



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Elektrikli Bir Aracın Sürme Sisteminin Denetimi

Muhsin Uğur DOĞAN ^{a,*}, Uğur GÜVENÇ ^b, Çetin ELMAS ^c

^a *Elektronik ve Otomasyon Bölümü, BTBMYO, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, TÜRKİYE*

^b *Elektrik -Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*

^c *Elektrik -Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: muhsinugurdogan@ibu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Hub (SM-HUB) motorların hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. SM-HUB motorlar yapısı itibariyle Fırçasız doğru akım motorlara (FDAM) benzerlik gösterse de rotor stator yapıları farklıdır. Klasik FDAM’larda rotor içerde iken bu tip motorlarda rotor dışıdır. Bu nedenle bu tip motorların pozisyon ve hız kontrollerinde alan etkili pozisyon algılayıcıları ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme sistemi kayış ile SM-HUB motorların birbirine bağlanması ile yapılmıştır. Bu tip sistem doğrusal olmayan etkiye sahiptir. Sistemin uygulama sonuçlarının test edilmesi için TMS320F2812 sayısal işaret işlemci ile denetlenen bir SM-HUB motorun sürücüsü tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu sürücü gerçek zamanlı olarak çalıştırılmış, farklı hız ve yük koşullarında istenen performansı sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Sayısal İşaret İşlemci, SM-HUB Motor, Motor Denetimi*

Control of A Electric Vehicle Drive System

ABSTRACT

In this study, speed control of permanent magnet synchronous hub motors used in electric vehicles has been realized. Although SM-HUB motors are similar to brushless DC motors, rotor and stator structures are different. Whereas in conventional FDAMs, the rotor is inside, in this type of motors the rotor is outside. For this reason, position and speed controls of this type of motors are performed with field effect position sensors. The loading system is made by connecting the SM-HUB motors with the belt. This type of system has a nonlinear effect. In order to test the application results of the system, a TMS320F2812 digital signal processor was designed and designed to drive an SM-HUB motor driver. This drive has been executed in real time and has been shown to provide the desired performance under different speed and load conditions.

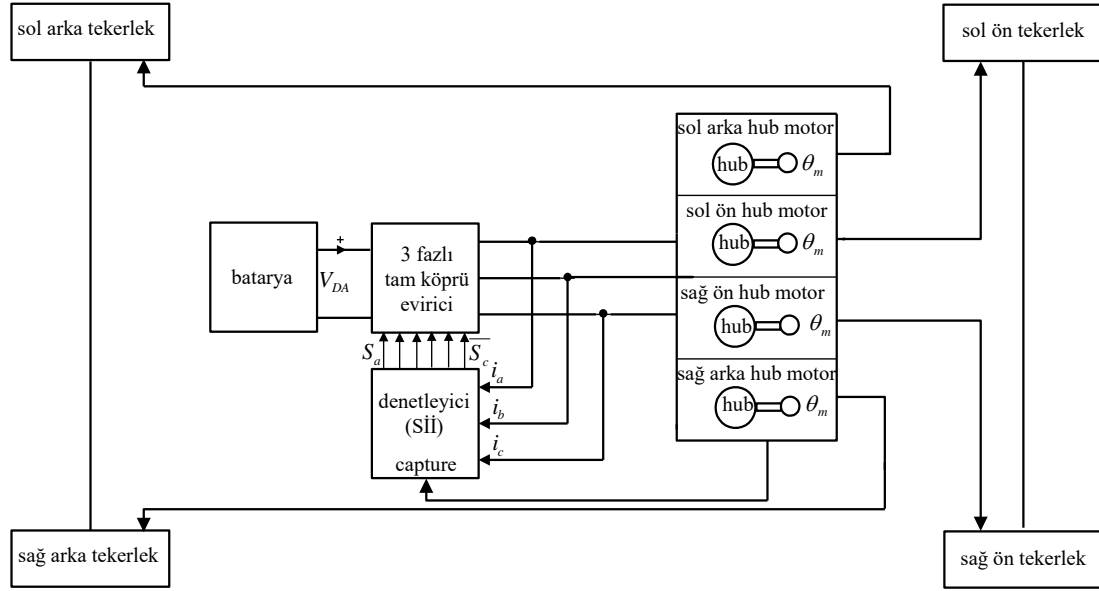
Keywords: *Digital Signal Processing, PM-HUB Motor, Motor Control*

