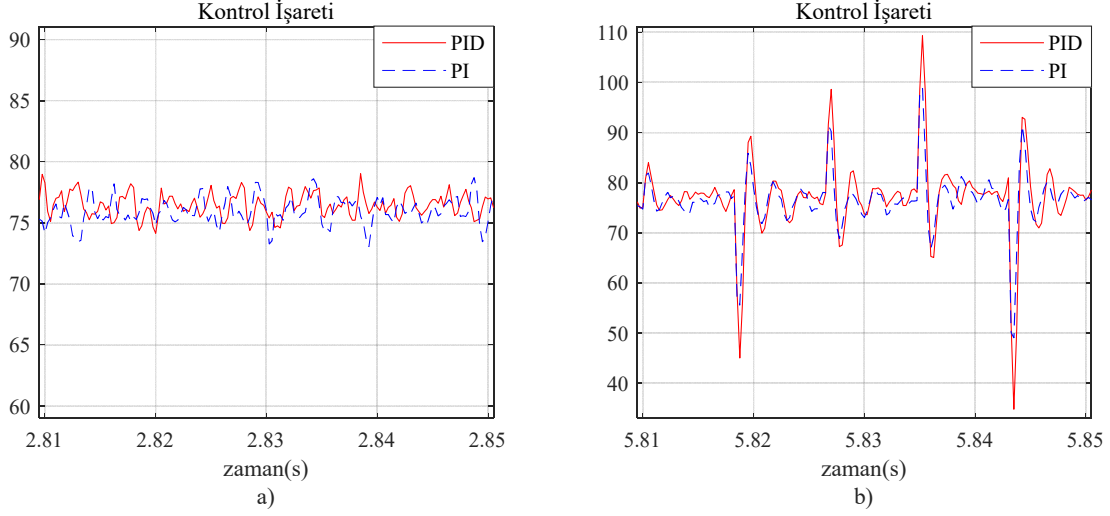
çevrimlerine göre daha yavaş olan faz akımları üzerinden akım genliklerindeki değişimler gösterilmiştir. Benzer şekilde hat gerilimindeki ani değişimlere karşı önerilen yapıya ait kontrol işaretleri dinamik tepkisinin PI-PI kontrol yapısına göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Tasarlanan PID kontrolörün dinamik performansının içerdiği türev etkisi sebebiyle özellikle gerçek sistemlerde sıklıkla karşılaşılan hat gerilimi ani değişimlerine karşı çok daha iyi olduğu bu test koşulunda belirgin olarak görülmektedir. Akım performansları üzerinden elde edilen sonuçlarla beraber her iki kontrol yapısının performansı üç farklı test koşulu altında değerlendirilmiştir. Uygulanan kontrol işaretlerine ait grafikler Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 15a ve Şekil 15b'de sırasıyla ideal ve gürültülü çalışma test koşullarında her iki yapıya ait kontrol işaretine yer verilmiştir. İdeal çalışma test koşulunda kontrol işareti performanslarının benzer olduğu görülmekte olup gürültülü çalışma test koşulunda özellikle yüksek genlikli gürültü anında önerilen kontrol yapısına ait cevabın daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Bozucu etki altında uygulanan kontrol işaretleri ise Şekil 16'da sunulmuştur. Hat gerilimindeki anlık değişimlere karşı önerilen yapıya ait kontrol işareti dinamik tepkisinin PI-PI kontrol yapısına göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Tasarlanan PID kontrolörün dinamik performansının içerdiği türev etkisi sebebiyle özellikle gerçek sistemlerde sıklıkla karşılaşılan hat gerilimi ani değişimlerine karşı çok daha iyi olduğu bu test koşulunda belirgin olarak görülmektedir.



