

RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BİLEZİKLİ ASENKRON MAKİNANIN KONTROLÜ VE HARMONİK ANALİZİ

Abdül BALIKCI

Eyüp AKPINAR

Özgür Salih MUTLU

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Mühendislik Fakültesi,
Dokuz Eylül Üniversitesi, 35160 Buca, İZMİR

e-posta:abdul.balikci@deu.edu.tr, eyup.akpinar@deu.edu.tr, ozgurmutlu@yahoo.com

Anahtar sözcükler: rüzgar enerjisi, bulanık mantık kontrol, asenkron jeneratör, harmonik

ABSTRACT

In this work, two types of slip ring induction machine drives are compared due to their stator current harmonics. These systems are used with drive circuit at rotor terminals in the wind energy conversion systems (WECS). The power quality constraints subjected to the WECS cover the limitation of injected current harmonics to the power system. Therefore, the supply current harmonics injected by the slip ring induction machine is considered here. Both systems are controlled by the digital proportion integral type controller as a speed regulator programmed in TMS320F2812 eZdsp. Simulation results are compared to the experimental ones

1. GİRİŞ

Yarı iletken ürünler ve mikrodenetleyici teknolojisindeki gelişmeler sonucunda rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve şebeke bağlantılı çalıştırılması önem kazanmıştır. Rüzgâr santrallerinde üretilen bu enerjinin kalitesi güç elektroniği devrelerinin uygun bir şekilde kullanılmasıyla artmaktadır. Güç elektroniği devrelerinin rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi içindeki fonksiyonları ile birlikte modellenmesi önemli bir mühendislik çalışması oluşturmaktadır [1,2].

Rüzgâr gücünün kullanım oranının artması ve yeni şebeke kodu[3] tanımlamaları rüzgar çiftliklerinin gerilim ve frekans bozulmalarına karşı etkin olarak belirli bir sürede devrede tutulmasını gerektirmektedir. Daha önce şebekeye bağlı rüzgar türbinleri motor yükleri ile aynı kategoride değerlendirilirken, günümüzde enerji üreteçleri kategorisinde yer almaları yeni şebeke bağlantı kodlarının belirlenmesine yol açmıştır.

Rüzgâr türbinlerindeki çıkış gücü, rotor hızının kontrolü ve kanat açısı kontrolü ile denetlenebilmektedir. Buna göre, rüzgar türbininin çıkış gücünü kontrol edebilmek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Genellikle rüzgâr hızı ölçülüp, referans rotor hızı hesaplanır ve jeneratörden maksimum verimi alabilecek biçimde rotor hızı ayarlanır.

Rüzgar enerji sistemlerinde asenkron ile sabit mıknatıslı senkron jeneratör kullanımı yaygındır. Sabit mıknatıslı senkron jeneratör ve sincap kafes asenkron jeneratör kullanıldığında güç elektroniği elemanları stator ile şebeke arasına bağlanırlar. Bu çevirgeçler rüzgâr enerji sisteminin ürettiği tüm elektriksel gücü taşıyacaklardır ve bu sebeple güç oranları jeneratör ile aynı anma değerinde seçilmelidir [4].

