



Dizel Elektrikli Lokomotiflerde Cer Sistemlerinin Gelişimi Üzerine Bir İnceleme

Halil DEVECİ 

Tülomsaş, Ar-Ge Dairesi Başk., Elektrik-Elektronik Sist. Şubesi, 26000, Eskişehir, Türkiye

halildeveci@tulomsas.com.tr

(Alınış/Received: 28.11.2019, Kabul/Accepted: 30.12.2019, Yayınlama/Published: 31.01.2020)

Özet: Bu çalışmada dizel elektrikli lokomotiflerdeki çeşitli cer sistemleri ve bunların farklı elektro-mekanik yöntemlerle oluşturulmuş kontrol düzenekleri incelenmiş, yıllar içerisinde gelişen farklı topolojiler anlatılmıştır. TULOMSAŞ (Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayii A.Ş.) tarafından tasarlanıp üretilen ve TCDD Taşımacılık A.Ş. (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Taşımacılık A.Ş.) tarafından ticari işletmede kullanılan anahat ve manevra lokomotiflerinden alınan örneklerle cer sistemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Alternatif akım ve doğru akım cer sistemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş, güç elektroniğinin gelişmesi ve raylı sistemlerde uygulama alanı bulmasıyla ortaya çıkan güç kontrol yapıları anlatılmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer Sistemi, Dizel Kontrol, Cer Motoru, Lokomotif, Jeneratör-set

An Overview for Development of Traction Systems on Diesel Electric Locomotives

Abstract: In this work, different traction systems and their control mechanism which created with different electro-mechanical methods on diesel-electric locomotives are examined. Different topologies which improved on years are represented. Traction systems are discussed with details with the examples taken from the mainline and shunting locomotives which have been designed and produced by TULOMSAS (Turkish Locomotive & Engine Industry Inc.) and used commercially by TCDD Transport JSC (Turkish State Railways Transport JSC). Alternative current and direct current traction systems have been examined comparatively. The power control structures which risen with the enhancements in power electronics and its railway industry applications are described.

Keywords: Traction System, Diesel Control, Traction Motor, Locomotive, Generator-set

1. Giriş

Güç elektroniğinin yıllar içerisindeki gelişimi birçok endüstriyel uygulama ile birlikte demiryolu sektörüne de yansımıştır. Demiryolunda yolcu ve yük taşımacılığının temel taşlarından biri olan lokomotifler de bu dönüşümden nasibini almış, ancak ne yazık ki bu yeniliklerin lokomotiflerde kullanılması gerek bu kadar yüksek güçlerde ve karmaşık sistemlerde güç aktarımının zorluğu, gerekse bu tip uygulamaların yüksek güvenlik gerektirmesi nedeniyle diğer endüstriyel uygulamalara nazaran uzun zaman almıştır [1]. Dizel elektrikli lokomotiflerde enerjinin kaynağı dizel motor olup dizel motordan alınan mekanik enerji ana alternatörde üç fazlı alternatif akım elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu elektrik enerjisi lokomotifin ve kontrol sisteminin yapısına göre farklı şekillerde kontrol edilerek akslarda bulunan ve doğrudan lokomotifin tekerleklerini tahrik eden cer motorlarını sürmekte kullanılır. Modern kontrol sistemlerinde enerjinin kontrolünde gelişmiş yarıiletken teknolojilerinin kullanılabilmesi eski sistemlere göre yüksek verimli, düşük ağırlıklı, düşük hacimli, düşük tepki süreli, yüksek güçlü ve patinaj performansı arttırılmış lokomotiflerin tasarlanıp üretilmesine olanak tanımıştır.

Atf için/Cite as: H. Deveci, "Dizel elektrikli lokomotiflerde cer sistemlerinin gelişimi üzerine bir inceleme," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 52-59, Jan. 2020.

