

GERÇEK ZAMANLI BENZETİM ve KAPALI DÖNGÜ İÇERİSİNDE DONANIM DESTEĞİ: UYGULAMALAR VE SINIRLAMALAR

Alper SARIKAN ve M. Timur AYDEMİR*

KAREL Elektronik A.Ş., Cyberpark Cyberplaza B Blok, Kat 3, Bilkent Ankara

*Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe
06750, Ankara

alper.sarikan@gmail.com, aydemirmt@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11.2008 ; Kabul/Accepted: 16.04.2009)

ÖZET

Gerçek zamanlı benzetim ve kapalı döngü içerisinde donanım desteği hızla yaygınlaşmakta ve yeni uygulama alanları bulmaktadır. Bu makalede gerçek zamanlı benzetim ve kapalı döngü içerisinde donanım desteği konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş ve gerçek zamanlı benzetimin uydu yönelim sistemine uygulanması projesi kapsamında elde edilen deneyimlerle birleştirilerek özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gerçek zamanlı benzetim; kapalı döngü içerisinde donanım.

REAL-TIME SIMULATION and HARDWARE IN THE LOOP: APPLICATIONS and RESTRICTIONS

ABSTRACT

Real time digital simulation and hardware in the loop testing have been finding widespread use in different applications. This paper presents a literature survey of the recent research done in the field of real time digital simulation and hardware in the loop testing. Literature survey is supported by the experience gained during the application of the technique to a satellite attitude system.

Keywords: Real time digital simulation; hardware in the loop.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Normal benzetim araçlarının temel dezavantajı işlemlerinin gerçek zamanlı olmamasından kaynaklanmaktadır. Yani, modellenen sistemin tepkisini hesaplamak için işlemci tarafından harcanacak zaman gerçekte harcanacak zamandan çok daha büyüktür. Gerçek zamanlı olmayan bu işlem benzeticiye dışarıdan cihaz bağlanmasını engellemektedir. Harici cihaz bağlanamaması da benzeticilerin fiziksel kontrol ve koruma cihazlarının test edilmesinde kullanımını sınırlamaktadır.

Uzay araçları, elektrikli gemiler, hibrit elektrikli araçlar, dağıtık enerji sistemleri gibi bazı uygulamalar, içerlerinde karmaşık güç üretim ve dağıtım sistemlerini barındırırlar [1, 2]. Çok sayıda jeneratörün ve karmaşık yükün güç elektroniği devreleriyle

birbirine bağlandığı bu sistemlerde enerji kalitesini ve güvenilirliği tüm çalışma koşullarında sağlamak çok önemlidir. Bu tür karmaşık sistemlerin tasarımı, birleştirilmesi ve üretim sonrası kabul testleri büyük zorluklar içermektedir. Çok sayıda dinamik değişken içeren bu sistemlerin tüm çalışma koşulları için testlerini gerçekleştirmek çoğu zaman olası olamamakta veya çok özel test ortamlarının kullanımını gerektirmektedir. Son yıllarda, zaman alıcı ve pahalı olan bu yöntemlere seçenек olarak gerçek zamanlı sayısal benzetim yöntemi ve döngüde donanım test yöntemi geliştirilmiştir.

Karmaşık ve hızlı çalışan sistemlerin dinamik davranışlarını analiz edebilmek için de gerçek zamanlı benzetime ihtiyaç duyulmaktadır. Analog benzeticiler bu amaçla kullanışlıdır ancak modellenen sistemin büyüklüğü konusunda sınırlamalara sahiptir [3].

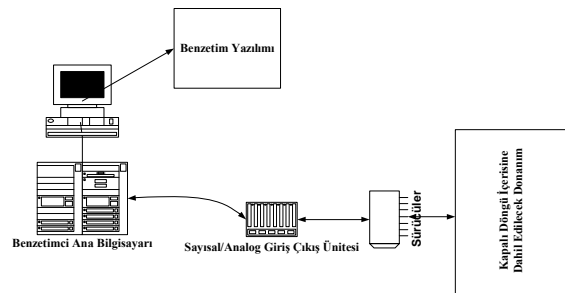
Bu makalede, söz konusu yöntemler ve bu yöntemlerin uygulama alanları hakkında bilgi verilmekte, yöntemlerin avantaj ve dezavantajları sunulmakta, kısıtlar anlatılmaktadır.

2. GERÇEK ZAMANLI BENZETİM SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI (GENERAL STRUCTURE OF REAL TIME DIGITAL SIMULATION SYSTEMS)

Gerçek zamanlı benzetim (GZB) araçları, yapılarında bir donanım bloğu ve bir de yazılım bloğu içerir. Donanım bloğu, benzetimi yapılacak uygulamaya özel arayüzleri içerir. Yazılım bloğunun işlevi de bir yandan söz konusu özel donanım bloğunu desteklemek, bir yandan da bu donanıma bağlı arayüz bağlantısı üzerinden benzetimi yapılacak sistemi kontrol etmektir. Uygulamanın türüne göre, kullanıcı bir grafik arayüz aracılığıyla kütüphaneden bileşen seçer ve benzetim parametrelerini ayarlayabilir. Gerçek zamanlı benzetim süreci, benzetim süresi ve adım aralığının seçimi, kapalı döngü içerisinde donanım desteği ayarının yapılması ve kütüphaneden kullanılacak parçalar için koşturulacak matematiksel modellerin belirlenmesi ile başlar. Gerçek zamanlı benzetimin süresi ise, uygulamanın türüne göre bağlı olarak kısa veya uzun olabilir. Gerçek zamanlı benzetim ortamının genel yapısı ve kapalı döngü içerisinde donanım desteğinin nasıl sağlanabileceğine yönelik örnek ortam Şekil 1’de verilmiştir.

