



Raylı Ulaşım Sistemlerinde Tahrik Amaçlı Katı Hal Transformatörü Kullanımı

Uğur Emre DOĞRU*, Özcan KALENDERLİ

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı,
34467, İstanbul, Türkiye*

*uguremre.dogru@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9785-4608

(Alınış/Received: 16.05.2019, Kabul/Accepted: 22.07.2019, Yayımlama/Published: 31.07.2019)

Özet: Bu çalışmada demiryolu uygulamalarında yaygın kullanılan tahrik sistemlerinin yanında alternatif bir sistem olarak beliren katı hal transformatörü devre topolojisinin bir değerlendirmesi ve devre benzetimi gerçekleştirilmiştir. Makalede, önce bilinen yaygın tahrik sistemleri incelenmiş; daha sonra katı hal transformatörü ve yaygın sistemlere göre avantajlarından ve dezavantajlarından söz edilmiştir. Son olarak da örnek yük olarak seçilen Durmazlar firmasının ürettiği İpekböceği tramvayı seçilmiş ve bu örnek yük üzerinden bir katı hal transformatörü tahrik devresi benzetim yoluyla PSIM programında çalıştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda önerilen katı hal transformatörü devre topolojisinin bir doğru akım tahrik sistemine sahip olan tramvayı maksimum hızıyla ve teknik özelliklerine uygun bir biçimde çalıştırdığı görülmüştür. Katı hal transformatör devresinin toplam verimi %93 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak katı hal transformatörü devre topolojilerinin demiryolu uygulamaları başta olmak üzere başka tahrik uygulamalarında da öne çıkabilecek bir alternatif olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Transformatör, tahrik, katı-hal, demiryolu, rezonans çeviriciler

The Use of Solid State Transformer for Traction in Railway Systems

Abstract: In this study, solid state transformer circuit topology which is an alternative to current conventional traction systems is investigated using simulation tools. First, conventional traction systems are investigated then the solid-state transformer topology is introduced with its advantages and disadvantages. At last, a sample load is selected for simulation. The load is a tram named silkworm (ipek böceği in Turkish) manufactured by Durmazlar. This sample load is driven with designed solid-state transformer circuit using simulation tool named PSIM. In conclusion it is seen that the proposed solid-state transformer system can drive aforementioned sample load which has direct current traction system commercially at maximum speed with needed specifications. Total efficiency of the solid state transformer system is 93%. It can be accepted that solid-state transformer circuit topologies are suitable alternatives for traction purposes.

Key words: Transformer, traction, solid-state, railway, resonant converters

1. Giriş

1800'lü yılların başında buharlı motorun bulunmasıyla birlikte gerçekleşen sanayi devriminin en önemli çıktılarından biri üretimin hızlanması ve üretilen ürünlerin kitlelere hızlıca ulaştırılması olmuştur. Demiryolu da bu gereken hızın doğal bir sonucu olarak doğmuştur. Buharlı lokomotifler gerek yüklerin gerekse de insanların çok uzak mesafelere hızlıca taşınmasını sağlamıştır. Yıllar geçtikçe gelişen teknoloji ile birlikte trenlerin hem verimi, hem hızları hem de kullanım alanları artmıştır. Buharlı trenlerin yerine bugün 500 kilometre/saat hızlara ulaşabilen trenlerle yolcular uzak mesafeleri kolayca alabilmekte; üretim çıktıları ürünler tonlarca kütlelerine rağmen hedeflerine kolayca ulaştırılabilmektedir.

Atif için/Cite as: U. E. Doğru, Ö. Kalenderli, "Raylı ulaşım sistemlerinde tahrik amaçlı katı hal transformatörü kullanımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 63-74, July 2019.

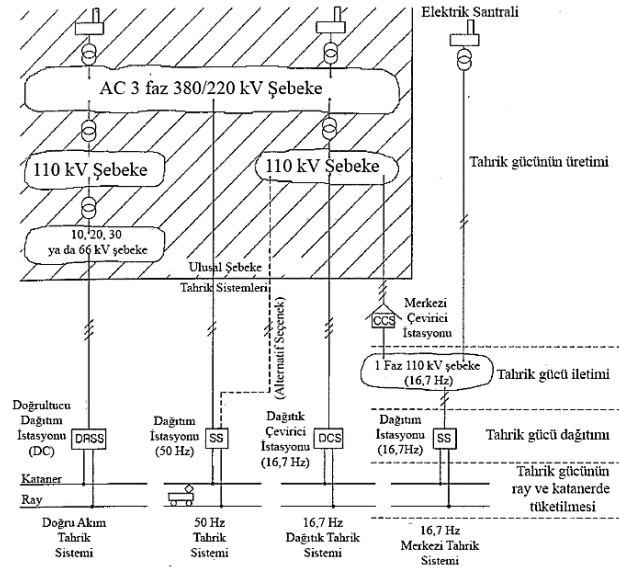
Demiryolu Mühendisliği

Trenlerin sahip olduğu bu gelişim, trenlerin tahrik sistemine de yansımış; buhar motorlarının yerini ilk önce dizel motorlar daha sonra da elektrik motorları almıştır. Bugün elektrik motorlarına sahip trenler büyük bir paya sahiptir. Tahrik sistemi açısından elektriği kullanan trenler, kontrolü ve verimi açısından ön plandadır. Elektrikli trenlerin tahrik sistemleri, alternatif akım tahrik sistemleri ve doğru akım tahrik sistemleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Her iki tahrik sistemi de birbirinin alternatifi gibi gözükse de kurulum ve tasarım bakımından güç değerleri öncelikli kullanılırlar. Geçmişte doğru akım tahrikli trenler yaygın gözükse de; verim, mesafe ve güç ihtiyacı göz önüne alındığında alternatif akım tahrikli trenler de kullanılmaya başlanmıştır. Bir Avrupa normu olan "EN 50163: Demiryolu Uygulamalarında Besleme Gerilimleri" standardında, kullanılan sistemlerin en düşük ve en yüksek gerilim değerleri, Tablo 1'deki gibi verilmiştir.