I. GİRİŞ

Günümüzde çevre kirliliğinin artması, petrol rezervlerinin azalması ve enerji problemlerinin yaşanmasından dolayı enerjide verimlilik ve tasarruf konuları ön plana çıkmaktadır. Sıkıntılardan en önemlisi ise petrolün yakın bir zamanda tükeneceğidir [1, 2]. Bu sebepten dolayı elektrikli araçlar önemli bir alan haline gelmiştir. Elektrikli araç kullanımı şu anda ülkemizde çok yaygın değildir. Bununla birlikte ülkemizde bu konuda sürekli yeni çalışmalar ve projeler ortaya çıkmaktadır ve elektrikli araç kullanımının artacağı düşünülmektedir. Bir elektrikli araç elektrik motoru, güç elektroniği devresi, batarya sistemi, denetim sistemleri ve mekanik sistemlerden oluşmaktadır. Ayrıca elektrikli araçların kontrol edilebilmesi güvenlik açısından önem taşımaktadır. Sistemin tam olarak modellenmesi için iyi bir denetim sistemi gereklidir. Elektrikli araçların, içten yanmalı motor kullanılan araçlara göre kısa kontrol periyodunda kontrol edilmesi daha kolaydır. Elektrik motorların moment cevapları birkaç milisaniye kadardır. İçten yanmalı motorlara göre daha hızlıdır. Bundan dolayı elektrikli araçlarda geri besleme önem taşımaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında frenleme ve sürme momenti daha küçük belirsizliklere sahiptir [3]. Otomotiv sektöründe çok hassas değişken hız değerlerine ihtiyaç duyulurken elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının güvenilir, ucuz, sağlam, hafif ve aynı zamanda az bakım ihtiyacı duyulacak şekilde olması istenmektedir. Otomotiv sektöründe elektrik motorlarından beklenen özellikler yüksek moment, güç yoğunluğu, sabit moment, geniş hız aralığı, yüksek verim, güvenilirlik ve sağlamlıktır [4]. Pillay ve Krishnan tarafından Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor ve Fırçasız doğru akım motoru konusu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Zıt elektromotor kuvvetlerine göre motorları sınıflandırmışlardır. Zıt emk dalga şekli yamuk ise FDAM, zıt emk dalga şekli sinüzoidal ise SMSM adını vermişlerdir [5, 6]. SM-HUB Motorlar tekerlek motor olarak da adlandırılır. SM-HUB motorlarda tekerlek mili direk olarak motora bağlıdır. Güç iletimi sırasında herhangi bir kayıp olmadığından bu motorlarda verim yüksektir. SM-HUB motorları son yıllarda elektrik makinelerinde çalışılan önemli konulardan birisidir. Bu motorların verimlilikleri ve güç yoğunlukları çok yüksek olup SM-HUB motorlar elektrikli araçlar, elektrikli sandalyeler, scooterler, golf araçları, kaldırma sistemleri, rüzgar enerjisi teknolojisi, jeneratörler gibi yüksek tork ihtiyacı olan sistemlerde günden güne artan sayısız uygulama alanına sahiptir. Üstün ve Elmas tarafından sürekli mıknatıslı bir senkron motorun hızının bulanık sinirsel ve kayma kipli denetleyicilerle dönüşümlü denetiminde kullanılan sayısal işaret işlemci denetleyiciler ve motor modeli üzerine çalışmalar yapılmıştır. [7, 8]. Elektrik motorlarının hız, moment ya da konum denetiminde yüksek hızlı ve doğrulukla işlem başarısının elde edilmesinde sayısal işaret işlemci denetleyiciler önem teşkil etmektedir. Eviricilerde kullanılan yarı iletken anahtarların daha hızlı ve daha karmaşık denetimleri daha kolay yapılabilmektedir. [9,10]. Son yıllarda motor sistemlerin denetiminde Texas firması tarafından üretilen TMS320F2812 kodlu sayısal sinyal işlemci kullanılmıştır. Çalışma frekansının yüksek olması, SM-HUB motorun hız, moment, pozisyon denetiminde yüksek hızlı ve doğru sonuçların elde edilmesi ve analog bilgiyi sayısal bilgiye çevirme zamanının kısa olması gibi faktörler sebebiyle tercih edilmiştir. Bu makale, ikinci bölümde elektrikli bir aracın sürme sistemi, üçüncü bölümde elektrikli araçlarda kullanılan SM-HUB motorun sürme sistemi tasarımı ve dördüncü bölümde sistemin uygulama sonuçları, beşinci bölümde ise sonuçlar olacak şekilde düzenlenmiştir.

II. ELEKTRİKLİ BİR ARACIN SÜRME SİSTEMİ

Bir elektrikli aracın donanım sistemi batarya, sayısal işaret işlemci (Sİİ), motor sürme devresi, yalıtma devresi, akım ve pozisyon algılayıcılar ve SM-HUB motordan meydana gelmektedir. BİR elektrikli aracın donanım sistemi Şekil 1’de verilmiştir.