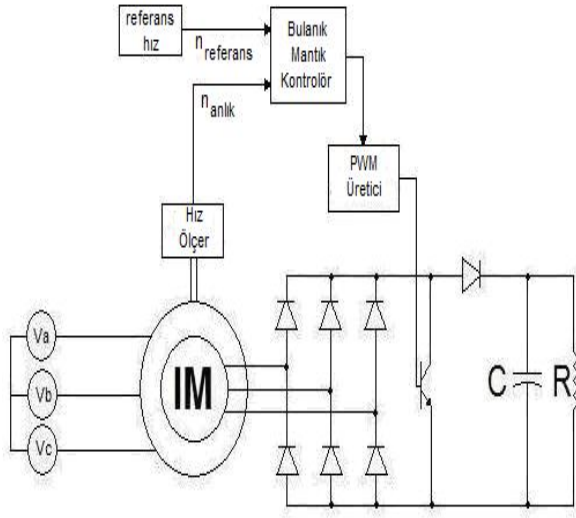
Bilezikli asenkron jeneratör kullanıldığında güç elektroniği dizgeleri genellikle rotor terminaline bağlanır ve kayma enerjisi geri şebekeye kazandırılır. Rotor sargılarına bağlanılacak 3 fazlı doğrultucu ve 3 fazlı invertör sayesinde enerjinin bir kısmı sisteme geri gönderilebilecektir. Bazı rüzgar enerjisi sistemlerinde maliyeti düşürmek amacıyla invertör kullanılmaz, sistemde yalnızca doğrultucu ve gerilim yükseltici kıyıcı devresi bulunur. Bu basit sistemlerde kayma enerjisi şebekeye geri dönüştürülme de rotor terminalerindeki dizge ile hız denetimi yapılabilir. Bu yarıiletken tabanlı sistemler jeneratörün toplam gücünün yaklaşık olarak %30 u boyutlarında tasarlanabilir. Bu sistemin temel dezavantajı bilezikli rotor kullanılmasıdır.

Bu çalışmada, inverter kullanılmayan iki tip kayma enerjisi kontrollü asenkron makine yapısı incelendi. Yapılardan birincisi şekil 1 de görülen doğrultucu çıkışına direk bağlı olan gerilim yükseltici kıyıcı devresi ile tek direnç bağlı olan yapı, ikincisi ise şekil 2 de görülen rotor uçlarına bağlı olan üç adet direnç ve

bunların kıyıldığı doğrultucu arkasına bağlanmış kıyıcı olarak kullanılan IGBT birimi. Bu çalışmada bu iki sistem kaynağa gönderdikleri akım harmonikleri açısından incelendi. İki sistemde laboratuarda deneysel olarak kuruldu ve sistemlerin kontrolü bulanık mantık kullanılarak TMS320F2812 DSP kiti yapıldı.

2. SİSTEMLERİN ANALİZİ

Şekil 1 de verilen sistem bilezikli asenkron jeneratör ve onun rotor sargılarına bağlı bulunan üç fazlı köprü tipi doğrultucu ve bu doğrultucuyla birlikte çalışan bir gerilim arttırıcı kıyıcı yapısı görülmektedir. Geleneksel olarak kullanılan gerilim arttırıcı kıyıcı devresi bir adet bobin içermektedir fakat bu görülen devrede rotorun kaçak akı reaktansı bu sistem için yeterli bir endüktans değeri oluşturmaktadır. Bu devrede motorun referans hızda dönmesi için IGBT bulanık mantık çıkışında elde edilen çevrim zamanına dayalı PWM sinyaliyle sürülmektedir.



Şekil-1. gerilim yükseltici kıyıcı ile kayma enerjisi sistemi

IGBT ye uygulanan çevrim zamanı δ ile tanımlanır.

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

Diyot doğrultucu üzerinden makinenin rotor terminallerinde bir faza ait efektif toplam direnç değeri R_e ile gösterilmiştir.

$$R_e = 0.5[(1 - \delta)R] \quad (2)$$

Çevrim zamanının ayarlanması faz başına görülen efektif direncin değerini değiştirmektedir (R_e), buda

makinenin tork-hız karakteristiğinin değişmesine sebep olmaktadır.

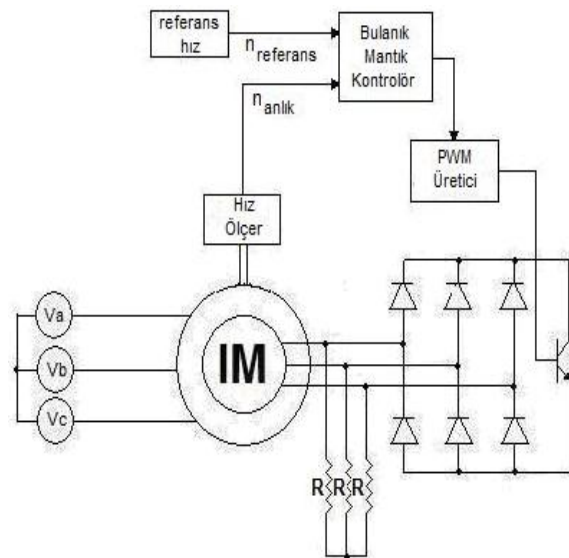
Şekil 2 de verilen sistemde ise üç adet direnç rotor terminallerine bağlanmıştır. Bu dirençlere paralel olan üç faz doğrultucunun beslediği kıyıcı devresi vardır. Kıyıcı devresindeki IGBT iletime girdiğinde, diyotlarında iletim sırasına bağlı olarak, rotor uçları eşit potansiyelde birleştirilmekte veya IGBT iletimden çıktığında rotor terminalleri sadece üç adet dirence güç aktarabilmektedir. Bu devrede direnç üzerindeki enerji kaybının denetimi yapılmaktadır ve bu denetim kayma enerjisinin denetimine yol açarak makinenin tork-hız eğrisini kontrol etmektedir.

