



TAKIM TEZGAHI TASARIMINDA ELEKTRİK MOTORU SEÇİMİ

Erol TÜRKEŞ* & Sezan ORAK**

*Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Tavşanlı yolu 10. km. Merkez kampüsü 43100 Kütahya eturkes@dumlupinar.edu.tr

**Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Batı meşelik, 26480 Eskişehir sorak@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi: 22.09.2008

Kabul Tarihi: 07.10.2008

ÖZET

Takım tezgahlarının tasarımındaki en önemli hususlardan biri, yeterli kesme kuvveti ve tezgah uzuvlarının gerekli hareketlerinin oluşumunu sağlayan elektrik motorlarının seçimidir. Bu seçimin doğru yapılması, istenilen boyutsal hassasiyette ve yüzey kalitesinde iş parçası üretilmesini sağlayan en önemli etkidir. Bu çalışmada, günümüzde talaşlı imalatta kullanılmakta olan konvensiyonel ve nümerik kontrollü takım tezgahlarında tezgah ana mili tahriki için güç, iş parçasının veya kesici takımın gerekli konumlandırılması için tezgah uzuv hareketlerini sağlayan sürüm sistemlerine, verim-performans ve kontrol teknikleri bakımından elektrik motoru seçiminin nasıl yapılacağı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Takım tezgahları, Tasarım, Elektrik motoru.*

1. GİRİŞ

Takım tezgahlarının iş mili veya iş parçasının konumlandırılmasını sağlayan kızakların tahrikleri ve soğutma sıvısının devir-daimi için gerek doğru akım (DC) gerekse alternatif akım (AC) motorlar kullanılmaktadır. Doğru akım motorlarında devir sayısı, şebeke gerilimi ve ikaz şiddetine bağlıdır. Devir sayısı, motora verilen voltajla doğru, ikaz ile ters orantılıdır. Motor momenti ise sadece ikaz ve indüvi akım şiddetine bağlıdır ve hem ikaz hem de endüvi akım şiddeti ile doğru orantılıdır. Motorun devir sayısını artırma, ikaz akımının bir reosta ile azaltılmasıyla yapılır. Bu reostanın ayarı sabit tutulursa, endüvi akımı yüke bağlı olarak kendiliğinden değişim gösterir. Bu değişim, tezgah için gerekli olan güce göre olmaktadır. Böylece şebeke voltajı ve ikaz şiddetinin sabit kalmasından dolayı da devir sayısı, yüke bağlı olmaksızın sabit kalır. Giriş voltajı değiştirilerek istenilen değerlerde hız elde edilebildiğinden ve sabit kesme hızı sağlanabildiğinden modern tezgahların çoğunda DC motoru kullanılmaktadır. DC motorlarının bir özelliği de motor momentinin devir sayısı arttıkça düşmesi ve böylece motor gücünün takriben sabit kalmasıdır. Bununla beraber DC motorundan elde edilen moment, çoğu hız aralığında sabit kalmaktadır. Önceleri, DC motorlar genellikle endüstriyel uygulamalarda, AC motorlar ise ev cihazlarında kullanılmakla beraber boyutlarındaki azalmadan ve batarya geliştirmesinden dolayı DC motorlar ev cihazlarında popüler hale gelmiştir. Takım tezgahlarında AC motorlardan genellikle asenkron ve kısa devreli, özellikle de sincap kafesli motorlar kullanılmaktadır. Bu motorların dezavantajı, demarajlarında normal hale göre beş misli kadar fazla akım çekmeleridir. Yıldız-üçgen anahtarı kullanılarak bu değer nominal cereyanın yaklaşık iki katına kadar düşürülebilir. Bu durumda demaraj momenti de aynı oranda düşse de bu moment tezgahın boş durumundaki yol vermeler için yeterlidir. Takım tezgahlarında şebekeyi ve motoru yüksek demaraj cereyanlarından korumak için yerine göre bilezikli asenkron motorlar da kullanılır. Asenkron motorlar, sık olarak durdurulup harekete geçirilmeye müsaittirler. Bu motorlarda devir sayılarını 3000 d/dak' ın üzerine çıkarabilmek için frekans değiştirilir. Bununla beraber, değişken tezgah mili hızları sağlayan özel tasarlanmış AC motorlarıyla çalışan takım tezgahları da mevcuttur. AC motorunun kullanımı, bir dizi mil hızının bulunduğu kademeli tahrik sistemini gerektirmektedir. CNC takım tezgahlarının tasarımında geleneksel olarak dönme hareketi için sürüm motorları ve tabla hareketinin sağlanması için mekanizma olarak da bilyalı vidalı miller kullanılmaktadır. Lineer motorlar ise bu geleneksel yaklaşıma alternatif olarak düşük atalet, daha iyi performans,

hassasiyet veya tamlık artışı ve karmaşıklığın azaltılması gibi avantajlarından dolayı öne çıkmaktadır. Araştırmacılar, hava sürtünme kuvveti kusurları, stator ve motor parametrelerinin dengesizliği, rotor millerinin kırılması, eksentrisite ve yataklama hataları gibi kusurlar hakkında çalışmalar yapmışlardır. Bu kusurların tanımlanması ve çözümünde farklı metotlar geliştirmişlerdir. Herhangi bir takım tezgahının tasarımında kullanılacak olan motor tipi, takım tezgahının gerektirdiği torkla ve zaman cevabıyla oldukça ilgilidir. Adım motorlarının kullanımı, kesme yükü yüksek olan ilerlemeli tahrikli sistemlerde yaygın değildir. Genellikle geri beslemesi olmayan araçlarda kullanılır. Adım motoru, açısal adım hareketleriyle kontrol edilir. Bu motor tipi, elektrik darbeleriyle enerjilendirilse ardışık adımlarla dönme hareketi verir. Bu ardışık adımlar, bir bilgisayar tarafından kontrol edilen darbelerle sağlanır [1, 2]. Bu elektrik motorlarının seçimi, tasarımı yapılan takım tezgahının özelliklerine ve tahrik edilecek olan tezgah mekanizmalarının özelliklerine göre yapılmalıdır.