Tablo 1. EN 50163'te belirtilen gerilim değerleri [1].

Sistem	Geçici Alt Gerilim [V]	Kalıcı Alt Gerilim [V]	Anma Gerilimi [V]	Kalıcı Üst Gerilim [V]	Geçici Üst Gerilim [V]
Doğru Akım	400	400	600	720	800
	500	500	750	900	1000
	1000	1000	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900
Alternatif Akım	11000	12000	15000	17250	18000
	17500	19000	25000	27500	29000

750 V doğru akım ile 25 kV, 50 Hz alternatif akım tahrik sistemleri yaygın olarak kullanılsa da şehir içi gerilime karşı korumanın zor olacağı bölgelerde indirilmiş 600 V doğru akım ile Afrika ve Amerika ülkelerinde uzun mesafelerde yük taşımacılığı yapmak için düşük frekanslı yüksek gerilimli uygulamalar da görülmektedir. Demiryollarında kullanılan tüm tahrik sistemlerini Şekil 1'deki gibi özetlemek mümkündür.

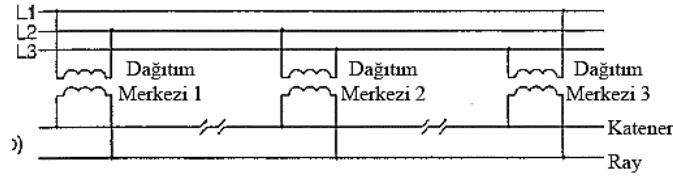


Şekil 1. Demiryollarında kullanılan tahrik sistemleri [2].

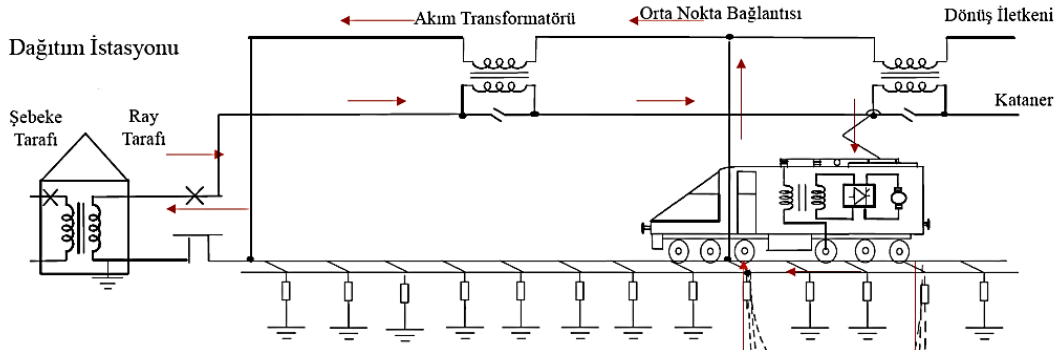
Alternatif akım tahrik sistemlerinde trene güç aktarımı indirici merkezler aracılığıyla gerçekleşir. 154 kV ya da 380 kV baralarından tahrik transformatörleri yardımıyla gerilim 25 kV, 50 Hz gerilime düşürülür. Bu gerilim, kataner yardımıyla trene aktarılır. 40 km ile 60 km arasında yerleştirilen transformatör merkezleri yardımıyla demiryolunun güç beslemesi

Demiryolu Mühendisliği

gerçekleştirilir (Şekil 2). Tren üzerinde bulunan güç elektroniği devreleriyle elektrik motoru sürülür. Bu işlem, alternatif akımlı sistemlerde bir güç elektroniği devresi ile gerçekleşmektedir. Evirici devreleri gibi karmaşık yapıları devreler kullanılabilirdiği gibi triyak, tristör yarıiletkenleri ile kurulan devrelerle de yapabilmek mümkündür. Alternatif akım tahrik sistemlerinin en büyük avantajı yüksek güç ihtiyaçlarının uzun mesafeler boyunca düşük kayıplarla karşılanabilmesidir. Bu sistemlerin en belirgin dezavantajı ise üç fazlı bir ana dağıtım şebekesinde, yükün tek fazlı olmasıdır. Bu da enerji kalitesi problemi yaratabilmektedir. Bu problemi aşmak için her merkezde kullanılan tahrik transformatörlerinin farklı faza bağlanması gibi çözümler kullanılmaktadır. Ayrıca akım transformatörleri ve dönüş akımlarının hava hattı ile taşınması gibi ek uygulamalarla rayda bulunan hassas elektronik devrelerinin etkilenmesi önlenmiş olur (Şekil 3).



Şekil 2. Alternatif akım tahrik sistemlerinde dağıtım merkezlerinin bağlantıları [2].

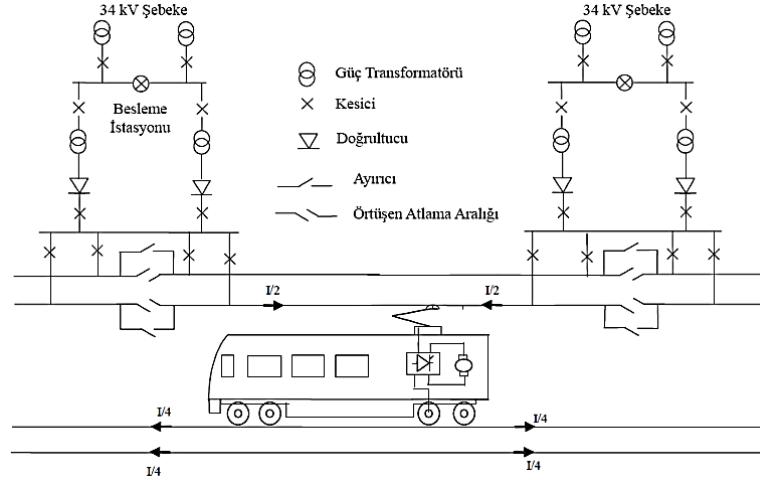


Şekil 3. Alternatif akım tahrik sistemlerinde akım transformatörü kullanımı [3].

