

Pnömatik Motor ile Tahrik Edilen DA Generatörü Çıkış Geriliminin Kontrolü

Bayram KÜÇÜK

ÖZET

Dünyadaki enerji talebinin büyük bir kısmı zamanla azalmakta olan ve çevreyi kirleten petrol gibi enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Bundan dolayı güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi gibi temiz ve güvenilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gittikçe önem kazanmaktadır. Ancak, bu alternatif enerji kaynaklarından üretilen enerjinin depolanmasında önemli problemler ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, enerjinin hızlı ve etkin bir şekilde depolanabilmesi için basınçlı hava kullanılarak elektrik enerjisi üretebilmek amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde, generatör tahriki için basınçlı hava ile çalışan paletli tip bir pnömatik motor(PM) kullanılmıştır. PM'nin hızını ve torkunu ayarlamak için sisteme bir hız ayar valfi eklenmiş ve bu valf bir Doğru Akım motoruyla denetlenmiştir. Yapılan uygulamalar sonucunda, depolanan basınçlı hava enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmüş ve yüklerin talep ettiği ölçüde enerji harcanmıştır. Böylece depo edilen enerji çok daha verimli bir biçimde kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik Motor, DA Generatörü, DA Motoru

Output Voltage Control of DC Generator Driven by Pneumatic Motor

ABSTRACT

A large part of the World's energy demands are provided from energy sources such as petrol which is decreasing gradually and causing environmental pollution. Therefore, the requirement for clean and reliable energy like sun, wind and wave is more important recently. On the other hand, important problems are occurred in storing of the energy produced from these alternative energy sources. In this study, a system was devised to generate electric energy using compressed air for storing of the energy more quickly and effectively. In the designed system a pneumatic motor(PM), working with compressed air, was used to drive the generator. In order to control the speed and the torque of the PM, a speed control valve was added to the system and the valve is controlled by a DC motor. As a result of the applications, the stored compressed air was converted into the electrical energy and the energy was consumed based on the extent of loads demand. In this way, the stored energy can be used more efficiently.

Key Word: Pneumatic Motor, DC Generator, DC Motor

1. GİRİŞ

Günümüzde petrol ürünleriyle çalışan araçlar kullanılmaktadır. Her ne kadar geçen zaman içerisinde bu araçların petrol tüketimi, çevreyi kirletme oranları azaltılıp verimleri yükseltilmiş olsa bile halen petrol ürünü yakıt kullandıkları için çevreyi aşırı derecede kirletmektedir. Ayrıca bu araçların verimleri de oldukça düşük seviyelerdedir. Petrol ürünleriyle çalışan araçlara alternatif olabilmesi amacıyla alternatif enerji kaynaklarına başvurulmuştur. Birkaç enerji çeşidiyle hibrit çalışabilecek araçlar üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır ve halen bu çalışmalar sürmektedir. Yapılan bu çalışmaların çoğu elektrik enerjisi ile çalışan araçlar üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat elektrik enerjisinin depolanmasındaki zorluklar nedeniyle halen bu konu üzerinde çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (1-4).

Basınçlı havanın atmosferden kolaylıkla elde edilebilmesi, herhangi bir atığı olmayan bir çeşit enerji

kaynağı olması, dolayısıyla diğer enerji kaynaklarına göre temiz olması, istenilen kapasitelerde ve basınçlarda hızlı ve kolay depolanabilmesi gibi üstün niteliklerinden dolayı pnömatik teknoloji endüstride çok geniş kullanım alanları bulmaktadır.

Pnömatik hareketlendiriciler, ucuz, temiz ve güvenli çalışma durumlarının istendiği endüstride basit konum ve hız kontrol uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Endüstride geniş kullanım alanı olan PM'ler küçük, hafif, aşırı yük altında yanmamazlık gibi daha birçok önemli özelliğe sahiptir (5-8).

