

Elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı döngüde donanımsal benzetimi ve kalıcı mıknatıslı bir senkron motor sürücü uygulaması.

ERDOGAN, N.

2019

Real-Time Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drive Systems: An Implementation of Permanent Magnet Synchronous Machine Drive

Nuh ERDOĞAN 

University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre, P43 C573, Cork/Ireland

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 24/06/2019

Revision : 23/09/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- Hardware-in-the-loop real-time simulation.
- PMSM drive.
- Multi-core CPU
- FPGA.

Keywords

Hardware-in-the-loop
Real-time simulation
GPU
PMSM
Multi-core CPU
FPGA

In this study, the hardware used in real-time HIL simulation of electric drive systems are comparatively examined, and suitable platforms are suggested with respect to applications of electric drive systems. In the case study, a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine (PMSM) drive system is performed on a hybrid parallel hardware platform with an Intel core at 3.0 GHz and a field programmable gate array (FPGA), and the issues associated with the real-time simulation are discussed.

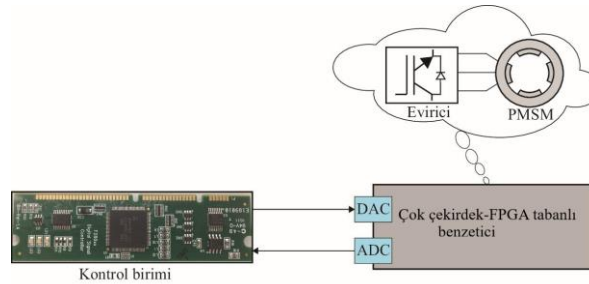


Figure A. Schematic representation of HIL simulation of PMSM drive

Purpose: This study aims at examining the real-time simulation hardware used in electric drive systems and performing a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine drive. In line with obtained experiences, it is also aimed at giving perspectives in choosing suitable simulation hardware for real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation of electric drive systems.

Theory and Methods: Real-time HIL simulation hardware and their technologies for electric drive systems are comparatively examined and classified with respect to system scale and dynamic response time. A vector controlled PMSM drive model is then developed in Matlab/Simulink. The real-time simulation of the drive is finally performed on a multi-core, FPGA based parallel hardware platform.

Results: The results have shown that a PMSM drive at 10 kHz can be simulated in real-time on multi-core, FPGA based hardware. The results are presented, and the issues associated with the real-time simulation are discussed in detail in Section 3.

Conclusion: This results in this study has confirmed that the real-time HIL simulation of electric drive systems running up to several kHz, can be realized on multi-core based parallel hardware platforms. The drive systems running in the range of hundreds of kHz can require FPGAs in their real-time HIL simulation. In these applications, the real-time technologies which enable to use automatic HDL coder in generating VHDL / Verilog code like SIMULINK HDL coder can be advised for those who are not expert in developing HDL. GPUs or inter-connected multi-FPGAs can be suggested for the real-time simulation of large scale electric drive systems with the system dynamics at milliseconds and microseconds.



Elektrikli Sürme Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Döngüde Donanımsal Benzetimi ve Kalıcı Mıknatıslı Bir Senkron Motor Sürücü Uygulaması

Nuh ERDOĞAN

University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre, P43 C573, Cork/Ireland

Öz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/06/2019
Düzeltilme: 23/09/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Döngüde donanımsal benzetim
Gerçek zamanlı benzetim
GPU
Kalıcı mıknatıslı senkron motor
Çok çekirdekli işlemci
FPGA

Keywords

Hardware-in-the-loop simulation
Real-time simulation
GPU
PMSM
Multi-core CPU
FPGA

Döngüde donanımsal benzetim (DDB), gerçek zamanlı benzetime imkân veren ve son yıllarda hem araştırmada hem de endüstriyel ürün geliştirmede yaygın bir şekilde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde kullanılan benzeticiler gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen platformlardır. Platformun seçimi, modelleme esnekliği ile yüksek doğruluk oranlı sistem gerçek zaman davranışını elde etme yönlerinden önemlidir. Bu çalışmada, elektrik sürme sistemlerinin benzetiminde kullanılan DDB yapıları tanıtılmış, gerçek zamanlı DDB'yi gerçekleştirebilen benzetim platformları karşılaştırılmalı incelenmiş ve elektrikli sürme sistemleri uygulama alanlarına göre uygun platform önerilerinde bulunulmuştur. Durum çalışmasında, örnek bir vektör kontrollü kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) sürücüsünün gerçek zamanlı benzetimi 3.0 GHz'de çalışan Intel işlemci çekirdeği ve bir SPARTAN-3 kullanıcı programlamalı kapı dizisi (FPGA) içeren, paralel işleme izin veren karma bir platformda gerçekleştirilmiş ve gerçek zamanlı benzetimde karşılaşılan meseleler tartışılmıştır. Sonuçlar, vektör kontrollü bir KMSM sürücüsünün gerçek zamanlı DDB'sinin çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren benzetici ile gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Sonuçlar doğrultusunda, daha yoğun hesaplama içeren ve daha yüksek frekanslı anahtarlama elemanlara sahip kontrol sistemlerinin DDB'si için uygun gerçek zamanlı benzetici platform önerilerinde bulunulmuştur.

Real-Time Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drive Systems: An Implementation of Permanent Magnet Synchronous Machine Drive

Abstract

Real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulation has recently become convenient method in both research and industrial product development. The simulators used in HIL simulation includes hardware platforms that enables a real-time simulation. The choice of suitable platform is important in terms of providing modeling flexibility and mimicking real-time behavior with higher accuracy. In this study, HIL structures used in real-time simulation of electric drive systems are presented, hardware-assisted real-time simulators are comparatively assessed, and suitable platforms are suggested with respect to the applications of electric drive systems. In the case study, a real-time simulation of vector controlled permanent magnet synchronous machine (PMSM) drive system is performed on a hybrid parallel hardware platform with an Intel core at 3.0 GHz and a field programmable gate array (FPGA), and the issues associated with the real-time simulation are discussed. It is shown that the real-time HIL simulation of a vector controlled PMSM drive can be realized on a multi-core and FPGA based hybrid platform. In line with the results, suitable real-time HIL simulation platforms are suggested for the control systems with more computationally intensive and higher switching frequency components.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