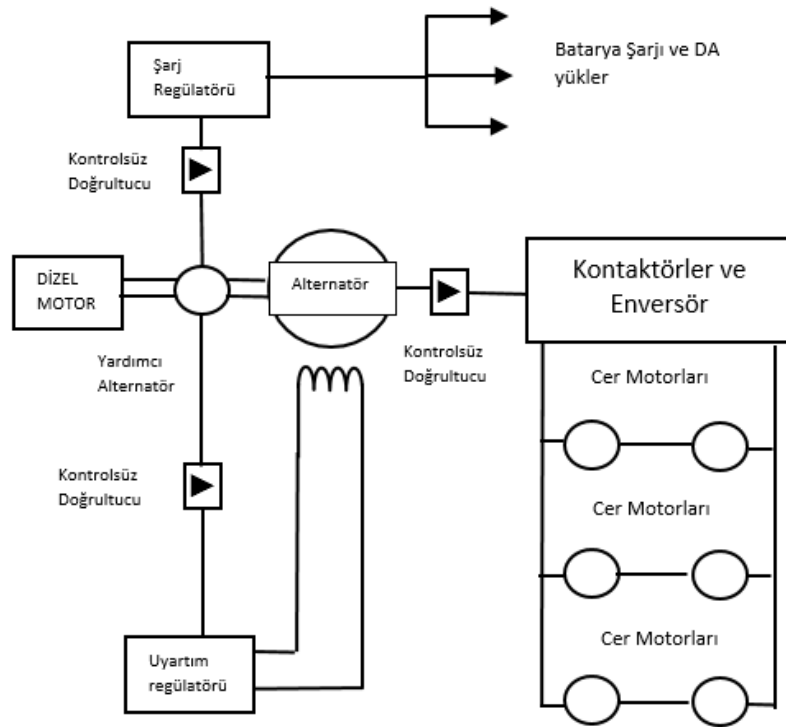
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada önce TÜLOMSAŞ tarafından üretilen doğru akım cer sistemine sahip bir anahat lokomotifinin cer sistemi ve kontrol algoritması anlatılmış, doğru akım cer motorlarının bir cer sisteminde nasıl tahrik sağlayabileceği örnek bir sistem üzerinden açıklanmıştır.

Bu sistemde yer alan elektro-mekanik, hidrolik gibi yöntemlerle oluşturulmuş kontrol düzenekleri tarif edilmiştir. Daha sonra ise TÜLOMSAŞ tarafından 2019'da tasarımı tamamlanan alternatif akım cer sistemine sahip bir manevra lokomotifi cer sistemi ve kontrol algoritması anlatılmış, alternatif akım cer motorlarının bir cer sisteminde nasıl tahrik sağlayabileceği örnek bir sistem üzerinden açıklanmıştır. Bu sistemde yer alan modern kontrol yöntemleri ile oluşturulmuş kontrol düzenekleri tarif edilmiştir. Bu iki sistem ayrı ayrı incelenerek okuyucuya karşılaştırma imkanı sunulması hedeflenmiştir. Sistemlerde yer alan açık ve kapalı çevrim kontrol algoritmalarına değinilmiştir.

3. Doğru Akım Cer Sistemine Sahip Bir Dizel Elektrikli Anahat Lokomotifi Topolojisinin İncelenmesi

Bu tip sistemlerde dizel motor tarafından sağlanan mekanik enerji, alternatörde 3-fazlı alternatif akım elektrik enerjisine çevrildikten sonra tam dalga doğrultucular yardımı ile doğrultulur. Elde edilen doğru akım elektrik enerjisi bojilerde bulunan doğru akım cer motorlarında yeniden mekanik enerjiye çevrilerek pinyon-cer dişli sistemi aracılığı ile tekerleklere aktarılır. Doğrultma işlemi sistemin kontrol mekanizmasına göre kontrollü veya kontrolsüz doğrultma olabilir. Güç elektroniği uygulamalarının nispeten daha az yaygın olduğu yıllarda geliştirilen lokomotiflerde ağırlıklı olarak kontrolsüz doğrultucu kullanıldığı gözlenmektedir [2]. Bu tip uygulamalarda cer motorlarının (lokomotifin) hız kontrolü, doğrudan alternatör uç geriliminin artırılıp azaltılması ile yapılmaktadır [2]. Şekil 1'deki blok şemada TÜLOMSAŞ üretimi, TCDD Taşımacılık A.Ş. tarafından ticari işletmede kullanılan Co-Co tipi bir lokomotif olan DE 24000'e ait güç aktarımı gösterilmektedir [3].