Bu çalışmada, elektrikli hibrit araçlarda enerjinin hızlı ve etkin bir metotla depo edilebilmesi için basınçlı hava enerjisi kullanılmış ve depolanan bu enerjinin verimli kullanılabilmesi için bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla, bir DA generatörü kullanılmış ve generatör miline sağlanacak olan mekanik dönme kuvveti basınçlı hava ile çalışan bir pnömatik motor tarafından sağlanmaktadır. PM'ye sağlanan hava, motorlu bir hız ayar valfi tarafından kontrol edilmektedir. Generatör çıkış geriliminin izlenmesi için fark alıcı bir devre yapılmış ve fark alıcı

Makale 13.03.2009 tarihinde gelmiş,23.06.2009 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

B. KÜÇÜK, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü

06500 Beşevler / ANKARA

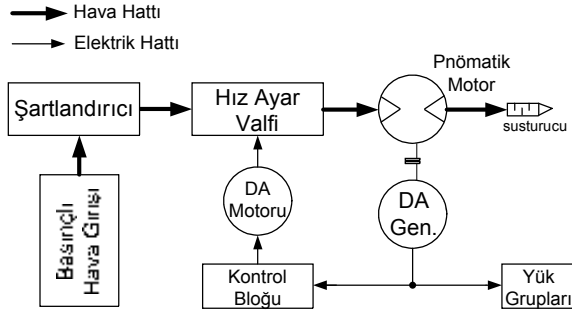
e-posta : bkucuk@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier 10.2339/2009.12.2. 73-78.

devreden alınan sinyale göre hız ayar valfine bağlanan DA motorunun kontrolü gerçekleştirilmektedir.

2. UYGULAMASI GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEM

Şekil 1’de görülen blok diyagram, kurulan sistemi prensip olarak temsil etmektedir. Pnömatik motora sağlanacak olan basınçlı hava deney düzeneğinde harici bir kaynaktan elde edilmektedir.



Şekil 1. Kurulan sistemin prensip şeması

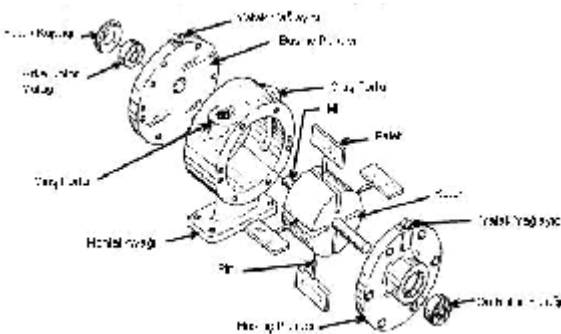
Şekil 1’de blok diyagramı gösterilen sistemin ana elemanları aşağıda verilmekte ve alt başlıklar halinde incelenmektedir. Bu alt başlıklar; pnömatik motor (paletli tip), DA Generatörü ve DA Motoru olarak belirlenmiştir.

2.1. Pnömatik Motorlar

Kısaca pnömatik motorlar, basınçlı hava enerjisini mekanik enerjiye çeviren makineler olarak tanımlanabilir. En önemli özelliklerinden biri uygun moment karakteristiklerinden dolayı geniş bir hız aralığında kolaylıkla kontrol edilebilmeleridir. PM’ler çoğunlukla 90 psig basınç altında çalışacak biçimde tasarlanıp imalatı gerçekleştirilmektedir.

Basit bir pnömatik motor, dairesel kesitli bir motor gövdesi içerisine eksantrik olarak yerleştirilmiş bir rotor ve onun üzerine açılmış yarıklara yerleştirilmiş kanatçıklardan oluşmaktadır. Kanatlar, yay ve kuvvetli merkezkaç kuvvet ile gövde iç yüzeyini kavramaktadır. Basınçlı hava, giriş portundan girerek kanat yüzeylerine etkimekte ve rotoru dolayısı ile mili dönmeye zorlamaktadır. Döndürme momentinin büyüklüğü hava basıncına, kanatın yüzey alanına, kanat sayısına ve rotor yarıçapına bağlıdır (8).

Şekil 2’de paletli tip bir PM’nin iç yapısı detaylıca verilmektedir.



Şekil 2. Paletli tip bir pnömatik motorun iç yapısı (Gast Manufacturing Corp.)