R_{bs} direnci IGBT ve diyotların iletim ve anahtarlama kayıplarına karşılık gelen direnç olmak üzere anahtarlama frekansı ve çevrim zamanı ile değişmektedir. Anahtarlama anındaki bu kayıpları yaklaşık olarak verilen aşağıda eşitlikten görebiliyoruz.

$$P_{sw} = \frac{1}{2} V.I.(t_{on} + t_{off}).f_s \quad (3)$$

Burada t_{on} IGBT'nin iletim süresini t_{off} kesimde olduğu süreyi göstermektedir. Çevrim zamanı değiştikçe yarı iletken malzemelerin kayıpları da yük torku oranında değişmektedir. Bu durumda faz başına görülen toplam direnç aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

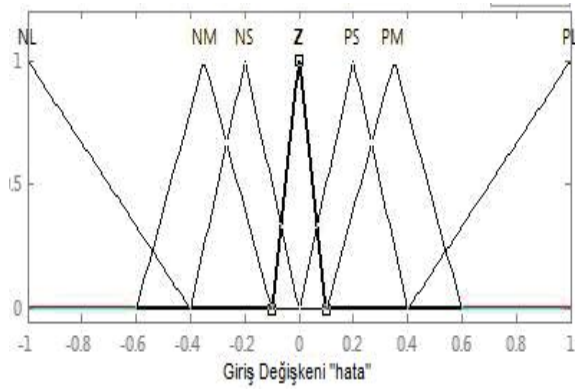
$$R_{e2} = 0.5(\delta.R_{bs}) + (1 - \delta)R \quad (4)$$



Şekil-2. üç direnç ve kıyıcı IGBT kullanılan kayma enerjisi sistemi

3. BULANIK MANTIK KONTROL SİSTEMİ

Bu çalışmada bulanık mantık PI kontrol referans hızın takip edilmesi amacıyla çevrim zamanı üretilmesinde kullanılmıştır[5-9]. Bulanık mantık kümeleri olan hata ve hatanın değişim miktarı şekil 3 de görüldüğü gibi üçgen formda tanımlanmıştır. Ayrıca şekil 3'te de görüldüğü gibi hatanın azaldığı noktalarda bu üçgen kümeler daralırken hatanın arttığı noktalarda üçgen kümeler genişlemektedir. Hata sinyali ölçülen anlık hız ile referans hızın karşılaştırılmasıyla elde edilmektedir. Hata ve hatadaki değişim kümelerinin her biri için toplam yedi üyelik fonksiyonu ve toplam 49 kural tanımlanmıştır. Oluşturulan bu kontrol tablosu tablo 1 de görülmektedir. Tüm bu sistem MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiştir.