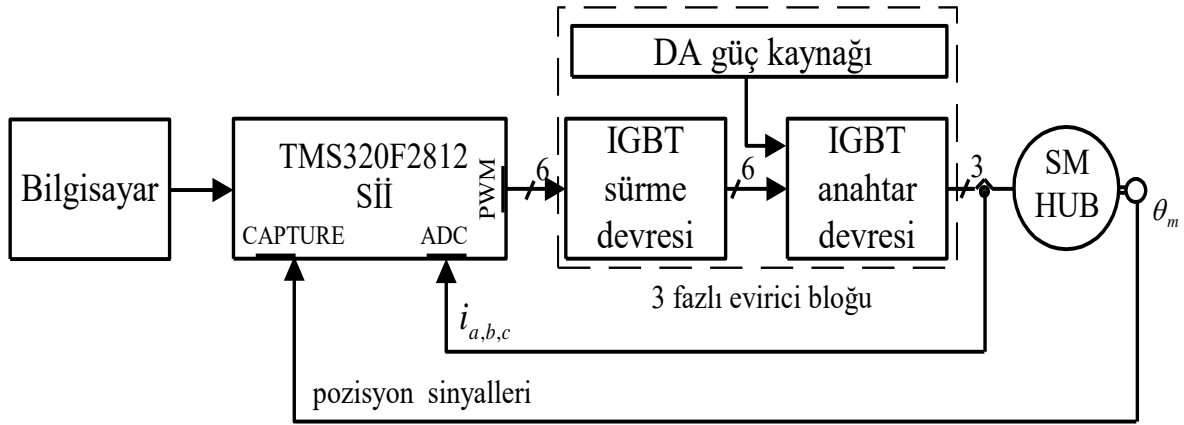


Şekil 1. Elektrikli bir aracın donanım sistemi

Bir elektrikli aracın donanım sistemi TMS320F2812 Sİİ tarafından denetlenmektedir. Sayısal İşaret İşlemci daha önce girilen referans bilgiler ile ölçümler sonucu elde edilen gerçek değeri karşılaştırma işlemi yaparak gerçek motor hızının elde edilmesini sağlar. TMS320F2812 Sİİ’den üretilen sinyaller yalıtma elemanlarından (optoizalatör) geçirilerek sürücülere ulaşmaktadır. Sürücü devre motor faz sargılarının enerjisini sağlayan yarıiletken anahtarların çalışmasını gerçekleştirmektedir. IGBT olarak isimlendirilen yarıiletken elemanların çalışma sırasında zarar görmemesi için koruma (snubber) devre elemanları bağlanmıştır. Akım algılama devresi ile motora ait her faz sargısının çektiği akım ve şebeke faz gerilimlerinin değerleri TMS320F2812 Sİİ’ye aktarılmaktadır. Sİİ tarafından okunan bu değerler referans değerler ile kıyaslanarak IGBT’lerin çalışması için gerekli tetikleme sinyallerini üretmektedir. Motor hız denetiminin düzgün olması için analog ölçümlerin hassas olması gerekmektedir. Kullanılan akım sensörleri ve akım algılama devresi ile motor hız denetimi yapılır.

III. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN SM-HUB MOTORUN SÜRME SİSTEMİNİN TASARIMI

Bir elektrikli aracın sürme sistemi SM-HUB motor, bilgisayar, sayısal işaret işlemci (Sİİ), sürme devresi, akım algılayıcı ve pozisyon algılayıcılar ve SM-HUB motordan oluşmaktadır. Şekil 2’de SM-HUB motorun sürme sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2. SM-HUB motor sürme sisteminin blok diyagramı

Bu makale çalışmasında SM-HUB motor kullanılmıştır. Elektrikli araçlarda gerçek sistemler hareketli sistemler olduğundan dolayı ve elektrikli araçlarda ölçümlerin yapılması zor ve maliyetli olduğu için Şekil 3'deki deney düzeneği kullanılmıştır [11-12]. Çalışmada kullanılan deney düzeneği St 37.2 kalitesinde düşük karbonlu yapı çeliğinden yapılmıştır. SM-HUB motor deney düzeneğinde kayış ve iki adet SM-HUB motor kullanılmıştır. SM-HUB motorlardan bir tanesi sürme, diğeri ise yük olarak kullanılmıştır. Şekil 3'de SM-HUB motorun hız denetimi için yapılan deney düzeneği gösterilmiştir.



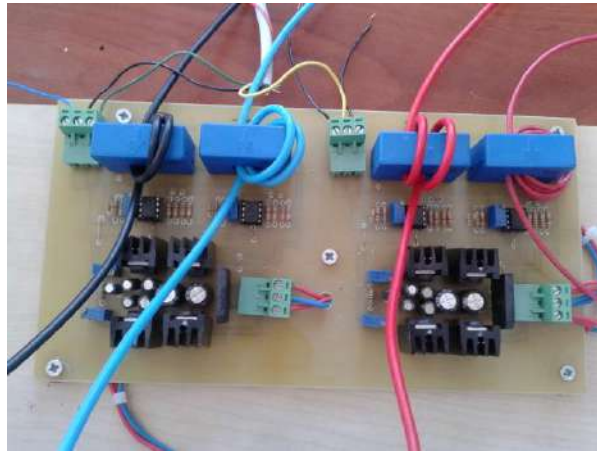
Şekil 3. SM-Hub motorların deney düzeneği

Bu çalışmada SM-HUB motoru sürmek için evirici devresi kullanılmaktadır. Eviricide bulunan yarıiletken elemanların anahtarlanması için sürücü devreye ihtiyaç vardır. Her IGBT elemanını yalıtılmış kaynaktan sürmek gerekmektedir. Aksi takdirde motoru besleyen şebeke fazları sürücüler üzerinden kısa devre olmaktadır. Bu sakıncayı gidermek için her IGBT elemanı için yalıtılmış besleme kaynağı kullanılmalıdır. Bu işlem için güç kaynağı kullanılacaktır. 2MBI100U4A-120 IGBT elemanı kullanılmıştır. Sürücü olarak ise Fuji firmasının ürettiği VLA517 isimli IGBT sürücü devre elemanı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan SM-HUB motor sürücü devresi Şekil 4'de gösterilmiştir.



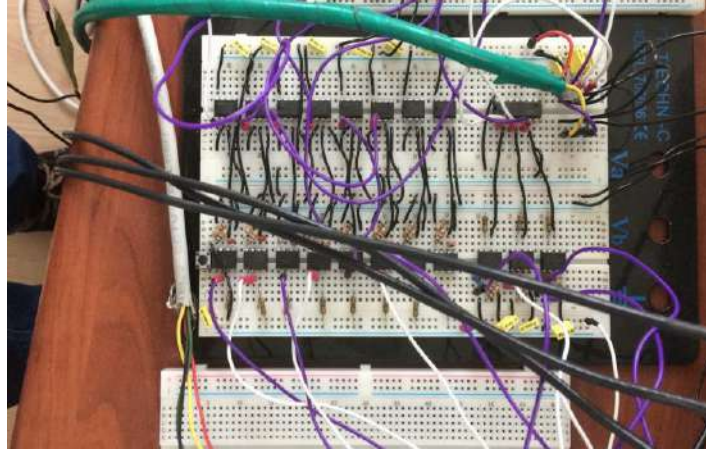
Şekil 4. SM-HUB motor sürücü sistemi

Eviricinin çalıştırılabilmesi için şebeke faz gerilimlerinin ve motorun çektiği faz akımlarının doğru okunması gerekmektedir [13]. Uygulama çalışmasında kullanılan eviricide büyük güçlü motorlarında çalıştırılacağı düşünülerek 50A akım algılayıcıları kullanılmıştır. Akım algılayıcı olarak LEM firması tarafından üretilen LA 55-P modeli kullanılmıştır. Şekil 5’de çalışmada kullanılan akım algılama devresi verilmiştir.