2. MEKANİKSEL GÜÇ GEREKSİNİMİ HESABI

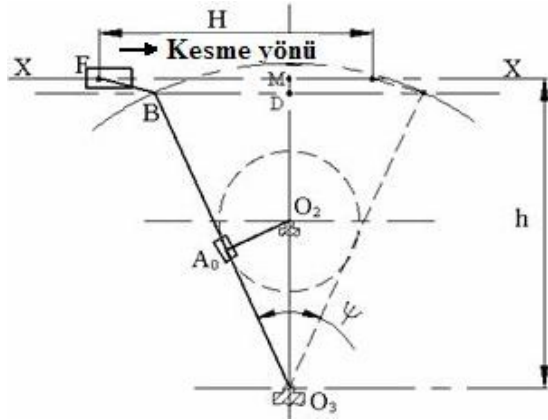
Takım tezgahları için elektrik motoru seçiminde mekaniksel güç gereksiniminin belirlenmesi en önemli konudur. Bir takım tezgahı, statik ve dinamik yükleme durumlarına maruz kalmaktadır. Statik yükleme durumu, tezgahın veya hareketli kısımlarının hareketsiz durumlarında tezgah parçalarının ve işlenen iş parçasının ağırlıklarından kaynaklanan kuvvetlerin yapıya verdiği etkilerdir. Dinamik yükleme ise hareket halindeki tezgah yapısı üzerine, kesme kuvvetleri, hareketli uzuvların ataletleri ve aralarındaki sürtünme kuvvetleri gibi kuvvetlerin etki etmesi durumudur. Tüm bu kuvvetlerin etkilerini azaltmak için takım tezgahı tasarımının mümkün olduğunca kusursuz olarak yapılması gerekir. Bunun gerçekleştirilmesi; uygun malzeme, mekanizma, makine elemanı seçimiyle birlikte; kinematik, kinetostatik ve dinamik analiz hesaplarının doğru yapılmasıyla mümkündür. Bununla beraber, mukavemet hesaplarına göre; hantal bir yapıdan kaçınmak için tezgah uzuvlarının uygun boyutlandırılması gerekmektedir. Tasarımı yapılan takım tezgahının toplam ana motor gücü hesap edilirken öncelikle tezgahın hareket mekanizması için gerekli olan güç hesaplanır. Bu güç hesabı, tezgah mekanizmasının dinamik analizinden yararlanılarak yapılır. Dinamik analiz sonucunda tezgah mekanizması için gerekli ana motor gücü hesabı, [3, 4]' deki gibi grafo-analitik bir metot olan N.I. Marselov yöntemiyle yapılabilir. Bu yöntemle göre tezgah mekanizmasının faydalı gücü,

$$P_f = \frac{W_{fd}}{T} \quad (1)$$

denklemlerle bulunur. Burada, W_{fd} , tezgah mekanizması üzerindeki faydalı direnç kuvvetlerinin yapmış olduğu iştir. T ise tezgah mekanizmasının giriş milinin veya uzvunun periyodudur. Bu periyot değeri,

$$T = \frac{60}{n_g} \quad (2)$$

denklemlerle hesaplanır. Burada, n_g , tezgah mekanizması giriş uzvunun maksimum devir sayısıdır. Tezgahın faydalı gücünün bulunmasında (1) denklemindeki W_{fd} değeri ise işletme kuvveti ($F_{i\dot{s}}$)' in indirgenmiş faydalı direnç momenti (M_{fd})' nin tezgah mekanizmasının işleme konumlarına göre hesaplanmasıyla elde edilir. Bu değer işleme konumlarına göre bulunmasında, [3] ve [4]' de hesaba alınan vargel tezgahı mekanizması örnek olarak verilmiştir. Bu mekanizmanın kinematik şeması Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Vargel tezgahı mekanizmasının kinematik şeması [3].

Şekil 1' e göre mekanizma, kurs boyu olan $[H]$ aralığında kesme yönünde iş parçası üzerinden talaş kaldırmaktadır. Ters yön ise kesici takım kesme yapmayarak boşta kalmaktadır. F noktasının $[H]$ aralığında gidip-gelmesi, (A_0) noktasının (O_2) noktası etrafında saat yönünde 360° lik dönüşüyle gerçekleşmektedir. (A_0) noktasının bir tam dönüşü, eşit parçalara bölünerek mekanizmanın kinematik ve dinamik analizi yapılır. F noktasının kesme yönünde $[H]$ aralığında ilerlemesine karşılık gelen (A_0) noktasının konumları, işleme konumları diye adlandırılır. Bu konumlardaki (M_{fd}) değerleri,

$$M_{fd} = F_{i\psi} \times r_{O_2 A_0} \times \frac{V_F}{V_A} \times \cos(F_{i\psi}, V_F) \quad (3)$$

vektörel bağıntısıyla hesaplanır. Burada, $r_{O_2 A_0}$, tezgah mekanizması giriş uzvunun yarı çapı, V_F ve V_A sırasıyla (F) ve (A) noktalarının çizgisel hızlarıdır. Bulunan (M_{fd}) değerleri, giriş uzvu $[O_2 A_0]$ ' in dönüş açısına göre integrallenip toplam W_{fd} değerleri bulunur. Böylece (1) ve (2) denklemlerinden faydalanılarak tezgah mekanizmasının faydalı gücü bulunur. Bu gücün bulunması için yapılan hesaplama yönteminin hassasiyeti tezgah için gerekli olan ana motor gücünün bulunmasında oldukça önemlidir. N.I. Marselov yöntemi, grafo-analitik bir metot olduğundan hesaplama hassasiyeti düşüktür. Bunun için [5] çalışmasında aynı tezgah mekanizması için Kane [6] hareket denklemleri düzenlenerek gereken motor gücü hesabı yapılmıştır. Bu denklemlere göre öncelikle tezgah mekanizmasının kinematik analizi yapılmıştır. Kane metoduna göre güç hesabı (1) denklemine benzer şekilde,

$$P = \frac{W_M}{T} \quad (4)$$

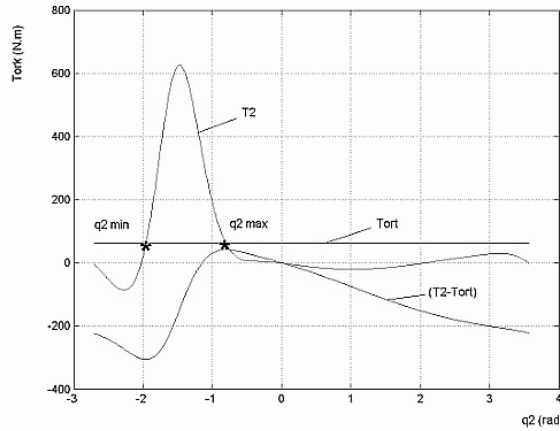
bağıntısıyla hesaplanır. Burada W_M , motorun yaptığı işdir. Bu iş değerinin bulunması, tezgah mekanizmasının giriş uzvunun dönüş açısı (q_2) ' nin 2π ' lik dönüşüne göre giriş uzvu torku (T_2) ' nin ve mekanizmayı dengeleyici tork olan ortalama torkun (T_{ort}) hesaplanmasıyla yapılır.

$$T_{ort} = \frac{\int_{q_2=0}^{q_2=2\pi} T_2 dq_2}{2\pi} \quad (5)$$

Burada T_2 , ifadesi, (q_2) ' ye bağlı olarak Kane hareket denklemleri düzenlenerek hesaplanır;

$$A\ddot{q}_2 + B\dot{q}_2^2 + Cq_2 + D = T_2(q_2) \quad (6)$$

Buradaki A, B, C ve D katsayıları sırasıyla; ataletle, merkezkaç kuvvetlerle, koryolisle ve sürtünme ve ağırlık etkisiyle oluşan büyüklükleri temsil etmektedirler. Vargel tezgah mekanizmasının (4) denkleminde güç hesabının yapılabilmesi için (5) ve (6) denklemleri yardımıyla (T_2) ve (T_{ort}) değerlerinin grafikleri Şekil 2' de görüldüğü gibi çizdirilir.



