



Yüksek Güçlü Motor Sürücülerde Meydana Gelen Kayıpların Modellenmesi

Modelling of Power Losses in High Power Motor Drives

Ebrar Kağıt¹, Recep Tayyip Ödemiş¹, Mehmet Onur Gülbahçe²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

ebrar.kagit@stu.fsm.edu.tr, receptayyip.odemis@stu.fsm.edu.tr

²Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
ogulbahce@itu.edu.tr

Özet

Yüksek frekanslı ve yüksek güç yoğunluklu endüstriyel sürüş uygulamalarında karşılaşılan yüksek kayıplar sistem veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Bu noktada, yüksek güçlü sürücülerde sistem verimliliğinin ve güvenilirliğinin iyileştirilmesi, özellikle sürüş kalitesinin artırılması için sürücüde meydana gelen güç kayıplarının değerlendirilmesi giderek daha önemli bir hale gelmektedir. Bu çalışmada 1000V doğru akım bara gerilimine sahip 370kW gücünde endüstriyel bir motor sürücüdeki meydana gelen anahtarlama ve iletim kayıpları veri föylerinden alınan bilgiler doğrultusunda hesaplanarak MATLAB/Simulink ortamında üç farklı IGBT/Diyot modülü için detaylı bir şekilde modellenmiştir. Elde edilen model sayesinde kayıpların farklı anahtarlama frekansları için optimizasyonu yapılabileceği gibi farklı IGBT/Diyot modülleri kullanılması durumunda sistemin kayıplar açısından başarımı irdelenebilmektedir.

Abstract

High losses in high frequency and high power density industrial driving applications cause a decrease in system efficiency. At this point, it becomes more and more important to evaluate the power losses in the driver in order to improve the efficiency and reliability of the system, especially to increase the driving quality in high-power drive system. In this study, the switching and conduction losses in a 370kW industrial motor driver with 1000V DC bus voltage are calculated with the information obtained from the datasheets and modelled in detail for three different IGBT/Diode modules on MATLAB/Simulink environment. Thanks to the obtained model, the losses can be optimized for different switching frequencies and the performance of the system in terms of losses can be examined in the case of using different IGBT/Diode modules.

1. Giriş

Günümüzde birçok endüstriyel uygulama için vazgeçilmez bir unsur haline gelen motor sürücüler herhangi bir doğru gerilim kaynağından alınan gerilimi işleyerek motora uygulanan gerilimin genliğini ve frekansını istenilen şekilde ayar etmek için kullanılan güç elektroniği devreleridir. Son yıllarda yarı iletken güç anahtarlarında kaydedilen gelişmeler statik güç dönüştürücü sistemlerinde ve endüstriyel motor sürücü sistemlerinde yeni ufuklar açmıştır [1].

Yüksek güçlü endüstriyel motor sürücülerde yüksek gerilim ve akım altında anahtarlama yapabilen IGBT (Yalıtılmış kapılı bipolar transistör) anahtarlar kullanılmaktadır [2]. Endüstriyel motor sürücüler bir doğru gerilim barasından beslenerek genellikle 3 fazlı, genliği ve frekansı ayarlanabilen sinüzoidal bir çıkış gerilimi üretmektedir. Çıkıştaki sinüs biçimli gerilimi oluşturmak için yarı iletken anahtarlarının seçilen modülasyon stratejisine göre verilen belirli zamanlarda kontrol edilmesi gerekmektedir. Anahtarlama eyleminin doğası gereği sürücü çıkışında asla mükemmel bir sinüzoidal gerilim üretilemez ve bu yüzden çıkış geriliminin dalga formu her zaman harmonikler içermektedir. Yüksek güçlü IGBT'lerin anahtarlama frekansındaki sınırlamalarından dolayı sürücü çıkışındaki gerilim kalitesi çok tatmin edici değildir ve yüksek harmonikli bir sürüş sağlanabilmektedir [3]. Anahtarlama frekansındaki artış çıkış gerilimi ve akımının kalitesini iyileştirse de anahtarlama kayıplarındaki artıştan dolayı tercih edilmezler. Buna ek olarak, sürücü çıkışındaki harmonikler motorların üzerinde ilave kayıplar meydana getirerek verim düşümüne ve moment dalgalılığına sebep olmaktadır.