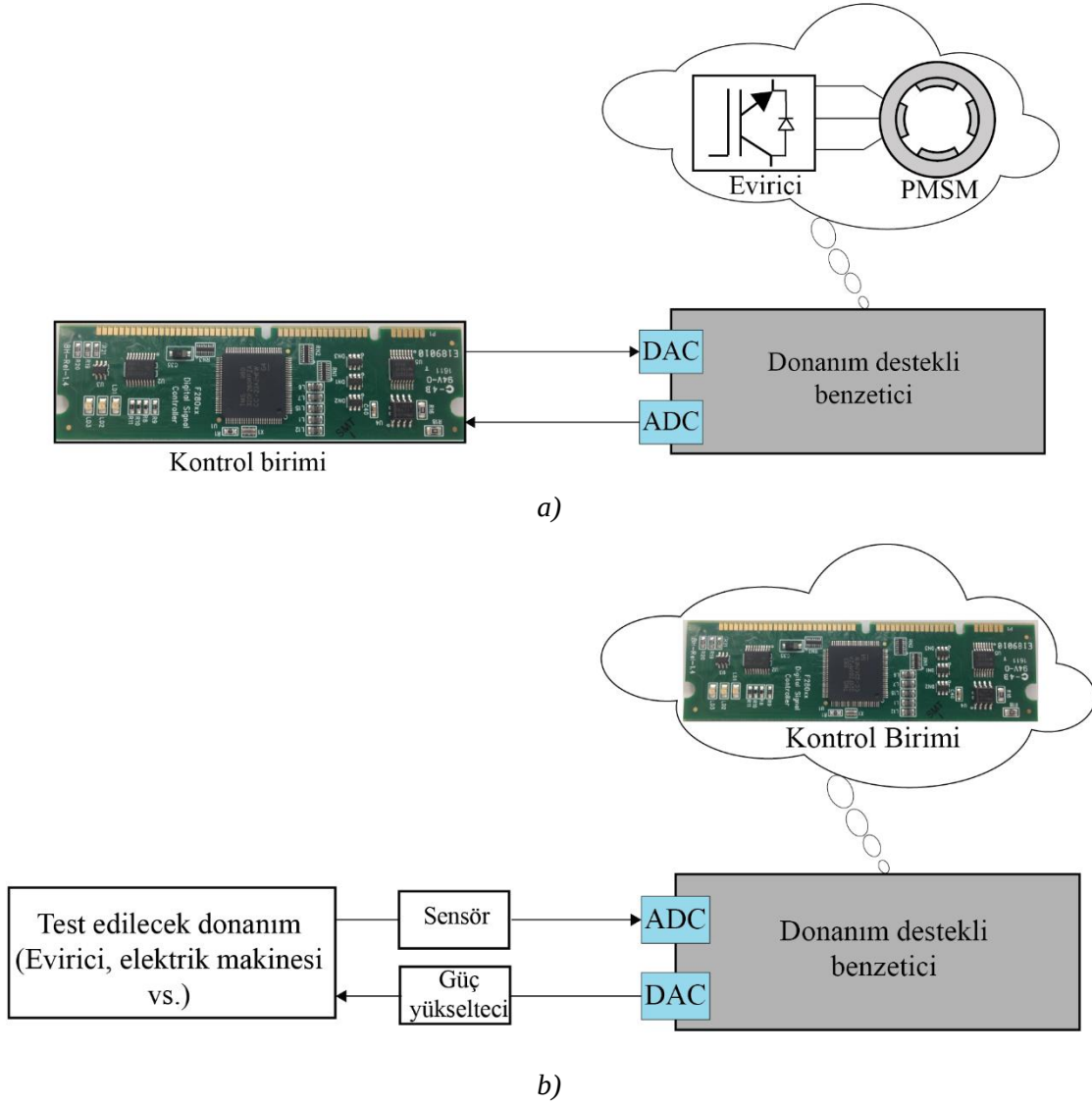
Tasarım doğrulama ve test etme işlemlerinde gerçek zamanlı benzetime ihtiyaç duyulması, döngüde donanım teknolojisinin doğmasına ve gelişmesine neden olmuştur [1, 2]. Döngüde donanım teknolojisi, fiziksel bir sistem modelinin gerçek zamanlı benzetimine imkân veren donanımlardır. Bu teknoloji, sistemin herhangi bir parçasının (örneğin donanımda modellenen sistemi denetleyen kontrol birimi gibi) fiziksel olarak benzetime dahil edilmesine imkân verir [3]. Dolayısıyla, benzetim esnasında harici gerçek

sistem tarafından üretilen sinyaller giriş olarak alınır. Bu nedenle bu yapı, DDB olarak adlandırılır. Benzetimin yapıldığı donanımın çıkışları gerçek sistemdekine denk analog veya sayısal sinyallerdir. Gerçek sistem üzerinden bir sinyal ölçülmesine benzer şekilde, donanımın çıkışları ölçülebilir veya bir osiloskop ekranında görüntülenip, değerlendirilebilir. Tasarlanan bir kontrol sisteminin performansı DDB kullanılarak birçok farklı ve aşırı koşul durumları için değerlendirilebilir [4]. Özellikle gerçek fiziksel sisteme ulaşmanın zor olduğu (uzay, havacılık alanları gibi) veya gerçek sistem üzerinde doğrudan test yapmanın riskli olduğu durumlarda DDB tekniğinden yararlanılır. DDB ile, tasarım doğrulama ve test işlemleri hızlandırılabilir ve maliyet azaltılabilir. Çünkü, test işlemi için büyük deneysel altyapılar kurmaya gerek kalmaz. Ayrıca, fiziksel sistem üzerinde testler gerçekleştirilmediği için, oluşabilecek muhtemel hasarlar da önlenmiş olur. Sonuç olarak, tasarlanan kontrol sisteminin fiziksel sistem üzerindeki davranışı ve performansı DDB ile gerçek zamanlı değerlendirilebilir [5].

Literatürde, gerçek zamanlı benzetim yapısına göre elektrikli sürücü uygulamaları için iki farklı DDB yapısı sunulmuştur [6]. Şekil 1.a'da gösterilen birinci DDB yapısında, tasarlanan kontrol birimi fiziksel olarak benzetime dahil edilirken sistemin güç katının (Motor ve evirici grubu) modellenmesi ve benzetimi donanım destekli bir platformda gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, birçok farklı test durumlarının gerçek zamanlı benzetimlerinin gerçekleştirilmesine izin verir. Böylece, bir yandan geliştirilen kontrol biriminin sistem üzerinde davranışı gerçek zamanlı analiz edilirken, test ve doğrulama işlemlerinin süresi ve maliyeti mümkün mertebe azaltılır. Örneğin, bir rüzgâr çiftliği için tasarlanan bir elektrik motor ve sürücü sistemin bir iletim hattı üzerinde davranışı bu yöntem ile gerçek zamanlı test edilebilir [7]. İkinci yaklaşımda ise, kontrol birimi donanım destekli platformda tasarlanırken, güç katı birimi fiziksel olarak benzetime dahil edilir (Şekil 1.b). Bu yaklaşım, özellikle incelenen sistemin modellenmesinin zor olduğu ve geliştirilen kontrol biriminin testlerinin sistem üzerinde doğrudan yapılmasının riskli olmadığı durumlarda tercih edilir. Bu yöntemde, geliştirilen farklı kontrol algoritmalarının testi gerçek sistem üzerinde hızlı bir şekilde test edilir.

Donanım destekli benzetimler, paralel işleme imkân tanıyan ve bünyesinde birçok işlemci bulunduran gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen platformlardır [5]. Bu platformlar; çok çekirdekli işlemciler [8], kişisel bilgisayar (PC) kümeleri [9], kullanıcı programlamalı kapı dizileri (FPGA'lar) [10], grafik kullanıcı ara yüzleri (GPU'lar) [11, 12] olabilir. Bu benzeticilerde, sistem modeli parçalara ayrılır ve her bir model parçası farklı bir işlemci üzerinde paralel bir şekilde çözülür. Böylece, hesaplama yönünden yoğun ve karmaşık sistemlerin benzetimi, her bir işlemcide sistemin bir parçası çözülecek şekilde uygun bölümlere ayrılarak optimize edilir.

Bu çalışmanın amacı; elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sinde kullanılan donanımları incelemek, vektör kontrollü örnek bir kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) sürücüsünün gerçek zamanlı DDB'sini gerçekleştirmek ve elde edilen deneyim ile elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sini gerçekleştirecek kullanıcılara benzetim platformun seçimi için bir perspektif sunmaktır. Öncelikle, Bölüm 2'de gerçek zamanlı benzetimde kullanılan donanımlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş, bu donanımların kullanıldığı mevcut gerçek zamanlı DDB teknoloji ürünlerin, donanım mimarileri, işletim sistemleri, haberleşme protokolleri, harici donanım ile ara yüzleri, modelleme araçları ve uygulama alanları karşılaştırmalı incelenmiştir. İncelenen DDB platformları, elektrikli sürme sistemleri için sistem ölçeği ve dinamik hızına göre sınıflandırılmıştır. Bölüm 3'te, örnek bir vektör kontrollü KMSM'nin gerçek zamanlı benzetimi karma bir platformda gerçekleştirilmiş ve gerçek zamanlı benzetim sonuçları irdelenmiştir. Sonuç bölümünde, daha yoğun hesaplama içeren ve daha yüksek frekanslı anahtarlamalı elemanlara sahip elektrikli sürme kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'si için uygun benzetici platform önerilerinde bulunulmuştur.