Şekil 2. Tork grafikleri [7].

Denklem (4)' deki W_{fd} değeri, Şekil 2' de çizilmiş olan (T_2) grafiğinin (T_{ort}) doğrusuyla çakıştıkları (q_{2min}) ile (q_{2max}) noktaları arasındaki bölgenin integralinin alınarak toplam alan (A_T) ' nin hesaplanmasıyla bulunur. Şekil 2' deki $(T_2 - T_{ort})$ grafiğinin yine aynı noktalar arasındaki altında kalan alanın değeri de Şekil 1' de görülmekte olan tezgah mekanizmasının dengelenmesi için dengeleyici atalet momentinin hesaplanması için kullanılır. Böylece (4) denklemi,

$$P = \frac{W_M}{T} = \frac{A_T}{T} \quad (7)$$

şeklinde yazılır. Daha önce yapılmış olan [5] çalışmasında, N.I. Marselov grafo-analitik metot ile Kane metodu karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Kane metodunun mekanizmanın güç hesabında daha gerçekçi ve makul sonuç verdiği görülmüştür. Bunun nedeni de Kane metoduna göre düzenlenen hareket denklemlerinin bilgisayar ortamında çözümlenebilmesi ve giriş uzvu hareketinin daha fazla bölümlere ayrılarak daha hassas sonuçların alınabilmesidir. Denklem (1) ve denklem (2) den gerekli güç değerleri sırasıyla, $P_f = 1,485 kW$ ve $P = 0,913 kW$ olarak hesaplanmışlardır. Takım tezgahının toplam ana motor gücü ise tezgahın tüm tasarımından sonra sistemde kullanılan yataklar, sürtünen yüzeyler ve tüm makine elemanlarının toplam verimleri $(\eta_T = 0,44)$ de hesaba katılarak bulunmuştur [3]. Böylece gerekli toplam mekaniksel güç,

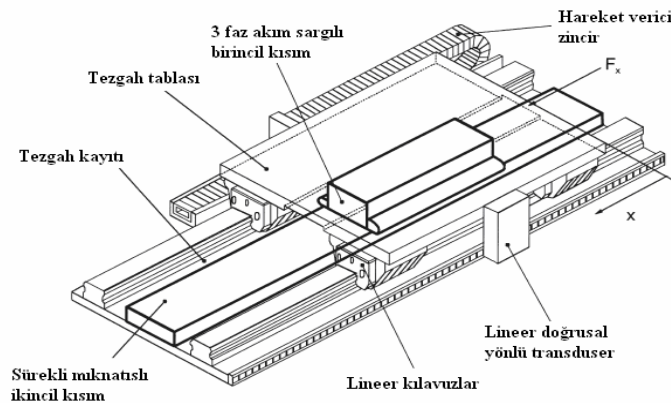
$$P_T = \frac{P}{\eta_T} \quad \text{ve ya} \quad P_T = \frac{P_f}{\eta_T} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır.

3. SÜRÜM SİSTEMİNE GÖRE MOTOR SEÇİMİ

Takım tezgahlarında sürüm sistemleri, mil ve ilerleme sürüm mekanizmaları olarak sınıflandırılır. Mil sürüm sistemleri, 35000 dev/dak' ya kadar oldukça geniş bir hız aralığında dönme hareketi yaparlar. İlerleme sürüm sistemleri ise genellikle motorların açısal hareketlerini hızı 30000 mm/dak' ya kadar varan lineer harekete dönüştürürler. İlerleme sürüm sistemleri, iş parçasının bağlandığı tezgah tablası, vida somunu, bilyalı vida, tork reduksiyon dişli grubu ve servomotor mekaniksel bileşenlere sahiptir. Değişik hızlarda verimli tork sağladığından dolayı ilerleme sürüm sistemlerinde yaygın olarak servomotorlar kullanılır. İlerleme sistemlerinde en çok kullanılan servomotorlar, DC motorlardır. Bununla birlikte, AC servomotorlar da gelişkin performanslarından dolayı rağbet kazanmışlardır. Bir servomotor sisteminin elektriksel bileşenleri; servomotor yükselteci, hız ve pozisyon geri besleme transduseri, dijital bilgisayar ve dijital ya da analog konverter devresinden oluşur [2]. İleri sürüm sistemi motoru, takım tezgahındaki hem statik hem de dinamik yüklemelere karşı yeterli olmalıdır. Statik yükler, kızaklar ve yataklardaki sürtünme kayıpları ile tezgah tablasının ilerleme doğrultusunda etki eden kesme kuvvetlerinden kaynaklanır. İleri sürüm sistemi için seçilecek motor, tezgah tablası, iş parçası ve vidalı mil topluluğunda oluşan sisteme uygun ivmelenmeyi sağlayacak yüksek yeterlilikteki dinamik torku verebilmelidir. Aynı zamanda bu tork, arzu edilen kararlı durum hızını sağlayabilmelidir.

Nümerik kontrollü takım tezgahları ve bunların sürüm sistemlerinde; ana, ilerleme ve yardımcı işlemler için üç çeşit motor kullanılır. Ana motor, tezgahın ana miline hareket veren ve talaş kaldırmada kullanılır. İlerleme motorları, kızaklara hareket verir ve yardımcı motorlar ise kesme, yağlama ve soğutma sıvısı devir-daim sistemi gibi sistemleri çalıştırır. Güç ve ilerleme motorlarından istenen en önemli özellik, kademesiz hız değişimi temin edebilmeleridir. Bunun için bu motorlar, servomotor şeklinde imal edilmektedir. Ayrıca güç motorlarından, talaş kaldırmak için gerekli gücü verebilmeleri istenmektedir [7]. Takım tezgahlarının tasarımında ilerleme eksenlerindeki hareket, lineer motorlar tarafından sürülecek şekilde göz önüne alınır. Şimdiye kadar tezgah yapısının ideal olarak eğilip bükülmez rijitlikte olduğu kabul edilmiştir. Buna rağmen, örneğin devirdaimli bilyalı vida gibi mekanik hareket iletim elemanlarındaki kusurlar ve bu gibi kusurlar ilk baskın doğal sürüm frekansını meydana getirebilmektedir. İyileştirilmiş kontrol davranışına karar verilmesiyle elektrikli lineer doğrusal sürücüler ile kontrol edici grupların arması mekanik salınımlar oluşturur. Bu yüzden sistem kendi kendini salınım yapmaya zorlar. Gerçekte yüksek doğal frekanslar, yüksek kontrol band genişlikli lineer motorun rijit olmasından dolayı uyarılabilirler [8]. Takım tezgahlarındaki imalat hatalarının en aza indirilmesi, takım ve tezgah çalışma ömrünün artırılması için tezgahın sürüm sistemlerinde kullanılan motorların çalışma sırasında sarsıntısız ve titreşimsiz çalışması da oldukça önemli bir husustur.



