

PROGRAMLANABİLİR LOJİK KONTROLÖR İLE BİR RAYLI ULAŞIM TAŞITI KONTROL SİSTEMİNİN GERÇEKLENMESİ

Salman KURTULAN Metin GÖKAŞAN Seta BOĞOSYAN

Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

e-posta:kurtulan@elk.itu.edu.tr , gokasan@ elk.itu.edu.tr, bogosyan@ elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler Raylı ulaşım, kontrol, elektrikli taşıt,

ABSTRACT

Electrical transport systems offer the most efficient, economical and reliable form of transportation. However, their performance depends highly on the utilized control and command system. Vehicle command systems entail the generation of binary signals preparing the vehicle for departure and maintaining this status. Those systems consist of logic gate elements or relay circuits. However, the realization of those systems with programmable logic controllers (PLC' s) provides certain advantages. Transportation control system, generate the required control signals for the desired vehicle motion. This system provides control on the acceleration, jerk, slip, skid and finally, on the electrical and mechanical braking. PLC' s can also be used for the realization of such systems. However, in case of the utilization of PLC, the minimum software and hardware requirements should be analyzed. In this study, the basic hardware and software specifications have been discussed for the command and control of a transportation system realized by a PLC and some fundamental principles and realization methods for such systems have been mentioned.

1.GİRİŞ

Elektrikli raylı ulaşım sistemi inşaat, makina, elektrik ve kontrol mühendisliğinin ortak çalışması sonucu ortaya çıkan bir üründür. Sistemi oluşturan ulaşım yolu (ray), güç besleme sistemi ve taşıtlar farklı mühendislik uygulamaları ile gerçekleşir. Kontrol mühendisliği taşıtı giriş ve çıkışı davranışı açısından ele alıp sistemin güvenilirliği ve konforlu işletimi için gerekli kumanda ve kontrol çözümlerini üretir. Bir ulaşım sisteminin kontrol mühendisliği açısından tasarlanması ve gerçekleşmesi gereken bölümler şu şekilde sıralanabilir:

- Taşıt kumanda sistemi,
- Taşıt kontrol sistemi
- Taşıt içi ve taşıtlar arası veri iletişim sistemleri
- Hata belirleme ve görüntüleme sistemi

Taşıt kumanda sistemi, taşıtı, elektrik enerjisi sistemine bağlayan elemanların kumandası (pantograf, ana

devre kesicisi, şarj devresi ve motor kontaktörleri), taşıt için gereksinim duyulan basınçlı hava üretimine ilişkin makinelerin kumandası, aydınlatma, kapıların kumandası, havalandırma ve ısıtma sistemlerinin kumandası, taşıtın ileri ve geri hareket yönünün belirlenmesi, taşıtın birbirine bağlı olarak oluşan taşıt grubundaki diğer taşıtlara göre durumu (ana ya da uydu taşıt olması) gibi ikili lojik ilişkilerle çözümlenebilecek bölümlerden oluşur [1].

Taşıt kontrol sistemi, taşıtın istenen ivme değerinde hareketi için gerekli kontrol işaretlerini sürücüye sisteme uygulayan, sarsıntı (jerk), kayma (slip) ve kızaklama (skid) durumlarını en aza indiren, elektrikli ve mekanik frenleme kuvvetlerinin üretilmesi için gerekli işaretleri üreten bölümdür. Bu bölüme ilişkin kontrol işaretleri, geri beslemeli kontrol kuramından hareketle tasarlanır.

Gerek taşıt kumanda sistemi ve gerekse taşıt kontrol sistemine ilişkin lojik fonksiyonlar ve kontrol algoritmaları programlanabilir lojik kontrolör (PLC) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Taşıt içi veri iletişim sistemi, taşıtı süren kişi ile taşıt sürücü sistemi arasındaki verilerin aktarılması amacıyla kullanıldığı gibi ana taşıt ile uydu taşıtlar arasındaki veri iletişimi için de aynı iletişim sistemlerinden yararlanılabilir. Burada göz önüne alınması gereken en önemli konu veri iletişiminin güvenilirliğidir. Sistem hareketi için çok önemli olan verilerin aktarılmasında, beklenmeyen bir durum ile karşılaşıldığında yapılması gereken işlemler kesin olarak belirlenmelidir. Bu amaçla karma sistemler ya da iletişimi ilişkin ek donanım düşünülebilir. Günümüz koşullarında programlanabilir kontrolörler ile tümleşik endüstriyel veri iletişim sistemleri (Profibus, Modbus, Interbus gibi) bu amaçla kullanılabilir[2].