Alternatif akımlı sistemlerde yaygın kullanılan gerilim 25 kV, 50 Hz olsa da, gücün daha kayıpsız aktarımı için düşük frekanslı aktarımı ve daha yüksek gerilim uygulamaları için çift sarımlı transformatör yardımıyla 2×25 kV, 50 Hz gerilime ve frekansa sahip sistemler de kullanılabilir. Bu sistemlerde yaygın kullanılan gerilim 25 kV, 50 Hz olsa da, gücün daha kayıpsız aktarımı için düşük frekanslı aktarımı ve daha yüksek gerilim uygulamaları için çift sarımlı transformatör yardımıyla 2×25 kV, 50 Hz gerilime ve frekansa sahip sistemler de kullanılabilir.

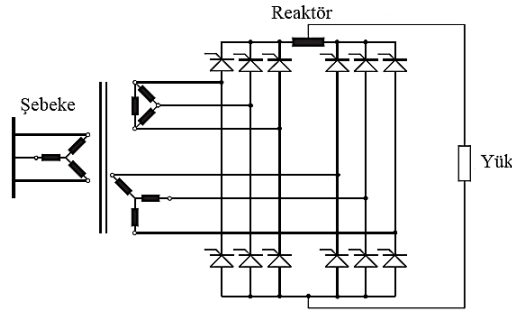
Doğru akım tahrik sistemleri ilk elektrikli tren uygulamalarında gözükse de günümüzde şehir içi toplu ulaşım uygulamalarında ve banliyö trenlerinde kullanılmaktadır. Genellikle 750 V, 1500 V ve 3000 V seviyelerinde uygulamaları bulunmaktadır. Kalabalık caddelerde, yolcu ve yayayı koruma amaçlı indirgenmiş 600 V uygulamaları da bulunmaktadır. Bu tahrik sisteminde gerilim 34,5 kV orta gerilim seviyesinden tahrik transformatörü yardımıyla indirilip doğrultucu ile doğru akıma çevrilir. 750 V için 3 km; 1500 V için ise 2 km ile 8 km aralıklarında merkezler kurularak hattın beslenmesi sağlanır. Bir doğru akım tahrik sisteminin genel şeması Şekil 4'te görülmektedir.

Demiryolu Mühendisliği



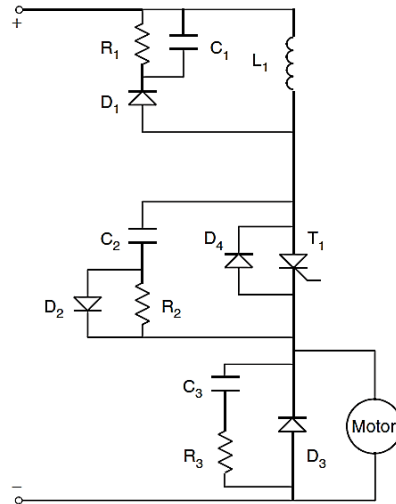
Şekil 4. Doğru akım tahrik sistemlerinde güç aktarımı [3].

Besleme merkezlerinde gerçekleşen doğrultma işlemi için hem enerji kalitesi hem de verim açısından 12 darbeli doğrultucular tercih edilir (Şekil 5). 3/6 fazlı yıldız/üçgen+yıldız bağlantılı bir transformatör yardımıyla tristörler kullanılarak doğrultma işlemi yapılır. Standart 6 darbeli doğrultucuya kıyasla, 12 darbeli doğrultucularda şebekeye geri dönen toplam harmonik bozunumun %50 azaldığı tespit edilmiştir [4].



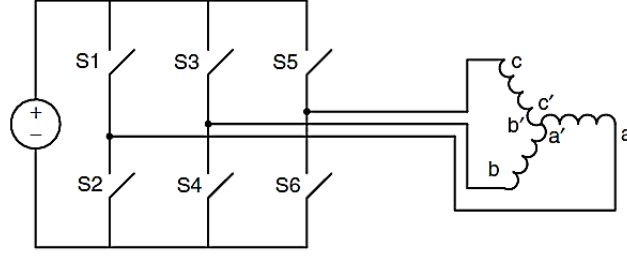
Şekil 5. 12 darbeli doğrultucu yapısı [5].

Doğru akım sistemlerinin, alternatif akımlı sistemlere karşılık en büyük avantajı daha basit kontrol sistemlerine ihtiyaç duymasıdır. Modern güç elektroniği ile doğru akım motorlarının sürülmesi kolaylaşmış ve verimi artırılmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7).



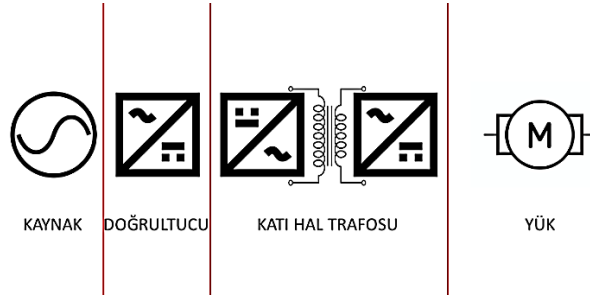
Şekil 6. Doğru akım motoru sürücü devresi [5].