Şekil-3. bulanık mantık kümeleri (simülasyon ve deneysel çalışma için hata ve hatanın değişimi için)

Bulanık mantık uygulamasında durulaştırma için birçok yöntem bulunmaktadır bu uygulama için formül 5 deki ağırlıklı ortalama metodu uygulanmıştır.

$$\Delta\delta(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (5)$$

Formül 5 de görülen w_i ağırlık faktörünü belirtir ve bulanık mantık kontrolörün çıkışındaki çevrim zamanı hesabı formül 6 daki gibidir [10].

$$\delta(k) = \delta(k-1) + \Delta\delta(k) \quad (6)$$

Tablo-1. Bulanık mantık kural tablosu

ce e							
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
PM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
PS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
NL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

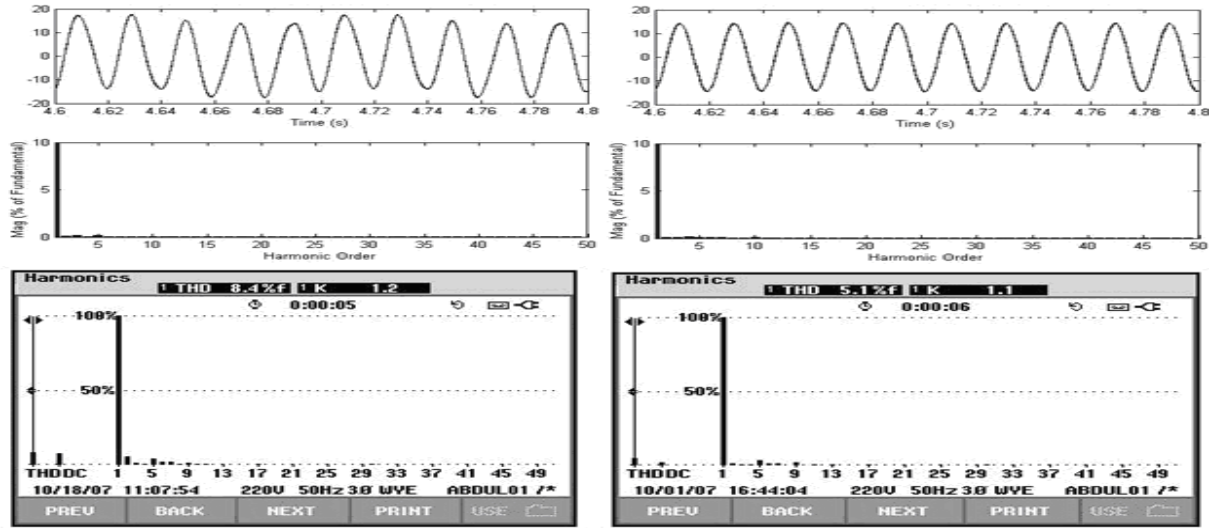
4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Her ne kadar asenkron makinenin jeneratör olarak çalışması senkron hızın üzerindeki rotor hızlarında gerçekleşse de, analizler ve deneyler motor olarak çalıştırılan bölgede yapıldı. İncelenmekte olan iki sistem iki ayrı rotor hız referansı için karşılaştırıldı; bu hızlar 1300 ve 900 d/dk olarak belirlendi. Matlab/simulink paket programı kullanılarak ayrıca yine bu programın bulanık mantık araç çubuğundan yararlanılarak kontrol sistemi tasarlanıp simülasyonları yapıldı.