Hata belirleme ve görüntüleme sistemi, sisteme ilişkin hatalı durumların sürücüye ya da teknik elemanlara bildirilmesini sağlayan bir veri toplama sistemidir. Sistem kumanda ve kontrolünde programlanabilir kontrolör kullanılması durumunda bu

tür veriler herhangi bir veri iletişim sistemi ile alınamaz. Bu veriler endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan operatör paneli ya da yazı gösterme aygıtı ile görüntülenebilir.

2. KUMANDA SİSTEMİNİN PLC İLE GERÇEKLENMESİ

Kumanda sisteminin PLC ile gerçekleştirilmesinde ilk adım, sisteme ilişkin iki durumlu (VAR-YOK) işaretlerin belirlenmesi ve bu PLC'ye bağlanabilecek uygun sayıda giriş/çıkış noktası içeren birimlerin seçilmesidir. Sistemde hatalı çalışma noktalarının düzenli ve hızlı olarak belirlenmesi için belirli bölümlere ilişkin girişlerin/çıkışların belirli gruplar biçiminde oluşturulması yararlı olur. Kumanda sisteminin gerçekleştirilmesinde kullanılan lojik işlem, zamanlama, sayma ve karşılaştırma gibi işlemler PLC'ler ile kolayca gerçekleştirilebilir. PLC'lerde bu tür işlemlerin doğrudan gerçekleştirilmesini sağlayan komutlar bulunur. PLC ile kumanda sisteminin gerçekleştirilmesinde göz önüne alınması gereken en önemli konu kumanda işaretlerinin alınış biçimidir. Başka bir deyişle bir olayın oluşumunun PLC'ye bildirilmesi için 0 değerinin mi 1 değerinin mi kullanılması gerektiğine karar vermektir. Genel olarak sistemin hareketsiz olmasını ya da durmasını gerektiren bir işaretin 0 değeri ile bildirilmesi, güvenlik açısından en uygun seçimdir. Örneğin taşıt hareketi için bütün kapıların kapalı olması gerekir. Şu halde bütün kapıların kapalı olduğu bilgisi 1 değeri ile gönderilmelidir. Eğer herhangi bir kapıdan 0 işareti alırsa sistem hareketine izin verilmemelidir. Bu durum iki şekilde ortaya çıkabilir. Ya gerçekten kapı kapalı değildir ya da herhangi bir nedenle (kopma, arıza) işaret almamamaktadır. Her iki durumda da sistemin çalıştırılmaması gerekir. Eğer kapıların açık olması 1, kapalı olması durumunda 0 işareti gönderilseydi hatalı bir çalışma durumunun belirlenmesi olanaksız olur ve taşıt hareket edebilir. Bu ise sistem güvenliği açısından istenmeyen bir durumdur. Sistem güvenliği için tüm durmayı gerektiren işaretler benzer biçimde üretilmelidir. Bu işlem donanım sırasında göz önüne alınmalıdır.

3. KONTROL SİSTEMİNİN GERÇEKLENMESİ

Taşıtlarda kontrol edilmesi gereken en önemli büyüklük taşıt ivmesidir. Taşıtın istenen ivme değerinde çalışması için geri beslemeli bir kontrol

yapısı kurulur.