Şekil 3. Elektrikli lineer doğrusal sürücü [8].

Bu nedenle, torsional yükler ve ani ters yönde dönme yapma kabiliyetli dişli kutusu sistemlerine sahip motor sürüm sistemleri için hızlı ve robust hız kontrol edici önerilebilmektedir. Bu konuda Dhaouadi ve arkadaşlarının yapmış olduğu analiz, simülasyon ve deneysel çalışmalara göre, modelleme hatalarının önlenmesinde ve

mekaniksel titreşimlerin yok edilmesi için robust sistemli hızlı kontrol edicilerin kullanımı kuşku duyulmaz bir şekilde yarar sağlamıştır [9]. Sürücü sistemlerinin kontrolü konusunda bir başka çalışma Yin ve Wu [10] tarafından elektrik motorlarındaki gerilim harmoniklerinin beslenmesinin azaltılması yönünde yapılmıştır. Yin ve Wu, hat ve PWM (Pulse-Width-Modulation) yüksek frekans değişiminin neden olduğu kalkış voltaj oranı gibi her iki yük harmoniğinin azaltılması için yeni bir CSI (Current-Source-Inverter) sürüm sistemi önermektedirler. PWM-CSI sürüm sistemiyle, sürüm redresör kontrol çevriminin modifiye edilmesiyle daha büyük bir harmonik azaltım sağlanmıştır. Hatta araştırmacılar, geleneksel olarak kullanılan PMW-VSI (Voltage-Source-Inverter) sürüm sistemlerinin yerini PWM-CSI sürüm sisteminin alacağını savunmaktadırlar. Motor sürüm sistemleri için yapılan bir kontrol sistemi de rotor zaman-sabiti adaptasyonlu indirekt alan-yönlendirmeli bir indüksiyon motorudur. Bir indüksiyon motorunun rotor zaman-sabitinin ayrı olması, dolaylı konum-yönlendirmesinin hatalı olmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı, bir indüksiyon motor sürümü için komple bir dolaylı konum-yönlendirmesi kontrolü kurulması bakımından rotor zaman-sabiti ile uyumlu bir adaptasyon mekanizması Lin ve arkadaşları [11] tarafından geliştirilmiştir. Rotor zaman-sabiti adaptasyonlu indirekt konum yönlendirme kontrolü, dekuple tork ve değişken eksen bileşenleri için güçlü bir konumlandırma özelliğine sahiptir. Bu tür bir sürüm kontrol sistemine sahip elektrik motoru, karmaşık yüzeyli iş parçalarının rahat işlenmesinin yanında değişken kesme hızlarının da elde edilmesini sağlayabilmektedir. Takım tezgahlarında kullanılan elektrik motorları ve/veya sürüm sistemlerinin seçimi için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Dinamik yük ve buna ek olarak iletim hareketine haiz bir sürüm sistemi, gerekli makine performansları, maliyet, sistem boyutu gibi diğer karakteristiklerin eşzamanlı optimizasyonunun sağlanması için seçilmiş olmalıdır. Sürekli magnetikli eşzamanlı bir AC servo motorda karşılaşılan genel bir probleme genel hareket kanunları ve yük torkları uygulanır. Ayrıca sürekli iş yapma durumu ve dinamik sürüm sisteminin operasyon aralıkları göz önüne alınarak verilen yükün sürümünü başaramayan motor seçiminin yapıldığı makul bir metot önerilir. Bu metot her çeşit iletim oranına uygun olabildiği gibi yük sürümüne yetenekli motorlar için ise ayrıca belirli özel uygun iletim oranlarının kullanımına da olanak sağlar. Bunun yanında genel bir durumda bu metodun uygulanması bir simülasyon programı gerektirir [12, 13]. Bir başka çalışmada [14] başarılabılır tamlik ve motor hızı arasındaki uyumsuzluk incelenmiştir. Bu problemin çözümü için de bir noktadan diğer bir noktaya hareket göz önüne alınarak bir metot verilmiştir. Bu metoda göre yapılan bir çalışmada [15] sadece ataletsel yükler hesaba katılmıştır. Bu metot, yüklerin toplam oranı ile hareket zamanının minimizasyonu üzerine temellenmiştir. Motor tarafından sağlanabilecek maksimum hızın zorlama durumu hesaba katılır. Böylece; sürüm sistemi, iletim oranı ve bununla birlikte hareket kanunu seçilebilir. Bununla birlikte bu metot, ne tüm sürüm sistemlerinin operasyon alanlarını ne de direnç yüklerini hesaba katmamaktadır. Bir başka çalışmada [16] ise, makinenin çok daha fazla ve zorlanarak iş yapma durumuna göre bir metot önerilmiştir. Toplam yük oranı ve hareket zamanının her ikisi de çevrim periyoduyla belirlenmiştir. Bu metotta hareket kanununun doğru bir şekilde seçimi ilk adımdır. Bu metoda göre kabul edilen iletim oranı, motor torkunu minimize eder. Benzer diğer şartlar altında sürüm sistemlerinin karşılaştırılmasını sağlar ve yükler uygun bir şekilde karakterize edilir. Sürekli çalışma alanı ve dinamik sürüm sisteminin operasyon aralığı bir birinden ayrılır. Bu metotta direncin olmadığı zaman sadece ataletsel torklar verilir. Son zamanlarda Cusimano [12] yaptığı çalışmada, [16]'da önerdiği metodu makinenin daha karmaşık çalışma şartlarını göz önüne alarak uygun bir genelleştirme vermiştir. Bu çalışma motor torkunu minimize edecek biçimde iletim oranı farklı değerlerde hesaba katılmıştır. İletim ataletinin etkisi basit bir tarzda hesaba katılmıştır. Elektrik motorunun iş mili üzerindeki yükün; ataletin sabit yük momenti, periyodik hareket, toplam dönme ve hareket zamanı gibi bir makine için en çok gerekli parametreleri yerine getirecek özellikte dönme hareketi yaptığı kabul edilir. Modern motor sürüm sistemlerinin kontrol elemanları, kompleks ve sistem ve yük davranışına yüksek oranda hassastırlar. Bu yüzden bu kontrol elemanları, kapalı çevrim operasyonunu sağlayacak biçimde gerçek çalışma ortamında test edilmelidirler. Kontrol ve verimlilik fonksiyonları, genellikle ekstrem şartlar altında test edilir. Aynı zamanda diğer bir yönden güç oranı ve sistemin hassasiyeti gibi kontrol aksiyonları artırılır. Bu bakımdan real-time simülasyon, elektrik motor sürücülerinin kontrol elemanları için ideal bir test biçimidir [17].