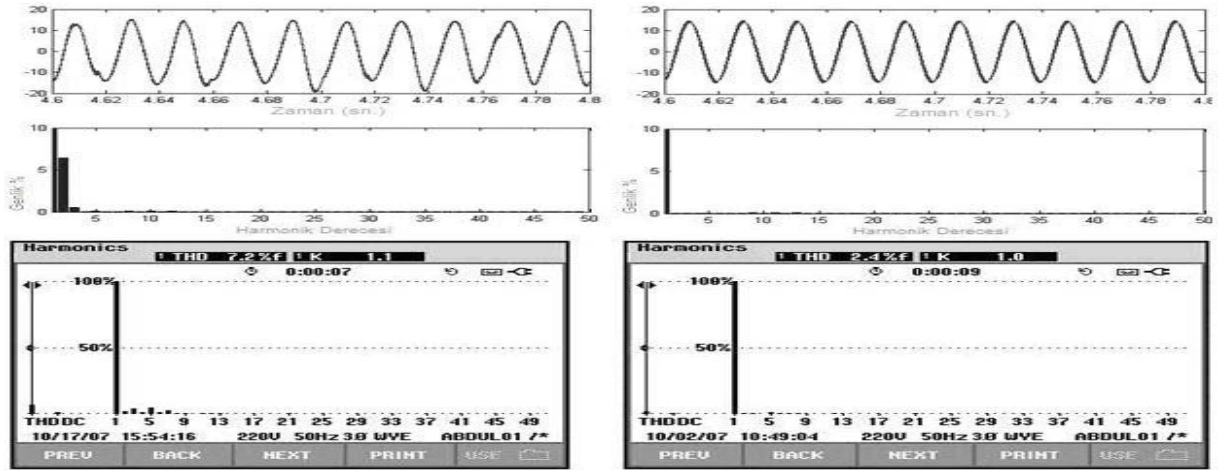
3 fazlı, 4-kutuplu, 3.5 KW gücünde 380 V ve 50Hz rotoru sargılı asenkron motor bu simülasyon çalışmasında kullanıldı. Makinanın eşdeğer devre parametreleri tablo 2 de verilmiştir. Şekil 1 ve şekil 2 te görünen bağlantı şekilleri için sırasıyla 96Ω ve 64Ω luk dirençler kullanıldı. Gerilim yükseltici devre için 1175 μF lık kapasitör kullanıldı. Motorun miline iki devre içinde 3.3 Nm lik bir yük bağlandı. Kontrol algoritmasının çalıştığı ve ayrıca analog dijital çevrimlerin yapılıp, PWM sinyallerinin üretildiği TMS320F2812 DSP kiti kullanıldı. Bu iki sistemde bulunan IGBT 5 KHz ve 0.5 KHz frekanslarında PWM sinyali ile sürülmüştür. Elde edilen sonuçların harmonik analizi Matlab ortamında 10 periyotluk örnekler üzerinden hızlı Fourier analiz (FFT) kullanılarak yapılmıştır.

Tablo-2. Asenkron motor eşdeğer devre parametreleri

Rs (ohm)	Rr' (ohm)	LS (mH)	Lr' (mH)	Lm' (mH)
1.183	1.183	8.5	8.5	175.5



Şekil-4. rotor hızı 1300d/dk ve anahtarlama frekansı 5Khz. iken kaynak akımları ve harmonikleri
a) gerilim yükselticili kıyıcı kullanılan devre b) 3 direnç ve kıyıcı kullanılan devre



Şekil-5. rotor hızı 900d/dk ve anahtarlama frekansı 5Khz. iken kaynak akımları ve harmonikleri
a) gerilim yükselticili kıyıcı kullanılan devre b) 3 direnç ve kıyıcı kullanılan devre

Tüm sonuç grafiklerinde simülasyon sonuçlarından elde edilen Fourier analiz sonuçları ile laboratuvar setinde güç kalitesi analizöründen elde edilen sonuçlar görülmektedir. Ayrıca tüm şekillerin üst kısmında kaynağa görülen akım sinyalleri görülmektedir.

Şekil 4 e bakıldığında gerilim yükselticili devrede ikinci harmoniğin diğer devreye göre çok daha etkin olduğu görülmektedir. 5 KHz anahtarlama frekansı için iki sistemde de 5. harmoniğin etkin olduğu görülmektedir. Şekil 4(a) da THD %8.4 ve şekil 4(b) de THD %5.1 olduğu görülmüştür.