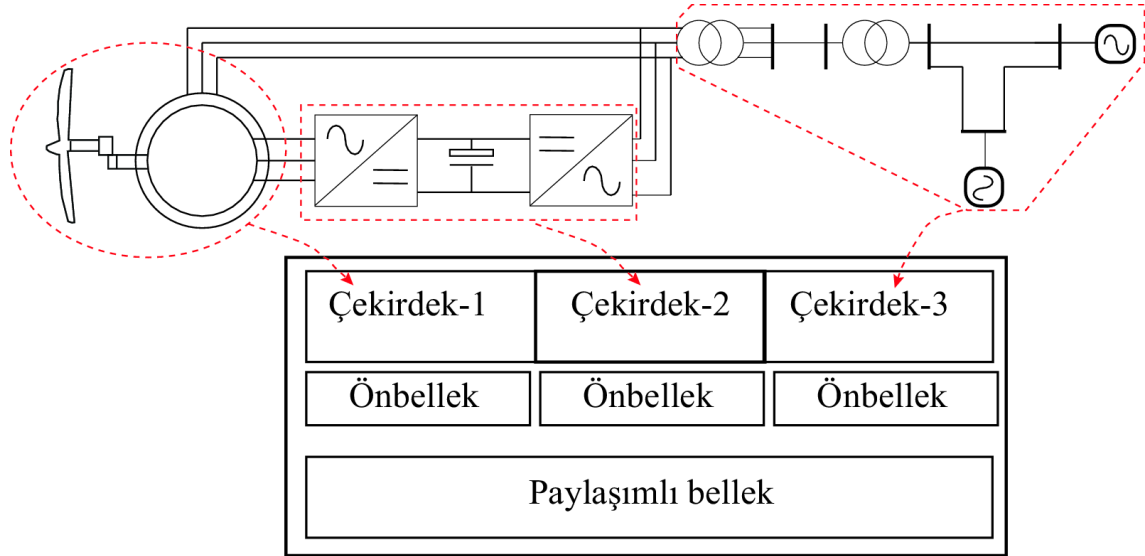
Şekil 1. Bir elektrikli sürücü sisteminin döngüde donanımsal benzetim yapısı, (a) döngüde kontrol birimi, (b) döngüde güç katı birimi

2. ELEKTRİKLİ SÜRME SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DDB PLATFORMLARI (REAL-TIME HARDWARE-IN-LOOP SIMULATION PLATFORMS FOR ELECTRIC DRIVE SYSTEMS)

2.1. Gerçek Zamanlı Benzetici Donanımları (Real-time Simulation Hardware)

Son yarım asırda, elektrikli sürme sistemlerinin benzetimi tek işlemcili ve ardışık işlem çevrimlerine dayanan programlar ile gerçekleştiriliyordu [13, 14]. Bu benzetimlerin en önemli dezavantajı, çok sayıda durum değişkeni içeren, hesaplama yönünden yoğun sistemlerin (büyük ölçekli bir güç sistemi gibi) model çözümlerinin çok uzun zaman alması ve dolayısıyla gerçek zamanlı benzetimlerinin yapılamamasıdır [15, 16]. Bu durumlar için çözüm yolu, paralel işleme izin veren donanım destekli platformların kullanılmasıdır [17]. Bu platformlar, bünyelerinde çok sayıda işlemci barındırırlar. Her bir işlemci birbirinden bağımsız paralel çalışır ve sistemin modelinin belli bir kısmını çözer. Böylece, bütün modelin çözümünün yürütülmesi, kullanılan platformun hesaplama gücüne ve sistemin karmaşıklığına bağlı olarak önemli oranda hızlandırılır. Ayrıca, seçilecek benzetici türüne bağlı olarak, bölünen her bir parça sistem dinamiklerine uygun olarak farklı hesaplama adımları ile çözülerek optimize edilebilir. Örneğin, Şekil 2’de bir rüzgâr enerji sisteminin çok çekirdekli bir işlemcide benzetimin yapısı gösterilmiştir. İncelenen sistem, dinamiklerine göre üç modüle ayrılmış ve her bir modülün çözümü paralel bir şekilde ayrı bir çekirdekte gerçekleştirilmektedir. Daha önemlisi, her bir çekirdekte hesaplama adımı, modüllerin sistem dinamiklerine

göre uygun bir şekilde seçilir. Diğer yandan, gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen bu platformlar genellikle ölçeklenebilir [18]. Gerçek zamanlı benzetimi yapılacak sistemin gerektirdiği hesaplama yüküne bağlı olarak platformun yapısı ve karakteristiği, dolayısıyla hesaplama gücü artırılır. Platformun ölçeğinin büyütülmesinde, bileşenler arasındaki haberleşmede yaşanan gecikme sınırlayıcı bir etken olarak göz önünde bulundurulur.



Şekil 2. Bir rüzgâr enerji sisteminin çok çekirdekli bir işlemcide gerçek zamanlı benzetim yapısı

Literatürde elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde dört farklı platform öne çıkmaktadır. Bu platformlar; (i) Çok çekirdekli işlemciler, (ii) PC kümeleri, (iii) FPGA'lar, (iv) GPU'lar. Çok çekirdekli işlemciler, bir yonga üzerinde birden fazla çekirdek ve ortak bir bellek içeren yapılardır. Harici fiziksel sistemle bağlantı veri yolu (PCI veya PCI-e) ile sağlanır. Benzetimi yapılacak sistem modeli, uygun bir şekilde parçalara ayrılır ve her bir model parçası ayrı bir çekirdekte paralel çözülerek tüm sistemin benzetimi optimize edilir. Çok çekirdekli işlemciler, kullanıcı dostu paket programlar (örneğin SIMULINK) kullanılmasına imkân vererek modelleme yönünden esneklik sağlar ve düşük maliyetlidir. Bu nedenle, çok çekirdekli işlemci tabanlı eMEGASIM, Hypersim, gibi platformlar elektrikli sürme devrelerinin DDB'sinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19, 20]. Çok çekirdekli işlemcilerin başlıca dezavantajı, veri yolundan kaynaklanan yüksek girdi-çıkış (I/O) gecikme süresi ve dolayısıyla benzetim hesaplama adımının yüksek olmasıdır. Bu nedenle, yüksek frekanslı darbe genişlik kiplmeli (PWM) motor sürücülerin bu tip platformlarda benzetiminin yapılması pratik değildir. Bununla birlikte, girdi-çıkış gecikme süresinin azaltılması için eMEGASIM gibi platformlarda FPGA tabanlı kartlar ara yüz elemanı olarak kullanılmaktadır [21]. Böylece hesaplama adımı, mili saniye mertebesinde mikro saniye mertebelerine azaltılabilmektedir.

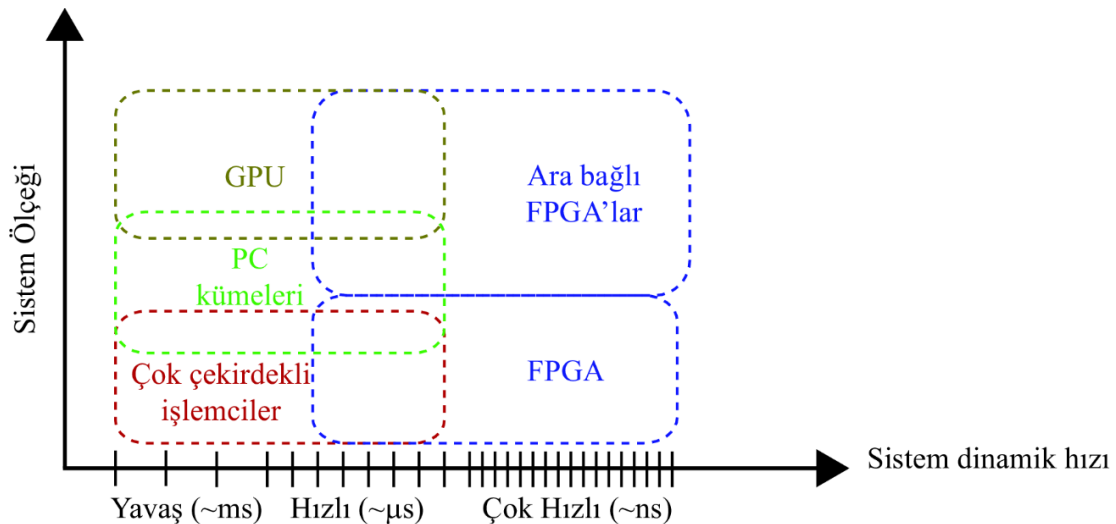
Çok çekirdekli işlemcilerin hesaplama kapasitesinin yetersiz kaldığı, büyük ölçekli ve karmaşık sistemlerin benzetiminde PC kümeleri bir diğer alternatif olarak kullanılmaktadır [9, 18]. PC kümeleri, bir pilot bilgisayar ve bir veya daha fazla uydu bilgisayar grubu, bilgisayarlar arasında bir haberleşme ağ hattı (yüksek hızlı Ethernet veya Infiniband) ve I/O'lardan oluşur. Pilot bilgisayar uydu bilgisayarları kontrol ederken, bir veya daha fazla çekirdekli işlemcilere sahip uydu bilgisayarlar paralel hesaplamanın yapıldığı düğümlerdir. PC kümelerinin avantajı ölçeklenebilir olması, dolayısıyla benzetimi yapılacak sistemin büyüklüğüne bağlı olarak ihtiyaç duyulan hesaplama kapasitesine göre uydu bilgisayarların artırılabilir olmasıdır. Bilgisayarlar arasındaki senkronizasyon ve PCI veya PCI-e veri yolundaki yüksek I/O gecikme süreleri başlıca göz önünde bulundurulması gereken hususlardır.