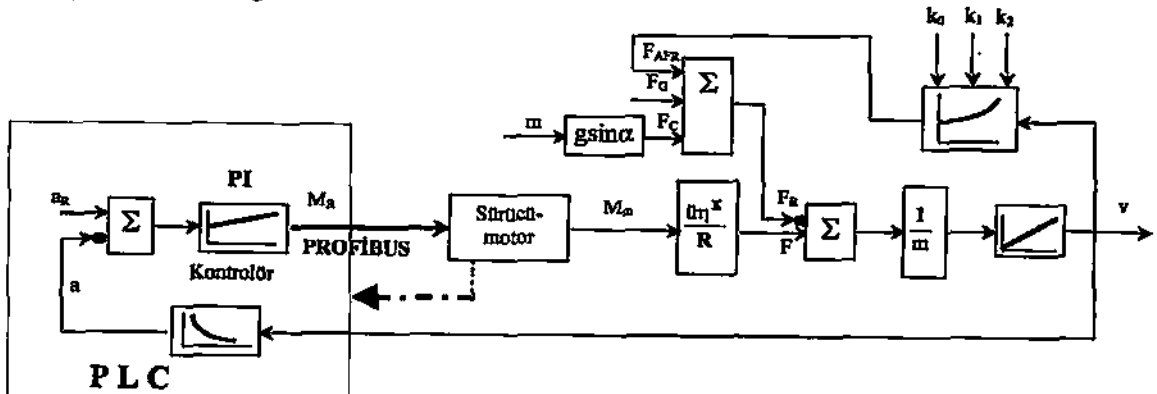
Taşıt ivme bilgisi çeşitli durumlarda farklı yerlerden alınır. Normal koşullarda ivme değeri taşıt sürücü kişinin el ile kumanda ettiği bir aygıttan alınır. İvme bilgisi nereden alırsa alınsın kontrol sistemi, istenen ivme değerini sağlayacak kontrol işaretini üretmelidir. Bu amaçla kullanılabilecek bir kontrol modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu modelin elde edilmesine ilişkin denklem ve bağıntılar aşağıda verilmiştir.

En genel anlamda bir taşıt hareket ettirici kuvvet, karşı kuvvet (direnç kuvveti) ve taşıt eylemsizliğinin belirlediği koşullara göre hareket eder. Newton hareket yasasına göre bir taşıta ilişkin dinamik denklem

$$F = F_R + m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

biçiminde yazılabilir. Burada F kontrol edilmesi gereken hareketlendirici kuvvet, F_R sürtünme, hava, eğim ve dönmeç nedeniyle oluşan dirençlerin toplam kuvveti, m taşıt dönen kısımlarının da etkisinin göz önüne alındığı eşdeğer taşıt kütlesi, v ise taşıt hızı büyüklükleridir. F hareketlendirici kuvveti bir elektrik motoru ve sürücüsü kontrol edilerek üretilir. Sürücü kontrol girişi ile sürücü çıkışı arasındaki ilişki, sürücü iç kontrol çevrimleri, koruma devreleri, doyma, gecikme ve ölü bölge gibi etkenler nedeniyle doğrusal değildir. Taşıt direnç kuvvetini oluşturan sürtünme kuvveti taşıt kütlesine bağlı, hava, eğim ve dönmeç dirençleri de doğrusal olmayan kuvvetler olduğundan karşı kuvvet de doğrusal değildir. Ayrıca denklemdeki taşıt eşdeğer kütlesi de yolcu sayısına bağlı olarak değişen bir büyüklüktür.

Taşıt sürücü sistemi genellikle birden çok motordan oluşur. En yaygın kullanılan yapı 4 motorlu taşıt sürücü sistemidir [3]. Bu tür sistemlerde her motorun dengeli yüklenmesi için gerekli önlemler alınmaya çalışılır. Göz önüne aldığımız kontrol modelinde bütün motorların dengeli yüklendiği varsayılmış ve sistem büyüklükleri 1 motora indirgenmiştir. Motor olarak moment kontrollü bir sürücünden beslenen bir asenkron motor kullanılmıştır ve sürücünün verilen referans momentini üretmek için uygun elektriksel işaretleri gecikmesiz uyguladığı varsayılmıştır. Sürücü gecikmesinin mekanik sistem dinamiğine göre çok küçük olması nedeniyle bu varsayım ivme kontrollü açıdan sonucu fazla etkilemez. Ancak jerk kontrolünün göz önüne alınması durumunda sürücü



dinamik modelinin bu modele eklenmesi gerekir.

F kuvveti, M_m motor momenti, $\omega = \omega_m / \omega_T$ dişli çevirme oranı R teker yarıçapı, η dişli verimi olmak üzere enerjinin sakınımı ilkesinden hareketle, enerjinin motordan taşıta aktarılması durumunda (motor çalışmada)

$$\eta M_m \omega_m = M_T \omega_T = Fv \quad (2)$$

Enerjinin taşıtan motora aktarılması durumunda (frenlemede)

$$M_m \omega_m = \eta M_T \omega_T = \eta Fv \quad (3)$$

eşitlikleri yazılabilir. Buna göre F kuvveti her iki durum için ($v = R\omega_T$ olduğu göz önüne alınarak)

$$F = \frac{M_m}{R} \omega \eta^2 \quad (4)$$

biçiminde yazılabilir. Burada x değişkeni motor çalışmada 1, frenlemede -1 değerini alan bir katsayıdır [3].