Kapalı Döngü İçerisinde Donanım (KPDD) desteği, gerçek çalışma ortamlarında yaratılması zor olan veya zaman alacak olan özel durumlarda bir sistemin nasıl tepki vereceğini gözlemlemek için kullanılır. Bunun için, test edilecek sistem benzeticiye ait giriş ve çıkışlara bağlanır. Bu giriş ve çıkışlar sayısal veya analog olabilir. Sistemdeki denklemler benzetici tarafından çok hızlı biçimde çözülebilmeli ve bir sonraki örnekleme değeri benzeticiye ulaşmadan hesaplanan çıktı hazır edilebilmelidir [4]. Bu yapının bir diğer önemli özelliği ise, hiç donanım desteği olmaksızın sadece benzetimle başlayıp, donanım bloklarının (elektriksel ve mekanik alt sistemler) tasarım ilerledikçe parça-parça benzeticiye dahil edilmesiyle, tümleşik sistemin testine olanak vermesidir [5, 6].

Kapalı döngü içerisinde benzetim aynı zamanda, sistem seviyesindeki testlerin hızlı ve ucuz biçimde



Şekil 1. Gerçek zamanlı benzetim ortamının genel yapısı (General structure of a real time digital simulation environment)

yapılmasını sağlar. Sistem parametreleri benzetim yazılımında kolaylıkla değiştirilebileceği için testler hızlı ve geniş bir aralığı kapsayacak şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Geleneksel olarak, pek çok sistem, kendi çalışma ortamlarına kurulduktan sonra test edilmektedir. Gelişmiş kontrol sistemlerinde proje başına 100 000 satırdan uzun yazılımların bulunması ve bunların da birden fazla kontrol kartında farklı işlemcilerde çalışmaları nedeniyle, bu geleneksel test yapısı yeterli değildir. Bu kapsamda sistem entegrasyonu, test ve doğrulama süreçlerine özel önem vermek gerekmektedir. Test ve doğrulama süreçlerinde bulunabilirlik (gerçek sistem mevcut olamayabilir veya uzay uygulamalarında olduğu gibi, erişilemeyebilir), risk (insan hayatı veya ekonomik), maliyet (gerçek sistemde test çok maliyetli sonuçlar doğurabilir) ve kapsam (normal çalışma sırasında tüm test senaryoları yaratılamayabilir) önem taşımaktadır [5].

Yarıiletken teknolojisinde yaşanan hızlı gelişmelere paralel olarak düşük maliyetli ve işlem gücü yüksek işaret işleyicilerin gelişmesiyle, geleneksel analog kontrol sistemlerinin yerini sayısal kontrol sistemleri almaya başlamıştır. Sayısal kontrol üniteleri enerji üretim, iletim ve dağıtım şebekelerinde kullanılan güç elektroniği tabanlı denetleyicilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir sayısal kontrol sistemi genelde bir veya daha çok işlemci, çevre birimleri ve gömülü yazılımdan oluşur ve temel görevleri şunlardır:

- bilgi alma ve işleme
- haberleşme
- sistem mantık kapısı yönetimi ve kontrol algoritmaları
- güç devresi arayüzü
- harici fonksiyonlar

Sayısal kontrol sistemlerinde kullanılabilen işlemci üniteleri ise şöyle sıralanabilir:

- Genel amaçlı işlemciler.
- Mikroişlemciler
- Uygulama Özel Entegre Devreler (ASIC)
- Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA)
- Sayısal İşaret İşleyiciler (DSP)
- Komut Kümesi Küçültülmüş Bilgisayar (RISC) tabanlı işlemciler
- Paralel işlemciler

Sayısal kontrol sistemlerinin piyasaya sürülmeden önce titiz bir performans analiz sürecinden geçirilmesi gerekmektedir [2]. Bu analizler sırasında kontrol sistemi, ilgili güç elektroniği donanımları ile, içerisinde çalışacağı güç sistemi çerçevesinde ele alınmalıdır. Bu tür performans testlerini gerçekleştirebilmek için üç farklı yaklaşım seçilebilir. İlk yaklaşım sayısal kontrol sisteminin uygun biçimde ölçeklendirilmiş güç elektroniği ekipmanları ve güç sistemini simüle

eden bir benzeticiyle birlikte çalıştırılmasıdır. Bu yaklaşımın temel dezavantajları şunlardır:

- Yüksek miktarda işgücü ve kaynak gerektirmesi.
- Altyapı hazırlanması için uzun süre gerektirmesi
- Farklı senaryolarda test yapılmasına olanak verecek şekilde esnek olmaması
- Doğrusal olmayan yükler altında sistem tepkisini göstermemesi

Bu konudaki ikinci yaklaşım çevrim-dışı sayısal benzetimdir. Çevrim-dışı benzetim için, güçlü işlem yeteneğine sahip yazılım araçları hali hazırda mevcuttur. EMTP, PSCAD/EMTDC, ve NETOMAC gibi yazılımlar buna örnek olarak gösterilebilir. Bu araçlar güç elektroniği ve güç sistemleri parçalarının yanı sıra sayısal kontrol ünitelerini oluşturan temel mantık ve algoritma bloklarını da içlerinde barındırmaktadır. Fakat karmaşık ve denenmemiş bir kontrol sistemi gerçekleştirilmesinin çevrim-dışı benzetim aracında çalıştırılması zor olacağı gibi, bu sonuçları itibarıyla da hataya açık olacaktır.