Yüksek güçlü sürücü sistemlerinde çıkış geriliminde meydana gelen harmonikleri azaltmak için çıkışa bir L süzgeci bağlanmaktadır. L süzgeci her ne kadar basit bir yöntem olsa da ideal olmayan durumda meydana gelen kayıplar sebebi ile sistem başarımını düşürmekte ve sürüş sisteminin hacmini artırmaktadır. Harmoniklerin meydana getirdiği ilave kayıplar yüksek anahtarlama frekanslarına çıkılarak da en aza indirgenebilir. Yüksek anahtarlama frekansları ise daha sık anahtarlama yapıldığından yarı iletken elemanlarda meydana gelen anahtarlama kayıplarını artırmaktadır [4]. Bu yüzden hem sürücü çıkışındaki akımın harmonik bileşeninden dolayı meydana gelen ilave makina kayıplarını, hem de yüksek anahtarlama frekanslarından dolayı meydana gelen kayıpları azaltmak için kayıpları az sürücü sistemlerinin tasarımı zorunlu hale gelmiştir [5]. Ayrıca, dönüştürücüler yüksek frekansta çalıştığı için IGBT'nin yüksek güç kaybı cihazlara ve dönüştürücüye zarar verebilmektedir. Bu nedenle güç kayıplarını doğru ve hızlı bir şekilde belirlemek ve güç kayıplarını azaltmanın yollarını bulmak önemlidir [6]. Örneğin, [7] ve [8]'de IGBT/Diyot modüllerindeki kayıpları azaltmak için sıfır gerilim ve sıfır akım anahtarlama topolojileri geliştirilirken [9] ve [10]'da anahtarlama ve iletim kayıplarının azaltılması için kapalı form çözümünün kullanılması önerilmektedir.

[11] numaralı çalışmada aktif güç filtrelerinde meydana gelen anahtarlama kayıplarını yeni bir modülasyon stratejisi ile azaltmayı hedefleyen algoritma önerilmiştir. [12] ve [13]'de yazarlar, kayıpları azaltılmış farklı IGBT/Diyot modülleri tasarlamayı amaçlamışlardır. Bu nedenle, yalnızca güç oranlarına göre doğru anahtarlama elemanları seçerek değil [14], aynı zamanda her bir bileşenin başarımı doğrultusunda sistemler tasarlamak zorunlu hale gelmektedir [15].

Bu çalışmada, yüksek güçlü motor sürücülerinde kullanılan IGBT/Diyot modüllerindeki anahtarlama ve iletim kayıplarının sadece veri föylerindeki bilgiler ile hesabına ait matematiksel modelleme ilkeleri verilmiştir. Yapılan bu çalışmanın 2. bölümünde bir motor sürücüsünde kullanılan IGBT/Diyot modülünde meydana gelen kayıplar sınıflandırılarak kayıpların matematiksel alt yapısı verilmiştir. 3. bölümde modüldeki anahtarlama ve iletim kayıpları MATLAB/Simulink altında modellenmiştir. 4. bölümde 1000V doğru gerilim barası ve 690 V/40 Hz çıkış gerilimi olan 370 kW'lık bir endüstriyel asenkron motor sürücüsünde meydana gelen kayıplar elde edilen matematiksel model yardımıyla hesaplanmıştır. 5. bölümde ise çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular yorumlanarak geliştirilen modelin başarımı tartışılmıştır.

2. IGBT Kayıpları

Bir endüstriyel motor sürücüsünde meydana gelen kayıplar IGBT/Diyot modüllerinde ortaya çıkan güç kayıpları tarafından belirlenmektedir. Bu kayıplar, dinamik kayıplardan (açma ve kapatma) ve statik kayıplardan (açık-durum ve kapalı-durum) oluşmaktadır [16]. Bu çalışma kapsamında modüllerde meydana gelen kayıplar üç grupta incelenmektedir.

- Anahtarlama kayıpları ($P_{anahtarlama,IGBT}$)
- İletim kayıpları ($P_{iletim,IGBT}$)
- Diyot üzerinde meydana gelen ters toparlanma kayıpları ($P_{tk,SGD}$)

2.1 Anahtarlama kayıpları

Anahtarlama kayıpları, anahtarın açılıp kapatılma durumlarında meydana gelir ve anahtarlama frekansının karesi ile doğru orantılıdır. Anahtar iletimdeyken anahtarlama elemanın üzerindeki akım artar gerilim düşümü azalır. Anahtar kesimdeyken tam tersi olur ve anahtarlama elemanın üzerindeki akım azalırken gerilim düşümü artar [17]. Bir IGBT'de anahtarlama için belirli bir süre gerektiğinden dolayı anahtarlama anında anahtarlama elemanı üzerinde önemli miktarda enerji harcanır ve anahtarlama kayıpları meydana gelir [5,6]. Serbest geçiş diyotuna (SGD) sahip IGBT'ler göz önüne alındığında anahtarlama kayıpları üç grupta incelenmektedir.