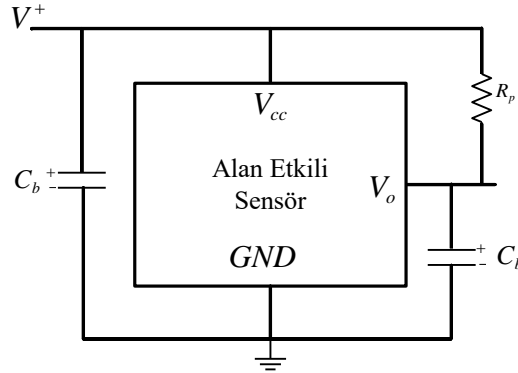
Şekil 5. Akım algılama devresi

Eviricideki 6 adet yarıiletken anahtarların iletme ve kesime götürülmesi sayısal işaret işlemciden gelen anahtarlama sinyalleri ile sağlanmaktadır. İşlemci çıkışındaki düşük seviyeli sinyalin (3.3 V) yükseltilmesi gerekmektedir. Çünkü IGBT’leri çalıştıracak sürücü devre besleme gerilimi 5V dur. İşlemci ile IGBT sürücüsünün yalıtılması gereklidir. Bu işlem için yüksek hızlı optoizalatör elemanlara gereksinim duyulmaktadır. Yapılan bu çalışmada 6N137 optoizalatörü seçilmiştir. Optoizalatör devresinin görevi sayısal işaret işlemciyi korur ve işareti tersleme işini yapar [7]. Bu çalışmada kullanılan yalıtım devresi Şekil 6’da gösterilmiştir.



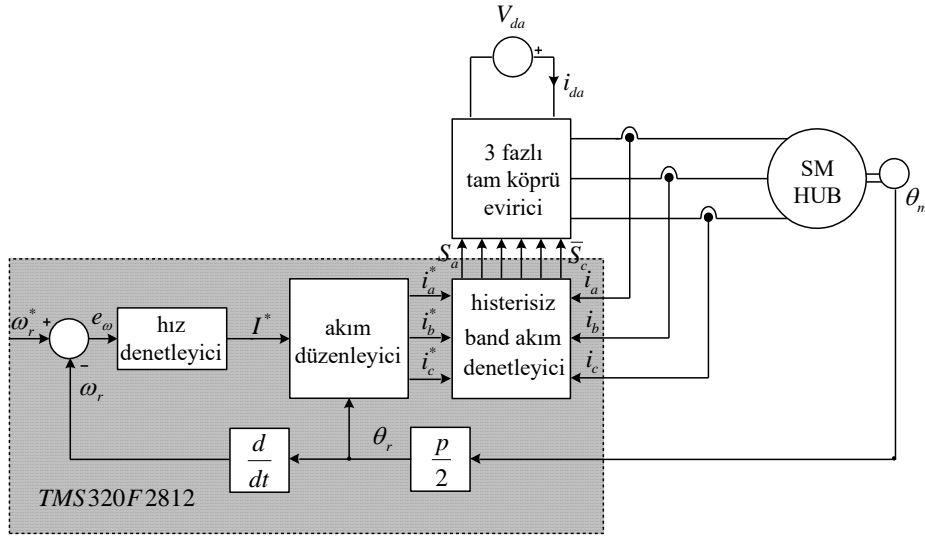
Şekil 6. Çalışmada kullandığımız yalıtma devresi

SM-HUB motorun rotor konum bilgisi SM-HUB motorların denetimi için önemlidir. Anahtarlanması gereken fazın belirlenmesinde pozisyon algılayıcıları kullanılır. SM-HUB motor'un gerçek pozisyonunun algılanmasında alan etkili algılayıcı kullanılmıştır. Bu algılayıcı SM-HUB motorun gövdesi döndüğü ve en uygun algılayıcı olduğu için tercih edilmiştir. Alan etkili algılayıcı motorun pozisyon bilgisini alıp sayısal işaret işlemcinin Capture pinlerinden işlemciye aktarılır. Bu sinyaller kullanılarak motorun gerçek hız ve pozisyon bilgisi elde edilir.



Şekil 7. Pozisyon algılama devresi

SM-HUB motorun pozisyon bilgisine alabilmek için Şekil 7'de verilen pull-up devresi tasarlanmıştır. Besleme kaynağı ile çıkış pini arasında bir pull-up direnci R_p bağlanmıştır. R_p direnç değeri 1 ile $10k\Omega$ arasında değişir. Minimum R_p direnci, algılayıcının maksimum çıkış akımının ve besleme voltajının bir fonksiyonudur. SM-HUB motorun mekanik konumdan elektriksel konum bilgisi ve hızın hesaplanması, hız denetleyici, konum denetleyici, akım düzenleyici ve histeresis band akım denetleyici ile ilgili işlemler TMS320F2812 işlemcisi ile yapılmaktadır. Sistem 10 kHz anahtarlama ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 8'de SM-HUB motor sürme sisteminde sayısal işaret işlemcinin sürme sistemindeki yeri gösterilmektedir.