Üçüncü yaklaşım sayısal kontrol ünitesinin çevrim-içi gerçek zamanlı benzeticiyle test edilmesidir. Benzeticide güç elektroniği ve güç sisteminin benzetimini yapabilecek parçalar mevcut olacaktır. Kontrol sistemiyle gerçek zamanlı benzetici arayüzü oluşturulurken kontrolcünün üreteceği güç elektroniği anahtar devrelerini tetikleme işaretlerinin benzeticinin adım aralığı ile uyumlu çalışması hedeflenmelidir. Bu noktada oluşacak bir uyumsuzluk hatalı sonuçlar elde edilmesine sebep olacaktır [2].

3. GERÇEK ZAMANLI BENZETİM UYGULAMA ALANLARI (APPLICATION AREAS OF REAL TIME SIMULATION)

Gerçek zamanlı benzetim araçları analog ve sayısal benzetim araçlarının esnekliğini biraraya getirdiği için pek çok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Bu alanlar ve literatürde yer alan farklı incelemeler-uygulamalar aşağıda sıralanmıştır.

Gerçek zamanlı benzetim araçları modern koruma ve kontrol ünitelerinin performanslarını ölçmede kullanılan başlıca araçlardan bir tanesidir. Gerçek zamanlı benzetimler, enerji sistemlerinin koruma ekipmanlarının tasarımında da kullanılabilir [1,7,8]. Buna ek olarak sorunlu durumlara ait veriler saklandıkları kayıtlardan alınarak sistem performansı değerlendirilmesinde kullanılabilir. Sistem operatörlerine göre bu tür sistemler özellikle geçici durum tepkilerinin anlaşılması ve analiz edilmesinde yararlı olmaktadır. Sistemlerin karmaşıklıkları arttıkça bu tür uygulamalara daha çok ihtiyaç duyulmaktadır. Hata durumu kayıtlarının bir başka kullanım alanı da yapay zeka uygulamaları ile sisteme koruma ve kontrol için daha yeni ölçüm algoritmalarının öğretilebilmesine olanak sağlamasıdır [9].

Günümüzde sayısal mesafe röleleri güç iletim hatlarını korumak için kullanılmaktadır. Koruma amaçlı bu rölelerin testlerinin yapılabilmesi ve donanım kapalı döngü içerisinde testlerinin yapılabilmesi için test yatağı oluşturulması ve ilgili yazılım algoritmalarının geliştirilmesi Waikar ve arkadaşları tarafından [10] numaralı makalede aktarılmıştır. [7] numaralı çalışmada da gerçek zamanlı bir güç sistemi benzetim aracı ve röle performansı değerlendirmesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Güç iletim sistemlerinde oluşabilecek hata durumlarının gerçek zamanlı simülasyonuna yönelik model [11] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. [12] numaralı kaynakta 50MVar'lık statik senkron kompanzator için gerçek zamanlı benzetim uygulaması aktarılmaktadır. Harmoniklerin gerçek zamanlı olarak benzetilmesine yönelik inceleme [13] numaralı kaynakta aktarılmaktadır.

Endüktif yüklerle sonlanan, 100 V d.c. ile beslenen, tek fazlı, 300 km uzunluğunda bir iletim hattı [4] numaralı kaynakta benzetimi yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan benzetim enerjilenme anında oluşan durumları da içermektedir. Çalışmada DSP yerine FPGA (Field Programmable Gate Array) kullanılmış ve bu kullanım sayesinde adım aralığı düşürülmüştür. FPGA kullanılarak adım aralığı 100 ns'nin altına düşürülmüştür. Bu adım aralığı da istenilen 50 μ s adım aralığının yaklaşık 1/500'ü kadardır.

Rüzgar tribünü kullanımı enerji sistemlerinde giderek yaygınlaşmaktadır. Modern rüzgar tribünlerinde güç elektroniği çeviricileri ve karmaşık kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu yeni enerji kaynaklarının güç sistemleri üzerindeki etkisini analiz edebilmek için sistemdeki elektromanyetik geçici durumların benzetilmesi ve analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu amaçla rüzgar tribünlerini gerçek zamanlı olarak benzetebilecek araçlara veya metodlara ihtiyaç duyulmaktadır [14].

Elektrik güç sistemlerinin gerçek zamanlı benzetim amacıyla farklı algoritmaların üretilip denenmesi Groom ve arkadaşları tarafından [15] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. Bu çalışmada sistem geçici durumları ve dinamik kararsızlığı simüle edebilmek için geliştirilen hızlı ve karmaşık algoritmaların performanslarının geleneksel matematiksel modellerle performans karşılaştırması yer almaktadır.