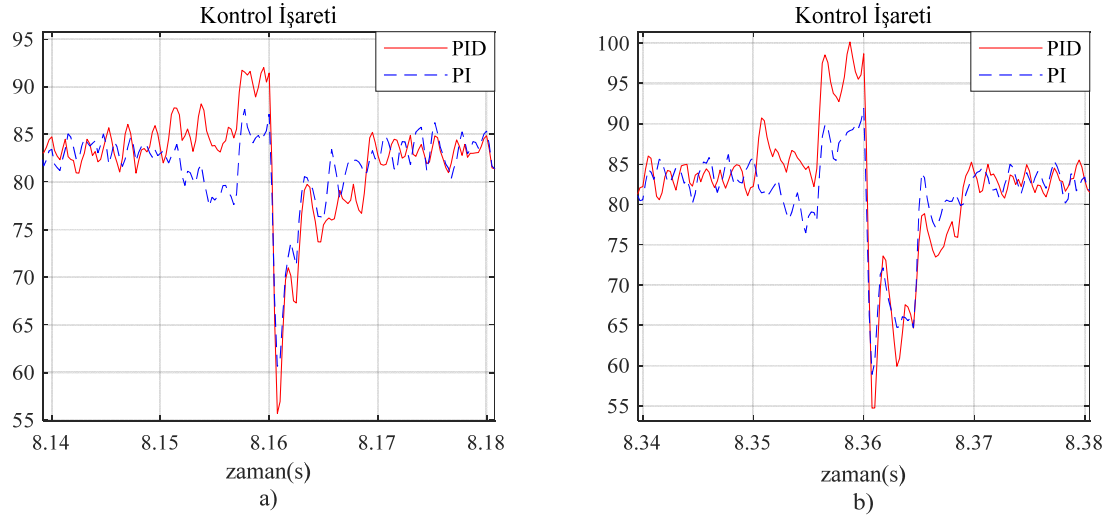
Şekil 13. Bozucu etki altında çalışma test koşulu kontrol çevrimi akımı performansı a) I. bölge b) II. Bölge (Performance of control loop current in disruptive operating condition a) region I b) region II)



Şekil 14. Bozucu etki altında çalışma test koşulu faz akımı performansı a) I. bölge b) II. bölge (Performance of control loop current in disruptive operating condition a) region I b) region II)



Şekil 15. Kontrol işaretleri performansı a) ideal çalışma test koşulu b) gürültü altında çalışma test koşulu
(Performance of control signals a) ideal operating condition b) noisy operating condition)



Şekil 16. Bozucu etki altında çalışma test koşulu kontrol işaretleri performansı a) I. bölge b) II. bölge
(Performance of control signals in disruptive operating condition a) region I b) region II)

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, DA raylı ulaşım sistemlerinde rejeneratif enerji kazanımını gerçekleştiren şebeke bağlantılı üç fazlı evirici birimi için PID tabanlı yeni bir kontrol mekanizması önerilmiştir. Hat gerilimindeki dinamik değişimlere hızlı cevap vermek amacıyla evirici birimi kaskat kontrol yapısı gerilim çevrimi içerisinde literatürde yaygın olarak kullanılan PI kontrolör yerine baskın kutup atama yöntemine göre tasarlanan PID kontrolör kullanılmıştır. Önerilen kontrol mekanizması ile akım çevrimi dikkate alınarak PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarım doğruluğu artırılmıştır. PID içerisinde yer alan türevsel etki ile sistem tepkisi hızlandırılmış böylelikle hat gerilimindeki değişimlere hızlı cevap verilmesi sağlanmış ve PI tabanlı kontrol yapılarının yavaş dinamik tepkisi iyileştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki sabit gerilim değerinde çalışmasını gerçekleştiren sistemlerden farklı olarak devreye girme ve devreden çıkma olmak üzere iki farklı gerilim değerini dikkate alan yeni bir çalışma stratejisi önerilmiştir. Böylece, evirici çalışma bölgesi

artırılarak daha fazla rejeneratif enerji kazanımı ile enerji verimliliğine katkı sağlanmıştır. Gerçek bir sisteme ait detaylı model Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Sistemin kararlılık analizi Mathematica programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sistem kararlılığı gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları, önerilen kontrol yapısı ve literatürde yaygın olarak kullanılan PI-PI kontrol yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki kontrol yapısı rejeneratif enerji kazanım bölgeleri için ideal, gürültü ve bozucu etkiler altındaki çalışma test koşullarında ele alınmış, akım cevapları ve kontrol işaretleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında ideal çalışma test koşullarında önerilen kontrol yapısı performansı PI-PI kontrol yapısına göre üstün olmakla beraber yakındır. Gürültü altında çalışma test koşulunda özellikle yüksek genlikli gürültüler ile hat geriliminde oluşan dinamik değişimlere önerilen kontrol yapısına ait cevabın daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan önerilen PID tabanlı kontrol yapısı dinamik performansının içerdiği türev etkisi sebebiyle özellikle gerçek sistemlerde sıklıkla karşılaşılan hat gerilimi ani