Bir FPGA'nın mimarisinde, programlanabilir mantık bloklar, I/O'lar, ve bunları birbirine bağlayan elektriksel bağlantı elemanları bulunur. Mantık blokları, milyonlarca mantık kapıları, çoğullayıcılardan oluşur ve birçok mantıksal işlemi yerine getirirler. FPGA'lar harici fiziksel sisteme, PCI gibi herhangi bir veri yoluna gerek duymaksızın doğrudan I/O vasıtasıyla bağlanır. Dolayısıyla, çok düşük I/O gecikme süresine sahiptirler. Bu özellikleri FPGA'ları nano-saniyeler mertebesinde hesaplama adımı benzetimler gerçekleştirmesini sağlar [10]. Bir sistemin modeli FPGA üzerinde Verilog, VHDL gibi programlama dilleri kullanarak veya kullanıcı dostu SIMULINK gibi paket programlara dayalı şematik

yöntem ile gerçekleştirilebilir. Şematik yöntemde geliştirilen model, DSP Builder, Xilinx System Generator gibi araçlar ile otomatik olarak donanım betimleme dili (HDL)ne çevrilir. Böylece, donanım betimleme dilinde uzman olmayan kullanıcılar şematik yöntemle FPGA ile benzetim gerçekleştirebilirler. Bununla birlikte, şematik yöntemin uygulamaları HDL kod yazmaya göre sınırlıdır. Ayrıca, şematik yöntemde daha çok donanım kaynağı kullanılır, dolayısıyla benzetim süresi daha uzundur. HDL kodlama tekniği ise daha esnektir ancak modelin geliştirilmesi daha zordur. Bununla birlikte, etkili bir kodlama ile donanım kaynakları optimize edilebilir. FPGA'lar göreceli olarak daha sınırlı donanım kaynaklarına sahiptirler. Bu durum, FPGA'ların gerçek sayılarla aritmetik hesaplama kapasitesini sınırlar. Özellikle, modelin derecesi arttıkça, donanım kaynaklarını etkili kullanmak daha önemli hal almaya başlar. Bunu önlemek için büyük ölçekli, karmaşık sistemlerin benzetiminde birbirine bağlı birden fazla FPGA'lar kullanılır. Bununla birlikte, bu yöntem karmaşık VHDL kodlama ve derin donanım mimarisi bilmeyi gerektirir.

GPU'lar bünyelerinde binlerce çekirdek bulunduran, iş kaynaklarını büyük oranda veri işlemeye ayıran elemanlardır. Bu özellikleri sayesinde, GPU'lar çok çekirdekli işlemcilere göre daha üstün performans gösterirler [12]. GPU'lar daima bir işlemci ile çalışırlar. İşlemci bir uydu işlemci olabileceği gibi, sadece benzetimin yürütülmesini kontrol eden pilot işlemci gibi de çalışabilir. İşlenecek veri öncelikle işlemciden GPU'nun ana belleğine PCI veri yolu ile aktarılır. Bu transfer işlemi GPU'larda FGPA'lara göre daha uzun kurulum süresine neden olur. Çünkü, GPU ana belleği yonga üzerinde değildir. GPU'da model, C tabanlı, MATLAB ile ara yüz oluşturabilen CUDA kodlama işlemi ile gerçekleşir. Bu nedenle, kodlama işlemi FPGA'lara göre zaman yönünden daha verimlidir. GPU'lar özellikle çok sayıda durum değişkeni içeren, karmaşık sistemlerin benzetim süresini önemli oranda hızlandırır [12]. Ancak, küçük ölçekli sistemlerin benzetiminde çok çekirdekli işlemcilere göre avantajları yüksek kurulum süresine sahip olmaları nedeniyle önemli oranda kaybolur.

DDB'de kullanılacak platformun seçimi; uygulamaya (sistem dinamikleri, sistemin büyüklüğü), platform performansına ve modelin platformda gerçekleştirme kolaylığına bağlıdır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, benzetim hesaplama adımı yönünden; yavaş ve hızlı dinamiklere (mili-saniye ve mikro-saniye mertebelerinde) sahip sistemlerin benzetiminde çok çekirdekli işlemciler kullanmak uygundur. Örneğin bir elektrik makinasının veya güç sisteminin gerçek zamanlı benzetimi çok çekirdekli işlemcilerle gerçekleştirilebilir. Yüksek frekanslı PWM sürücüler içeren uygulamalar (mikro-saniye ve nano-saniye mertebelerinde) FPGA'da gerçeklemek daha optimumdur. Sistem büyüklüğü yönünden; küçük ve ortak ölçekteki sistemlerin benzetimi, sistem dinamiklerine bağlı olarak çok çekirdekli işlemciler, PC kümeleri veya FGPA'lar ile gerçekleştirilebilir. Sistem büyüklüğü arttıkça zaman (örneğin; yüzlerce bara içeren bir güç sistemi [13], onlarca elektrik makine ve sürücü sistemi içeren bir rüzgâr enerji sistemi gibi) GPU'lar veya yüksek hızlı dinamiklerin incelenmesi durumunda birbirine ara bağlantılı bir den fazla FPGA'lar kullanmak daha uygun olur. Sonuç olarak, yüksek hızlı dinamikler içeren sistemlerin benzetiminde FPGA'lar, çok sayıda durum değişkeni içeren yüksek dereceli sistemlerin benzetiminde GPU'lar kullanılarak, çok çekirdekli işlemcilere göre benzetim hızı önemli oranda artırılabilir, gerçek zamanlı benzetimler gerçekleştirilebilir.



Şekil 3. Elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde kullanılan platformların sistem ölçeği ve dinamik cevaplarına göre uygulama alanları.

2.2. Elektrikli Sürme Sistemleri İçin Gerçek Zamanlı DDB Teknolojileri (Real-time Hardware-in-the-loop Simulation Technologies)

Endüstri ve araştırmada kullanılan, gerçek zamanlı benzetime izin veren mevcut DDB teknoloji ürünleri Tablo 1’de listelenmiştir. Bu teknolojilerin konfigürasyonları, yukarıda belirtilen gerçek zamanlı benzetimi gerçekleştiren donanımların bir veya birkaçını içeren bir hedef donanım ile sonuçların izlenebildiği bir ana bilgisayardan oluşur. Ana bilgisayarlar Windows işletim sistemi ile çalışabilirken, hedef donanımların her biri tabloda belirtildiği üzere kendi özel işletim sistemlerinde çalışmaktadır. Sistem modelleri, ana bilgisayarda çevrim dışı geliştirilir ve platform çeşidine uygun derleyici ile hedef donanımın diline çevrilerek donanıma yüklenir. Hedef donanım bünyesindeki I/O terminalleri ile harici donanıma bağlanır. En sonunda, gerçek zamanlı benzetim hedef donanımda çalıştırılır.