- IGBT iletime girerken meydana gelen enerji kayıpları (E_{on})
- IGBT kesime giderken meydana gelen enerji kayıpları (E_{off})
- SGD üzerinde meydana gelen ters toparlanma enerji kayıpları (E_{tk})

Bir periyottaki enerji kayıpları E_{on} , E_{off} ve E_{tk} enerji kayıplarının toplamı olarak ifade edilir.

$$P_{anahtarlama} = P_{anahtarlama,IGBT} + P_{anahtarlama,SGD} \quad (1)$$

Toplam anahtarlama kaybı ise anahtarlama frekansı da dâhil edilerek Eş. (2)'deki gibi ifade edilir.

$$P_{anahtarlama} = (E_{on} + E_{off} + E_{tk}) \cdot f_{anahtarlama} \quad (2)$$

2.2 İletim kayıpları

İletim periyodu sırasında anahtarlama elemanı direnci ve gerilim sıfır olan ideal bir anahtar gibi davranmaz [5]. İletim sırasında, anahtarlama elemanın üzerinde her zaman bir gerilim düşümü vardır ve anahtarlama elemanı iletken durum direncine sahiptir. Bu gerilim düşümü, anahtarlama elemanı üzerindeki gücün dağılması ve güç kaybının meydana gelmesi anlamına gelmektedir [18]. Bu ideal olmayan durumlar nedeniyle anahtar devredeyken iletim kayıpları meydana gelir. Serbest geçiş diyotuna (SGD) sahip aynı IGBT göz önüne alındığında iletim kayıpları iki grupta incelenmektedir.

- IGBT iletim gücü kayıpları ($P_{iletim,IGBT}$)
- SGD iletim gücü kayıpları ($P_{iletim,SGD}$)

Bir anahtarın IGBT/Diyot modülü için iletim kayıpları genel olarak Eş. (3)'deki gibi ifade edilir.

$$P_{iletim} = (I_{anahtarlama,RMS}) \cdot V_x \quad (3)$$

3. Matematiksel Modelleme

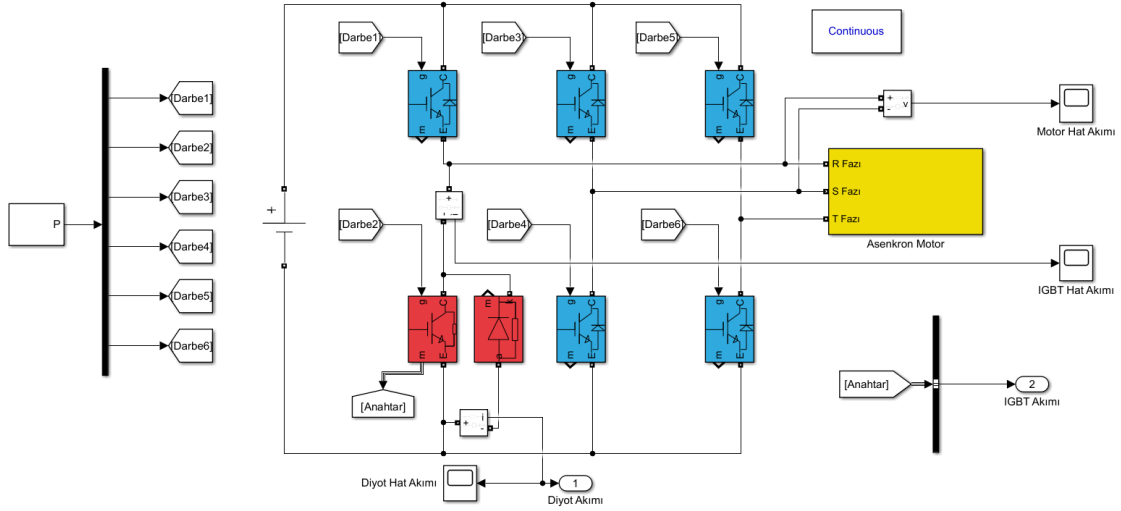
Çalışma kapsamında kurulan model Şekil 1'de verilmiştir. Burada, 3 fazlı sürücüsünde meydana gelen IGBT kayıplarının incelenmesi ve gerekli akım değerlerinin elde edilebilmesi için asenkron motorun ve sürücünün MATLAB/Simulink altında modeli kurulmuştur. Kurulan modeldeki IGBT güç anahtarlarını sürmek için kullanılan kapı işaretlerinin elde edilmesinde hâlihazırda ticari bir ürünün sürüş stratejisi olan Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (SVPWM) kullanılarak üretilmiştir. Böylece, aralarında 120° faz farkı olan 40 Hz çıkış gerilimi uygulanan kapı işaretleri elde edilmektedir. Referans motor sürücüsüne ait bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sürücü anma çalışma değerleri