4. VERİM VE PERFORMANS BAKIMINDAN MOTOR SEÇİMİ

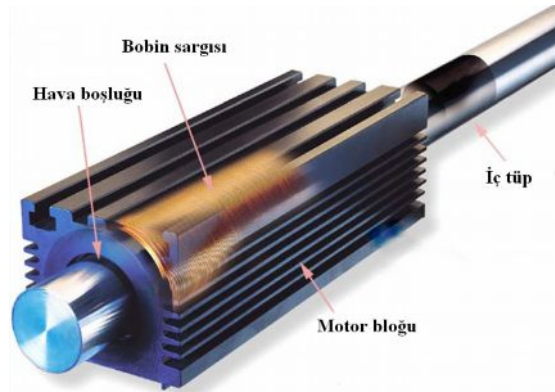
Günümüze kadar birçok elektrik motoru türü tasarlanmıştır. AC motorları iki grupta toplanabilir: asenkron motorlar (indüksiyon motorları) ve senkron motorlar. Asenkron tipler, standart bir aygıt olmuştur. Senkron tiplerse, büyük güç gerektiren yerlerde kullanılabilir. Bu motor türlerinin takım tezgahlarında hangi ortamda, hangi amaçla, hangi tür ve miktardaki yükler altında kullanılacaklarının uygun bir biçimde karşılaştırılması

onların verimliliğinin artırılmasının en önemli etkenidir. Ortam bakımından, çalışma ortamının sıcaklık, ıslak, kuru ve partikül yoğunluğu gibi etkenler göz önüne alınmalıdır. Amaç bakımından ise, işlenecek parçaların malzemesi, şekli, boyutu ve çalışma süresi gibi etkenlerdir. Takım tezgahının işleme sırasında (dinamik) ve statik durumda bu yüklerin ne kadarına maruz kalacağı ve bu yüklerin büyüklüklerinin hangi değerlerde olacağı iyi tahmin edilerek hesaplanmalıdır. Bunların yanında motorların kontrolü de oldukça önemlidir. Tipi ve boyutu ne olursa olsun bütün motorlar bir tür kontrole ihtiyaç duyarlar. Yıllar boyunca motorların endüstride kullanımı çok basitti ve genellikle DC motorlar kullanılıyordu. Yapılan tek seçme işlemi ise motorun sürülme tipi hususunda idi. DC motorların hareketleri düzgün, kesin ve güçlüdür. Hızları kolaylıkla değiştirilebilir; ama bunlar çalışırken ark çıkarırlar. Eğer bir motor hem sık sık durup çalışacak, hem hassas hız ayarlarına elverişli olacak hem de yük altındayken ani frenlemeler yapacaksa, böyle bir motorun seçimi kolay değildir. Bu koşullar, en yüksek verimin istendiği uygulamalarda aranır. Bu durumda, güçleri onlarca Megawatt'a ulaşan doğru akım motorları kullanılır.

Bir elektrik motorunu istenen hızda döndürmek için, motora mikro işlemcili elektronik bir hız sürücü takmak gerekir. Değişen hızlar kullanmak söz konusu olduğunda, ilk seçim doğru akım motoru olur. Bu tip motorlarda sabit uyarı altında dönme hızı rotor üzerine uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değişir, kuvvet çifti ile rotordan geçen akımın şiddeti arasındaki oran aynı kalır. Bunun için motora bir redresör (doğrultucu) takmak gereklidir. Takım tezgahlarının elektrik motorlarında dönme hızı, işlenen malzemenin türüne göre ayarlanır; bunun için, standart asenkron motora mikro işlemcili bir frekans dönüştürücü bağlanmıştır. Dişli kutusu oranları, dönme hızı, ilk yükleme ve tahrik kuvvet amplitüdünü içeren takım tezgahı sürüm sistemlerinin dinamik torsiyonel cevabına tesir eden faktörler de motor verimliliğini etkiler. Frekans cevabı ölçümleriyle dönme hareketi yapan sürüm sistemini tahrik eden etkenler saptanabilmektedir. Sürüm motoru ve dişli kutusu arasından alınan ölçüm sonuçlarıyla baskın doğal frekansın rezonans oluşturup oluşturmadığı saptanabilir [18]. Kwon ve Buradaki [19] çalışmasında, bir CNC takım tezgahının tablası üzerine dikey olarak ve iş milinin ilerleme doğrultusunun zıt yönünde yerleştirilen iki dijital yer değişim sensörleriyle ölçüm yapılarak iki işleme ekseninin eş zamanlı hareketleri bir mikro computer ile ölçülmüştür. Bu ölçüm sisteminin, yuvarlak ve dik keskin köşeli takım yolu programlarının her ikisine de uygulanmasıyla takım tezgahlarındaki servo-nedenli hatalar değerlendirilmiştir. Bir işleme merkezinin X ve Y eksenlerine bu sistemin uygulanması mümkündür ve sonuçlar, marjinal frekansların bir aralığını ve eksenlerin kazanç ortamlarını gösterir. Bu ölçüm sistemi ve bir ikinci dereceden teknik olarak görülen konvensiyonel "çift küresel link bar" uygulamalarıyla yapılan karşılaştırmalı testler, servo hatalar karakterizasyonunun belirlenmesinin doğruluğunu da garanti eder. Takım tezgahları elektrik motorlarının performanslarının artırılması için değişik yöntemler uygulanmıştır. İşleme merkezleri gibi takım tezgahlarının kayar yüzeylerinin pozisyon geri beslemesi için iki yol vardır. Bunlardan biri AC servo motorun döner encoder uygulaması diğeri ise pozisyon denetimi için bir ilave lineer encoder uygulamasıdır. Lineer encoder kullanımı "kapalı çevrim" olarak adlandırılır. Bu uygulama takım pozisyon hatalarını çok küçülttüğünden yüksek hassasiyette işleme sağlar. Ihara [20] yaptığı çalışmada, mekaniksel ve kontrol parametrelerini geri besleme sistemlerinin karakteristik değerleri olarak alıp stabilitenin kaynağı olarak görüp simüle etmiştir. Bu çalışmada, farklı geri besleme metotları ile düzgün doğrusal hareket yapan gerçek takım tezgahlarının pozisyon sapmaları ölçülmüştür. Sonuçlar göstermiştir ki, lineer encoder geri besleme sistemli işlemler, mekaniksel yapının iyi bir dizaynı ve yeterli rijitlikte olduğu durumda yeterli stabilite elde edilmektedir. Hybrid geri besleme metodu da ele alınarak bu metodun da tüm şartlar için verimli olduğu simülasyon sonuçlarıyla görülmüştür. Takım tezgahı sürüm sistemleri için en önemli görevlerden biri, gerekli tezgah pozisyonlamasının yapılabilmesidir. Pozisyonlama performansı, ilerleme eksenleri boyunca başarılı harekete bağlı yörüngenin yerine getirilmesiyle geliştirilebilir. Son yıllarda lineer parametre değişimli kontrol elemanları sentezindeki gelişme, çapraz-etkili kontrol elemanlarına bağımlı yörünge dizaynı için iyi bir çalışma yapısı sağlar. Bir lokal koordinat yapısı için takım tezgahı ilerleme sürüm dinamiklerinin transformasyonu vasıtasıyla düzgün hareket yönlendirilmesi, lineer parametre değişimli sistemler için kazanç çizelgeli yaklaşım uygulaması dizayn edilebilir. CNC takım tezgahlarında stabilite, düzenli durum hata analizi, sönümleme faktörü ve korunumlu data sürücülerinin kurulum zamanı pratik bir sistemin dizaynı için gerekli bilginin elde edilmesiyle analiz edilmektedir. Bu analiz için Juri'nin test kriteri ve Mitrovic kriteri uygulanır [21, 22].