RTDS, türünün ilk gerçek zamanlı benzetici örneğidir [23]. Donanımında RISC (Reduced Instruction Set Computer architecture) mikroişlemci mimarisini kullanan ve VxWorks işletim sisteminde çalışan modüler bir DDB platformudur. Her bir modül, birden çok işlemci içeren elemandan oluşur ve birbirleri ile Gigabit ethernet, TCP/IP, IEC61850 haberleşme protokolü ile haberleşir. Platform, geliştirilecek ve test edilecek sistemin gerektirdiği hesaplama yükü oranında ölçeklendirilebilir. Sistem modeli teknoloji üretici firma tarafından sunulan RSCAD modelleme aracı ile geliştirilir. Bu araç, içerisinde güç sistem elemanlarının hazır modellerinin bulunduğu ve PSS/E gibi bazı güç sistemleri benzetim programlarında geliştirilen modelleri bünyesinde dönüştürebilen bir paket programdır [23]. eMEGASIM, OPAL-RT firması tarafından geliştirilen, bünyesinde çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren gerçek zamanlı karma bir benzetici platformudur [24]. Hesaplama işlemi çok çekirdekli işlemci ile yapılırken FPGA kartı veri haberleşmesindeki gecikmeyi engellemek için harici donanım ile arayüz elemanı olarak kullanılır. Sistem modellemesi, Matlab/SIMULINK üzerinde geliştirilirken, modelin derlenmesi, hedef donanıma yüklenmesi ve çalıştırılması teknoloji üretici firma tarafından sunulan Rt-LAB programı ile yapılır [24]. OPAL-RT firması tarafından büyük ölçekli güç sistemleri için (azami 3 fazlı, 9000 düğüm) geliştirilen HYPERSIM, bulut bilişim tabanlı ve çok çekirdekli işlemci donanımına sahip sanal benzeticilerden oluşan gerçek zamanlı diğer bir benzetici platformudur [25]. Model, grafik kullanıcı ara yüz tabanlı teknoloji üretici firma tarafından sağlanan Hypersim paket program üzerinde geliştirilir ve sistemin gerektirdiği hesaplama gücü kadar çekirdek sanal olarak kullanılır. Benzer karma donanım mimarisine sahip diğer gerçek zamanlı benzetim ve test platformu Speedgoat’dır [26]. Bu platformda FPGA’lar, eMEGASIM’den farklı olarak SIMULINK HDL kod üretici yardımıyla programlanarak benzetimde işlemci olarak kullanılabilir. dSPACE, özellikle endüstriyel ve otomotiv kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde ve testinde sıklıkla kullanılan bir DDB platformudur [27]. Bu platform, modelin kişisel bilgisayarlar üzerinde SIMULINK, State-flow programlar ile geliştirilmesine ve gerçek zamanlı DDB’sine imkân tanır. Daha çok güç elektroniği kontrol sistemleri için geliştirilmiş Typhoon, işlemci olarak FPGA kullanan, gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen bir DDB platformudur [28]. Sistem modeli, teknoloji üretici firma tarafından sağlanan grafik kullanıcı arayüz tabanlı bir paket program olan Schematic üzerinde geliştirilir ve Matlab/SIMULINK ile derlenerek hedef donanıma yüklenir. Bu platform, FPGA kart sayesinde mikro ve nano saniye mertebesi hesap adımlarında gerçek zamanlı benzetimler gerçekleyebilir. Kişisel bilgisayarlar kullanılarak gerçek zamanlı DDB’ye imkân tanıyan diğer platformlar xPC [29] ve ADI rtX’dir [30]. Sistem modelleri SIMULINK, State-flow üzerinde geliştirilir, Real-time Workshop ile derlenerek hedef donanıma yüklenir ve X-PC target Linux veya sistem çekirdeği (kernel) ile gerçek zamanlı çözülür.

Tablo 1. Elektrikli sürme sistemleri için gerçek zamanlı DDB teknolojileri [2]

Teknoloji Adı	Donanım Mimarisi	İşletim Sistemi	Haberleşme Protokolü	Harici Donanım ile Arayüz	Modelleme Aracı	Uygulama Alanları
RTDS [23]	RISC	VxWorks	Gigabit ethernet, TCP/IP, IEC61850	Analog ve sayısal I/O'lar	RSCAD	Güç sistemleri, güç elektroniği ve kontrol sistemleri
eMEGASIM [24]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Linux tabanlı RedHat	Ortak bellek, Gigabit ethernet, UDP/IP, Infiniband, Dophin, IEC61850	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/O'lar	Matlab/SIMULINK	Güç sistemleri, güç elektroniği, otomotiv, kontrol sistemleri
HYPERSIM [25]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Linux tabanlı Hypersim	Gigabit ethernet, IEC61850	PCI-e	Hypersim	Güç sistemleri, güç elektroniği ve kontrol sistemleri
Speedgoat [26]	Çok çekirdekli işlemci ve FPGA	Gerçek zamanlı sistem çekirdeği (kernel)	Profibus, Ethernet/IP, CAN, UDP, MIL-STD-1553	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/O'lar	Matlab/SIMULINK, SIMULINK Real-time, SIMULINK HDL coder	Endüstriyel kontrol, güç elektroniği, otomotiv
dSPACE [27]	Mikroişlemci	QNX ROS	Gigabit ethernet, dSPACE protokol	PCI-e	SIMULINK, State-flow, AUTOSAR	Endüstriyel kontrol, güç elektroniği, otomotiv, uzay
Typhoon [28]	FPGA	FPGA	IEEE 1284C, Ethernet RJ45	FPGA tabanlı analog ve sayısal I/Os	Typhoon schematic	Güç elektroniği kontrol sistemleri
xPC Target [29]	Mikroişlemci ve FPGA	Linux / Gerçek zamanlı sistem çekirdeği (kernel)	PC104, TCP/IP UDP/IP, CAN, J1939, ARINC429, MIL-STD-1553	PCI, PCI-e, PMC,	SIMULINK, State-flow, SIMULINK Coder, HDL coder	Kontrol sistemleri
ADi rtX [30]	Mikroişlemci	QNX TROS	TCP/IP UDP/IP, CAN, ARINC429, MIL-STD-1553, RS-232, RS-422	PCI, PXI, VME, DIOS	ADvantageDE, ADvantageVI	Deniz ve havacılık güç sistemleri, uçak ve gemi benzetimleri

3. DURUM ÇALIŞMALARI (CASE STUDIES)

Bu bölümde örnek bir elektrikli sürme sisteminin gerçek zamanlı DDB'si eMEGASIM OP5600 platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu platform, 3.0 GHz'de çalışan 8 adet Intel işlemci çekirdeği ve 256 analog ve dijital I/O'ya sahip bir SPARTAN-3 FPGA kart içermektedir. Sürme sistemi olarak bir KMSM sürücüsü seçilmiştir. Motor kontrol devresinde, literatürde kullanılan alan yönlendirmeli bir vektör kontrolü gerçekleştirilmiştir. Vektör kontrol devresi, hızlı dinamik cevabına sahip olmasına rağmen hesaplama yönünden karmaşıktır ve ardışık işlem çevrimlerine dayanan programlar ile gerçek zamanlı benzetimi gerçekleştirilememektedir [31]. Aşağıda, bu kontrol sisteminin paralel işleme imkân tanıyan karma OP5600 platformunda gerçek zamanlı benzetimi gösterilecektir.

3.1. Vektör Kontrollü KMSM Sürücü Modeli (Vector Controlled PMSM Drive Model)

Senkron hızda dönen rotor referans çerçevesinde KMSM denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [32]:

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_e \cdot L_{qs} \cdot i_{qs}, \quad 1$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_e \cdot (L_{ds} \cdot i_{ds} + \lambda_{fd}), \quad 2$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_{fd} \cdot i_{qs} + (L_{ds} - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}), \quad 3$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = (T_e - T_L - B \cdot \omega_m) / J, \quad 4$$

gerçekleştirilememiştir. Örneğin, Şekil 5.a'da 5 μ s, 20 kHz anahtarlama frekans değerlerinde hedef donanım benzetim hesaplama değerleri gösterilmiştir. Toplam 441 s benzetim süresi boyunca, toplam 63 defa gerçek zaman benzetim ihlal edilmiş, çözüm süresi seçilen hesaplama adımından fazla sürmüş ve veri kaybı yaşanmıştır. 5 μ s, 20 kHz anahtarlama frekansı durumunda benzetici platformun gerçek zamanlı benzetimi için azami 5.07 μ s süreye ihtiyaç duyulmuştur. Bununla birlikte, 10 μ s zaman aralığında seçilen tüm anahtarlama frekans değerlerinde gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Şekil 5.b'de verildiği üzere, 10 μ s, 20 kHz anahtarlama frekansı için benzetici platformu işlemci çekirdeğin, belirlenen zaman adımında gerçek zaman benzetim süreçlerini tamamlayabilmektedir. Burada, anahtarlama frekans seçiminin hesaplama yüküne etkisinin benzetim zaman adımına göre daha az olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, ele alınan KMSM sürücü sisteminin zaman sabiti ve evirici anahtarlama frekansı dikkate alınarak, gerçek zamanlı benzetim adımı 10 μ s seçilmiştir. Bu zaman çözünürlüğü, 10 kHz olarak seçilen evirici anahtarlama frekansı dinamiklerini analiz etme için oldukça yeterli bir süredir.