Şekil 8. TMS320F2812 sayısal işaret işlemcinin sürme sisteminde gösterimi

SM-HUB motorun hız denetiminin gerçekleştirilmesi için referans hız (ω_r^*) ile gerçek hız (ω_r) değerlerinin farkı alınarak hesaplanır [7]. Oluşan hız hatası klasik orantı+integral (PI) denetleyiciye girilerek referans akımının değeri hesaplanır. Şekil 8’de TMS320F2812 sayısal işaret işlemcinin sürme sisteminde gösterilen hız denetleyici orantı + integral (PI) denetimi şu şekilde çalışır.

$$e_\omega(t) = \omega_r^*(t) - \omega_r(t) \quad (1)$$

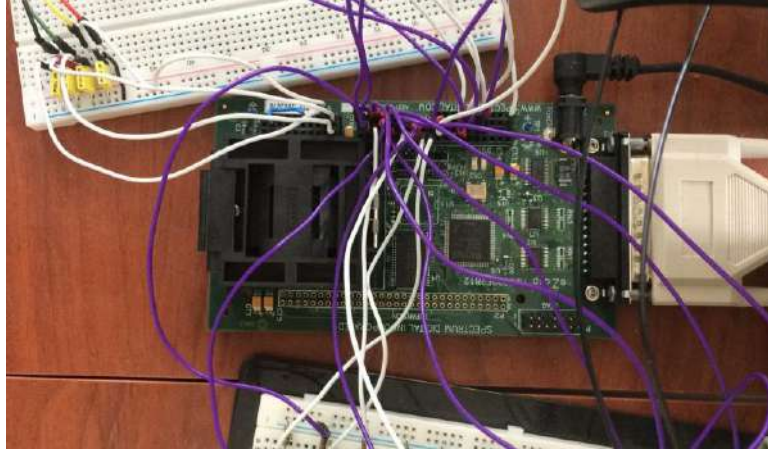
$$i^*(t) = K_p e_\omega(t) + K_i \int e_\omega(t) dt \quad (2)$$

$$\frac{di^*(t)}{dt} = K_p \frac{de_\omega(t)}{dt} + K_i e_\omega(t) \quad (3)$$

$$di^*(t) = K_p de_\omega(t) + K_i e_\omega(t) dt \quad (4)$$

Denetleyici girişleri referans hız $\omega_r^*(t)$ ve pozisyon algılayıcıdan elde edilen gerçek motor hızı $\omega_r(t)$ arasındaki hız hatası $e_\omega(t)$ ile ifade edilir. Hız hatasındaki değişim $de_\omega(t)$ ile ifade edilir. Pozisyon algılayıcıdan gelen sinyaller kullanılarak motorun gerçek hız değeri ω_r hesaplanır. İstenen hız değeri ω_r^* ile gerçek hız değeri arasındaki fark olan hız hatası $e_\omega(t)$ hesaplanır. Elde edilen bu hata değeri hız denetleyiciden geçirilerek denetim sinyali referans akım $I^*(t)$ elde edilir. Orantı + integral denetleyici çıkışı referans akım büyüklüğünü ifade etmektedir. Elde edilen bu denetim sinyali ile elektriksel pozisyon bilgisi kullanılarak üç faz referans akımları elde edilir. Elde edilen bu referans akımlar histerisiz band akım denetleyici içerisinde kullanılır. Akım algılayıcıdan alınan gerçek akım değerleri ile karşılaştırılarak darbe genişlik modülasyonu sinyalleri üretilir. Burada K_p denetleyicinin orantı sabiti, K_i denetleyicinin integral sabitini ifade etmektedir. Denetleyici yazılımları Code Composer Studio ortamında kodlanarak bilgisayarın paralel portundan

TMS320F2812 Sİİ'ye gönderilmiştir. Makale çalışmasında kullanılan işlemci devresi Şekil 9'da gösterilmiştir.