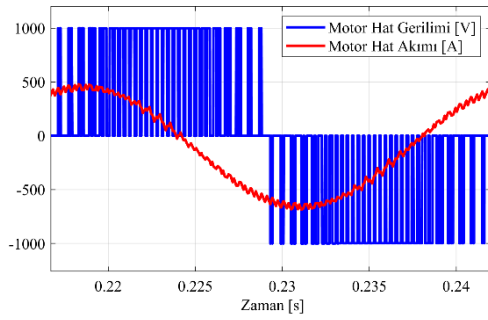
Sembol	Nicelik	Değer
V_{DA}	DA Bara Gerilimi	1000 V
f_o	Çıkış Geriliminin Frekansı	40 Hz
f_s	Anahtarlama Frekansı	1.6 kHz
P_o	Sürücünün Gücü	370 kW

Yüksek güçlü motor sürücülerde meydana gelen kayıpların modellenmesi için öncelikle anahtarlama ve iletim kayıplarında kullanılmak üzere IGBT/Diyot modüllerinden akan akımın ve modül üzerindeki gerilimin yüksek doğrulukta bilinmesi gerekir. Bunun için çalışma kapsamında oluşturulan endüstriyel motor sürücüsü modeli Şekil 1'de verilmiştir. Burada IGBT anahtarlarına ek olarak serbest geçiş diyotunun kullanılması ile diğer IGBT modellerinde elde edilemeyen diyot üzerinden geçen akım değerinin elde edilmesi hedeflenir. Kurulan model sayesinde, endüstriyel motor sürücülerindeki her bir anahtarın ve diyotun içinden akan akım ve üzerinde düşen gerilim değerleri elde edilebilmektedir.

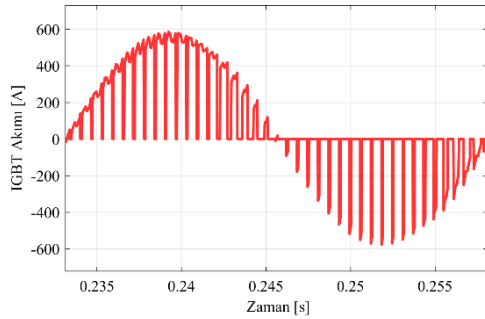
Elde edilen modelin bir periyot boyunca çalışması sonucu elde edilen motor hat gerilimi, hat akımı, IGBT ve diyot üzerinden akan akımların dalga şekli sırasıyla Şekil 2, 3 ve 4'te verilmiştir.



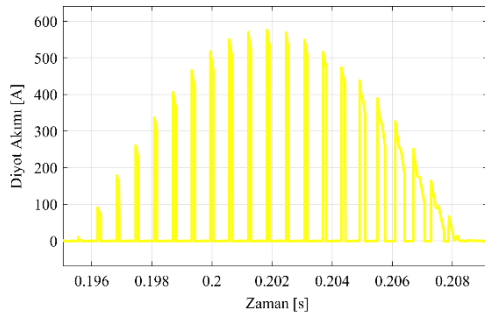
Şekil 1: Endüstriyel motor sürücüsü için kurulan MATLAB/Simulink modeli.



Şekil 2: Motor hat geriliminin ve hat akımının dalga şekli.



Şekil 3: IGBT üzerinden akan akımın dalga şekli.



Şekil 4: Diyot üzerinden akan akımın dalga şekli.