Bir güç sisteminin frekansının gerçek zamanlı tesbiti amacıyla Lobos ve arkadaşları tarafından geliştirilen algoritma [16] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. Sayısal filtreleme ve Prony kestirimi kullanılarak oluşturulan bu algoritma ile, yüksek harmonik içeriğinin bulunduğu durumlarda güç sistemi frekansı ölçülmektedir. Bu ölçüm sonuçlarının dönen gerilim fazının açısı hızının ölçülmesi ile karşılaştırılması

gerçekleştirilmiş ve geliştirilen bu algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Nükleer güç üniteleri için bir test yatağı uygulaması konusunda Kwon ve arkadaşları tarafından [17] numaralı makalede bilgi verilmektedir. Bu kaynakta genel olarak test sisteminin yapısı aktarılmakta ve otomatik başlama kontrol ünitesi, dinamik alarm ünitesi, kaza uyarı ünitesi ve takip sisteminden oluşan bir prototipe uygulanarak test sonuçları elde edilmektedir.

Bir başka uygulama alanı da uzay teknolojisidir. Kendi ortamında test edilemeyecek uzay araçlarının testlerinde kullanılmak üzere geliştirilen araç kontrol sistemi işleme alınmadan önce doğruluğunu kanıtlamak için gerçek zamanlı simülasyon kullanılarak test edilir. Riskleri ve maliyeti en aza indirebilmek ve kontrolçüyü derinlemesine test edebilmek için kontrolcü kapalı döngü içerisinde uzay aracı simülatörüne bağlanır [5].

Uzay teknolojisinde araştırma yapmak ayrıca oldukça da maliyetli bir iştir. Günümüzde bu maliyetleri azaltmanın yolları aranmaktadır. Bu sebeple uzay aracı üreticilerinin tasarım, geliştirme, test ve üretim süreçlerini daha verimli hale getirmeleri gerekmektedir. Bu beklentilerin yanısıra uzay araçlarında kullanılan sistemlerin büyümesi ve gelişmesi daha hızlı analiz ve benzetim araçlarına ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Uluslararası uzay üssü için Boeing firması tarafından geliştirilen benzetim aracında kullanılan algoritmalar M. Ayres ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen yazılımın temelini Newton metodunu kullanan bir ağ çözümleyicisi algoritması oluşturmaktadır. Çalışmada elektriksel yapı ile akış kontrolü yapısı benzer biçimde modellenecek düğüm noktaları için nesne yönelimli yazılım geliştirilmiştir. Algoritmanın hızlı çalışması sayesinde kapalı döngü içerisinde donanım desteği ile gerçek zamanlı benzetim uygulamalarında kullanılabilmiştir. Yöntem, uluslararası uzay üssünde yer alan 420x420 lik bir matrisle ifade edilen güç şebekesi ile 200x200 lük bir matrisle ifade edilen termal kontrol sistemine uygulanmıştır [18].

Kapalı döngü içerisinde benzetim tekniği güç elektroniği ve elektrik makinaları alanlarında da uygulama bulmuştur. 48 darbeleri GTO STATCOM uygulaması RT-LAB programı kullanılarak gerçekleştirilen uygulama [6] numaralı kaynakta anlatılmaktadır. Çalışmada Linux işletim sistemi ile çalışan bir bilgisayar ve bu bilgisayara bağlı olarak çalışan işlemciler kullanılmıştır. Simüle edilen güç sisteminde 3 iletim hattı ve 3 tane de bara yer almaktadır. Linux işletim sisteminde çalışan 2.4 GHz Dual-Xeon işlemcili bir bilgisayar kullanılarak STATCOM ve güç sistemi 36 μ s adım aralığıyla gerçek zamanlı olarak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

[19] numaralı kaynakta DC sürücü (3 fazlı 6 darbeleri tristörlü AC-DC çevirici) ve asenkron motoru sürücüsü (PWM tetiklemeli IGBTli) için de gerçek zamanlı benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde RT-LAB kullanılmıştır. DC sürücü benzetiminde 1 GHz hızında 3 tane Pentium III işlemci kullanılmış, işlemcilerden bir tanesi sürücü için ayrılmış, bir diğeri tetikleme sinyalleri için ve sonuncusu da kontrolcü için ayrılmıştır. 3 işlemcili bu yapı sayesinde 35 μ s adım aralığı benzetimde yakalanmıştır.

PWM VSI tabanlı asenkron motoru benzetimi [20] numaralı kaynakta yapılmıştır. Benzetimde MOSFET köprü ile dc kaynak üç faz ac akıma dönüştürülmekte ve bu akım da 3 hp gücündeki asenkron motorunun sürülmesinde kullanılmaktadır. Benzetimin adım aralığı 7.5 μ s dir.

Sayısal kontrolörlerle yönetilen güç elektroniği ekipmanlarının gerçek zamanlı benzetim hakkında genel yapı [21] numaralı makalede incelenmektedir. Boost tipinde bir dönüştürücünün geribesleme kontrol sistemi [22] numaralı kaynakta aktarılan sistemle analiz edilmiştir.

FPGA kullanılarak üç fazlı asenkron motor için gerçek zamanlı donanım modeli gerçekleştirilmesi [23] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan modelin FPGA üzerinde koşması sağlanarak geleneksel yazılım tabanlı modellerden daha hızlı işlemesi sağlanmıştır.