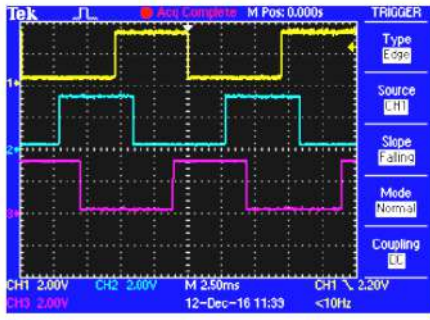


Şekil 9. Uygulamada kullandığımız sayısal işaret işlemci devresi

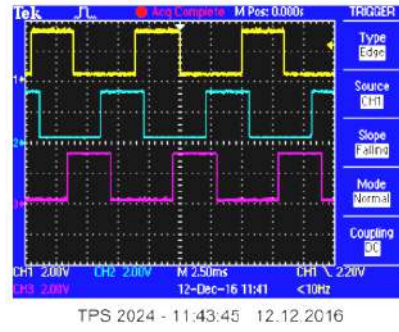
Bu makalede sistemin uygulama yazılımları C programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. C/C++ program kullanılarak yazılım gerçekleştirilmiş ve Code Composer Studio ortamında denetleyici için program yazılmıştır. Yazılan program derlenerek object kodlar elde edilmiş elde edilen kodlar TMS320F2812 Sİİ'ye paralel porttan aktarılmaktadır. Akım ve gerilim algılayıcılardan elde edilen faz akımları ve gerilim bilgileri ADC kullanılarak ve alan etkili algılayıcılardan alınan pozisyon bilgisi capture kullanılarak sayısal işaret işlemciye aktarılmaktadır. TMS320F2812 Sİİ kullanılarak eviricideki yarıiletken elemanların anahtarlanması için gerekli sinyaller 10 kHz de üretilmiş ve zaman kesmesi kullanılmıştır. Kesme alt programında her örnekleme anında hangi yarıiletkenlerin ilettime geçmesi gerektiği yapılan yazılım tarafından belirlenmektedir. Alan etkili algılayıcılardan motorun pozisyon bilgisini alıp sayısal işaret işlemcinin sayısal konnektörünün yakalama (Capture) pinlerinden işlemciye aktarılır. Elde edilen bu sinyaller kullanılarak motorun gerçek pozisyon ve hız bilgisi elde edilir. Bu konnektörün IOPB0 ile IOPB5 pinlerinden S_a ile \bar{S}_c evirici anahtarları için gerekli DGM denetim sinyalleri sağlanmaktadır. P2 konnektörünün ADCIN0, ADCIN1 ve ADCIN8 pinlerinden akım algılayıcı ünitesinden alınan i_a , i_b ve i_c gerçek faz akımları girilmektedir. Aynı zamanda P2 konnektöründe DAC0, DAC1, DAC2 ve DAC3 olmak üzere 4 analog çıkış yapılabilen pin bulunmaktadır. Bu pinlerden DAC0 denetim akımının ve DAC1 mekanik pozisyonun osiloskoptan görüntülenmesi için kullanılmıştır. Bunların yanında DA besleme ve bilgisayar ile iletişimi sağlayan XDS510 JTAG konnektörü kullanılmıştır. Uygulama verilerinin elde edilmesinde motor hız tepkisi için takogeneratör çıkışı, denetim akımı ve mekanik pozisyon için sayısal işaret işlemcinin sayısal analog dönüştürücü çıkışları ve faz akımı için akım algılayıcı çıkışı kullanılmıştır. Bu çıkışlardan elde edilen verileri alabilmek için Tektronix firmasının ürettiği TPS2024 model 4 kanal renkli sayısal osiloskop kullanılmıştır. Sayısal osiloskop ile bilgisayar arasında seri iletişim oluşturularak ve üretici firmanın ara yüzü kullanılarak veriler grafik olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

IV. SİSTEMİNİN UYGULAMA SONUÇLARI

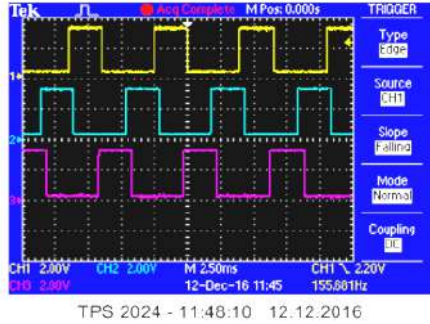
Sistemin uygulama çalışmasında SM-HUB motorun mekanik hız, mekanik pozisyonları incelenmiştir. SM-HUB motor 21 rad/s referans hızında, 31 rad/s referans hızında, 42 rad/s referans hızında, 52 rad/s referans hızında çalıştırılmıştır. SM-HUB motor farklı hızlarda alan etkili algılayıcı ve pozisyon algılama devresi kullanılarak motorun pozisyon ve hız grafikleri elde edilmiştir. Motor hızı 21 rad/s, 31 rad/s, 42 rad/s ve 52 rad/s hızlarında alan etkili algılayıcı kullanarak pozisyon bilgileri alınmış ve Şekil 10. a, b, c ve d’de verilmiştir.



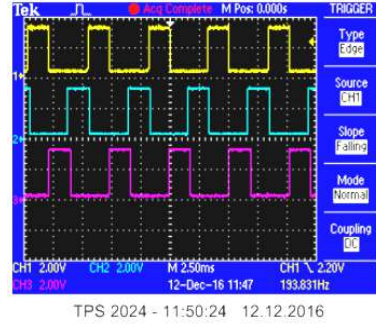
(a)



(b)



(c)

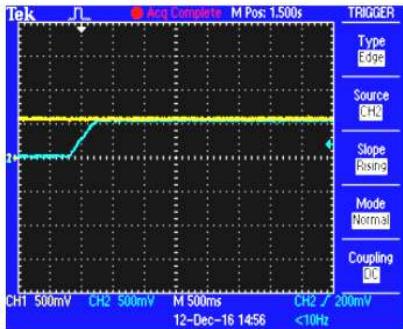


(d)

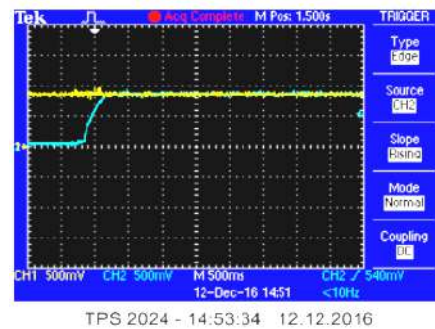
Şekil 10. Farklı hızlardaki alan etkili algılayıcının pozisyon grafikleri (a) 21 rad/s hızında (b) 31 rad/s hızında (c) 42 rad/s hızında (d) 52 rad/s hızındaki pozisyon grafikleri