3.1 Anahtarlama kayıplarının modellenmesi

Bir IGBT üzerinde, anahtarlama işlemi sırasında ideal olmayan gerilim ve akım geçişleri nedeniyle anahtarlama kayıpları meydana gelmektedir. Bir anahtarlama elemanındaki anahtarlama kaybı Eş. 4 ile ifade edilmektedir [19].

$$P_{\text{anahtarlama}} = \frac{1}{T_{\text{anahtarlama}}} \int_0^{T_{\text{anahtarlama}}} [E_{\text{on}}(t) + E_{\text{off}}(t)] dt \quad (4)$$

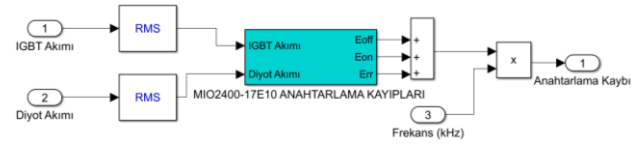
Anahtarlama topolojileri göz önüne alındığında diyot üzerinde meydana gelen ters toparlanma kayıplarının da anahtarlama kayıplarını arttırdığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle, ters toparlanma kayıpları da toplam enerji kaybına dâhil edildiğinde Eş. 4 şu şekilde düzenlenebilmektedir;

$$P_{\text{anahtarlama}} = \frac{1}{T_{\text{anahtarlama}}} \int_0^{T_{\text{anahtarlama}}} [E_{\text{on}}(t) + E_{\text{off}}(t) + E_{\text{tk}}(t)] dt \quad (5)$$

Verilen eşitlikler düzenlenerek anahtarlama kayıplarının hesaplanması için kullanılacak formül şu şekilde elde edilmektedir;

$$P_{\text{anahtarlama}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{tk}}) \cdot f_{\text{anahtarlama}} \quad (6)$$

Eş. 6'da da ifade edildiği gibi toplam anahtarlama kayıpları IGBT iletme girenken ve kesime giderken meydana gelen enerji kayıplarıyla beraber ters toparlanma enerji kayıplarının toplanarak frekans ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Bunun için gerekli olan E_{on} , E_{off} ve E_{tk} değerleri kullanılan IGBT/Diyot modülünün veri föyünden elde edilebilir. Bu çalışmada MIO2400-17E10, FZ2400R17HP4_B29 ve 1MBI2400VD-170E olmak üzere üç farklı IGBT/Diyot modülünün veri föyünden 125°C çalışma koşulunda verilen E_{on} , E_{off} ve E_{tk} enerjilerinin değişim eğrileri kullanılmıştır.



Şekil 5: Toplam anahtarlama kayıplarının elde edildiği alt hesaplama bloğu.

3.2 İletim kayıplarının modellenmesi

Faz akımlarının harmonik içeriğe sahip olması ve tamamen sinüzoidal olmaması nedeniyle eviricilerde iletim kayıpları meydana gelmektedir. Üzerinden akım geçen bir IGBT için anlık iletim kaybı Eş. 7 kullanılarak hesaplanabilir [19].

$$P_{iletim,x}(t, i_x, T_j) = R_x(T_j) \cdot i_x(t)^2 + V_x(T_j) \cdot i_x(t) \quad (7)$$

İletim kayıplarının bir periyot boyunca ortalama değeri Eş. 8’de verilen şekilde ifade edilmektedir.

$$P_{iletim,x}(i_x, T_j) = \frac{1}{T_{anahtarlama}} \int_0^{T_{anahtarlama}} P_{iletim,x}(t, T_j) dt \quad (8)$$

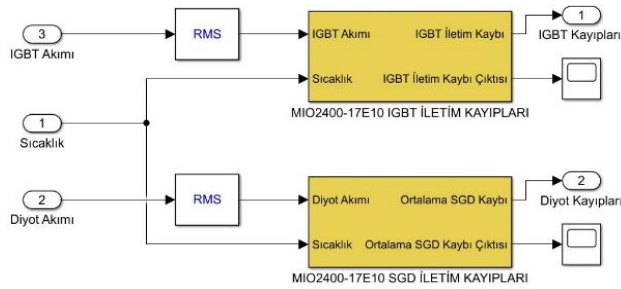
İletim kayıpları, yarı iletken üzerine düşen gerilim ve IGBT veya diyot üzerinden geçen akımın çarpılmasıyla Eş. (9)’da verildiği gibi ifade edilebilir. Burada kullanılan (x) alt indisi aynı denklemlerin IGBT ve diyot için geçerli olduğunun göstergesidir.

$$P_{iletim,x}(i_x, T_j) = \frac{1}{T_{anahtarlama}} \int_0^{T_{anahtarlama}} V_{CE}(t, T_j) \cdot i_x(t) dt \quad (9)$$

Eş. 10, iletim kayıplarının toplamı olarak herhangi bir T_j eklem sıcaklığında ve elemanın içinden akan herhangi bir akımda toplam iletim kayıplarını temsil eder.