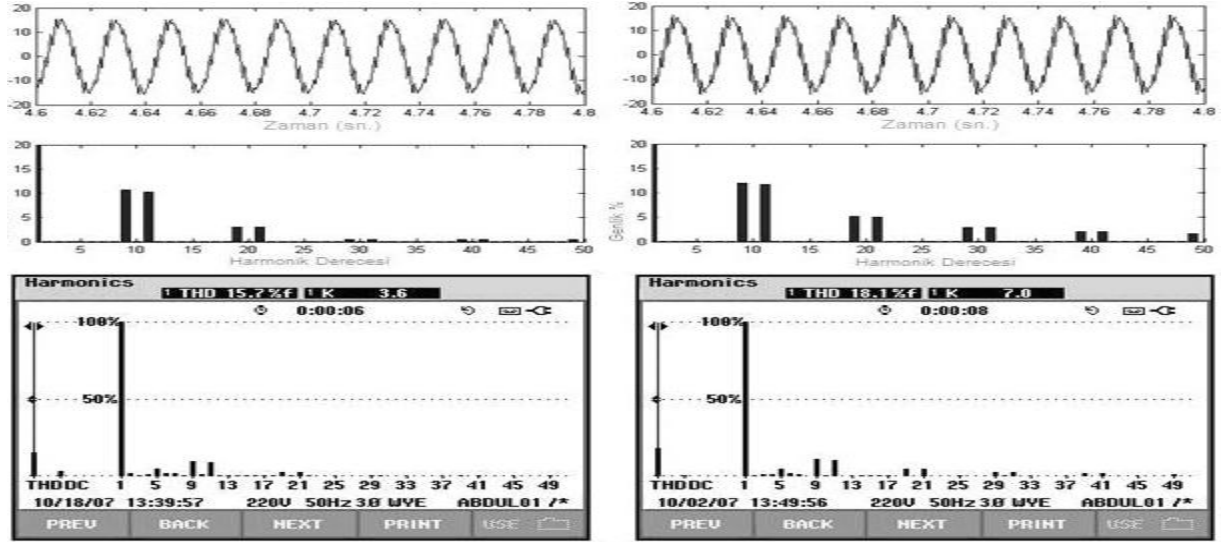
Şekil 5 de 900 d/dk iken ateşleme frekansı 5 Khz olarak ayarlandı. Şekil 5 de stator akımı dalga şekli simülasyon ve deneysel sonuçlarında görülmüştür. Şekil 5(b) de görülen stator akım harmonikleri şekil 5(a) ya göre çok daha azdır. Gerilim artırıcı kıyıcı devresindeki THD %7.2, bu değer üç dirençli devre için %2.4 oluyor. Rotor hızının azalması THD oranını azalmasında etkisi olduğu görülmektedir

Şekil 6 da rotor hızı referansı 1300 d/dk olarak ayarlanıp ateşleme frekansı 0.5 KHz yapıldı. Şekil 6 da görüldüğü gibi ateşleme frekansının etkisi olan harmoniklerin etkin olarak ortada olduğu görülmüştür. Bunlar 9, 11, 19, 21, 29, 31, 39 ve 41. harmoniklerdir. Formül 7 de görüldüğü gibi temel bileşenin üzerinde anahtarlama frekansında harmonikler görülmüştür.

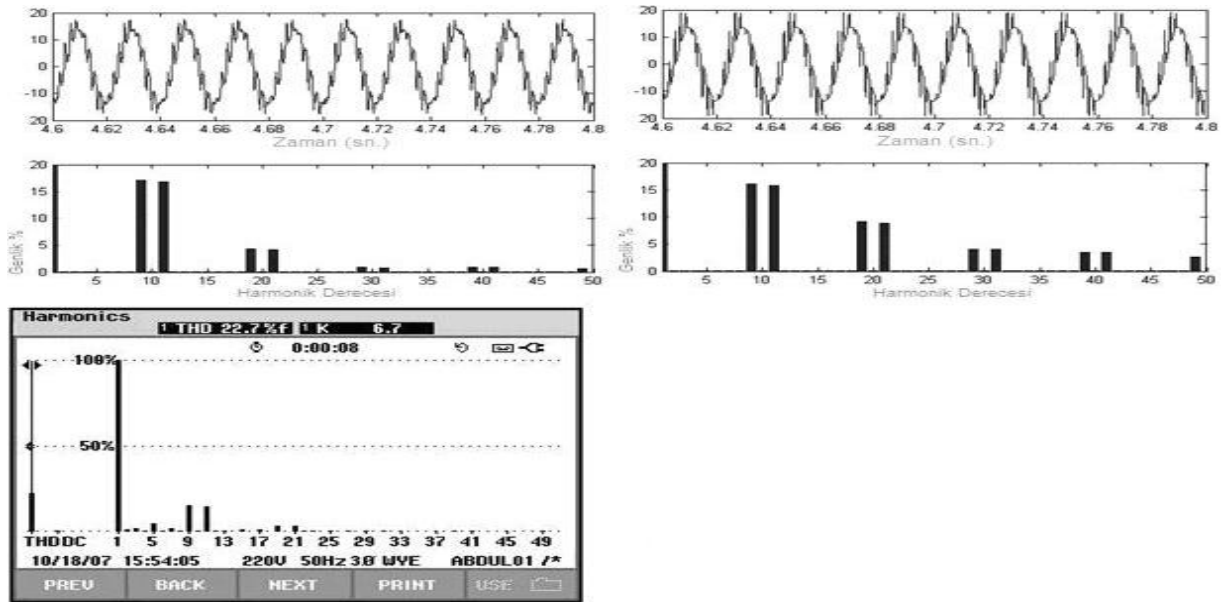
$$h = 10k \mp 1 ; \text{ where } k=1,2,3,\dots \quad (7)$$