Demiryolu Mühendisliği

Yukarıda anlatılan kontrol sistemi sayesinde cer motorlarına uygulanan gerilim kontrol edilerek lokomotifin hızlanması ve yavaşlaması sağlanmaktadır. Enversör adı verilen mekanik yapı sayesinde ise cer motorları ikili gruplar halinde (her aksta bulunan) devreye alınıp devreden çıkarılabilmektedir. Lokomotifteki cer motorları seri uyartımlı cer motoru olduklarından gerilimin artması hem endüvi hem de uyartım devresinin akımının artmasına yol açacak ve bu sayede (manyetik lineerlik varsayımı ile) Denklem 1’de verildiği gibi üretilen moment artacaktır [4, 5].

$$T_e = K_f \cdot i_f \cdot i_a \quad (1)$$

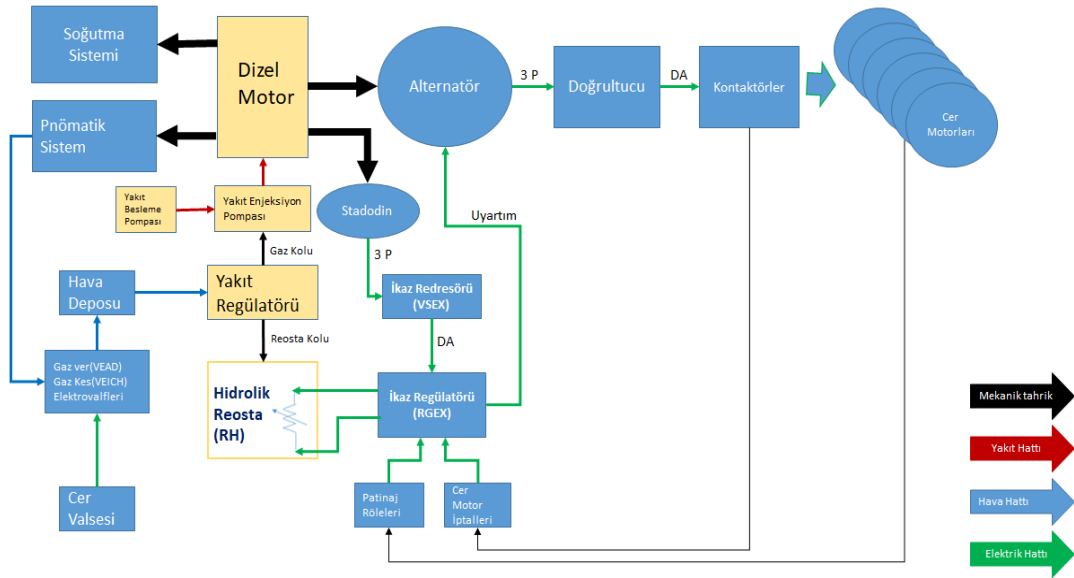
Bu denklemde K_f motorun yapısına bağlı bir sabittir. Burada uyartım akımı i_f endüvi akımı i_a ’ya eşit olduğundan moment ifadesi aşağıda verildiği gibi endüvi akımının karesi ile değişecektir.

$$T_e = K_f \cdot i_a^2 \quad (2)$$

Üretilen momente göre motorun açısal hızı ise bilindiği üzere aşağıdaki denklemde verildiği şekilde değişir.

$$T_e - T_y = J \frac{dw_m}{dt} + B \cdot w_m \quad (3)$$

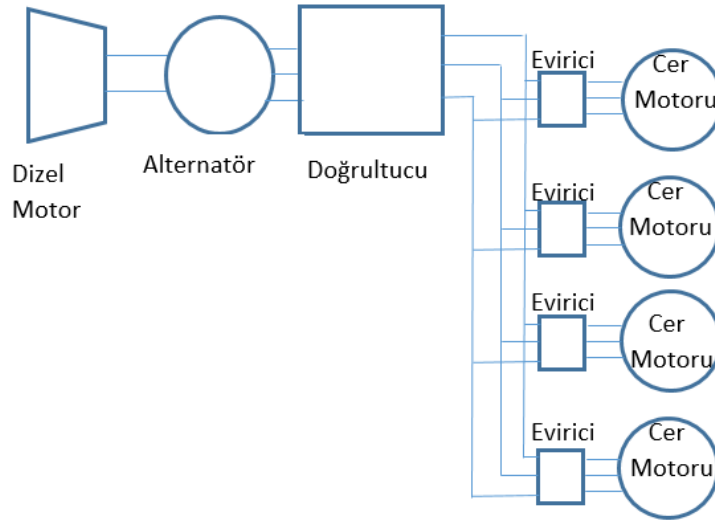
Burada T_e üretilen elektromanyetik moment, T_y ise katardaki yüke ve yol koşullarına bağlı olan yük moment, J rotor atalet momenti (Bu tip sistemlerde dişli ve tekerlek takımı da dahil edilmelidir.), B sürtünme katsayısı, w_m ise açısal hızdır. Üretilen momentin endüvi akımının karesi ile orantılı değişmesi görece yüksek kalkış akımlarında yüksek kalkış momenti üreteceğinden bunun cer sistemleri için istenen bir durum olduğu unutulmamalıdır. Bu sebeple bu tip DA cer sistemlerinde cer motoru olarak sıklıkla seri uyartımlı cer motorları tercih edilmektedir. Şekil 3’te DE 24000’e ait blok şemada yukarıda anlatılan kontrol sistemi görülebilir.