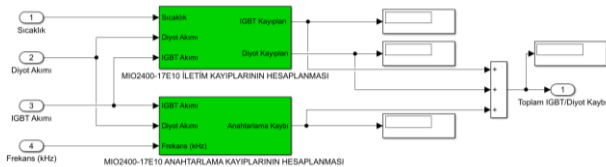
$$P_{iletim}(i_x, T_j) = P_{iletim,IGBT}(i_{IGBT}, T_j) + P_{iletim,SGD}(i_{SGD}, T_j) \quad (10)$$

İletim kayıpları, Eş. 10’da görüldüğü üzere IGBT iletim kayıpları ve diyot iletim kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 6: IGBT ve diyotun toplam iletim kayıplarının hesaplandığı alt blok.

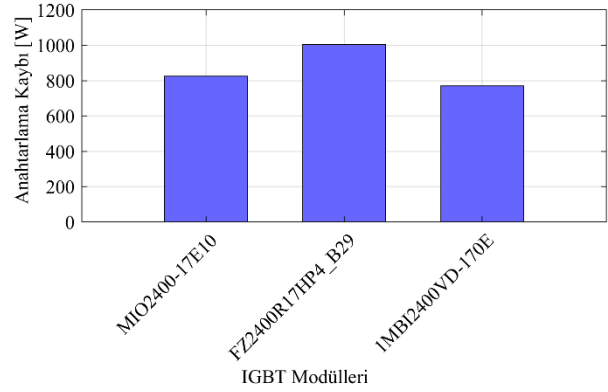
Bu çalışmada MIO2400-17E10, FZ2400R17HP4_B29 ve 1MBI2400VD-170E olmak üzere üç farklı IGBT/Diyot modülünün veri föyünden 125°C çalışma koşulundaki verilen parametreler kullanılmıştır. İletim kaybı eşitliklerinden görüldüğü üzere eklem sıcaklığı iletim kaybını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple, eklem sıcaklığı değeri hesaplamalara doğrudan dâhil edilmektedir. IGBT/Diyot modülünde meydana gelen toplam kayıpların elde edildiği blok Şekil 7’de verilmiştir.



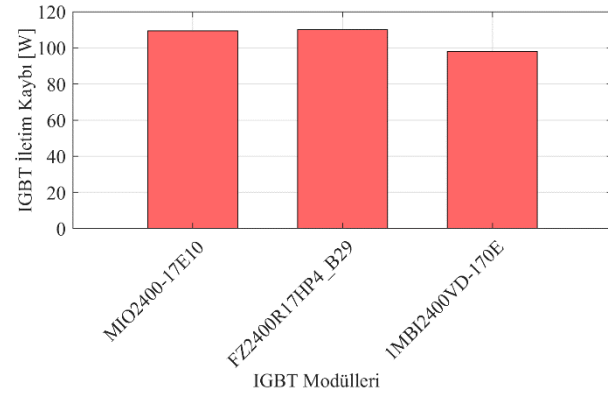
Şekil 7: Toplam IGBT/Diyot modülü kayıpları.

4. Benzetim Sonuçları

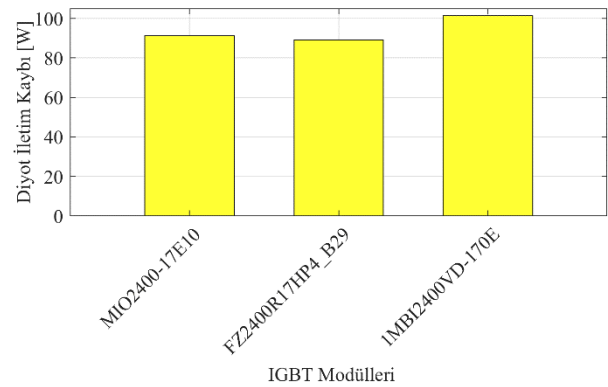
Bu çalışmada, endüstriyel sürücülerde sıklıkla kullanılan üç farklı IGBT/Diyot modülünün 1000V DA bara geriliminde 690V/40 Hz çıkış geriliminde ve 370 kW gücünde iken sürücü üzerinde meydana gelen toplam kayıpların modellenmesi ve hesabı yapılmıştır. Üç farklı modülde her bir IGBT/Diyot için meydana gelen anahtarlama, iletim, diyot kayıpları ve toplam güç kayıpları sırasıyla Şekil 8,9,10,11’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Modüllerde meydana gelen anahtarlama kayıpları.