[24] numaralı kaynakta bulanık mantık kontrolçüsü kullanılarak kontrol algoritması geliştirilen kapalı döngü içerisinde donanım desteği uygulaması DC motorun hız kontrolü şeklinde sunulmakta ve sonuçları değerlendirilmektedir.

Eksenel akılı motorların elektrikli araçta kullanılması Kapalı Döngü İçerisinde Donanım Desteği metodu ile [25] numaralı kaynakta benzetimi yapılmıştır. Bu çalışmada araç benzetim programı kullanılmıştır. Motor modeli farklı çalışma ortamlarını karşılayacak şekilde oluşturulmuştur. Farklı sürüş koşullarında değişken hava aralıklı eksenel motorun gerçek karakteristiği KDDD metodunda kullanılmak amacıyla ölçülmüştür.

Bağlaç çizgesi (Bond graph) metodu Simulink içerisinde kullanılarak PI kontrollü üç fazlı doğrultucu [26] numaralı kaynakta benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, sürekli sistemlerin modellenmesine eklentilerle olanak sağlar ve güç akışını göstermek için kullanılır. Bağlaç çizgesi, bağların birleşmesiyle oluşmaktadır. Güç akışı olan bir noktadan diğer bir noktaya olan her bağlantı bir bağlaç olarak tanımlanmaktadır.

Yüksek Gerilim DA İletim (HVDC) sistemi [20] numaralı kaynakta benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu

sistem içerisinde 12 darbeli tristör köprü 300 km uzunluğundaki bir DA hatta bağlıdır. Tüm sistem 40 \square s adım aralığıyla benzetimi yapılmıştır. Sistemin gerçekteki çalışma zamanı ise 38.4 \square s olarak belirlenmiştir. Benzetim sonucunda elde edilen veriler gerçek sistemden elde edilen verilere çok yaklaşık bulunmuştur.

Elektrikli araçlar, gerçek zamanlı benzetim sistemleri için önemli bir uygulama alanıdır. Tamamı elektrikli bir araca, kapalı döngü içerisinde donanım desteği bulunan gerçek zamanlı simülasyon uygulaması [27] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. Elektrikli araçlar için test yatağı uygulaması da [28] numaralı makalede verilmiştir.

Gerçek zamanlı benzetim sistemlerinde doğruluğu arttırmak ve işlem süresini kısaltmak için de çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Gerçek zamanlı benzetim yazılımlarında kullanılmak üzere periyodik sinyal analizi konusunda Xi ve arkadaşları tarafından geliştirilen algoritma [29] numaralı kaynakta aktarılmaktadır. Yeni geliştirilen algoritma sayısal güç ölçere uygulanarak digital Fourier Transform (DFT) ile harmonik analizi ile kıyaslanmış ve performansının DFT analiz yönteminden kaynaklı sızıntıları azaltmasından dolayı daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Harici sistemlerle kapalı döngü içerisinde donanım desteği bloğunun senkron çalışabilmesi için yazılım algoritmaları [30] numaralı makalede incelenmiştir. Örnek olarak güç sistemi elektromanyetik geçici durumları için uygulamalar ele alınmış ve algoritmanın hız, doğruluk performansı değerlendirilmiştir. Gerçek zamanlı benzetim uygulamalarında ihtiyaç duyulan yüksek işlem yeteneği ve hızın elde edilebilmesi için DSP'lerin paralel çalıştırılması, işlemlerin DSP'lere dağıtılması konusunda [31] numaralı kaynakta bilgi verilmektedir. Bu kaynakta DSPlerin haberleşme altyapısının DMA(Direct Memory Access) yöntemiyle yapılmasının performansı artırıcı olduğu tespit edilmiştir. DMA kullanılarak işlemcinin komut yürütümünü engellemeksizin DMA alt işleyicisi aracılığıyla işlemciler birbiriyle haberleşebilmekte ve komut yürütümlerini paralel olarak gerçekleştirebilmektedirler.

4. TEST ORTAMI (TESTING ENVIRONMENT)

Kapalı döngü içerisinde benzetim için, sistemin test edilen kısmı haricinde kalan bölümün dinamik modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem içeriğinde, tüm arayüz bağlantıları yer almalıdır. Kapalı döngü içerisinde benzetim, gerçek donanımdaki tüm ölçümleri gözlemleyerek sistemin geri kalanı için gerekli komutları üretmektedir. Teste tabi tutulan bloktan alınan çıktılar algılayıcılar tarafından okunmaktadır. Test sisteminin girdileri ise operatör tarafından verilen komutlardan oluşmaktadır.

Öncelikle test edilecek sistemin parametreleri simülöre yüklenmelidir (örneğin bir uzay uygulamasında

parçaların ağırlıkları, eylemsizlik ve esneklik özellikleri, parçalar arasındaki bağlantı özellikleri gibi). Sistemin genel parametreleri ayarlandıktan sonra sistemde hangi bileşenlerin matematiksel modelinin çalışacağı, hangi bileşenlerin kapalı döngü içerisinde donanım desteği ile çalışacağı ve bunlar arasındaki bağlantı ilişkileri ayarlanmalıdır. Tüm bu ayarlamalar yapıldıktan sonra testte kullanılacak adım aralığı, testin süresi ve test sonunda elde edilecek verilerin depolanacağı birim tanımlanmalıdır. Son olarak test süresince ele alınacak farklı senaryolar sisteme girilmelidir. Oluşturulacak senaryolarda özellikle normal çalışma durumlarının yanı sıra geçici aşırı yük durumları ve hata durumları da ele alınmalıdır.