Şekil 3. DE 24000 dizel jeneratör-set kontrolü

4. Alternatif Akım Cer Sistemine Sahip Bir Dizel Elektrikli Manevra Lokomotif Topolojisinin İncelenmesi

Bu tip sistemlerin 2. Bölümde anlatılan sistemlerden en önemli farkı güç elektroniği ve statik anahtarlama devrelerinin gelişmesi sayesinde modern kontrol tekniklerinin kullanıldığı yapıları içermeleridir. Tüm dizel-elektrikli lokomotiflerde olduğu gibi enerjinin kaynağı dizel motordur. Bu tip sistemlerde de dizel motor yine bir üç fazlı alternatörü tahrik etmektedir. DE 10000K'da bulunan fırçasız uyarım özelliğine sahip ana alternatöre uygulanması gereken uyarım akımı, DE 24000 alternatörü için gerekenden çok daha düşük seviyededir. Dolayısıyla ihtiyaç duyulan uyarım regülatörü çok daha küçük boyutlarda bir cihaz olabilmektedir. Bu özellik, alternatöre doğrudan ihtiyaç duyduğu uyarım akımının verilmesi yerine, alternatörün içerisinde bulunan yardımcı bir stator sargısına düşük miktarda DA gerilim uygulanması ve bu gerilim sayesinde rotorda endüklenen (rotorun dönme hareketi ile) alternatif gerilimin döner diyot köprüsünde doğrultularak ihtiyaç duyulan uyarım akımının elde edilmesi tekniğine dayanmaktadır. Bu sayede alternatöre dışarıdan uygulanan uyarım akımı doğrudan rotora uygulanandan çok daha düşük olmaktadır. Sonuçta elde edilen üç fazlı alternatif gerilim, doğrultucu bloklarında doğrultulduktan sonra alternatif akım cer motorlarını sürmekte kullanılan gerilim kaynaklı eviricilere aktarılır. Bu eviricilere uygun tetikleme sinyallerini gönderen çekiş kontrol sistemleri yardımıyla farklı kontrol yöntemleri ile (doğrudan moment kontrolü, skaler veya vektörel kontrol yöntemleri) alternatif akım cer motorlarının kontrolü sağlanır. Burada lokomotifin tipine göre her cer motoru bir evirici tarafından veya her cer motoru grubu (farklı sayıda cer motoru içerebilir) bir evirici tarafından sürülebilir. Aynı şekilde doğrultucu kısmında da her evirici bir doğrultucudan veya ortak DA bara kullanılarak her evirici grubu (farklı sayıda evirici içerebilir) bir doğrultucudan beslenebilir. Şekil 4'te TÜLOMSAŞ tasarımı bir manevra lokomotifini olan DE 10000K için blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4. DE 10000K güç aktarım blok diyagramı