SM-HUB motorun 21 rad/s hızında mekanik pozisyon eğrileri Şekil 10.a’da görülmektedir. Motorun 21 rad/s hızı 200 d/d hızına karşılık gelmektedir. Motorun mekanik pozisyonu her bir devrinde 0 ile 2π arasında değer almaktadır. Buradan mekanik ve elektriksel hız hesaplanabilir. Motorun 21 rad/s hızında pozisyonunun periyodu 12.5 ms olduğu görülmektedir. SM-HUB Motorun mekanik frekansı

80 Hz ve elektriksel frekansı 160 Hz olarak hesaplanır. Uygulama sonuçlarına göre mekanik pozisyon eğrileri aynıdır. Şekillerde görüldüğü gibi alan etkili algılayıcıların pozisyonu üretilirken fazlar arasında 120 derecelik açılar vardır ve gerçek hız grafiği çok kısa süre içerisinde referans hızı yakalamaktadır. Şekil 10.a'da motorun mekaniksel frekansı 80 Hz, motor 48 kutuplu olduğundan motor hızının 21 rad/s olduğu hesaplanır. SM-HUB motorun 31 rad/s hızında mekanik pozisyon eğrileri Şekil 10.b'de görülmektedir. 31 rad/s hızı 300 d/d hızına karşılık gelmektedir. Motorun mekanik pozisyonu her bir devrinde 0 ile 2π arasında değer almaktadır. Buradan mekanik ve elektriksel hız hesaplanabilir. SM-HUB Motorun 31 rad/s hızında pozisyonunun periyodu 8 ms olduğu görülmektedir. SM-HUB Motorun mekanik frekansı 125 Hz ve elektriksel frekansı 250 Hz olarak hesaplanmıştır. Uygulama sonuçlarına göre mekanik pozisyon eğrileri aynıdır. Şekillerde görüldüğü gibi alan etkili algılayıcıların pozisyonu üretilirken fazlar arasında 120 derecelik açılar vardır ve gerçek hız grafiği çok kısa süre içerisinde referans hızı yakalamaktadır. Şekil 10.b'de motorun mekaniksel frekansı 125 Hz ve motor 48 kutuplu olduğundan motorun hızının 32 rad/s olduğu hesaplanır. SM-HUB motorun 42 rad/s hızında mekanik pozisyon eğrileri Şekil 10.c'de görülmektedir. 42 rad/s hızı 400 d/d hızına karşılık gelmektedir. Motorun mekanik pozisyonu her bir devrinde 0 ile 2π arasında değişmektedir. Buradan mekanik ve elektriksel hız hesaplanabilir. SM-HUB Motorun 31 rad/s hızında pozisyonunun periyodu 5.75 ms olduğu görülmektedir. SM-HUB Motorun mekanik frekansı 175 Hz ve elektriksel frekansı 350 Hz olarak hesaplanmıştır. Uygulama sonuçlarına göre mekanik pozisyon eğrileri aynıdır. Şekillerde görüldüğü gibi alan etkili algılayıcıların pozisyonu üretilirken fazlar arasında 120 derecelik açılar vardır ve gerçek hız grafiği çok kısa süre içerisinde referans hızı yakalamaktadır. Şekil 10.c'de motorun mekaniksel frekansı 175 Hz ve motor kutup sayısı 48 kutuplu olduğunda SM-HUB motor hızı 42 rad/s olduğu hesaplanır. SM-HUB motorun 52 rad/s hızında mekanik pozisyon eğrileri Şekil 10.d'de görülmektedir. 52 rad/s hızı 500 d/d hızına karşılık gelmektedir. Motorun mekanik pozisyonu her bir devrinde 0 ile 2π arasında değişmektedir. Buradan mekanik ve elektriksel hız hesaplanabilir. SM-HUB Motorun 52 rad/s hızında pozisyonunun periyodu 5 ms olduğu görülmektedir. SM-HUB Motorun mekanik frekansı 200 Hz ve elektriksel frekansı 400 Hz olarak hesaplanmıştır. Uygulama sonuçlarına göre mekanik pozisyon eğrileri aynıdır. Şekillerde görüldüğü gibi alan etkili algılayıcıların pozisyonu üretilirken fazlar arasında 120 derecelik açılar vardır ve gerçek hız grafiği çok kısa süre içerisinde referans hızı yakalamaktadır. Şekil 10.d'de motorun mekaniksel frekansı 200 Hz ve motor 48 kutuplu olduğunda SM-HUB motor hızı 52 rad/s olduğu hesaplanır. SM-HUB Motor hızı 21 rad/s olduğunda referans ve gerçek hız grafiği Şekil 11.a'da, SM-HUB Motor hızı 31 rad/s olduğunda referans ve gerçek hız grafiği Şekil 11.b'de, SM-HUB Motor hızı 42 rad/s olduğunda referans ve gerçek hız grafiği Şekil 11.c'de, SM-HUB Motor hızı 52 rad/s olduğunda referans ve gerçek hız grafiği Şekil 11.d'de verilmiştir.