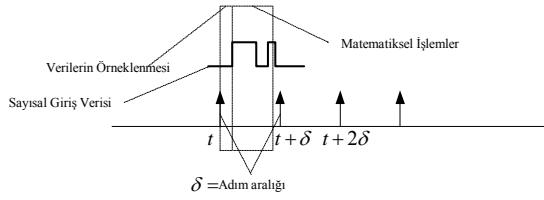
Gerçek zamanlı simülasyonda çevrimiçi veri ve sinyal akışını senkron olarak sağlayabilmek için adım aralığı en önemli parametrelerden birisidir. Simülasyon yazılımı her adım aralığında donanım desteği dahilinde gerekli giriş/çıkış (I/O) işlemlerinin gerçekleştirir; ilgili matematiksel modelleri çalıştırır ve sonuçları kaydedip bir sonraki adım aralığını bekler. Bu bekleme sırasında giriş çıkış bilgilerinin yeniden örneklenmesinin değerlendirildiği farklı optimizasyon algoritması çalışmaları da yapılmaktadır [32].

Gerçek zamanlı simülasyonda matematiksel işlemlerin sonuçları harici depolama birimlerine periyodik olarak aktarılmaktadır. Veri alış-verişi sırasında oluşabilecek anahtarlama olaylarının da simülasyona yansması ve elde edilen sonuçların doğruluğunu arttırabilmek veri alış-verişi sırasında da sistemin kontrol edilmesi ve geçici durumların oluşması halinde bu bilgilerin de hesaplanması gerçekleştirilebilir [33].

5. KARŞILAŞILAN PROBLEMLER (ENCOUNTERED PROBLEMS)

Dışarıdan takılan donanımla senkronizasyon gerçek zamanlı simülasyonda önemli noktalardan bir tanesidir. Simülasyon yazılımları sabit adım aralığını kullanarak örnekleme yaptığı ve matematiksel denklemlerin çözülmesinde de aynı adım aralığını kullandığı için bu işlemler sırasında oluşabilecek geçici durumları değerlendiremeyebilir.

Örnekleme arasında oluşabilecek geçici durumların benzetimci tarafından algılanmamasına yönelik örnek Şekil 2'de incelenebilir. Şekil 2'de anında örneklenen sayısal giriş verisinin bir sonraki örnekleme zamanı olan anına kadar farklı değerler aldığı ancak örnekleme anında bir önceki örnekleme değeri ile aynı noktada olduğu gözlemlenmektedir. Bu veri dikkate alındığında Şekil 2'de aktarılan olası durumlarda, örnekleme zamanları arasında gerçekleşen geçici durumlar benzetim aracı tarafından değerlendirilememektedir. Bu tür senkronizasyon problemlerinin çözümüne yönelik çalışmalar algoritmaların değiştirilmesi, donanımların hızlandırılması ile devam etmektedir [34].



Şekil 2. Adım aralığı, geçici durum ilişkisi (Step size - transient state relationship)

6. İLERİYE YÖNELİK YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR (FUTURE WORK)

Gerçek zamanlı simülasyon araçlarını oluşturan temel üç öge, kullanıcı arayüzü, donanım desteği ve sistem içerisinde yer alan bileşenlerin matematiksel modellerini de içeren yazılım bloğudur. Bu üç ana eksen de çalışmalar devam etmektedir.

Kullanıcı arayüzünde yapılabilecek çalışmalardan biri, özellikle grafik işlemlerinin zaman alıyor olmasından dolayı simülasyonun ana parametresini etkileyecek adım aralığından bağımsız şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Bu kapsamda arayüz grafiklerinin başka bir işlemci tarafından ele alınması, ile ana işlemcinin komut işletimi grafik arayüz komutlarıyla kesilmemiş olacaktır. Bu da matematiksel işlemlerin gerçekleştirilmesinde, örneklemelerin yapılmasında işlemcinin kesintisiz kullanımını sağlayabilecektir.

Donanım desteği konusunda en önemli nokta olabildiğince fazla donanım desteğinin, en iyi çözünürlük ve hızda sağlanabilmesidir. Bu amaçla yapılacak çalışmalar, yüksek çözünürlükte analog/sayısal ve sayısal/analog dönüştürücüler kullanmak, bu dönüştürücüler için örnekleme zamanlarını azaltmak, sayısal giriş çıkış ünitelerinin sayısını, örnekleme zamanını arttırmak biçiminde sıralanabilir. Bir diğer önemli konu da giriş çıkış noktalarının izolasyonu ile ilgilidir. Donanım desteğinde analog ve sayısal veriler için sağlanacak yeterince hızlı, ilgili sinyalleri etkilemeyecek izolasyon üniteleri kullanılarak bu ünitelerin test edilen cihazlardan izole edilmesi, herhangi bir hata durumunda simülasyonun zarar görmesini engellenecektir. Sayısal verilerin doğası gereği ayrık (discrete) olmaları, giriş ve çıkış mantık devrelerinde adım aralığı ile senkronizasyon bozukluklarına sebebiyet vermektedir (Örneğin bir adım aralığı içerisinde giriş/çıkış verileri okunduktan sonra işlemler gerçekleştirilirken o giriş/çıkış değerlerinde oluşacak değişim bir sonraki adım aralığına kadar simülasyona yansımaz. Özellikle bu verilerde bir geçici durum oluşmuş ve bir sonraki adım aralığında da veri eski değerine dönmüşse bu geçici durum tespit edilemeyecektir). Bu tür ayrık verilerin okunmasında ve değerlendirilmesinde farklı algoritmaların geliştirilmesi donanım ve yazılım bloklarında eşzamanlı yapılabilecek yeniliklerden birisi olacaktır [2].