PM’lerin güç karakteristikleri, seri sargılı bir DA makinasının güç karakteristiklerine benzemektedir. Prensip olarak PM’ler, paletler veya piston üstüne etkiyen basınçlı hava kuvveti ile çalışmaktadır. Motor tarafından üretilen tork, en yüksek değerine motor devri sıfır iken ulaşır. Yük altında kalkınırken ürettiği maksimum tork kalkınma torkudur. Bu değer, yaklaşık durma torkunun %75’ine denk gelmektedir (9).

Kullanılan PM’ye sağlanan basınçlı hava DA motoru tarafından sürülen hız ayar valfi ile kontrol edilmektedir. Kurulan deneyel sistemde Tonson Air Motor’a ait V4L modeli 4 paletli 1,71Hp gücündeki pnömatik motor kullanılmaktadır. Şekil 3’te sistemde kullanılan PM’nin fiziki görünüşü verilmektedir.

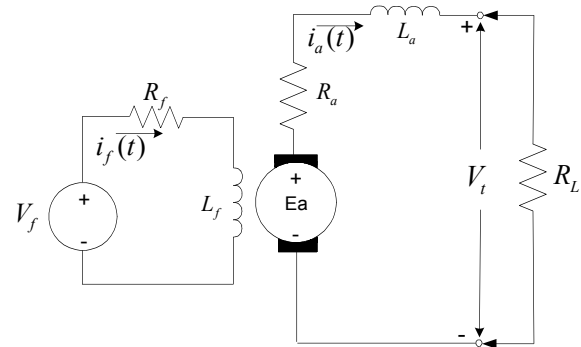


Şekil 3. Sistemde kullanılan PM görünüşü

Motora sağlanan basınçlı hava, uygun valfler ile ayarlanarak PM’nin hız kontrolü kolaylıkla istenilen değere ayarlanabilir. Fakat motora bağlanan yükün ataletini yenebilmek için paletler üstüne etkiyen sürekli bir basınç mutlaka olmalıdır.

2.2. DA Generatörü

Generatör etiketinde verilmeyen parametreler uygun deneyler ve hesaplamalar sonucunda bulunmuştur. Şekil 4’te yabancı uyarımlı bir DA generatörünün prensip şeması sunulmakta ve devamında bu generatöre ilişkin eşitlikler verilmektedir.



Şekil 4. Yabancı uyarımlı bir DA generatörünün prensip şeması

Geçici durum boyunca, alan gerilimi;

$$V_f = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (1)$$

olur. Burada R_f, L_f ve i_f sırasıyla uyarım sargısının direnci, endüktansı ve akımıdır. Endüvi sargılarında üretilen gerilim;

$$E_a(t) = (R_a + R_L)i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (2)$$

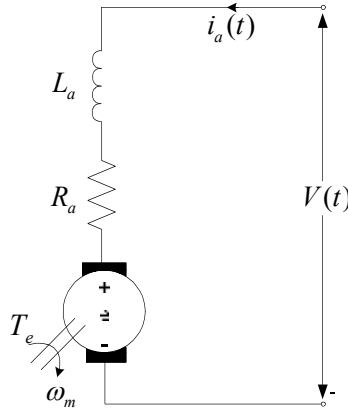
olur. Burada E_a , endüvi sargılarında üretilen gerilim R_a, L_a ve i_a sırasıyla endüvi direnci, endüktansı ve endüviden çekilen akımdır. R_L generatörün çıkışına bağlanan alıcının direncidir. Ayrıca üretilen gerilimi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$E_a(t) = K_e \omega_m i_f(t) \quad (3)$$

burada K_e motor sabiti, ω_m 'e ise endüvi dönüş hızıdır. Kurulmuş olan deneysel sistemde uyarım akımı sabit tutulduğu için generatörün çıkış gerilimi kontrolü sadece endüvinin dönüş hızının ayarlanması ile mümkün olmaktadır.