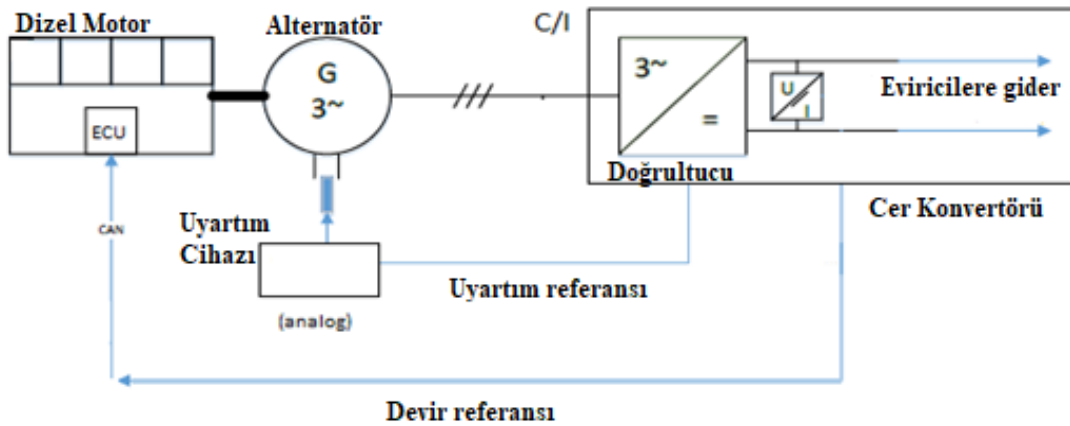
DE 10000K lokomotifini her cer motorunun bağımsız bir evirici tarafından sürüldüğü, her eviricinin ise tek bir doğrultucu çıkışındaki ortak DA baradan beslendiği sistemlere örnektir.

Bu lokomotifte kullanılan cer motorları kafes rotorlu asenkron motorlardır. Kafes rotorlu asenkron motorlar bilindiği gibi fırçasız ve doğru akım motorlarına göre daha sağlam bir yapıdadırlar. Bu sağlamlığı büyük ölçüde, doğru akım motorlarının aksine komütasyonsuz çalışmalarına borçludurlar.

Demiryolu Mühendisliği

Bu tip güç aktarımına sahip cer sistemlerinde de kontrolün cer motorlarına uygulanan gerilimin değişimi ile yapılacağı açıktır. Ancak bir önceki bölümde anlatılan sistemlerden farklı olarak bu kez makinist, cer kolu ile doğrudan cer motorlarına uygulanan gerilimi kumanda etmektedir. Bu kontrol, cer kontrol ünitesinin cer kolundan gelen bilgiye göre eviricilere uygulanan tetikleme sinyallerini kumanda etmesiyle mümkün olmaktadır. DE 10000K lokomotifinde cer motorlarına uygulanan gerilimin artmasıyla birlikte DA bara gerilimi ve dolayısıyla alternatör uç gerilimi düşmektedir. Bu kez jeneratör-set kontrol ünitesi devreye girmekte ve uç gerilimindeki düşmeyi karşılayacak şekilde alternatör uyarımını arttırmaktadır. Bu artış ile birlikte alternatörün dizel motordan talep ettiği moment artmakta ve buna bağlı olarak dizel motor devri (dolayısıyla frekans) düşmektedir. Yine jeneratör-set kontrol ünitesi bu düşmeyi karşılayacak şekilde dizel motor elektronik kontrol ünitesine gönderdiği devir referansını arttırmakta ve devirdeki düşüş, dizel motor elektronik kontrol ünitesinin bir aktüatör yardımı ile dizel motora verilen yakıtı arttırması ile karşılanmaktadır. Bu sayede dizel motor tarafından tüketilen enerji ve lokomotifte uygulanan çekiş kuvveti arttırılmış olmaktadır. Bütün bu kontrolün bir çevrimde (saykıl) yapıldığı unutulmamalıdır. Jeneratör-set kontrol ünitesi alternatör tarafından talep edilen devir-güç eğrilerine göre dizel motora hangi güçlerde hangi devirde dönmesi gerektiği bilgisini (devir referansı) göndermektedir. Bu eğrilerdeki devir ise alternatörden talep edilen gerilimlere göre (devir-gerilim eğrisi) belirlenmektedir. Ayrıca; dizel motor yüklenme bilgisi jeneratör-set kontrol ünitesi tarafından seri haberleşme ile alınmakta ve bu sayede dizel motor elektronik kontrol ünitesine daha yüksek doğrulukta bir devir referans sinyali uygulanmaktadır.