Son olarak gelişmeye en açık olan blok yazılım bloğudur. Bu alanda özellikle adım aralığının küçül-

tülmesi, örnekleme aralığının daraltılması, matematiksel işlemlerin optimizasyonu gibi konularda çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalara ek olarak daha fazla elektronik parçanın matematiksel modelinin oluşturulması ve bu modellere yapay zeka algoritmalarının da eklenmesi, üzerinde çalışılabilecek yeni konular arasında yer almaktadır [35].

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçek zamanlı simülasyon araçları ve kapalı döngü içerisinde donanım desteği kontrol sistemleri ve sistem içerisindeki bileşenlerin testinde kullanılmasyla gerçekçi test verileri yalnız normal çalışma durumunda değil farklı sınır dışı çalışma durumlarında da test edilebilmektedir. Bu da entegrasyon ve test süreçlerinin tamamlanmasını hızlandırdığı gibi güvenilirliğini de arttırmaktadır. Gerçek zamanlı simülasyon bu avantajlarının yanı sıra adım aralığından kaynaklı problemler ve matematiksel modellerin azlığı gibi bazı dezavantajları da içermektedir. Bu makalede, gerçek zamanlı benzetim sistemleri genel olarak tanıtmış, çalışma ilkeleri anlatılmış, çeşitli uygulamalarından örnekler verilerek, bu yöntemin kısıtları ve bu kısıtları kaldırmaya yönelik çalışmalardan söz edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 107E231 kodlu "Uydu Yönelim Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Benzetimi ve Kapalı Döngü İçerisinde Donanım Sınaması" başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, sağlanan destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bélanger, J., Abourida S. and Dufour C., "Real-Time Digital Simulation and Control Laboratory for Distributed Power Electronic Generation and Distribution", **Huntsville Simulation Conference** Huntsville Alabama, ABD, 25-27 October 2005.
2. Dinavahi, V.R., Iravani, M.R. and Bonert, R., "Real-Time Digital Simulation of Power Electronic Apparatus Interfaced With Digital Controllers", **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, No. 4, 775-781, October 2001.
3. Taoka, H., Iyoda, I., Noguchi, H., Sato, N., Nakazawa, T., Yamazaki, A., "Real-Time Digital Simulator with Digital/Analog Conversion Interface for Testing Power Instruments", **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 9, no. 2, 862-868, 1994.
4. Matar, M., Abdel-Rahman, M., Soliman, A.M., "FPGA-Based Real-Time Digital Simulation", **International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)** in Montreal, Canada, June 19-23, 2005.