Tablo 2. Benzetim adımı ve evirici anahtarlama frekansına göre stator akımları THD'si ve gerçek zamanlı benzetim gerçekleşme durumu

Benzetim zaman adımı	5 μ s				10 μ s			
	4	8	10	20	4	8	10	20
Evirici anahtarlama frekans (kHz)								
Stator akım THD (%)	19.17	12.14	10.64	10.54	23.36	13.55	12.94	12.91
Gerçek zamanlı benzetim durumu	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet

KMSM sürücü modeli Matlab ve SIMULINK ortamında kurulup hedef benzetici OP5600 yüklenmeden önce platformdaki FPGA kartın biçimlendirilmesi ve dolayısıyla I/O'ların etkinleştirilmesi gerekir. Bu işlem teknoloji üretici firma tarafından sağlanan [18] ve SIMULINK kütüphanesinde bulunan Şekil 6'da verilen "OpCtrl makro modeli" ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model, teknoloji üretici firma tarafından sağlanan sunulan Rt-LAB programı ile derlenerek hedef donanım OP5600 üzerine yüklenmiş ve bu program vasıtasıyla gerçek zamanlı benzetim başlatılmıştır. Benzetimde, sürücü sistemi öncelikle boşa çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra $t=0.5$ saniyesinde motora tam yük uygulanmıştır. $t=1$ saniyesinde motor yarı yükle yüklenmiştir. Tüm durumlarda nominal hız (300 d/d) referans olarak girilmiştir. Stator akımları, KMSM moment ve hız cevapları ile DC bara gerilimi hedef donanım üzerinde takip edilmiş ve gerçek zamanlı benzetimin ilk 2 saniyesi boyunca gerçek zamanlı sonuçlar kaydedilmiştir. Kaydedilen sonuçlar Şekil 7-10'da gösterilmiştir.

Monitoring

Model: machine Ts=5.0E-6[s] T=441.975794[s] Number of overruns=63

Probes	<< Info	
	Usage [%]	Mean
machine Ts=5.0E-6[s]	41.98%	
Number of Overruns		63
SM_Drive Ts=4.999999874E-6[s]	41.98%	dt= 2.37 [us]
New data acquisition	0.51%	dt= 0.05 [us]
Major computation time	30.19%	dt= 1.71 [us]
Minor computation time	1.27%	dt= 0.11 [us]
Execution cycle	41.98%	dt= 2.37 [us]
Total step size	100.0%	dt= 5.07 [us]
Total idle	52.35%	dt= 2.76 [us]

a)

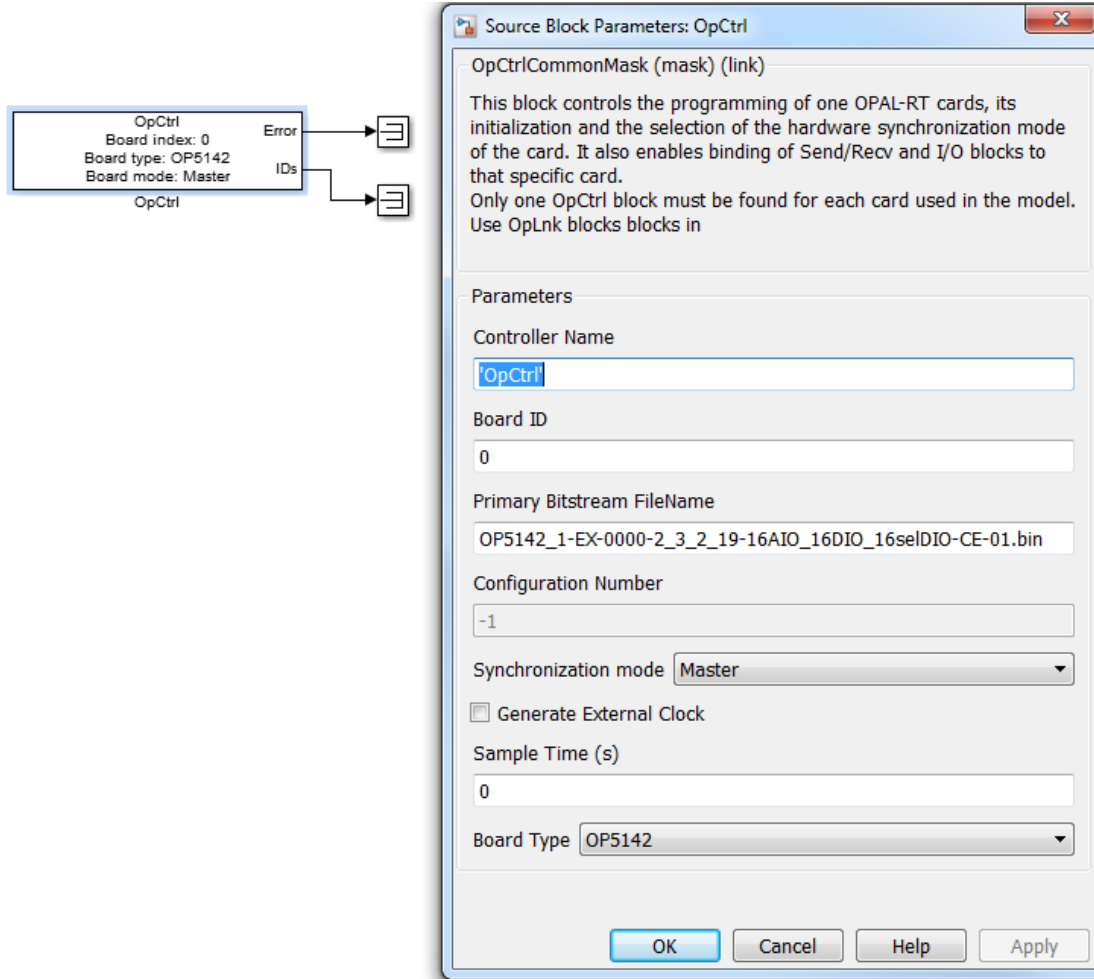
Monitoring

Model: machine Ts=1.0E-5[s] T=463.46745[s] Number of overruns=0

Probes	<< Info	
	Usage [%]	Mean
machine Ts=1.0E-5[s]	22.43%	
Number of Overruns		0
SM_Drive Ts=9.999999747E-6[s]	22.43%	dt= 2.24 [us]
New data acquisition	0.26%	dt= 0.03 [us]
Major computation time	16.03%	dt= 1.60 [us]
Minor computation time	1.15%	dt= 0.12 [us]
Execution cycle	22.43%	dt= 2.24 [us]
Total step size	100.0%	dt= 10.00 [us]
Total idle	74.69%	dt= 7.47 [us]

b)

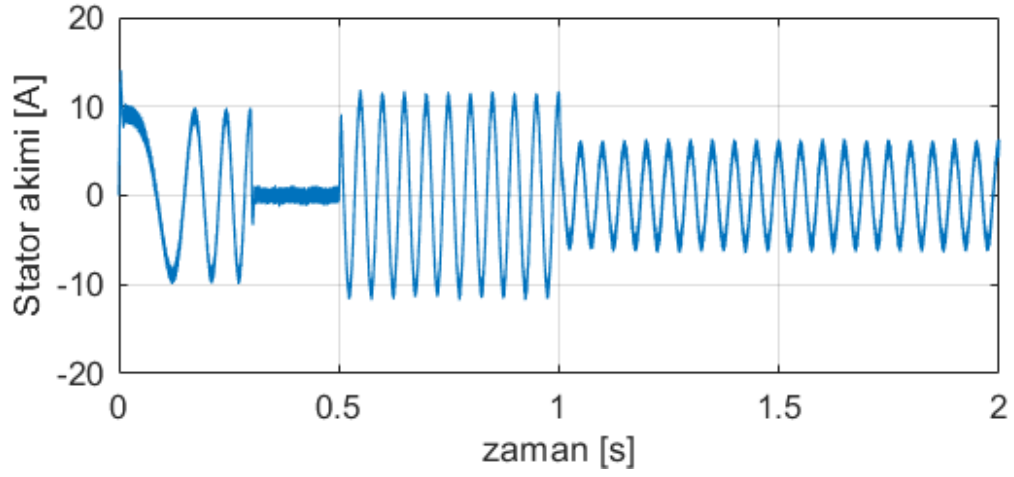
Şekil 5. Bir benzetim zaman adımında gerçek zamanlı benzetim süreçlerinin bir işlemci çekirdeği kaynağını kullanma süreleri (a) 5 µs benzetim adımı, (b) 10 µs benzetim adımı