Takım tezgahlarında dönme hızına ilave olarak çevresel kesme hızı, talaş kaldırma oranı ve ilerleme oranı gibi değişik kriterler yüksek hızda işlemeyi tanımlayan faktörlerdir. Bununla beraber, kesme operasyon tipi, takım kullanımı ve iş parçası malzemesi hızları kısıtlayan etkenlerdir. Konvensiyonel takım tezgahlarındaki dönme

hızları, 10 000 dev/dak' dan 100 000 dev/dak' ya ulaşabilse bile gerçekte 5000 dev/dak kadar düşük hızlarda kesme yapılabilmektedir. Yüksek dönme hızları, 15-60 m/dak aralığındaki marjinal işlemeli yüksek tabla ilerleme oranlarına eşlik eder. Yüksek hızlarda işleme, talaş kaldırma oranının artırılması, takım aşınmasının azaltılması, yüzey işleme kalitesinin yükseltilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Makinelerin performanslarındaki kısıtlayıcı faktörler, maksimum dönme hızını, ataleti, yuvarlanma, ters yöndeki ani hareketleri ve istenen hareketleri sınırlar. Bundan dolayı, lineer motorlar geleneksel sürüm sistemlerinden önemli avantajlara sahiptir. Genelde 6 m/s' den yüksek kesme hızları ve 100 m/s²' nin üzerindeki ivmelenmeler yaygındır ve 11 m/s kesme hızları ve 200 m/s² üzerindeki ivmelenmeler hedef alınmıştır. Bunu sağlayacak takım tezgahı dizaynında göz önüne alınması gereken konular; yüksek hız elektro milin özellikleri, lineer motor sisteminin ve CNC kontrolünün özellikleri ile yük dağılımının hesaplanması, tezgah şasisinin üretimi, CNC kontrollü elektro milin arabirimi ve sistem için PC temelli bir ara birimin tedarik edilmesi şeklinde özetlenebilir [23]. Bir lineer motor elektro mil sistemi Şekil 4' de verilmiştir. Elektrik motorlarındaki enerji tüketiminin azaltılması için değişik ölçümler yapılmalıdır. Endüstriyel sektörlerde kullanılan elektrik motorların verimliliği için enerji tüketiminin azaltılması oldukça önemlidir. Standart motordan farklı verimli motorun kullanılmasıyla, standart motordaki kayıp enerjiyle üretilebilecek çıkış torkunu üretmek mümkündür. Ne yazık ki, verimli motor, yaygın olarak kullanılmamaktadır. Enerjinin dikkatli kullanımı maksadıyla verimli motorların üreticiler tarafından iyi realize edilmesi gerekir. Verimli motorun kullanımı, motor bakımı maliyeti, uzun ömürlü oluşundan dolayı yenileme maliyeti gibi endüstriyel sektörün finansal maliyetlerini de azaltmaktadır. Ayrıca elektrik tüketimini de asgariye indirir. Motor verimliliği, kabaca elektrik enerjisinin kullanılabilir mekanik enerjiye dönüşümünün bir ölçüsüdür. Bu da, motor güç çıkışının kaynak güç girişine oranı şeklinde ifade edilir.



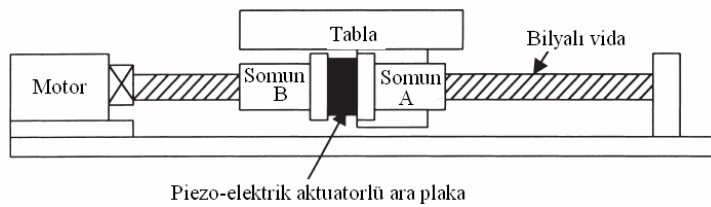
Şekil 4. Lineer motor detayı [23].

Güç kaybı, elektriksel kayıplara sürtünme ve hava sürtünme kuvveti (windage)' nin ilave edilmesiyle bulunur. Daha yüksek beygir güçlü motorlar tipiksel olarak çok daha verimli olmalarına rağmen bunların kayıpları da oldukça önemli miktarlardadır ve görmemezlikten gelinemezler. Gerçekte daha yüksek beygir güçlü motorlar en az analiz eforu bakımından en büyük tasarruf potansiyeli sağladıklarından teklif edilirler. Bir motor ayrı ayrı değişik birden fazla küçük motordan daha tasarrufludur. Motor kaybı, kullanılabilir mekanik enerjisine dönüştürülemeyen enerji tüketimi şeklinde ifade edilir. Her AC motor, kendisinin verimsizliğine neden olan güç kaybının beş unsuruna sahiptir. Motordaki güç kayıpları ısıya dönüşür ve bu ısı motordan motora sabitlenmiş iç ya da dış fanlarla atılır. Bu beş güç kaybı tipinin toplamı, toplam güç kaybını oluşturur. Soğutma mekanizmasının fonksiyonlarından biri güç kayıplarını azaltmasıdır. Bu kayıplarının herhangi birinin azaltılması yönünde motor dizaynındaki değiştirmeler, verimliliğin artırılmasında katkıda bulunur. Enerji kayıplarının azaltılması, motor verimliliğini daima geliştirir. Bir indüksiyon motorundaki kayıpların; stator, rotor, çekirdek, tesadüfi yük, sürtünme ve hava sürtünmesi geciktirici kuvveti şeklinde beş bileşeni vardır. Motor verimliliğinin ölçülmesi kolay bir iş değildir. Farklı motorların enerji dönüşüm performanslarının karşılaştırılmasının iyi bir şekilde yapılabilmesi için bu motorların verimliliği benzer ya da karşılaştırılabilir metotlar uygulanarak belirlenmelidir. Bir indüksiyon motorunun performansının belirlenmesi için veriye ihtiyaç vardır. Bir elektrik motorunun performansı, onun eşdeğer elektrik devresinden hesaplanabilir. Motorun elektrik devresi denklemiindeki parametreleri; DC direnç, yüksüz ve kilitle rotor testlerinden bulunabilir [24]. Elektrik

motorlarının verim artırılması konusunda değişik çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan biri Liu ve arkadaşları [25] tarafından bir tek fazlı indüksiyon motorunun verimliliği ve tork karakteristiklerinin iyileştirilmesi için yeni bir metot sunmuşlardır. İlk adım olarak motorun matematiksel modeli analiz edilmiştir. Sonrasında, motorun verimliliğinin ve kalkış torkunun iyileştirilmesi için güç elektronik teknolojisine uygulanabilir bir metot verilmiştir. Burada kalkış kapasitörü ve santrafüt anahtarı elimine edilerek sadece çalışma kapasitörü kullanılmıştır. Son yıllarda, çok eksenli ve yönlü takım tezgahlarında kullanılan elektrik motorlarının performanslarının geliştirilmesi için farklı dizayn metotları geliştirilmeye çalışılmıştır [1,26].