5. Terwiesch, P., Keller, T. and Scheiben, E., "Rail Vehicle Control System Integration Testing Using Digital Hardware-in-the-Loop Simulation", **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 7, no. 3, 352-362, May 1999.
6. Dufour, C. and Bélanger, J., "Real-time Simulation of a 48-Pulse GTO Statcom Compensated Power System on a Dual-Xeon PC using RT-LAB", **International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)**, Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
7. Henville, C., Folkers, R., Hiebert, A., Wierckx, R., "Dynamic Simulations Challenge Protection Performance", **Western Protective Relay Conference**, Spokane, WA- USA, paper no: 8, Oct. 21-23, 2003.
8. Kuffel, R., Giesbrecht, J., Maguire, T., Wierckx, R.P., McLaren, P., "A Fully Digital Power System Simulator Operating in Real Time", **IEEE WESCANEX Communications, Power, and Computing Conference**, Winnipeg, Manito, Canada, vol. 2, 300-305, May 15-16 1995.
9. Jakominich, D., Krebs, R., Retzmann, D., Kumar, A., "Real Time Digital Power System Simulator Design Considerations and Relay Performance Evaluation", **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 14, no. 3, 773-781, July 1999.
10. Waikar, D.L., Liew, A.C., Elangovan, S., "Design, Implementation And Performance Evaluation of A New Digital Distance Relaying Algorithm", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No. 1, 448-456, Feb. 1996.
11. Liao, X., Feng, Z., Schulz, K., Unbehauen, R., "A Digital Real-Time Simulation Model of Fault Operation States in a Power Transmission System Using Multiple Moduli", **Electrical Engineering**, vol. 82, no. 6, 347-352, Nov. 2000.
12. Liu, Z., Song, Q., Zhang, H., Liu, W., "Real-Time Digital Simulation for a 50MVar Cascaded Multilevel STATCOM", **International Conference on Power System Technology (PowerCon 2006)**, Chongqing, China, 1-6, Oct. 2006.
13. Pak, L.F., Dinavahi, V., Chang, G., Steurer, M., Ribeiro, P.F., "Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques", **IEEE Transactions On Power Delivery**, Vol. 22, No. 2, 1218-1227, April 2007
14. Gagnon, R., Sybille, G., Bernard, S., Paré, D., Casoria, S., Larose, C., "Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine", **International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)**, Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
15. Groom, C.G., Chan, K.W., Dunn, R.W. and Daniels, A.R., "Real-Time Security Assessment of Electrical Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol 11, No. 2, 1112-1117, May 1996.
16. Lobos, T. and Rezmer, J., "Real-Time Determination of Power System Frequency", **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol. 46, No. 4, August 1997.
17. Kwon, K.C., Song, S.J., Park, W.M. and Lyu, S.P., "The Real-Time Functional Test Facility for Advanced Instrumentation and Control in Nuclear Power Plants", **IEEE Transactions On Nuclear Science**, Vol. 46, No. 2, April 1999.
18. Ayresa, M., Waita, D.L., Leb, T., Wiederholth, M., "Simulation of Large Scale, Spacecraft Power Systems Using Sparse-Matrix Solution Techniques", **Advances in Engineering Software** 31 (2000) 593-598.
19. Abourida, S., Dufour, C., Bélanger, J., Lapointe, V., "Real-Time, PC-Based Simulator of Electric Systems and Drives", **International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003**, New Orleans, USA.
20. Kelper, B., Blanchette, H.F. and Dessaint, L.A., "Switching Time Model Updating for the Real-Time Simulation of Power-Electronic Circuits and Motor Drives" **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 20, No. 1, March 2005.
21. Dinavahi, V.R., Iravani, M.R. and Bonert, R., "Real-Time Digital Simulation of Power Electronic Apparatus Interfaced With Digital Controllers", **IEEE Transactions On Power Delivery**, Vol. 16, No. 4, October 2001.
22. Lu, B., Monti, A., Dougal, R.A., "Real-Time Hardware-In-the-Loop Testing During Design of Power Electronics Controls", **The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03**, Volume: 2, 1840-1845, 2-6 Nov. 2003.
23. Duman, E., Can, H., Akin, E., "Real Time FPGA Implementation of Induction Machine Model – A Novel Approach", **ACEMP '07- International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics**, 10-12 Sept. 2007.
24. Duman, E., Can, H., Akin, E., "Evaluating of a Fuzzy Chip by Hardware-in-the-loop (HIL) Simulation", **International Review on Computers and Software (I.RE.CO.S.)**, 2008.
25. Oh, S.C. and Emadi, A., "Test and Simulation of Axial Flux-Motor Characteristics for Hybrid Electric Vehicles", **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, Vol. 53, No. 3, May 2004.
26. Araújo, R.E., Leite, A.V., Freitas, D.S., "Modelling And Simulation of Power Electronic Systems Using A Bond Graph Formalism", **Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002**, Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.
27. Ren, W., Steurer, M., Woodruff, S., "Progress and Challenges in Real Time Hardware-in-the

- Loop Simulations of Integrated Ship Power Systems”, **IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005**, Volume 1, Issue 12-16, 534 – 537, June 2005
28. Terwiesch, P., Keller, T. and Scheiben, E., “Rail Vehicle Control System Integration Testing Using Digital Hardware-in-the-Loop Simulation”, **IEEE Transactions On Control Systems Technology**, Vol. 7, No. 3, May 1999.
 29. Xi, J. and Chicharo, J.F., “A New Algorithm for Improving the Accuracy of Periodic Signal Analysis”, **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, Vol. 45, No. 4, August 1996.
 30. Strunz, K., Linares, L., Marti, J.R., Huet, O. and Lombard, X., “Efficient and Accurate Representation of Asynchronous Network Structure Changing Phenomena in Digital Real Time Simulators”, **IEEE Transactions On Power Systems**, Vol. 15, No. 2, May 2000.
 31. Cosic, K., Kopriva, I., Sikic, T., “A Methodology For Digital Real Time Simulation Of Dynamic Systems Using Modern DSPs”, 1997 Elsevier Science B.V.
 32. Biesiadecki, J.J., Henriquez, D.A., Jain, A., “Reusable, Real-Time Spacecraft Dynamics Simulator”, **AIAA/IEEE 16th DASC Digital Avionics Systems Conference**, vol. 2, 8.2 - 8-8.2-14, 26-30 Oct 1997.
 33. Strunz, K., “Flexible Numerical Integration for Efficient Representation of Switching in Real Time Electromagnetic Transients Simulation”, **IEEE Transactions On Power Delivery**, Vol. 19, No. 3, July 2004.
 34. Strunz, K., Linares, L., Marti, J.R., Huet, O. and Lombard, X., “Efficient and Accurate Representation of Asynchronous Network Structure Changing Phenomena in Digital Real Time Simulators”, **IEEE Transactions On Power Systems**, Vol. 15, No. 2, May 2000.
 35. Leang, C.F., McMahon, E.H., Pingree, P.J. and Basilio, R.R., “Digital Avionics Systems Conference, **16th DASC Digital Avionics Systems Conference**. Volume 2, 8.2 - 15-8.2-21, 26-30 Oct 1997.