değişimlerine karşı çok daha iyi olduğu bozucu etki içeren çalışma test koşulunda belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca, tasarlanan kontrol yapısının uygulanabilirliği bu çalışma üzerinde elde edilen sonuçlar ile gösterilmiştir.

Kaynaklar (References)

- Iwnicki, S., Spiriyagin, M., Cole, C., & McSweeney, T., Handbook of Railway Vehicle Dynamics, (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, 2019.
- González-Gil, A., Palacin, R., & Batty, P., Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, 75, 374–388, 2013.
- Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W., Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20 (8), 2831–2847, 2019.
- Yang, X., Li, X., Gao, Z., Wang, H., & Tang, T., A Cooperative Scheduling Model for Timetable Optimization in Subway Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14 (1), 438–447, 2013.
- Nasri, A., Moghadam, M. F., & Mokhtari, H., Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems, *SPEEDAM 2010*, 1218–1221, 2010.
- Gelman, V., Energy Storage That May Be Too Good to Be True: Comparison Between Wayside Storage and Reversible Thyristor Controlled Rectifiers for Heavy Rail, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8 (4), 70–80, 2013.
- Lin, S., Huang, D., Wang, A., Huang, Y., Zhao, L., Luo, R., & Lu, G., Research on the Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (8), 7329–7339, 2019.
- Blasko, V., & Kaura, V., A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (1), 116–123, 1997.
- Yao, Z., Xiao, L., & Guerrero, J. M., Improved control strategy for the three-phase grid-connected inverter, *IET Renewable Power Generation*, 9 (6), 587–592, 2015.
- Zhang, G., Tian, Z., Tricoli, P., Hillmansen, S., Wang, Y., & Liu, Z., Inverter Operating Characteristics Optimization for DC Traction Power Supply Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (4), 3400–3410, 2019.
- Meral M.E., Çelik D., A novel current control strategy for grid connected renewable energy source inverters, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 537–550, 2020.
- Zhang, G., Qian, J., & Zhang, X., Application of a High-Power Reversible Control in a Hybrid Traction Power Supply System. *Applied Sciences*, 7 (3), 282, 2017.
- EN 50163:2004+A2:2020 European Standard. Railway applications - Supply voltages of traction systems, October 2020.
- Hu, J., Zhao, Y., & Liu, X., The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor, 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1–5, 2008.
- O'Rourke, C. J., Qasim, M. M., Overlin, M. R., & Kirtley, J. L., A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: Dq0, Clarke, and Park, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34 (4), 2070–2083, 2019.
- Hsieh, G.-C., & Hung, J. C., Phase-locked loop techniques, A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43 (6), 609–615, 1996.
- Pena, R., Clare, J., & Asher, G. M., A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine, *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, 143, 380–387, 1996.
- Trinh, Q.-N., Choo, F. H., & Wang, P., Control Strategy to Eliminate Impact of Voltage Measurement Errors on Grid Current Performance of Three-Phase Grid-Connected Inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (9), 7508–7519, 2017.
- Ceylan, M. Ç., Control of doubly fed induction generator based variable speed wind turbines, MSc, Yıldız Technical University, Institute of Science, Department of Control and Automation Engineering, 2014.
- Üstüoğlu, İ., & Söylemez, M. T., Feasibility conditions on PID controller synthesis using dominant pole assignment, 2007 European Control Conference (ECC), 483–489, 2007.
- Rabie, D., Senjyu, T., Alkhalaf, S., Mohamed, Y. S., & Shehata, E. G., Study and analysis of voltage source converter control stability for HVDC system using different control techniques, *Ain Shams Engineering Journal*, 2021.