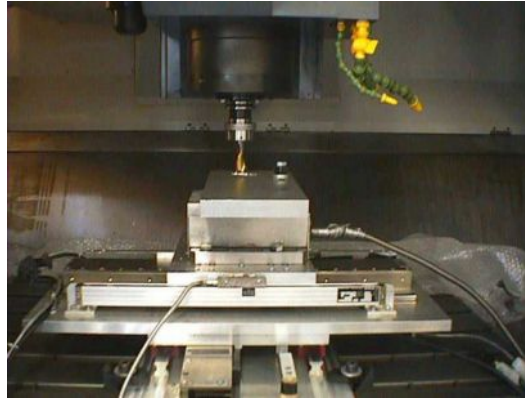
5. ELEKTRİK MOTORLARINDA SÜRÜM KONTROL TEKNİKLERİ

En basit anlamda kontrol; motoru çalıştırmak ve onu çalışma hızına ulaştırmaktır. En basit motor kontrol elamanı motor anahtarlayıcıdır. Diğer elamanlar karışık işleri gerçekleştirmek için karışık devrelere ihtiyaç duyarlar. Bazen motorun belirli hızlarda çalıştırılması, belirli aralıklarla çalıştırıp durdurulması ve çalışma yönünü değiştirilmesi istenebilir. Bu gibi durumlarda karmaşık devrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle devrelere motor kontrol devreleri denir. Takım tezgahlarında iş parçasının uygun tamlıkta pozisyonlandırılmasının yanında özellikle kırılğan malzemeli iş parçalarının kesilmesinde ve iş parçası profilinin izlenmesindeki yüksek tamlık sağlanmasında yüksek hız kontrolü de önemlidir. İş parçasının profilinin tamlığı, takım tezgahı eksenlerinin hız koordinatlanmasıyla başarılır. Bu konuda yapılan en küçük bir hata iş parçası profilinin hatalı üretilmesine neden olur. En önemli profil hataları yüksek orandaki nonlineer sürtünme kuvvetidir. Bu kuvvet önemli miktarda hata oluşturur. Bu nonlineer sürtünme ayrıca düşük hızdaki hareketlerde hız kararsızlıklarına sebep olur. Sürtünmeyle ilişkili literatürde, PD kontrol, adaptif sürtünme telafisi, fuzzy kontrol ve diğer sıra dışı algoritmalar gibi kontrol teknikleri mevcuttur. Sürtünme problemi, aşınma şartları, yağlama, işleme sırasında ısı üretimi şeklinde çeşitlidir ve ne yazık ki sürtünme modelinde bu konular göz önüne alınmamaktadır. Bu yüzden Chan ve Dwang [27], ile yükleme ve tam kontrol için bir piezo-elektrik somunlu bilyalı vida sürüm mekanizmasını göz önüne alarak hareket kontrolünü araştırmışlardır. Piezo-elektrikli somun sadece bilyalı vidanın ilk yüklenme durumu için aktif olarak kontrol edilmez ayrıca tabla pozisyonlamasını da tam olarak yapmaktadır. Bu kontrol mekanizmasının şematik çizimi Şekil 5' de verilmiştir. Sürtünme problemlerinin kontrol edilmesinin yanında CNC takım tezgahlarında hareket yörüngesinin tamlığının ve optimizasyonu için P, PI, PID, P-PI Cascade ya da Adaptif kayma mod kontrolü gibi kontrol teknikleri de kullanılmaktadır. Erkorkmaz ve Wong [28]' in geliştirdiği modelde ayrıca nonlineer Coulomb sürtünmesini de hesaba katmaktadır. Yapılan çalışmada yörungeleme ve pozisyonlama hataları, önerdikleri strateji ile tanımlanmış sürüm modelleri kullanılarak başarıyla önceden tahmin edilebilmiştir. Diğer bir yönden, işleme prosesindeki kesme kuvveti, bir dişli kutusu kullanılmadan takım tezgahı için kullanılan lineer motora direkt olarak yansıtılır.



Şekil 5. Ultra tamlık durumunun tasarımı [27].

Yüksek tamlıkta bir işleme elde edebilmesinde lineer motor sistemi için kontrol elemanları, kesme kuvvetine karşı koyabilmek için dizayn edilmelidir. Bu düşünce ile Choi ve Tsao [29], lineer motor için bir robust kontrol tekniği geliştirmişlerdir. Bu tekniğe göre lineer motorlu takım tezgahı ilerleme sürümlerinin kontrol elemanları, parmak frezelemede kesme kuvvetleri tarafından oluşturulan yörungeleme hatalarının azaltılması için dizayn edilmiştir. Çalışmada dizayn edilen kontrol elemanları, kesme kuvveti ve fiziksel parametrelerinin geniş değişimlerine rağmen iyi bir robust performans sağlamışlardır.



Şekil 6. Multi-Input–Multi-Output (MIMO) sistemin deneysel kurulumu[29].

Bu çalışmanın deneysel kısmında kullanılan Multi-Input–Multi-Output (MIMO) sistemin kontrol elemanları, normalleştirilmiş en iyi faktörizasyon metodunun uygulanması ve X ve Y eksenleri arasındaki verilen çiftlenme etkileri için sabit kesme kuvveti kazancının göz önüne alınmasıyla dizayn edilmişlerdir. Performans bakımından da simülasyon sonuçlarına göre MIMO kontrol elemanı, PID kontrol elemanından robust stabilite için bütünüyle tasarlanmış tekil değerlerin benzer boyutuna sahip her iki kontrol elemanına rağmen daha az yörüngesel hata vermiştir. Dizayn edilen kontrol elemanları, takım tezgahı tablasının X ve Y doğrultularına Şekil 6' da gösterildiği gibi yerleştirilmişlerdir. Gerçek kesme şartlarında yapılan deneysel çalışmalardan kesme kuvvetinin ve ilerleme oranının geniş çalışma alanlarında dahi MIMO kontrol elemanının sağlam ve güvenilir veriler sağladığı görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, takım tezgahlarının tasarımında, gerekli hareketleri en iyi tamlık ve düzende sağlayabilecek elektrik motorlarının uygun biçimde seçilmesinde göz önüne alınacak özellikler araştırılmıştır. Bununla beraber bilim ve teknolojiye son gelişmeler de araştırılarak motor ve ya kontrol tekniğinin seçiminde tasarım amacına göre nasıl bir seçimin yapılabileceği verilmeye çalışılmıştır. Öncelikle bir takım tezgahının tasarımında kullanılacak olan motor tipi, takım tezgahının gerektirdiği torkla ve zaman cevabıyla oldukça ilgilidir. Bu yüzden takım tezgahları için elektrik motoru seçiminde mekaniksel güç gereksiniminin belirlenmesi en önemli konudur. Güç hesabının yapılmasında tüm etkenler göz önüne alınarak nümeriksel hesaplama modelleri çok iyi kurulmalı ve hesaplanmalıdır. Buna ilave olarak tezgahlardaki sürüm sistemlerine göre hangi tip motorun seçileceğine karar verilmelidir. Bu seçimde tezgahın çalışma süresi, ortam özelliği ve hareket sağlama kabiliyeti gibi faktörler de hesaba katılmalıdır. Bu tür faktörler motorların verimliliğinde de etkili olmaktadır. Elektrik motorunun ve ya sürüm sistemlerinin kontrol tekniklerinden hangisinin kullanılacağı, tezgah uzuvlarından istenilen hassasiyetteki hareketlerin eldesi için tasarımcının göz önüne alması gerektiği en önemli konulardan biridir. Tasarımcı takım tezgahından istenilen kabiliyeti ve özelliği iyi bilmelidir. Günümüzde de hala araştırılmakta ve geliştirilmekte olan birçok yeni kontrol tekniklerinin olduğundan da haberdar olmalıdır. Çalışmada da belirtildiği gibi üretilecek iş parçalarının şekli yani tezgahın yörengelene yeteneği tamamıyla kontrol elemanlarına ve kontrol tekniğiyle bağlantılıdır. Tasarımcı tarafından seçilecek kontrol tekniği de bunun için çok önemlidir.