2.3. DA Motoru

Doğru akım (DA) motorları, kullanıcıya değişken yükler altında hız ayarı imkanı sağlamaktadır. Motorlardaki bu devir kontrolü, iş kalitesinin yükselmesine, performansın artmasına ve üretim üzerinde daha fazla kontrol sağlanmasına neden olmaktadır. DA motorlarının hız kontrolü, nominal hızlarının altında ve üstünde kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. DA motorları için hız kontrol yöntemleri basit ve ucuzdur(10,11). DA motorunun eşdeğer devresi Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. DA motoru eşdeğer devresi

Buna göre DA motoru için şu eşitlikler yazılabilir;

$$V(t) = e + R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4)$$

$$e = K_e \dot{\theta} \quad (5)$$

$$T_e = K_t i_a \quad (6)$$

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_t i_a \quad (7)$$

Burada V kaynak gerilimi, e endüvi gerilimi R_a, L_a ve sırasıyla endüvi direnci ve endüktansı, i_a çekilen akım, K_e voltaj sabiti, K_t endüvi sabiti ve T_e motor torkudur.

2.4. Pnömatik Motorlar ile Elektrik Motorlarının Karşılaştırılması

Elektrik motorlarıyla karşılaştırıldığında, pnömatik motorlar bazı önemli avantajlara sahiptirler. Bu avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Yüksek güç-ağırlık ve güç-boyut oranı,
- Hızlı dönüş sağlayan düşük atalet,
- Sınırsız değişken hızlarda yüksek güç iletimi,
- Yüksek hızlarda ısıyı güvenli bir şekilde dağıtır,
- Darbe ve sarsılmalardan etkilenmez,
- Basit bir tasarımı ve yapısı vardır,
- Aşırı yüklenmelere, hızlıca ters yöne dönebilme ve sürekli kapalı alanda çalışabilir,
- Isıya, neme ve tehlikeli atmosferik koşullara dayanıklıdır (6).

Pnömatik motorların elektrik motorlarına karşı üstünlüğü olduğu gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar şunlardır;

- Pnömatik motorlar, özellikle küçük boyutlarda genellikle aynı güçteki elektrik motorlarına göre daha pahalıdır.
- Pnömatik motorların verimi elektrik motorlarına göre çok daha azdır ve PM'lerin verimi yaklaşık %40, 50 gibi değerlerdedir.

Şekil 6'da kurulan sistemdeki PM ile generatörün montaj şekli görülmektedir. Burada iki motor arasındaki boyut ve ağırlık farkı açıkça görülebilmektedir.



Şekil 6. Pnömatik motor ile elektrik motorun karşılaştırılması

Pnömatik motorlar küçük ve hafiftir. Genellikle PM'lerin ağırlıkları aynı güçteki elektrik motorlarına göre çok daha küçüktür. Kurulan sistemde kullanılan pnömatik motor 1,28kW gücünde 3,7kg ağırlığındadır ve DA generatörü 1,5kW gücünde 39kg ağırlığa sahiptir. Basit bir oranlama ile watt başına düşen ağırlık DA generatöründe 26gr/W iken bu oran sistemde kullanılan PM'de 2,89gr/W'tır. Yani burada yaklaşık 10 kat gibi bir ağırlık/güç oranı söz konusudur.

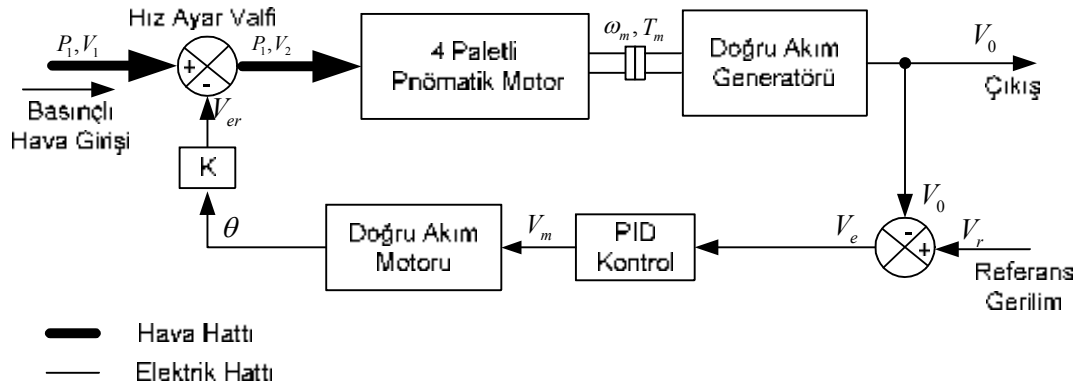
Aşırı yüklenen bir pnömatik motor basitçe durur. Fakat yük altında durmasına rağmen motor yüksek tork üretmeye devam etmektedir. Aşırı yük altında kalan PM

durmasına ve basınçlı havanın kesilmemesine rağmen herhangi bir hasar görmez. Ancak, elektrik motorları eğer korumaya alınmadıysa aşırı yük altında kaldıklarında yanar.