Demiryolu Mühendisliği



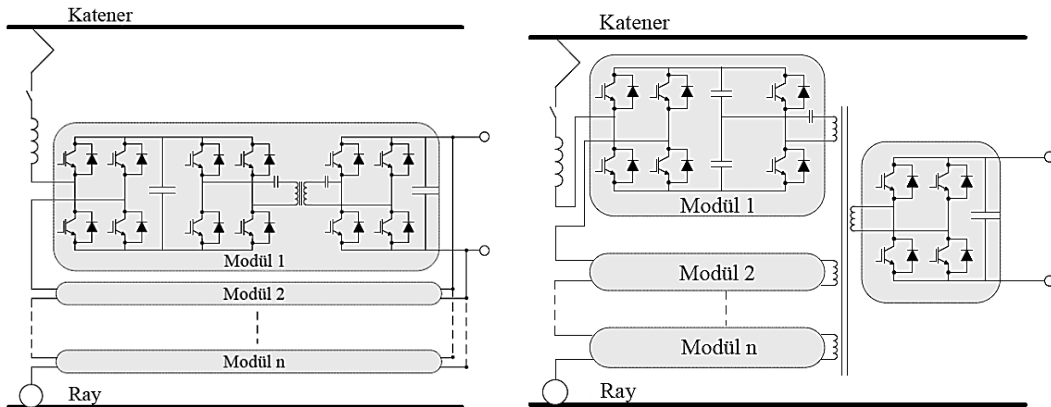
Şekil 7. Modern motor sürücü devreleri [5].

Yukarıda sözü edilen her iki sisteme alternatif olarak görülebilecek katı hal transformatörlerinde ise gücün aktarımı düşük frekanslı transformatörlerin yerine güç elektroniği devreleri vasıtasıyla gerçekleşir (Şekil 8). Düşük frekanslı tahrik transformatörlerinin sahip olduğu büyük hacim ve ağır kütleleri yerine, güç elektroniğindeki yarıiletken anahtarlama elemanları aracılığıyla yüksek frekansta güç aktarımı gerçekleşir ve lokomotiflerde büyük hacim kazancı sağlanır. Katı hal transformatörlerinde güç aktarılırken önce bir doğrultucu yardımıyla gerilim doğrultulur. Ardından evirici devreler kullanılarak yüksek frekanslı alternatif akım yaratılır. Bu devrede kullanılan yüksek frekanslı bir transformatör yardımıyla istenilen gerilim seviyesine ulaşılır. İstenildiği takdirde tekrar doğrultularak katener üzerinden güç trene aktarılır ya da bu devre lokomotif üzerinde kullanılarak motor sürücülerine aktarılır. Devrede tam köprü doğrultucu/evirici/doğrultucu devreleri sırasıyla kullanılmasının yanında, evirici devresinde kullanılan tam köprü evirici yerine kullanılacak bir rezonans çevirici sayesinde anahtarlama kayıpları ciddi miktarda azaltılmaktadır [6].



Şekil 8. Katı hal transformatörlerinde güç aktarımı akışı.

Katı hal transformatörlerinin yaygın sistemlere göre bir diğer avantajı da modüler bir yapıya sahip olmasıdır (Şekil 9). Modüler yapı onarım ve bakım giderlerini azalttığı gibi artan ya da azalan ihtiyaca da hızlıca yanıt verebilme olanağını yaratmaktadır.



Şekil 9. Katı hal transformatörlerinin farklı modüler kullanımları [7].

Demiryolu Mühendisliği

Katı hal transformatörlerinin en önemli elemanlarından biri merkezinde bulunan yüksek frekanslı gerilim transformatörüdür. Transformatörün tasarımı sırasında hava aralığı mesafesinin, sarım tasarımının, ferrit çekirdeğin seçimi devrenin toplam performansını ve verimini ciddi anlamda etkilemektedir. Devre tasarımında rezonans çevirici kullanıldığında, transformatörde oluşan kaçak endüktans, anahtarlama elemanlarının komütasyon zamanını doğrudan etkilemektedir. Denklem 1’de rezonant LLC dönüştürücüsünün rezonans frekansının hesaplaması gözlemlenmektedir.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{(L_m + L_r)C_r}} \quad (1)$$

Denklem (1)’de ω_r devrenin rezonans frekansını, L_m transformatördeki mıknatıslanma endüktansını, L_r rezonans endüktansını ve C_r ise rezonans kapasitesini belirtmektedir. Kaçak endüktans L_m değerini doğrudan etkileyerek devrenin rezonans frekansının değişmesine sebep olur. Transformatörün tasarımında L_m değeri belirlenirken, seçilen rezonans endüktansının iki ile üç katı arasında olması istenmektedir. Bu değeri sağlayabilmek için transformatörün yukarıda söz edilen tasarım ölçütleri göz önüne alınmaktadır.