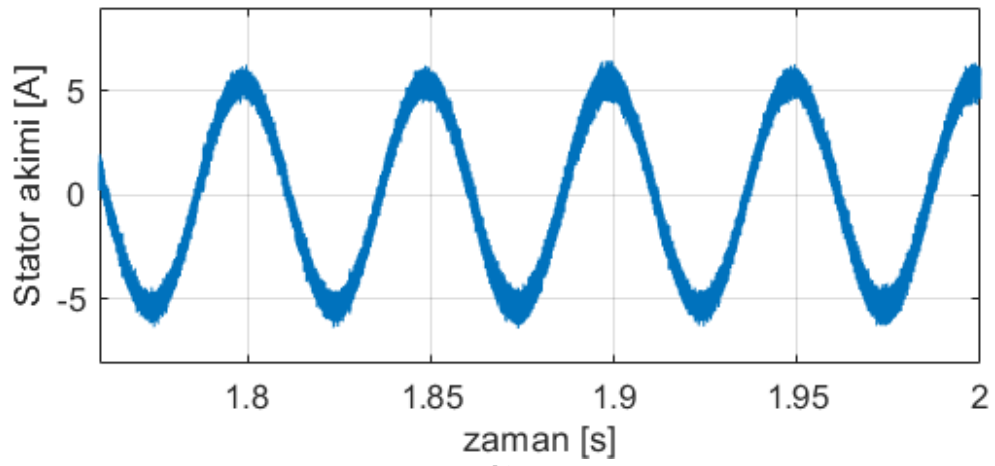
Şekil 6. OP5600 platformu FPGA I/O biçimlendirme bloğu

Şekil 8’de görüldüğü üzere, denetleyicinin dinamik moment cevabı, referans momenti uygun şekilde takip ediyor. Burada, ilk 0.5 s aralığında motor yüksüz çalışmakta, $t=0.5$ s anında tam yük momenti referans olarak uygulanmaktadır. Seçilen örnekleme zamanında ~ 1.5 Nm bir moment dalgalanması ölçüldü. Moment değişimlerinde hız cevabında küçük bir dalgalanma gözlenmekle birlikte, hız ani bir şekilde dengelenmektedir. Motorun yol verme ve moment değişimlerine karşı denetleyici DC bara gerilimini uygun bir şekilde düzenlemektedir. Gerçek zamanlı hız dinamik cevabı Şekil 9’daki gibi elde edilmiştir. $t=0.5$ s ve $t=1$ s anlarında sırasıyla uygulanan tam yük ve yarı yük moment değerlerinde motor hızında ani salınımlar oluşmaktadır. Bu salınımlar, hız denetleyicisi katsayılarının optimize edilmesi ile azaltılabilir.

Bu çalışmada, gerçek zamanlı benzetim 3.0 GHz’de çalışan 1 adet Intel işlemci çekirdeğinde yapılmıştır. Vektör kontrollü bir KMSM sürücü modelinin gerçek zamanlı benzetimi için en az 5.07 μ s süreye ihtiyaç duyulmuştur. 10 μ s benzetim adımında, 1 adet işlemci çekirdeği kaynağının Şekil 5.b’de görüldüğü üzere, yaklaşık %26 oranı kullanılmaktadır. Bu süre elektrik sürücü uygulamaları için yeterli olmakla birlikte, daha yüksek anahtarlama frekans (örneğin 100 kHz değerleri vb.) uygulamalarında, örnekleme zamanını daha da düşürmek için sistem modeli, hedef donanımın sahip olduğu 8 işlemci çekirdeği paralel olarak kullanılabilir. Bunun için sistem modeli durum değişkenleri ve içerdikleri anahtarlama elemanlarına göre 8 parçaya bölünerek optimize edilebilir. Optimize işlemi, şekil 5’te gösterildiği gibi her bir parçanın işlemci çekirdeğinde ne kadar kaynak kullandığı belirlenerek yapılabilir. Ayrıca, kullanılan benzetici platformunda FPGA kartı sistem çözümü yerine I/O biçimlendirilmesi için kullanmakta olup, teknoloji firma tarafından sunulan derleyici ile sistem modeli HDL’ye çevrilememektedir. Sistem modelinin FPGA ile çözülmesi durumunda çok daha düşük örnekleme zamanlarında çalışılabilir.

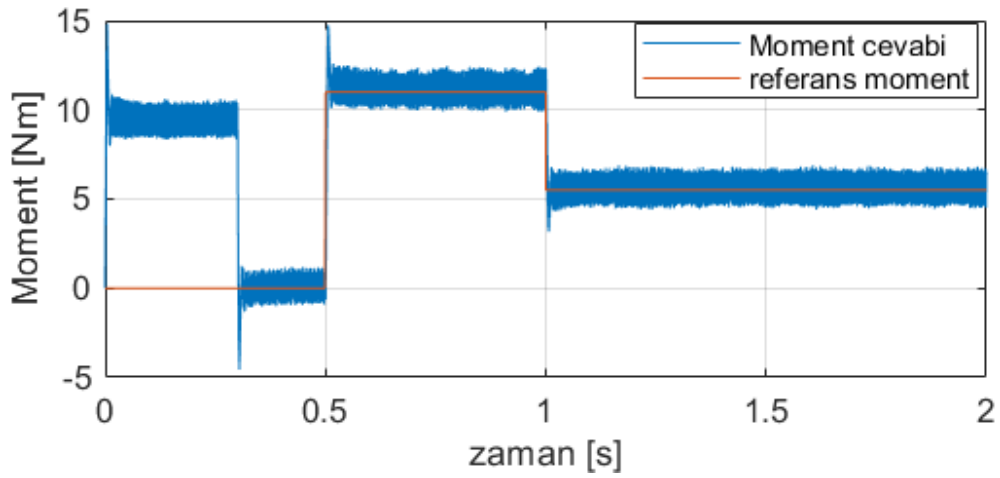


a)

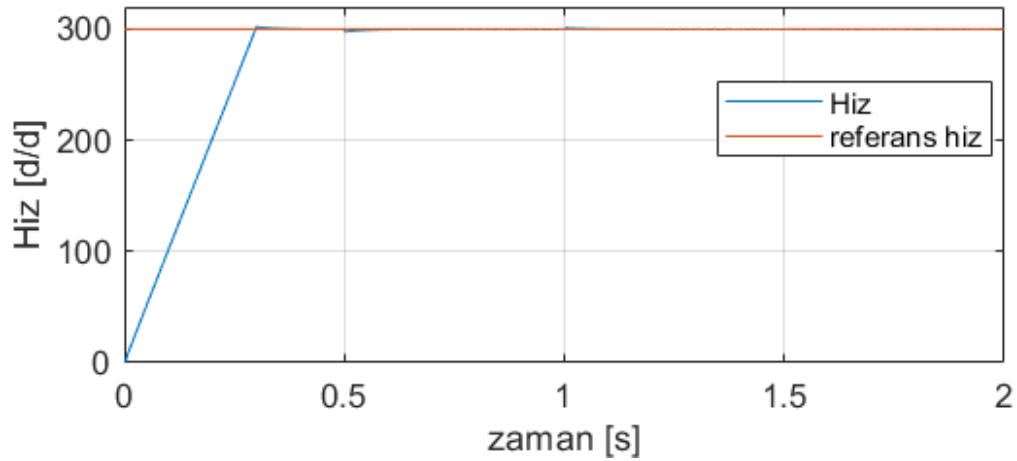


b)