Direnç kuvveti F_R hava-sürtünme direnci F_{AFR} , eğim direnci F_G ve dönemeç direnci F_G büyüklüklerinden oluşur. Hava-sürtünme direnci k_0 , k_1 ve k_2 taşıta ilişkin deneysel katsayılar olmak üzere

$$F_{AFR} = k_0 + k_1 v + k_2 v^2 \quad (5)$$

Eğim direnci F_G , α yol eğimi açısı olmak üzere

$$F_G = mg \sin \alpha \quad (6)$$

bağıntıları ile ifade edilir [3]. Dönemeç direnci F_C için çeşitli deneysel bağıntılar verilmekle birlikte, modelimizde belirli değerler arasında değişen bir bilinmez olarak değerlendirilecektir. Taşıt ivme kontrolünün yapıldığı hızlanma ve yavaşlama durumlarında bu değer etkisiz bir büyüklüktedir.

Şekil 1'de verilen kontrol modeline göre yapılan ivme kontrolünde, hız bilgisinden türetilen ivme bilgisi istenen ivme bilgisi ile karşılaştırılarak ivme hatası belirlenir ve bu değer kontrolöre giriş olarak verilir. Uygulamada hız bilgisi bütün dingillere bağlı olan tekerlerden alınır. Taşıt ilişkin gerçek hız motorsuz bir dingile bağlı tekerden alınan hız bilgisidir. Motorlu dingillerden alınan hız bilgisi kayma ve kızaklama kontrolü için kullanılır. Gurubumuz tarafından İstanbul Ulaşım A.Ş. için yapılan bir prototip model üzerinde gerçekleştirilen kontrol sistemine ilişkin çalışmada PLC ile sürücü arasındaki veri iletişimi Profibus iletişim sistemi ile sağlandığından, hız bilgisi de doğrudan sürücüdün alınmıştır [4]. Ancak gerçek uygulamada bu bilginin yine bir veri iletişim sistemi ile doğrudan tekerlerden alınması öngörülmektedir.

Gerçeklenen kontrol sisteminde, PLC'ye kumanda, kontrol, sürücü motor ile PLC arasında iletişim için gerekli Profibus DP yazılımları ve hata belirleme ve gösterimi için gerekli yazılımlar yüklenmiştir [4]. İvme kontrolü için PI türü bir kontrolör öngörülmüştür. PI kontrolörü giriş-çıkış ilişkisi

$$u = K_e \left(1 + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (7)$$

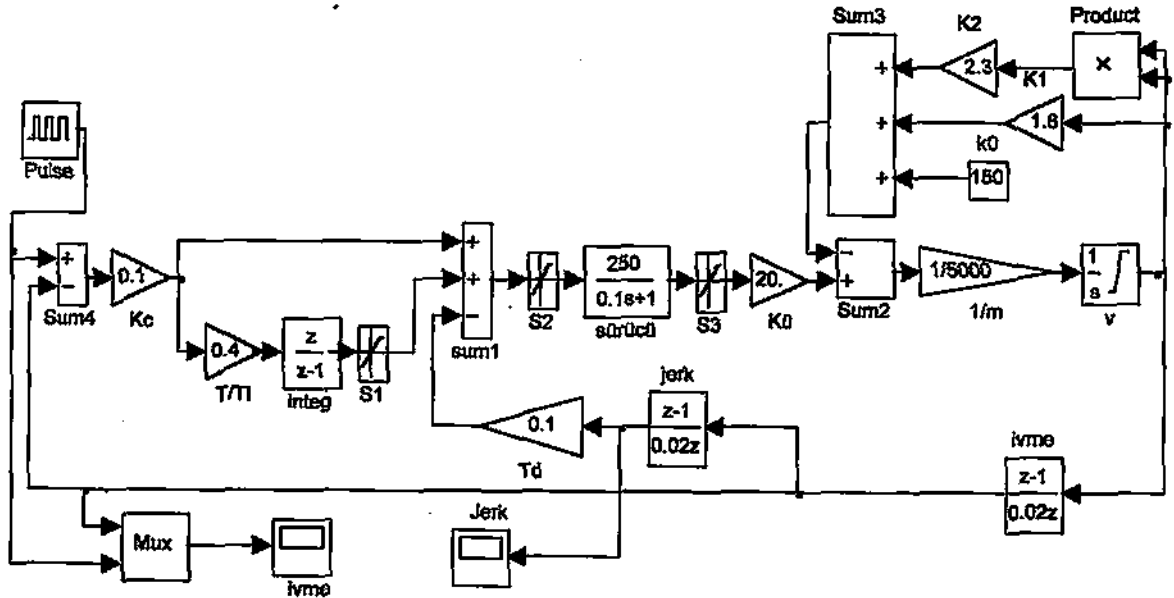
biçiminde tanımlanan bir kontrolördür. Burada u kontrolör çıkışı, e kontrolör girişi, K_e oransal katsayı, T_i ise integral zamanı katsayısıdır. Bu kontrolöre ilişkin kontrol yazılımı belirli bir örneklemeye zamanı için elde edilen z-tanım bölgesi transfer fonksiyonundan hareketle elde edilen fark denkleminin doğrudan programlanması ile gerçekleştirilmiştir [5], [6]. Kontrol yazılımı kontrol işaretlerinin uygulanabilir değerlerde olması ve integral yığılmasının (integral windup) önlenmesi için gerekli düzenlemeleri içerir. Şekil 2'deki simülasyon modelinde bu işlemler ve sayısal PI kontrolörüne ilişkin z-tanım bölgesi transfer fonksiyonu gösterilmiştir.