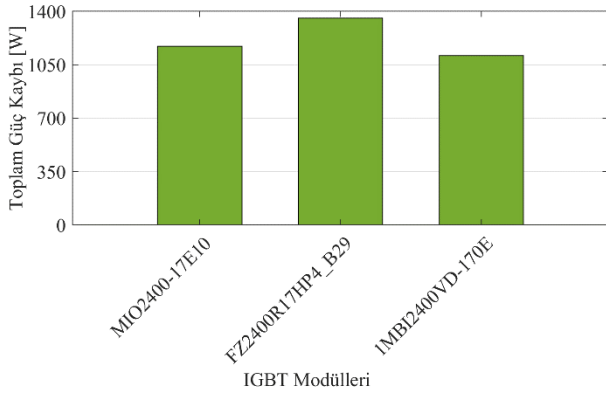


Şekil 9: Modüllerde meydana gelen IGBT iletim kayıpları.

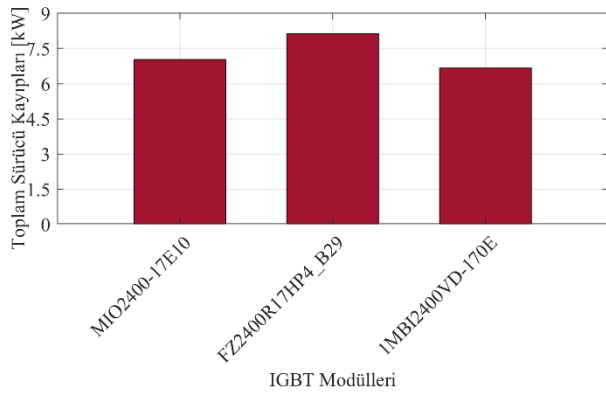


Şekil 10: Modüllerde meydana gelen diyot iletim kayıpları.

Elde edilen kayıp değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’deki hesaplanan değerlere bakıldığında endüstriyel bir sürücüde meydana gelen kayıpların çoğunlukla anahtarlama kayıplarından oluştuğu söylenebilir. Sürücü sisteminde bulunan altı IGBT/Diyot için toplam kayıplar Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 11: Modüllerdeki bir IGBT/Diyot için meydana gelen toplam güç kayıpları.



Şekil 12: Sürücüdeki meydana gelen toplam güç kayıpları.

Çizelge 2. Üç farklı modül için her bir IGBT/Diyot üzerinde meydana gelen kayıplar

Modüller	Anahtarlama Kayıpları	IGBT İletim Kayıpları	Diyot İletim Kayıpları
MIO2400-17E10	817.2 W	265.8 W	87.5 W
FZ2400R17HP4_B29	1010 W	260.9 W	85.27 W
1MBI2400VD-170E	763.4 W	250.2 W	96.89 W

5. Sonuç

Yüksek güçlü endüstriyel sürücülerde anahtarlama akımları ve gerilimleri yüksek olduğundan dolayı çok yüksek anahtarlama hızlarına çıkılamamaktadır. Bu nedenle motor akımı oldukça harmonik bileşen içerebilmektedir. Bu harmonik bileşenlerin hem sürücü tarafında hem de motor tarafındaki kayıpları artırdığı aşikârdır. Bu çalışmada, 1000V doğru gerilim barası ve 690 V/40 Hz çıkış gerilimi olan 370 kW'lık bir endüstriyel asenkron motor sürücüsünde meydana gelen kayıplar MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Sürücü modelindeki her bir anahtar ve diyot akımı değerleri anahtarlama ve iletim kaybı modellerinde kullanılarak IGBT ve diyot üzerinde meydana gelen toplam güç kaybı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bir IGBT'de meydana gelen anahtarlama kayıplarının iletim kayıplarına oranla daha fazla olduğunu, toplam sayısal sonuca bakıldığında ise IGBT kayıplarının göz ardı edilemeyecek kadar yüksek olduğunu göstermiştir.