Pnömatik motorlar, elektrik motorlarına göre çok daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Çünkü PM'ler içinden büyük miktarda basınçlı hava geçtiği için kendi soğutmasını kendisi yapmış olmaktadır.

Pnömatik motorlarının en genel kısıtlaması elektrik motorlarıyla kıyaslandığında düşük verime sahip olmasıdır. Bunun sebebi oluklardaki kaçak havadan ve motor enerjisinin havayı sıkıştırma işleminde ısıya dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Pnömatik motorların kullanılmasının diğer bir dezavantajı hava kaynağı deposuna ihtiyaç göstermesidir. Fakat kompozit materyallerdeki son gelişmeler ve taşınabilir hafif hava tankları ile kişisel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (6).

3. SİSTEM UYGULAMASI



Şekil 7. Kurulmuş olan sistemin şematik gösterimi

Uygulaması gerçekleştirilen deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 7'de verilmiştir. Burada P_1 PM'ye uygulanan havanın basıncı V_1 ve V_2 sırasıyla valfe giren ve çıkan havanın hacimleri ω_m ve T_m PM'den elde edilen ve generatöre aktarılan hız ve tork V_o , V_r ve V_e sırasıyla generatör çıkış gerilimi, referans gerilimi ve hata gerilimlerdir.

Tasarımı gerçekleştirilen bu sistem için gerekli olan basınçlı hava harici bir kaynaktan sağlanmaktadır. Sisteme sağlanan basınçlı hava bir şartlandırıcıdan geçirilmektedir. Böylece sisteme giren hava temizlenmiş, yağlanmış ve basıncı ayarlanmış olarak PM'ye aktarılmaktadır. Basınçlı hava şartlandırıcıdan çıktıktan sonra PM'ye aktarılmadan önce hız ayar valfine girmektedir. Burada hız ayar valfinin kullanılmasındaki amaç PM'ye sağlanan havanın debisini ayarlayarak motorun hız kontrolünü yapmaktır. Çünkü pnömatik motor, kendisine sağlanan basınçlı hava debisi ile çalışmakta ve sağlanan bu debiye göre motor devri ve torku belli olmaktadır. Hız ayar valfini

ayarlayabilmek için valf üstüne bir DA motoru yerleştirilmiştir. Bu sayede DA motoruna gelen sinyale göre valf gerekli oranda açılmakta ya da kapatılmaktadır.

PM'nin miline bir DA generatörü bağlanmış ve generatör için gerekli olan uyarım gerilimi bir oto trafosundan sağlanmaktadır. Generatör, kendisine uygulanan uyarım gerilimi ve PM'den elde ettiği dönel hareket ile endüvi sargılarında bir gerilim üretmektedir. Bu gerilim, generatörün fırça ve kollektörleri tarafından generatör klemens kutusuna ve buradan da yük gruplarına aktarılmaktadır. Generatör çıkışına bağlanan yük grupları kademeli olup omik değerlidir. Yüklerin kademeli olarak devreye girip çıkmasına göre generatör devri değişmektedir.

Generatör devrinin dolayısıyla çıkış geriliminin değişimi, opamplar ile yapılan bir fark alıcı devre tarafından denetlenmektedir. Fark alıcı devre ile elde edilen sinyal, referans sinyal ile karşılaştırılır.

Karşılaştırılan bu sinyaller arasında bir fark meydana geldiğinde fark alıcı devre çıkışı fark sinyaline göre $+V_e$ veya $-V_e$ çıkışını vermektedir. Fark devresinden gelen sinyal kontrol devresine iletilmektedir.