Katı hal transformatörü üzerine yapılan çalışmalar ABB, Bombardier, Alstom gibi raylı sistemler sektöründe öncü firmalar tarafından yapılmakla birlikte ETH Zurich ve EPRI gibi üniversitelere bağlı enstitülerde de devam etmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Katı hal transformatörü üzerine yapılan çalışmalar [8]

Sistem	Güç [kW]	Frekans [kHz]	Verimlilik [%]
ALSTOM 2003	180	5	Veri Yok
BOMBARDIER 2007	500	8	97
UNIFLEX 2009	25	2	92
FREEDM 2010	7	3	90,88
EPRI 2012	50	20	96
FREEDM 2012	20	20	94,8
ABB 2013	150	1,8	93
ETH Zurich 2013	166	20	97
NCSU 2016	16	50	96

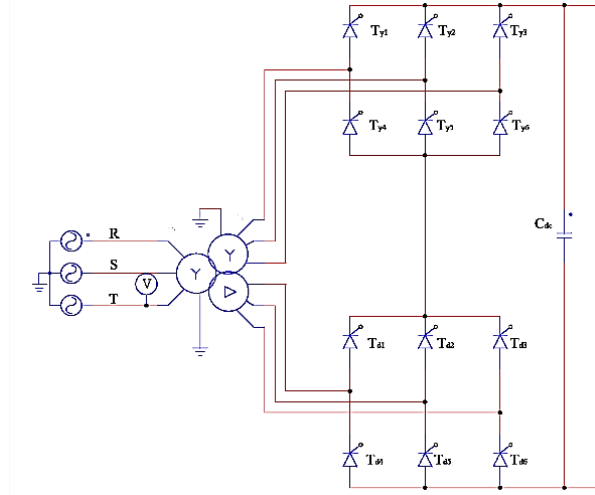
2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada önerilen yöntem üç ana bölümden oluşmaktadır; orta gerilim hattından alınan gerilimin doğrultulduğu bölüm, katı hal transformatörü ile gücün aktarılması ve yük sürücü devresi.

2.1. Doğrultucu katı

Kurulan benzetim modelinde 34,5 kV’luk bir orta gerilim şebekesine yıldız / üçgen+yıldız 3/6 faz transformatörü bağlanmıştır. 15/1/1 şeklinde sarım sayısı kabul edilerek 2,3 kV etkin değere sahip alternatif gerilime dönüştürülmüştür. Transformatörün çıkışında 12 darbeleri doğrultucu kullanılarak oluşturulacak doğru akımın genliği kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Çıkışındaki kondansatör bankı ile gerilim üzerindeki dalgalanmalar bastırılmıştır (Şekil 10).

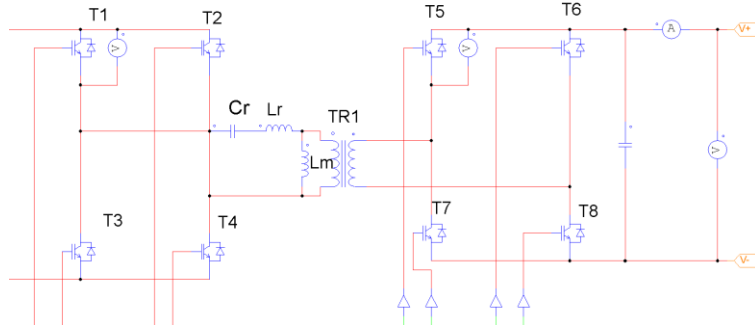
Demiryolu Mühendisliği



Şekil 10. Orta gerilim şebekesinden alınan gücün doğrultulması

2.2. Katı hal transformatörü bölümü

İkinci aşamada katı hal transformatörünün tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 11). Yapıda iki adet tam köprü evirici ve doğrultucu kullanılmıştır. Anahtarlama kayıplarını azaltmak amacıyla devre yapısı, transformatörün mıknatıslanma endüktansı da kullanılarak LLC yapısındaki seri rezonans çeviriciye dönüştürülmüştür. IGBT elemanlarının doluluk oranı %50 olarak alınmıştır ve rezonans frekansı 60 kHz seçilmiştir. Devrede transformatörün kaçak endüktansı ihmal edilmiştir. IGBT'lerin anahtarlama frekansı ise 56 kHz seçilmiştir.



Şekil 11. Katı hal transformatörü devre şeması.