Taşıta jerk değerinin belirli sınırlar altında tutulması, diğer bir deyişle ivmenin değişiminin sınırlandırılması için kontrol çevriminde jerk bilgisi de değerlendirilmiştir. Bu amaçla ivmenin türevinden üretilen sayısal değer bir katsayı ile çarpılmış ve bu değer PI kontrolör çıkışından üretilen değerden çıkartılmıştır. Bu işlem matematiksel olarak PID kontrolörü ile eşdeğerdir. Ancak, uygulamada türev işleminin doğrudan ivme hatası bilgisine uygulanması türev vuruşu (derivative kick) olayına neden olur [6]. Bu ise taşıta sarsıntıya neden olabilecek bir olaydır. Bunu önlemek için PID kontrolör dolaylı olarak kullanılmıştır.

Kontrol sistemine ilişkin bütün yazılımlar örneklemeye zamanına göre düzenlendiğinden bu yazılımların seçilen örneklemeye süresinde işletilmesi zorunludur [4]. Bu amaçla PLC'nin zaman bağlı kesmeli çalışma özelliğinden yararlanılmıştır. Bütün alçak geçiren filtre, türev, integral ve zamana bağlı fonksiyonlara ilişkin yazılımlar kesmeli çalışan program blokları içinde yer almıştır. PLC'de hesaplanan sayısal kontrol işaretleri Profibus-DP iletişim bağlantısı üzerinden sürücü sisteme uygulandığından iletişim sisteminin veri gönderme hızının örneklemeye zamanından küçük olması gerektiği göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konudur [4].

4. KONTROL SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU

Kontrol sistemine ilişkin simülasyon modeli, İstanbul Ulaşım A.Ş. için geliştirilen 1 boylu ve 1 motorlu prototip taşıtın verileri kullanılarak Şekil 2'deki gibi MATLAB Simulink simülasyon yazılımında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modelinde görüleceği üzere, uygulamada karşılaşılan tüm işaret sınırlandırmaları modelde göz önüne alınmıştır. Simülasyonda ivme referansı darbe dizisi şeklinde uygulanarak ivme ve ivmenin değişimi gözlenmiştir. Simülasyon için taşıt dinamiğinde en etkili büyüklük olan taşıt kütesinin üç değeri için sonuçlar elde edilmiştir. Kontrolör parametreleri, kararlılık için en kötü durum göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kararlılık açısından en kötü durum taşıtın yolcusuz olduğu durumdur. Çünkü bu durumda kontrol çevrimi ileri yol kazancı en büyük değeri alır.



Taşıt kütlesinin artması ile kontrol çevrimini ileri yol kazancı azalacağından bu durum kararlılığı iyi yönde etkiler.