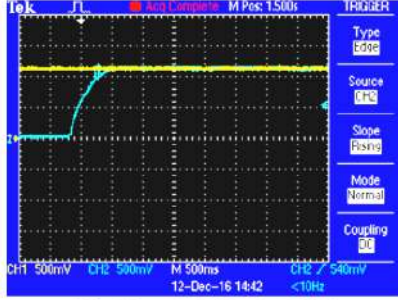


TPS 2024 - 14:58:41 12.12.2016



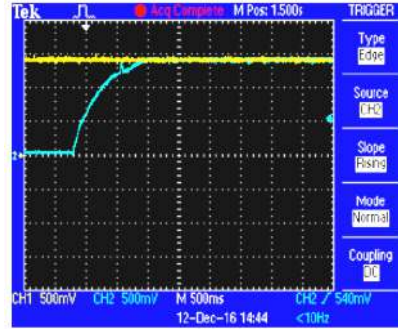
TPS 2024 - 14:53:34 12.12.2016

(a)



TPS 2024 - 14:45:00 12.12.2016

(b)



TPS 2024 - 14:46:54 12.12.2016

(c)

(d)

Şekil 11. SM-HUB motorunun referans hızı ve gerçek hız grafikleri (a) 21 rad/s hızında (b) 31 rad/s hızında (c) 42 rad/s hızında (d)52 rad/s hızındaki referans ve gerçek hız grafikleri

Sistemin sonuçlarına göre motor 0 rad/s'den 21 rad/s'ye 250 ms'de yükselmektedir. Motorun hız eğrisinde aşma ve titreşim olmadığı ve motorun gerçek hızı verilen referans hızı takip ettiği Şekil 11.a'da görülmektedir. Şekil 11.b'de ise SM-HUB motor 0 rad/s'den 31 rad/s'ye 280 ms'de yükselmektedir. Şekil 11.c'de ise SM-HUB motor 0 rad/s'den 42 rad/s' ye 600 ms'de yükselmektedir. Şekil 11.b ve 11.c incelendiğinde hız grafiğinde aşma olmadığı ve motor referans hızı takip ettiği görülmektedir. Şekil 11.d incelendiğinde motor 0 rad/s'den 52 rad/s'ye 1100ms'de yükselmektedir. Hız eğrisinde de aşma olmadığı, az titreşim olduğu ve motorun gerçek hızı verilen referans hızı takip ettiği görülmektedir. Hız eğrilerine göre PI denetleyicinin iyi bir performans sağladığı görülmüştür.

V. SONUÇ

Bu makale çalışmasında, elektrikli araçların sürme sisteminde son yıllarda gündemde olan SM-HUB motor ve işlem gücü yüksek olan sayısal sinyal işlemci kullanılarak gerçek zamanlı hız denetimi yapılmıştır. Uygulamada TMS320F2812 sayısal işaret işlemci ile gerçek zamanlı denetim yapılmıştır. Aynı zamanda deneysel sonuçları gözlemlemek için bir DA kaynağı, 3 fazlı bir evirici, akım ve pozisyon algılayıcı ve bir sayısal işaret işlemciden (Sİİ) oluşan SM-HUB sürme sistemi ile uygulama yapılmıştır. Her bir denetleyici uygulama aşamasında motor 21 rad/s, 31 rad/s, 42 rad/s ve 52 rad/s için alan etkili algılayıcıların pozisyonları, faz akımları ve referans hızı ve gerçek hız grafikleri elde edilmiştir. SM-HUB motor hız denetiminin literatüre büyük katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bundan sonra yapılacak elektrikli araç uygulamalarında daha güçlü olan SM-HUB motor kullanılarak daha yüksek hızlarda uygulama gerçekleştirilebilir. Bu makale çalışmasında SM-HUB motorların rotor konumunu belirleyen alan etkili algılayıcılar kullanılmıştır. Farklı pozisyon algılayıcıları kullanılarak SM-HUB motorların hız ve konum denetimleri gerçekleştirilebilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] A. Emadi, S. S. Williamson and A. Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 567-577, 2006.
- [2] A. Emadi, M. Ehsani and J. M. Miller, *Vehicular electric power systems: land, sea, air, and space vehicles*. Florida: CRC Press, 2003.
- [3] Y. Hori, "Future vehicle driven by electricity and control-research on four wheel motored UOT Electric March II," *In Advanced Motion Control, 7th International Workshop Conference*, Maribor, Slovenia, 2002, pp. 1-14.
- [4] M. Yılmaz, "Fırçasız doğru akım motorunun algılayıcısız kontrolünde dalgacık tekniğinin uygulanması," Doktora Tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [5] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 265-273, 1989.
- [6] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part II: The brushless DC motor drive," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 274-279, 1989.
- [7] O. Üstün, "Sürekli mıknatıslı bir senkron motorun hızının bulanık sinirsel ve kayma kipli denetleyicilerle dönüşümlü denetimi," Doktora Tezi, Elektrik Eğitimi ABD, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2004.
- [8] C. Elmas, and O. Üstün, "A hybrid controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor drive," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 3, pp. 260-270, 2008.
- [9] Texas Instrument, TMS320f2812 Digital Signal Processor Implementation Tutorial, 2004
- [10] S. Kesler, "Elektrik Makinaları Denetim Sistemlerinde TMS320F2812 DSP Kullanımı," Akademik Bilişim, pp. 685-697, 2008.
- [11] C. Elmas, U. Güvenç, and M. U. Doğan, "Tire-Road Friction Coefficient Estimation and Experimental Setup Design of Electric Vehicle," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 202-207, 2015.
- [12] M. U. Doğan, "Bağımsız dört çekerli elektrikli bir aracın uyarlamalı denetimi," Doktora Tezi, Elektrik Eğitimi ABD, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [13] A. Saygın, "Matris konverter ile asenkron motor hızının denetlenmesi," Doktora Tezi, Elektrik Eğitimi ABD, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.