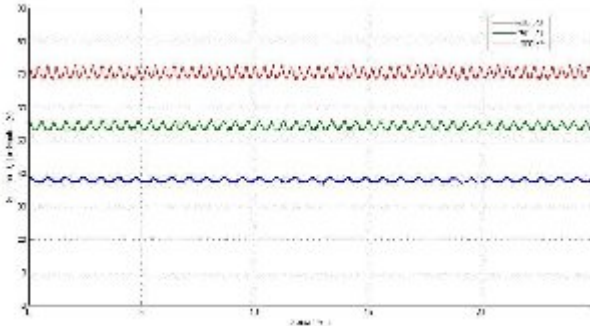
Şekil 8'de uygulaması yapılan sistemin görünüşü verilmektedir.



Şekil 8. Gerçekleştirilen sistemin genel görünüşü

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

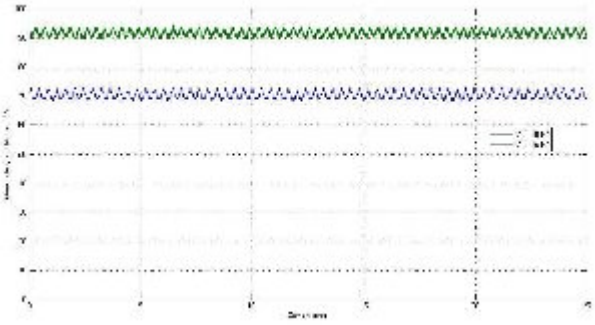
Uygulanan hava basıncına bağlı olarak fark hızlarda ve farklı uyartım gerilimleri altında generatör çalıştırılmış ve çeşitli eğriler elde edilmiştir. Yapılan deneylerde, generatör çıkışının ölçülüp kaydedilmesi için GW INSTEK firmasının GDS-2204 modeli kanallı dijital osiloskobu kullanılmıştır. Dijital osiloskoptan alınan değerler MATLAB ortamına aktarılmış ve burada değerlendirilmiştir. Şekil 9'da generatörden alınan 3 farklı devirdeki gerilim eğrileri verilmektedir. Eş.3'e göre i_f ve K_e sabitleri değişmediği için generatörün devir sayısı arttıkça ürettiği gerilimin değeri de artmaktadır. Şekil 9'daki eğriden de görülebileceği gibi PM'nin devri arttıkça generatörün ürettiği gerilimdeki dalgalanmaların sayısı da artmaktadır.



Şekil 9. Tasarımı gerçekleştirilen sistemde generatöre ait çıkış eğrisi

Sistemde generatörün çeşitli devirlerde çalıştırılması ile generatörden farklı çıkış genliklerinde gerilim sinyalleri elde edilmiştir. Elde edilen bu sinyaller üstünde belli dalgalanmaları içermektedir. Bu dalgalanmalar, PM'nin çalışma prensibine bağlı olarak basınçlı havanın motor içindeki paletlere temas etmesi ile gerçekleşmektedir. Paletlere çarpan basınçlı hava bu anda PM'nin tepki hızını arttırmaktadır ve bu tepki hızı PM miline bağlı bulunan generatörde çıkış geriliminden açıkça görülmektedir. Böylece PM'nin palet sayısına ve motor devrine bağlı olarak generatörden üstünde dalgalanmaların olduğu çıkış gerilimi elde edilmektedir. Üstünde dalgaların bulunduğu bu çıkış sinyali alıcıların çalışmasında bazı olumsuzluklara neden olabilmektedir. Bu durumu düzeltebilmek ve alıcılara ideal bir doğru gerilim sağlayabilmek için generatör çıkışına uygun kapasitif elemanlar bağlanmalıdır.

Şekil 10.'da 1000d/d ile çevrilmekte olan generatörün 100V ve 150V uyartım gerilimleri altında üretmekte olduğu gerilim eğrileri verilmektedir. Burada Eş. 3'e göre K_e ve ω_m sabit olduğu için generatör çıkış gerilimi farklı uyartım gerilimleri uygulanarak elde edilen uyartım akımı ile belirlenmektedir.