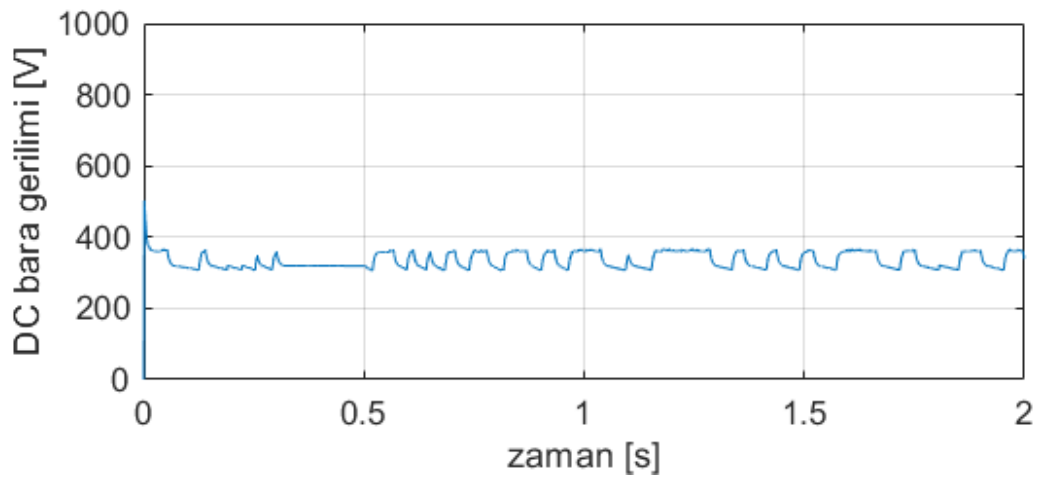
Şekil 7. KMSM stator akımının gerçek zaman davranışı (a) geçici ve kararlı hal cevapları, (b) kararlı hal cevabı



Şekil 8. KMSM momenti gerçek zaman davranışı



Şekil 9. KMSM hız gerçek zaman davranışı



Şekil 10. DC bara gerilimi gerçek zaman davranışı

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrikli sürme sistemlerinin DDB'sinde kullanılan gerçek zamanlı benzetim donanımları ve bu donanımları içeren mevcut teknoloji platformları detaylı incelenmiş, sistem ölçeği ve dinamik hızına göre uygun platform önerilerinde bulunulmuştur. Örnek bir KMSM sürücü sisteminin gerçek zamanlı benzetimi çok çekirdekli işlemci ve FPGA içeren karma bir benzetici platformunda gerçekleştirilmiş, gerçek zamanlı benzetimde karşılaşılan meseleler tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, birkaç mikro saniye örnekleme adımlı elektrikli sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'sinin paralel işleme izin veren çok çekirdekli işlemcilerle gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Birkaç yüz kHz anahtarlama frekansta çalışan sürme sistemlerinin gerçek zamanlı DDB'si için ise FPGA kullanılması gerekmektedir. Donanım betimleme dilinde uzman olmayan kullanıcılar için bu tür uygulamalarda, sistem modelini SIMULINK HDL kod üretici gibi otomatik donanım betimleme diline çevirerek FPGA ile gerçek zamanlı benzetim gerçekleştirebilen teknoloji ürünler kullanması önerilebilir. Yavaş (mili saniye) ve hızlı (mikro saniye) sistem dinamiklerine sahip, çok büyük ölçekli sistemlerin (güç sistemine bağlı rüzgâr çiftlikleri uygulaması, vb) gerçek zamanlı DDB için ise GPU'lar veya birden fazla FPGA'lar önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma University College Cork, Marine and Renewable Energy Centre Elektrik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar altyapısını bu araştırmada kullanılmasına izin verdikleri için University College Cork'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Yaylacı, İ. Yazıcı, Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzeneklerinin Gerçeklenmesi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7 (1), 175-183, 2019.
- [2] M.D.O. Faruque, v.d., Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal 2(2), 63-73, 2015.
- [3] Z. Doğru, Döngüde Donanımsal Benzetim ve Gerçek Zamanlı Gömülü Sistemler, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [4] W. Ren, v.d., Interfacing Issues in Real-Time Digital Simulators, IEEE Trans. on Power Delivery, 26(2), 1221-1230, 2011.
- [5] A. Sarıkan ve M. T. Aydemir, Gerçek Zamanlı Benzetim ve Kapalı Döngü İçerisinde Donanım Desteği: Uygulamalar ve Sınırlamalar, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 24(3), 517-524, 2009.
- [6] S. Mojlish, N. Erdogan, D. Levine, and A. Davoudi, Review of Hardware Platforms for Real-Time Simulation of Electric Machines, IEEE Trans. on Transportation Electrification, 3(1), 130-146, 2017.
- [7] S. Tezcan, Rüzgâr Santrallerinin Modellenmesi ve Rüzgâr Santrallerinin İletim Sistemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 197-212, 2017.
- [8] R. Champagne, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and G. Sybille, Analysis and validation of a real-time AC drive simulator, IEEE Trans. on Power Electronics, 19(2), 336-345, 2004.
- [9] L.F. Pak and V. Dinavahi, Real-time simulation of a wind energy system based on the doubly-fed induction generator, IEEE Trans. on Power Systems 24(3), 1301-1309, 2009.
- [10] N.R. Tavana and V. Dinavahi, A general framework for FPGA-based real-time emulation of electrical machines for HIL applications, IEEE Trans. on Industrial Electronics 62(4), 2041-2053, 2015.
- [11] M. Peker, O. Özkaraca, Büyük ölçekli veri setleri için GPU hızlandırmalı melez bir GA-SVM: Cu-GA-SVM, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 581-591, 2018.
- [12] Z. Zhou and V. Dinavahi, Parallel massive-thread electromagnetic transient simulation on GPU, IEEE Trans. on Power Delivery 29(3), 1045-1053, 2014.
- [13] M. Yeşilbudak, S. Ermiş, R. Bayındır, Farklı Baralara Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (3), 237-246, 2017.
- [14] S. Usenmez, R. A. Dilan, M. Dolen, & A.B. Koku, Real-time hardware-in-the-loop simulation of electrical machine systems using FPGAs, In IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1-6, November, 2009.
- [15] N. Erdogan, T. Assaf, R. Grisel, & M. Aubourg, An accurate 3-phase induction machine model including skin effect and saturations for transient studies, In IEEE Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Vol. 2, 646-649, 2003.
- [16] İ. Çelik, C. Yıldız, M. Şekkeli, Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (4), 898-908, 2018.
- [17] E. Duman, E. Akın, EEBM Eğitiminde Döngüde Donanımsal Benzetim Tekniğinin Kullanımı, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi 2. Ulusal Sempozyumu, Samsun, 1-5, 2005.

- [18] X. Guillaud v.d., Applications of real-time simulation technologies in power and energy systems, IEEE Power and Energy Technology Systems Journal 2(3), 103-115, 2015.
- [19] V. Jalili-Marandi, L. F. Pak, & V. Dinavahi, Real-time simulation of grid-connected wind farms using physical aggregation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 57(9), 3010-3021, 2010.
- [20] S. Abourida, C. Dufour, and J. Bélanger, Real-Time and Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drives and Power Electronics: Process, problems and solutions, In Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005), Niigata, Japan. 2005.
- [21] S. Abourida, v.d. Hardware-in-the-loop simulation of finite-element based motor drives with RT-LAB and JMAG, in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, 2006.
- [22] P. G. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, J. Giesbrecht, & L. Arendt, A real time digital simulator for testing relays, IEEE Trans. on Power Delivery, 7(1), 207-213, 1992.
- [23] RTDS Tech. Inc. Real time digital power system simulation. <https://www.rtds.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [24] OPAL-RT Inc. RT-LAB: Distributed Real-Time platform v11.2.2.108. <https://www.opal-rt.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [25] OPAL-RT Inc. Hypersim real-time simulation. <https://www.opal-rt.com/systems-hypersim>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [26] Speedgoat GmbH, Real-time simulation and testing, <https://www.speedgoat.com/> 2019. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [27] dSPACE GmbH. dSPACE manual. <https://www.dspace.com/en>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [28] Typhoon HIL Inc. Typhoon HIL real-time simulator. <https://www.typhoon-hil.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [29] MathWorks Inc. xPC Target for use with real-time workshop. https://www.mathworks.com/tagteam/37937_xpc_target_selecting_hardware_guide.pdf. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [30] ADI Applied Dynamics International. ADI rTX. <https://www.adi.com>. Erişim tarihi Eylül, 21, 2019.
- [31] A.A. Adam, K. Gulez, & N. Erdogan, Minimum torque ripple algorithm with fuzzy logic controller for DTC of PMSM, In International Conference on Intelligent Computing, pp. 511-521, 2007.
- [32] D. Uygun, Y. Çetinceviz, Yüzey Yerleştirmeli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Tutma Torkunun Azaltılması İçin Stator Yapılandırması, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 605-620, 2018.