KAYNAKÇA

- [1] Singh, G.K., Al Kazzas, S.A.S., “Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research-A Survey”, *Electric Power Systems Research*, 64, 145-158p., (2003).
- [2] Altintas, Y., “Manufacturing Automation; Metal Cutting Mechanics”, *Machine Tool Vibrations and CNC Design*, 284p, Cambridge University Press, New York, USA., (2000).
- [3] Türkeş, E., “Konvensiyonel Takım Tezgahlarının Dizaynı ve Vargel Tezgahı Dizayn Uygulaması”, *Yüksek Lisans Tezi, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.*, (2001).
- [4] Türkeş, E., Köse, R., Zafer N., “Konvensiyonel Takım Tezgahlarında Tasarım: Vargel Tezgahı”, *3rd International Advanced Technologies Symposium*, Gazi University, Ankara., (2003).
- [5] Türkeş, E., Köse, R., Zafer N., “Vargel Mekanizması için Dinamik Analiz ve Volan Hesabı”, *3rd International Advanced Technologies Symposium*, Gazi Universty, Ankara., (2003).
- [6] Kane, T.R., Levinson, D.A., “Dynamics: Theory and Applications”, *McGraw-Hill*, New York., (1985).
- [7] Akkurt, M., “Bilgisayar Destekli Takım Tezgahları (CNC) ve Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat (CAD-CAM) Sistemleri”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul., (1996).
- [8] Weck, M., Krüger, P., Brecher, C., “Limits for Controller Settings With Electric Linear Direct Drives”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 65–88p., (2001).
- [9] Dhaouadi, R., Kubo, K., Tobise, M., “Analysis and Compensation of Speed Drive Systems with Torsional Loads”, *IEEE, TH0406-9, PCC-Yokohama*, 271-277p., (1993).
- [10] Yin, Y., Wu, A.Y., “A Low Harmonic Elektric Drive System Based on Current-Source-Inverter”, *IEEE, 0-7803-3919-3-5-/97*, 148-154p., (1997).
- [11] Lin, F-J., Wai, R-J., Shieh, H-J., “Robust Control of Induction Motor Drive with Rotor Time-Constant Adaptation”, *Electric Power Systems*, 47, 1-9p., (1998).
- [12] Cusimano, G., “Generalization of a Method for the Selection of Drive Systems and Transmissions Under Dynamic Loads”, *Mechanism and Machine Theory*, 40, 530–558p., (2005).
- [13] Straete, V.D., H.J., Schutter, J.D., Degezelle, P., Belmans, R., “Servo Motor Selection Criterion for Mechatronic Applications”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 43–50p., (1990).
- [14] Cetinkunt, S., “Optimal Design Issues in High-Speed High Precision Motion Servo Systems”, *Mechatronics: 1 (2)*, 187–201p., (1991).
- [15] Pasch, K.A., Seering, W.P., “On the Drive Systems For High Performance Machines”, *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 106, 102–108p., (1984).
- [16] Cusimano, G., “A Procedure for a Suitable Selection of Laws of Motion and Electric Drive Systems Under Inertial Loads”, *Mechanism and Machine Theory*, 38, 519–533p., (2003).
- [17] Champagne, R., Dessaint, L.-A., Blanchette, H.F., “Real-time Simulation of Electric Drives”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 63, 173-181p., (2003).
- [18] Knight, W. A., “Factors Affecting the Torsional Frequency Response of Machine Tool Drive Systems”, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 12(1), 65-83p., (1972).
- [19] Kwon, H.D., Burdekin, M., “Development and Application of a System for Evaluating the Feed-Drive Errors on Computer Numerically Controlled Machine Tools”, *Precision Engineering*, 19(2-3), 133-140p., (1999).
- [20] Ihara, Y., “Dynamic Performance of Machine Tools with Different Position Feedback Method”, *Circuits, Signals and Systems, ACTA Press*, 391-034, 436p., (2003).
- [21] Chiu, G. T-C., “Contour Tracking of Machine Tool Feed Drive Systems”, *Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, AACC*, 3833-3837p., (1998).

-
- [22] Ramachandran, V., “Evaluation of Performance Criteria of CNC Machine Tool Drive System”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 45(3), 462-468p., (1998).
- [23] Gorgon, S., Hillery, M.T., “Development of a High-Speed CNC Cutting Machine Using Linear Motors”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 321-329p., (2005).
- [24] Hassan, M.Y., Majid, M.S., Rahman, H.A., “Application of Energy Efficient Motor in Malaysian Industries”, *IEEE, 0-7803-6355-8/00, II*, 97-102p., (2000).
- [25] Liu, T-H., Lin, M-T., Wu, H-C., “A Single Phase Induction Motor Drive with Improved Performance”, *Electric Power Systems Research*, 47, 29-38p., (1998).
- [26] Mori, M., et. all, “Development and Application of a Direct Drive Motor for Performance Enhancement of Versatile Machine Tool Systems”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54 (1), 337-340p., (2005).
- [27] Chen, J.S., Dwang, I.C., “A Ballscrew Drive Mechanism with Piezo-Electric Nut for Preload and Motion Control”, *Int.Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 513–526p., (2000).
- [28] Erkorkmaz, K., Wong, W., “Rapid Identification Technique for Virtual CNC Drives”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1381–1392p., (2007).
- [29] Choi, C., Tsao, T-C., “Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drives for End Milling: Robust MIMO Approach”, *Mechatronics* , 15, 1207–1224p., (2005).