Şekil 10. 100V ve 150V uyartım gerilimleri altında 1000 d/d ile çevrilen generatörün çıkış gerilimleri

4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, temiz enerji kaynaklarından biri olan basınçlı hava enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi üretilmiştir. Sistemde üretilen bu enerji, generatör çıkışına bağlanan yüklerin değişiminde bile sabit kalması sağlanmaktadır. Kurulan sistemde DA generatörü, pnömatik motor tarafından sürülmektedir. Pnömatik motorun ürettiği güç ve tork, hız ayar valfi tarafından ayarlanmaktadır. Burada hız ayar valfi, PM'ye sağlanan hava debisini ayarlamakta kullanılmaktadır. Valf kontrolü için valf ayar vidasına bir DA motoru monte edilmiştir. Tasarlanan kontrol devresi ile valf, dolayısıyla PM'nin devri ve torku ayarlanmaktadır.

Tasarım, uygulama ve deneyler sonucunda, depo edilmesi oldukça zor olan elektrik enerjisi basınçlı hava enerjisi olarak depolanmıştır. Basınçlı hava olarak depolanan bu enerji, yüklerin değişimine bağlı olarak sabit çıkış gerilimi altında talep edilen enerji oranında tüketilmektedir. Bu durum, elektrikle çalışan hibrit araçlar için enerjinin hızlı ve etkin bir şekilde depolanması ve depolanan bu enerjinin kolaylıkla elektrik enerjisine çevrilebilmesi gibi problem teşkil eden durumlara çözüm olarak sunulmuştur. Sistemin önemli bir avantajı da, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi çeşitli kaynaklardan üretilen fakat depolanamayan elektrik enerjisini basınçlı havaya dönüştürerek saklanabilmesidir.

PM'nin çalışırken paletlerinin stator iç yüzeyine sürtünmesi ve mekanik elemanların fazla olması nedeniyle toplam sistem verimi düşüktür. Basınçlı havayı üretmek için rüzgâr enerjisini kullandığımızda ve ayrıca PM'ler üstünde yapılan çalışmaların artmasıyla motor verimi dolayısıyla kurulan sistemler için sistemin toplam verimi artırılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Stewart, P., Gladwin, D., Stewart, J., Cowley, R., "Generator Voltage Stabilisation For Series-Hybrid Electric Vehicles", Elsevier, 2008.
2. Karden, E., Ploumen, S., Fricke, B., Miller, T., Snyder, K., "Energy Storage Devices For Hybrid Electric Vehicles", Elsevier, 2006.
3. Koyanagi, F., Uriu, Y., "A Strategy of Load Leveling by Charging and Discharging Time Control of Electric Vehicles", IEEE Transactions on Power Systems, 13(3):1179-1184, 1998.

4. Wang, J., Cao, B., Chen, Q., Wang, F., “Combined State of Charge Estimator for Electric Vehicle Battery Pack”, Elsevier, *Control Engineering and Practice*, 15:1569-1576(2007).
5. Wang, J., Pu, J., Moore, P.R. and Zhang, Z., “Modelling Study and Servo-Control of Air Motor Systems”, *Int. J. Control*, 71(3):459-476, 1998.
6. Pandian, S.R., Takemura, F., Hayakawa, Y. and Kawamura, S., “Control Performance of an Air Motor – Can Air Motor Replace Electric Motors?”, *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 518-524, Detroit, 1999.
7. Takemura, F., Pandian, S.R., Nagase, Y., Mizutani, H., Hayakawa, Y., Kawamura, S., “Control of a Hybrid Pneumatic/Electric Motor”, *Proc. IEEE Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, 209-214, 2000.
8. Akdoğan, A., Turgay, R. E., “Otomasyon Sistemleri”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1997.
9. Hehn, A. H., “Fluid Power Troubleshooting” 2th edition, CRC Press, New York, 1995.
10. Guru, B.S., Hızıroğlu, H.R., ”Electric Machinery and Transformers”, *Oxford Univesity Press*, New York, 1995.
11. Krishman, R., “Electric Motor Drivers, Modeling, Analysis and Control”, *Prentice Hall*, 2001.