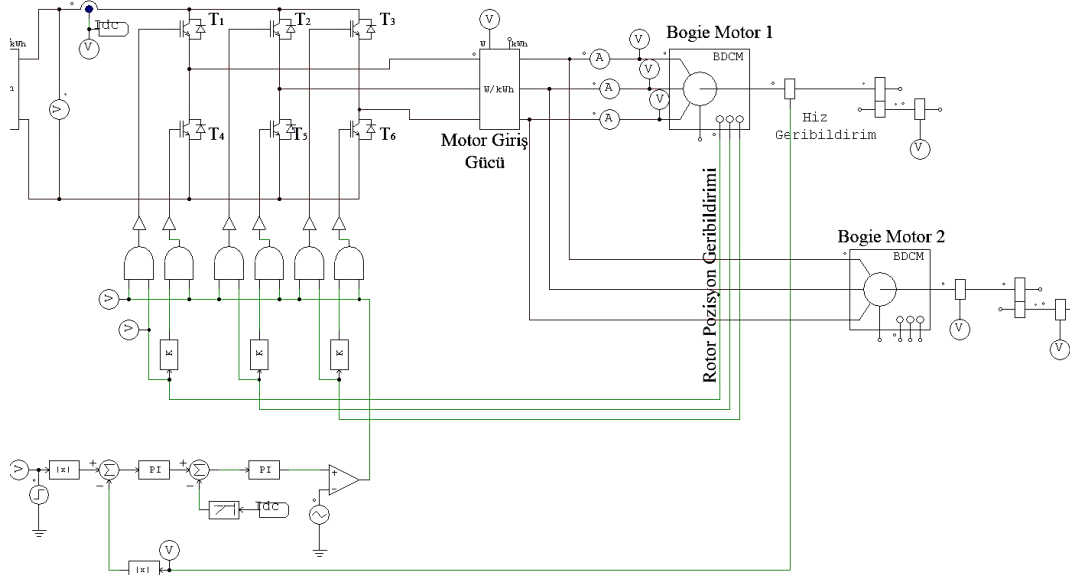
2.3. Motor sürücü devresi

Katı hal transformatörü benzetim modelinin doğru çalışıp çalışmadığını anlamak için bir örnek yük seçilmiş ve buna uygun bir motor sürücü devresi tasarlanmıştır (Şekil 12). Yük olarak, Bursa'da şehir içinde kullanılan Durmazlar firmasının ürettiği İpekböceği tramvayı alınmıştır (Tablo 3). Bojide bulunan motorları temsilen iki adet fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Hız kontrolü sağlamak amacıyla da PI kontrolör devresi kurulmuştur. Motordan alınan geribildirim ile IGBT'lerin anahtarlama yapıları gerçekleştirilmiştir. PI kontrolör devresinde iki ayrı PI modülü bulunmaktadır. Birincisi hız geribildirimini için; diğeri ise sürücü giriş akımı için kullanılmaktadır. İlkinde kazanç katsayısı 0.001, zaman katsayısı 0.0001 iken, diğeri ise kazanç ve zaman katsayıları olarak 0.002 ve 0.000001 olarak seçilmiştir.

Demiryolu Mühendisliği

Tablo 3. İpekböceği tramvayının teknik özellikleri [9].

Maksimum hız [km/sa]	70
Çalışma gerilimi [V]	750
Motor Gücü [kW]	2×100
Tekerlek çapı [mm]	600

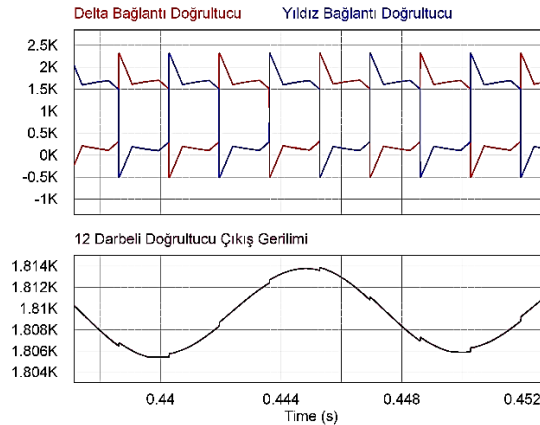


Şekil 12. Motor sürücü devresi.

3. Bulgular

Oluşturulan yöntem, PSIM devre benzetim programı aracılığı ile çalıştırılmıştır. Çalışma koşulları olarak tramvayın maksimum hızı referans alınmış ve bu maksimum hız sonucunda devrenin çeşitli noktalarında oluşan gerilim, akım ve güç değerleri ölçülmüş ve 1,5 saniye boyunca izlenmiştir. Benzetimin başlangıcında (sıfırıncı saniyesinde), vatmanın kontrol panelinden giriş yaptığı varsayılmıştır. Vatmanın verdiği hız girdisinin, tekerlek hızıyla eşleşip eşleşmediğini görmek için tekerleklerden takometre aracılığı ile devreye hız geribildirimi alınmıştır.

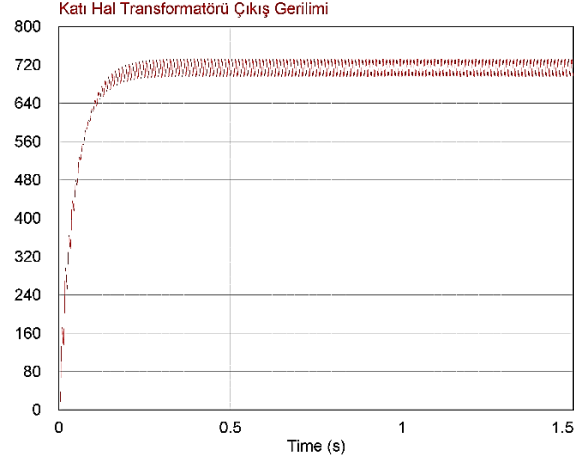
12 darbe doğrultucu çıkışını kontrol edildiğinde, hem üçgen hem de yıldız bağlantı noktalarında 900 V okunmuş, 12 darbe doğrultucunun da çıkışındaki doğru akım değerinin ortalama 1800 V olduğu saptanmıştır (Şekil 13).



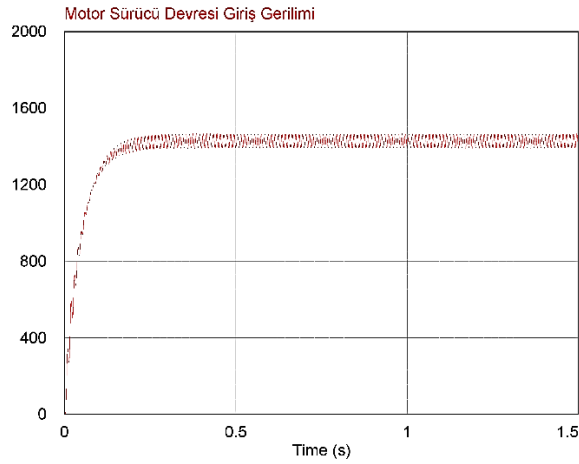
Şekil 13. 12 darbe doğrultucu çıkış dalga şekilleri.

Demiryolu Mühendisliği

Katı hal transformatörünün çıkış dalga şekilleri kontrol edildiğinde, çıkış geriliminin ortalama 690 V değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 14). İki adet katı hal transformatörü kullanılarak, motor sürücü devresi beslenmiştir. Motor sürücü devresinde ortaya çıkan gerilim değerinin ise 1380 V olduğu, dalgalanma oranının ise %5,18 olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 15).