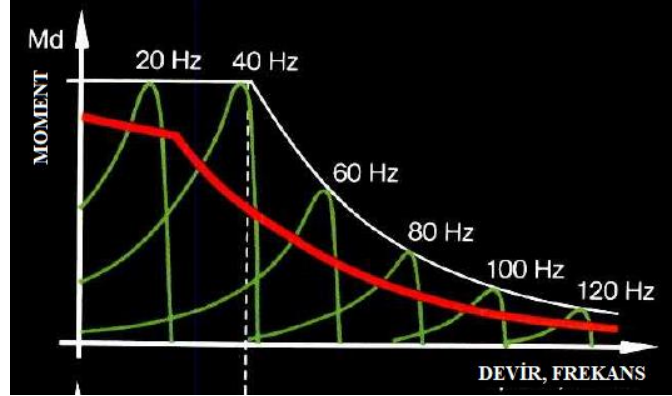
Önceki bölümde anlatılan sistemdekinden farklı olarak alternatif akım cer sistemine sahip lokomotiflerde, doğru akım yerine alternatif akım kullanılmasının doğal bir sonucu olarak cer motorlarına uygulanan gerilimin sadece genliği değil, genliği ve frekansı kontrol edilmektedir. Bilindiği gibi frekans doğrudan doğruya cer motorunun dolayısıyla lokomotifin hızını belirleyecektir. Ancak gerilimden bağımsız olarak frekansı değiştirmek, farklı dinamik etkiler nedeniyle mümkün olmamaktadır. Basitçe açıklamak gerekirse çıkışında belli bir yük momentine sahip bir asenkron motoru belli hızlara çıkarmak için uygulanan gerilimin belli bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde yük momenti, o frekanstaki devrilme momentinin üstünde kalacağından motor duracaktır. Bunun önüne geçilmesi için cer motorunun belli bir gerilim-frekans oranına göre kalkışı ve kontrolü sağlanır. Ayrıca; böyle bir sistemde her fren yapıldığında motorlar jeneratör modda çalışacağından DA bara gerilimi yükselecektir. Bu gerilim uygun anahtarlama elemanları ile yönlendirilerek aşırı gerilim koruma dirençlerinde sönmülenir. Şekil 5'te DE 10000K'ya ait blok şemada yukarıda anlatılan kontrol sistemi görülmektedir. Dizel jeneratör-set kontrol ünitesi cer konvertöründe bulunan bir kontrolcü olduğu için blok şemada ayrıca gösterilmemiştir.



Şekil 5. DE 10000K dizel jeneratör-set kontrolü

Demiryolu Mühendisliği

Çekiş sistemlerinde kullanılan asenkron motorların kontrolü hakkında lokomotifin çekiş eğrisine göre cer motorunun devir-moment eğrilerinin yer aldığı Şekil 6 fikir verebilir. Maksimum momentin istendiği nominal çalışma noktasından sonra motor alan zayıflatma bölgesinde çalışarak daha düşük yüklerde daha yüksek hızlara çıkabilecektir. Kırmızı eğri ile lokomotifin hız-kuvvet eğrisi gösterilmektedir. Toplam kuvvet ile moment arasında tekerlek çapı, dişli çevirme oranı ve lokomotifteki toplam cer motoru sayısı ile geçiş yapılabileceği unutulmamalıdır. Motorda üretilen momente göre devir değişimi ise yine Denklem 3'te verilen hareket denkleminde bulunabilir. Bu noktada yük momentinin belirlenmesi dişlilerdeki aktarma, dizinin toplam ağırlığı, yol koşulları, tekerlek yol arasındaki aderans, rüzgar direnci gibi bir çok parametreye göre değişeceğinden teorik olarak belirlenmesi zor olmakla birlikte hesaplanması için bir takım ampirik formüllerden faydalanılabilir [6, 8].



Şekil 6. Cer motoru devir-moment ve lokomotif hız-kuvvet eğrileri

5. Sonuç ve Yorum

Yapılan incelemeler açıkça göstermektedir ki 3. Bölümde anlatılan ve açık çevrim bir güç kontrolüne sahip olan doğru akım cer sistemine göre 4. Bölümde anlatılan ve kapalı çevrim kontrole sahip (hatta birden fazla kapalı çevrim kontrol içeren) alternatif akım cer sistemi daha etkili ve güvenli bir kontrol imkanı sunmaktadır. DE 24000 lokomotifin 1960'larda, DE 10000K'nın ise 2019'da tasarımının tamamlanması ve bu yıllar arasında güç elektroniğinin yaygınlaşarak raylı sistemlere de girmiş olması bunun temel sebebi olarak gösterilebilir.