Taşıt kütlelerinin $m=5000$ kg değeri için sürekli durum hatasını sıfırlayan, aşırı ve yerleşme zamanı 1 saniye öngörülen kontrolör parametreleri $K_c=0.1$, $T_f=0.05$ seçilmiş ve geri besleme yolundaki türev katsayısı için $T_d=0.1$ alınmıştır. Bu katsayıların belirlenmesinde yine MATLAB yazılımından yararlanılmış, ancak bu ölçütlerden hareketle benzer katsayılar kontrol kuramındaki klasik yöntemlerle kolayca belirlenebilir [7], [8]. Burada jerk sınırlaması için geri besleme yolunda bulunan T_d türev katsayısının seçimi sistem kararlılığını etkileyen önemli bir büyüklüktür. Geri besleme yolunda türev teriminin bulunması durumundaki sistem açık transfer fonksiyonu göz önüne alındığında

$$\frac{a}{a_r} = \frac{K_z T_z}{T_m z^2 + (-T_m A + T_0 K_z)z - T_0 K_z} \quad (8)$$

biçiminde olduğu görülmüştür. Burada K_z sürücü ileri yol kazancının z tanım bölgesindeki değeri, T örneklem zamanı, m taşıt kütlesi, $A = \exp(-T/\tau)$, τ sürücü zaman sabiti, T_d ise geri besleme yolundaki türev katsayısıdır. Bu ifade incelendiğinde bu modelde sistem kararlılığını etkileyen birçok parametre bulunduğu görülecektir. Buradaki en önemli parametreler tasarımcı tarafından belirlenebilen, T örneklem zamanı ve T_d türev katsayısı ile yolcu sayısına göre değişen m taşıt kütlesi büyüklükleridir.

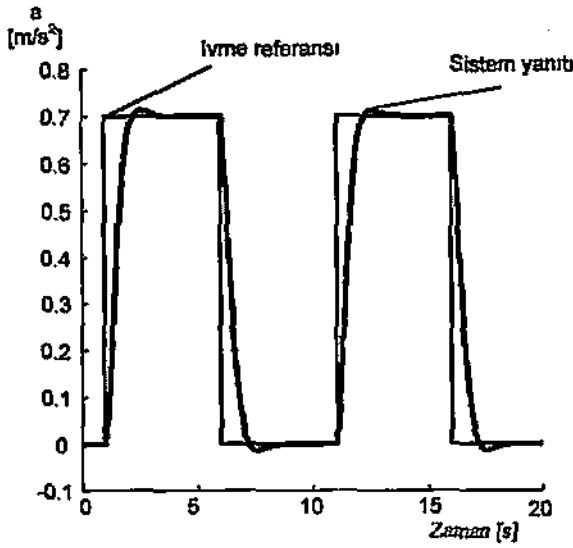
Şekil 2

Doğal olarak kararlı olan sürücü sisteminin geri besleme yoluna konulan titreşim teriminin sistemi kararsız yapması olasılığı T_d katsayının seçiminin önemini arttırmaktadır. Bu parametrenin seçiminde en etkili büyüklük taşıt kütlesi olup, simülasyonda kullanılan değer taşıtın boş durumdaki kütlesi göz önüne alınarak belirlenmiştir.

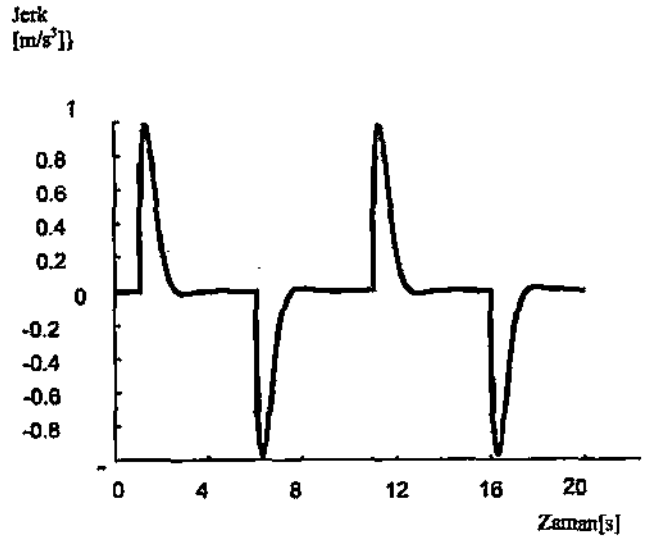
Şekil 2'deki modelden görüleceği üzere moment kontrollü asenkron motor sürüşü birinci mertebeden bir sistem olarak modellenmiştir. Laboratuvarıda bu konu ile ilgili yapılan ölçümlerden bu tür sürücülerin gecikmeli birinci mertebeden sistemler gibi davrandığı gözlemlendiğinden model bu şekilde seçilmiştir. Jerk değerinin sınırlandırılması ve ivme kontrolünün gerçek sistem değerleriyle örtüşmesi bu modelin seçimi ile doğrudan bağlantılıdır. Doğrusal olmayan sürücü gerçek modelinin belirlenmesi için gereken sistem üzerinde modellemeye ilişkin gerekli ölçümlerin yapılması ilertye yönelik çalışmalar olarak planlanmıştır.