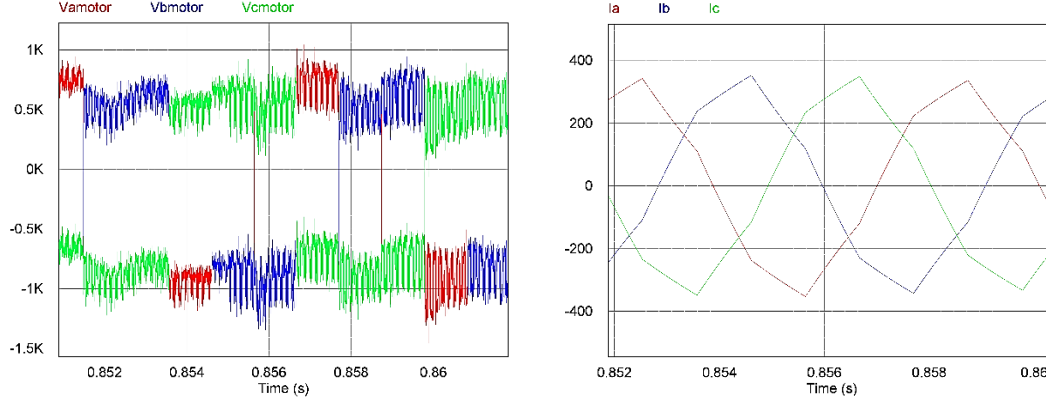
Şekil 14. Katı hal transformatörü çıkış gerilimi.



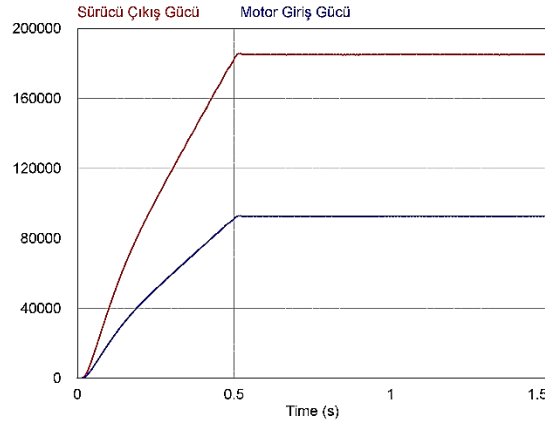
Şekil 15. Motor sürücüsündeki gerilim.

Fırçasız doğru akım motorlarının akım dalga şekilleri de ayrıca gözlenmiştir (Şekil 16). Dalgada görülen etkin değer 220 A olarak belirlenmiştir. Şekil 17'de motorlara giden toplam güç ve tek motorun aldığı güç değerleri görülmektedir. Motor sürücü gücü toplamda 185 kW ve her iki motorun da gücü eşit olarak paylaştığı görülmektedir. Motor sürücüsünün çıkış gücünde 500 W değerine sahip dalgalanma bulunmaktadır.

Demiryolu Mühendisliği

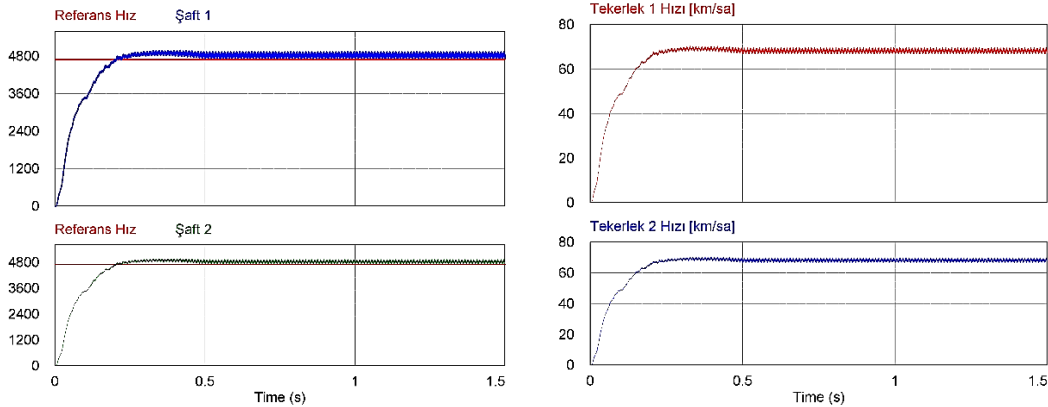


Şekil 16. Motor üç faz gerilim ve akım dalga şekilleri.



Şekil 17. Sürücü çıkış gücünün ve motor giriş gücünün zamanla değişimleri.

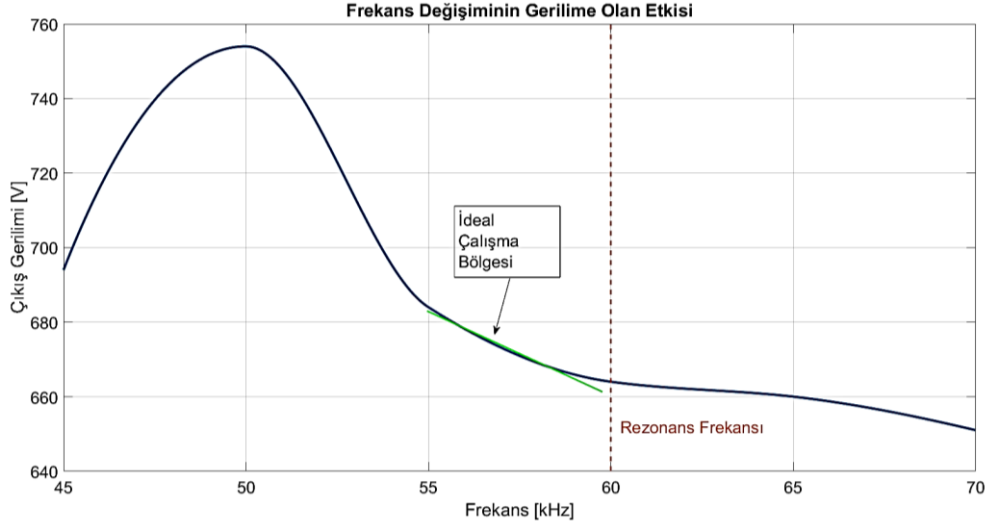
Tekerleklere konulan takometre aracılığı ile referans hız değeri ile tekerleklerin sahip olduğu hız değeri ölçülüp karşılaştırılmıştır. Her iki tekerlek üzerinden de okunan değer 68 km/saat hız olarak gözlemlenmiştir (Şekil 18).