Bu nedenle anahtarlama frekansı motora uygulanan gerilimin kalitesini artırdığı gibi anahtarlama kayıplarını da hayli artırmaktadır. Bu sonuç doğrultusunda, yüksek güçlü motor sürücülerinin tasarımı aşamasında yüksek anahtarlama frekanslarında artan anahtarlama kayıplarının sistem başarımına ve soğutma sistemi üzerine etkisinin göz önüne alınması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Proje No: 1919B012103021) "Haddelme Sistemlerinde Kullanılan Motor Ve Sürücü Sisteminin Kayıplarının Modellenmesi" isimli proje kapsamında desteklenmiştir. Ancak, çalışmanın tüm sorumluluğu çalışma sahibine aittir. TÜBİTAK'tan alınan mali destek, yayın içeriğinin bilimsel anlamda TÜBİTAK tarafından onaylandığı anlamına gelmez.

6. Kaynaklar

- [1] Lee, Y. H., Suh, B. S. and Hyun, D. S., "A Novel PWM Scheme for a Three-Level Voltage Source Inverter with GTO Thyristors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 32, no. 2, pp. 260-268, 1996.
- [2] Rui, W., JiaLiang, W., Jian, H., Zhongyuan, C., Quanqing, W., Na, J. and Chenghao, W., "A Power Loss Calculation Method of IGBT Three-Phase SPWM Converter", 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, China, 2012.
- [3] Badstübner, U., Stupar A., and Kolar, J., "Sensitivity of Telecom DC-DC Converter Optimization to the Level of Detail of the System Model", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), USA, 2011, 585-592.
- [4] Win, T., Sabai, N., and Maung, H. N., "Analysis of Variable Frequency Three Phase Induction Motor Drive", World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 42.
- [5] Zhu, Y., Xiao, M., Su, X., Yang, G., Lu, K. and Wu, Z., "Modeling of Conduction and Switching Losses for IGBT and FWD Based on SVPWM in Automobile Electric Drives", Appl. Sci. 2020, 10, 4539.
- [6] Hafezi, H., and Faranda, R., "A New Approach for Power Losses Evaluation of IGBT/Diode Module", Electronics, 2021, 10, 280.
- [7] Xia, Y. and Ayyanar, R., "Naturally Adaptive, Low-Loss Zero-Voltage-Transition Circuit for High-Frequency Full-Bridge Inverters with Hybrid PWM." IEEE Trans. Power Electron. 2018, 33, 4916-4933.
- [8] Li, Z., Qian, W. and Zhang, X., "An Optimized Zero-Voltage Zero-Current Transition Boost Converter Realized by Coupled Inductor." IEEE Trans. Power Electron. 2019, 34, 8882-8893.
- [9] Sepahvand, H., Khazraei, M., Corzine, K.A. and Ferdowsi, "M. Start-up Procedure and Switching Loss Reduction for a Single-Phase Flying Capacitor Active Rectifier" IEEE Trans. Ind. Electron. 2013, 60, 3699-3710.
- [10] Krismer, F. and Kolar, J.W., "Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters.", IEEE Trans. Power Electron. 2012, 27, 174-188.
- [11] Asiminoaei, L., Rodriguez, P., Blaabjerg, F. and Malinowski, M., "Reduction of Switching Losses in Active Power Filters with a New Generalized Discontinuous-PWM Strategy.", IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, 467-471.

- [12] Faranda, R. and Valade, “I. UPQC compensation strategy and design aimed at reducing losses.”, In Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2002, L’Aquila, Italy, 8–11 July 2002, Volume 4, pp. 1264–1270.
- [13] Schweizer, M. and Kolar, J.W., “Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications.”, IEEE Trans. Power Electron. 2013, 28, 899–907.
- [14] Sadigh, A.K., Dargahi, V. and Corzine, K.A., “Analytical Determination of Conduction and Switching Power Losses in Flying-Capacitor-Based Active Neutral-Point-Clamped Multilevel Converter.”, IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, 5473–5494.
- [15] Baliga, B.J., “Fundamentals of Power Semiconductor Devices”, Springer: Cham, Switzerland, 2008.
- [16] Kabalyk, Y., “Determination of Energy Loss in Power Voltage Inverters for Power Supply of Locomotive Traction Motors”, Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development, Russia, 12-15 September 2016, Volume 165, 1437-1443.
- [17] Yıldız, B. , Altıntaş, G., Gulbahce, M. O. , Kocabas, D. A. “Design, Voltage Mode Control and Non-ideal Analysis of a Low Voltage-High Current Synchronous Buck Converter” . IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2017, 17, 3377-3385
- [18] Ericson R., Maksimovic D., “Fundamentals of Power Electronics”, Kluwer Academic, New York, 2004.
- [19] Hart, D., “Power Electronics”, Mc-Graw Hill, New York, 2011.