3. ve 4. Bölümde incelenen topolojilerin çalışma sistemleri dikkate alınırca DE 10000K'ya ait topolojinin daha kompakt bir yapıya sahip olduğu halde çok daha karmaşık işlemleri daha hızlı yapabildiği ve etkili bir kontrol imkanı sağladığı açıkça görülmektedir. Gerek dizel jeneratör-set kontrolünün iyileştirilmesi sayesinde tepki sürelerinin kısılması gerekse cer motorlarının daha etkili sürülmesi sonucu artan çekiş ve patinaj performansı bu tip modern cer sistemine sahip lokomotifleri diğerlerinden üstün kılmaktadır. DE 10000K'da kullanılan fırçasız uyartım tipi alternatörün DE 24000'dekine göre yüksek verimli olması lokomotif verimine de yansımaktadır. Yine DE 10000K'da kullanılan asenkron cer motorlarının DA motorlara göre daha verimli olmaları (iki sistem yakın güçlerde olmadığından motor ve alternatörlerinin birebir karşılaştırılması uygun görülmemekle birlikte) bu tip sistemlerde lokomotif veriminde ciddi bir artışa yol açmaktadır. Ayrıca asenkron motorların sağlam yapılarının doğal bir sonucu olarak daha az bakım gerektirmeleri kullandıkları lokomotifin bakım maliyetlerini düşürmektedir.

Demiryolu araç dinamiğinin daha ileri çalışmalarda lokomotiflerin çekiş ve yük eğrileri ile birlikte çekiş performanslarının detaylı incelenmesi için çalışılması düşünülmektedir. Bu sayede lokomotif çekiş sistemlerinin matematiksel modelleri oluşturularak simülasyonlarının yapılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

TÜLOMSAŞ Ar-Ge Dairesi Başkanlığı'ndaki çalışma arkadaşlarıma tasarımdaki özverili çalışmaları ve bu makaleye olan katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] H. Deveci, "Matris Çeviricilerde Dolaylı Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Yöntemi ve Matris Çevirici ile Beslenen Bir Asenkron Cer Motorunun Kontrolü" Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2019
- [2] M. Syiryagin, P. Wolfs, C. Cole, V. Spiriyagin, Y.Q Sun, T. McSweeney, *Design and Simulations of Heavy Haul Locomotives and Trains*, London, 2017, CRC Press.
- [3] İ. Gündüz, H. Soltekin, *DE24000 Tipi Lokomotif Eğitimi*, Eskişehir, TCDD Eskişehir Eğitim Merkezi Müdürlüğü, 2005.
- [4] S.V.M.B. Prabhath Kiran, C.H. Anil Bharadwaj, "An Algorithm for the Analysis of Transient and Steady States in a DC Motor" *International Journal of Electrical and Electronics Engineering(IJEEE)*, ISSN (PRINT): 2231 – 5284, vol. 3, Issue-1, 2013.
- [5] O. I. Okoro, C. U. Ogbuka, M. U. Agu, "Simulation of DC Machines Transient Behaviors: Teaching and Research" *Pacific Journal of Science and Technology*, 9(1):142-148, 2008
- [6] C. Urlu, *Demiryollarında Tren Dinamiğine Giriş*, İzmir, TCDD Matbaası, 1990 .
- [7] C. F. Bonnet Clifford, *Raylı Sistemlerin Temelleri*, Ankara, Nobel Yayıncılık, 2013.
- [8] A. Rassolkin, H.Hoimoja, "Calculation of the Traction Effort of Switching Locomotive" *11th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*, Parnu, Estonia, 2012.

Özgeçmiş



Halil DEVECİ

1993 yılında Isparta'da doğdu. 2012 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünü 2016'da tamamladı. Aynı yıl Elektrik Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans öğrenimini 2019'da tamamlamıştır. Lisans mezuniyetinden sonra özel sektörde çalışmıştır. 2017 Aralık'ta Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayi A.Ş.'de ar-ge mühendisi olarak göreve başlamıştır. Halen bu kurumda ar-ge tahrik sistemleri tasarım ve projelendirme şef vekili olarak görevini sürdürmektedir.