Şekil 18. Tekerlek hızlarının devir/dk ve km/sa cinsinden değerleri.

Son olarak katı hal transformatöründe seri LLC rezonans çevirici kullanıldığı için gerilim-frekans karakteristiği, farklı anahtarlama frekansları kullanılarak çıkarılmıştır (Şekil 19). Rezonans çeviricilerde ideal çalışma bölgesinin rezonans frekansından hemen önceki bölge olduğu gözlemlenmiştir.

Demiryolu Mühendisliği



Şekil 19. Anahtarlama frekansının çıkış gerilimine etkisi.

Devrenin verimi, 12 darbe doğrultucu girişi ile motor sürücü devresinin çıkışı arasından ölçülmüştür. Kullanılan IGBT modellemelerinde piyasadaki yüksek güçlü IGBT modülleri incelenmiştir. Infineon ve Fuji markalarının modülleri incelendiğinde bu değerlerin 6500V, 500A seviyelerinde eşik direnç değerinin 10 Ohm olduğu gözlemlenmiştir. Devre modellerinde de IGBT modüllerinin eşik direnç değeri olarak yukarıdaki değer alınmıştır. Rezonant dönüştürücü devresinde kullanılan trafonun birincil sargı direnci primer tarafta 62 mΩ, sekonder tarafta ise 66 mΩ olarak alınmıştır. Yukarıda belirtilen her iki nokta arasına PSIM üzerinde güç analizörü modeli bağlanmıştır. Simülasyon süresi boyunca güç değerleri ölçülmüş ve değerler okunmuştur. Değerler okunduğunda 12 darbe doğrultucunun girişindeki okunan değer ile motor sürücü devresinin çıkışındaki güç değerinin oranı %93 olarak tespit edilmiştir.

4. Sonuç ve Yorum

Sonuç olarak katı hal transformatör devrelerinin, raylı sistemlerde tahrik amaçlı kullanılmasının uygun bir seçenek olduğu tespit edilmiştir. Doğru akım tahrik sistemine sahip bir örnek yükü güç aktarımı, benzetim programında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sahip olduğu %93 verim ile piyasada ticari ve akademik olarak çalışılan diğer katı hal transformatörlerinin değerlerine yakın bir değere sahip olduğu görülmüştür.

12 darbe doğrultucu aracılığıyla elde edilen 1800V katı hal transformatörü kullanılarak motor sürücü katına 690V olarak aktarılmış ve iki motorun, motor sürücü vasıtasıyla 68 km/sa hızla çalışması sağlanmıştır. Sistemin frekans/çıkış gerilimi cevabı seri rezonant LLC dönüştürücüye uygun bir şekilde olduğu tespit edilmiştir. Motor sürücü devresinde eviricinin gerilim ve akım grafikleri incelendiğinde üçgen biçiminde üretilen referans gerilime uygun bir biçimde, kare dalga gerilim ve sinüse yakın akım dalga formlarının olduğu görülmüştür.

Çalışmanın sonraki aşamalarında, alternatif akım tahrik sistemi için de aynı benzetimin tekrarlanması, hem katı hal transformatörü tahrik sistemi hem de yaygın kullanılan alternatif akım tahrik sistemi üzerinde çalışılarak karşılaştırmalı bir çalışma yapılması, bu konudaki araştırmaları ileriye taşıyacaktır.

Kaynakça

- [1] BS EN 50163, *Railway Applications. Supply voltages of traction systems*, 2005.
- [2] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, and E. Schneider, *Contact Lines for Electric Railways*, Publicis Publications, Germany, 2009.

- [3] R. D. White, "AC/DC Railway Electrification and Protection," *IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems*, London, 2014, pp. 1-42. doi: 10.1049/cp.2014.1439.
- [4] A. Hernadi, Taufik and M. Anwari, "Modeling and Simulation of 6-Pulse and 12-Pulse Rectifiers under Balanced and Unbalanced Conditions with Impacts to Input Current Harmonics," *2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*, Kuala Lumpur, 2008, pp. 1034-1038. doi: 10.1109/AMS.2008.88
- [5] M. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2nd Ed., 2007.
- [6] M. Steiner and H. Reinold, "Medium frequency topology in railway applications," *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2007.4417570.
- [7] D. Dujic, F. Kieferndorf, F. Canales, and U. Drofenik, "Power electronic traction transformer technology," *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Harbin, 2012, pp. 636-642. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6258820
- [8] S. Zhao, "High Frequency Isolated Power Conversion", M.Sc. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, Virginia Tech, VA, USA, 2016.
- [9] "İpekböceği Tramvayı Teknik Özellikleri", <http://www.durmaray.com/ipekbocegi-tramvay/2/3/5>, accessed May 12, 2019.

Özgeçmiş



Uğur Emre DOĞRU

1992 yılında doğdu. Lisans öğrenimini İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans öğrenimini ise İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı'nda tamamlamıştır. Arçelik firmasında ARGE mühendisi olarak çalışmaktadır.



Özcan KALENDERLİ

1956 yılında İstanbul'da doğdu. Lisans ve lisansüstü eğitimlerini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Aynı üniversitede Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Raylı Sistemler Mühendisliği Programı'na raylı ulaşım sistem elektroteknigi konusunda ders desteği vermektedir.