Şekil 2'de kurulan simülasyon modelinde sistemin ivme referansına yanıtı Şekil 3'te ve oluşan jerk değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar kararlılık açısından en kötü durum olan taşıt kütlesinin 5000 kg değeri için elde edilmiştir. Taşıt kütlesinin artması durumunda $m=7000$ kg için an büyük jerk değeri $j=0.75m/s^3$ değerine düşmektedir. Buna karşın $m=5000$ kg iken 2 saniye olan yerleşme süresi, $m=7000$ kg olduğunda 3 saniye olmaktadır. Buradan çıkan sonuç belirli bir kütle durumu için en uygun olan kontrol sistemi diğer bir yük durumu için yetersiz kalmaktadır. En uygun kontrol parametrelerinin belirlenmesi için taşıt kütlesinin belirlenmesine ilişkin yöntemlere gereksinim vardır. Bu şekilde kütle durumuna göre parametreleri

değiştirilebilen bir kontrolör ile daha iyi çözümler bulunabilir.



Şekil 3. Sistem ivme yanıtı



Şekil 4. Sistemde jerk değişimi

5.SONUÇ

Bu çalışmada bir elektrikli ulaşım sisteminde yer alan bir örnek kontrol yapısı önerilmiş ve PI yapısındaki kontrol algoritması PLC ile gerçekleştirilmiştir [5]. Kontrolör parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri yapılan simülasyon programında verilmiştir. Elektrikli ulaşım sistemleri doğrusal olmayan yapıdadır. Bu nedenle örnek sistemde kullanılan PI ile kontrolör yerine sistem yanıtının geçici ve sürekli rejimdeki davranışını daha iyi duruma getirecek bir kontrolör bulunabilir. Ayrıca taşıt jerk'inin sistem davranışına etkisi göz önüne alınmalıdır. Taşıt sisteminin modellenmesinde, moment değişimlerindeki etkisi nedeniyle, sürücü sisteminin elektriksel yanıtının da göz önüne alınması uygun olacaktır.

REFERANSLAR

- [1] "İstanbul Metro System: Instructional Training Program", ABB Traction, 1988.
- [2] Josef Weigman, Gerhard Killion., *Decentralization with PROFIBUS-DP*, 2000, Wiley-VCH.
- [3] S. Kurtulan, Bir Elektrikli Ulaşım Sisteminin Modellenmesi Ve Simülasyonu Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü 1992.
- [4] M.Gökasan, S. Kurtulan, S. Boğosyan, "İstanbul Metrosu Vagon Kumanda Sisteminin PLC' de gerçekleştirilmesi ve Testi Projesi", İTÜ Vakfı ve İstanbul Ulaşım A.Ş., 2000.

[5] J. R. Leigh., *Applied Digital Control: Theory, Design and Implementation*, 1992.

[6] G. Olsson, G. Piani, , *Computer Systems for Automation and Control*, Prentice Hall, 1992.

[7] M.Gökasan, S.Kurtulan, M.Kalyon, S.Bogosyan, F.Caliskan, O.Yildiz, "Boğaziçi Hafif Metrosu Kontrol Sisteminin Analizi", Int. Advanc. Technol. Sysmp., İstanbul, 8-10 March, 1999

[8] M.Kalyon, M.Gökasan, S.Kurtulan, O.Yildiz, S.Bogosyan, F.Caliskan, "Boğaziçi Hafif Metrosu Kontrol Sisteminin Simülasyonu", Int. Advanc. Technol. Sysmp., İstanbul, 8-10 March, 1999