Şekil 6 de ayrıca stator akımları üzerinde etkin olarak 5. harmoniğin etkileri görülmektedir. Şekil 6(a) da %15.7 buna karşı şekil 6(b) de %18.1 dir.

Şekil 7 de rotor hızı referansı 900 d/dk ye ayarlanıp ateşleme frekansı 0.5 KHz olarak ayarlandı. Bu iki sistem içinde stator akımlarında 9, 11, 19, 21, 29, 31, 39 ve 41. harmonikler etkin olarak yine anahtarlama frekansından dolayı görülmüştür. Şekil 7(b) de akım harmonikleri en etkin şekilde görülmüştür.



Şekil-6. rotor hızı 1300d/dk ve anahtarlama frekansı 0.5Khz iken kaynak akımları ve harmonikleri
a) gerilim yükselticili kıyıcı kullanılan devre b) 3 direnç ve kıyıcı kullanılan devre



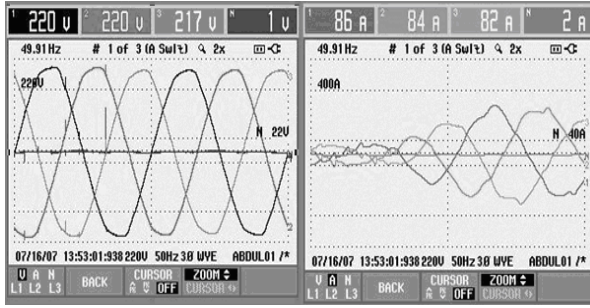
Şekil-7. rotor hızı 900d/dk ve anahtarlama frekansı 0.5Khz. iken kaynak akımları ve harmonikleri
a) gerilim yükselticili kıyıcı kullanılan devre b) 3 direnç ve kıyıcı kullanılan devre

Sistem 900 d/dk ve 0.5 KHz ateşleme frekansında çalışırken IGBT de hasar olduğu gözlemlendi. Bu sebeple laboratuvar çalışması esnasında bu ateşleme açısı ve rotor hızında deneysel sonuç alınamadı. Bu sebeple IGBT de hasara yol açan nedeni tespit etmek için osiloskop kısıdevreyi yakalayabilecek konumda bırakıldı. Şekil 8(a) da üç fazlı stator giriş voltajı ve nötr voltajı hata anında yakalandı. Şekil 8(b) de üç faz stator akımları ve nötr akımları görülüyor. IGBT de hasar oluşmasına şebekeden gelen gerilim atlamaları ve salınımlarının yol açtığı tespit edildi. Bu grafiklerde akımlar 1:10 oranında verilmiştir. Bu sebeple 0.1 ile çarpılarak gerçek değerini bulabiliriz (40 A/div). Şekil 1 deki devrede IGBT ye paralel olarak bağlı olan direnç ve kapasitörden oluşan sönümlenme devresi vardır. Bu devre kollektör emitter

uçları arasındaki dv/dt değişmelerinde sönümlenme etkisini sağlamak amacıyla. Bu konudaki temel çalışmalar [11] da belirtilen makalede belirtilmiştir.

Şekil 6(a) daki THD %15.7 ve şekil 7(a) daki THD %22.7 olarak görülmüştür buradan anlaşılan rotor hızının azalması stator akımlarındaki THD değerinin artmasına sebep oluyor. Anahtarlama frekansları tabanlı bu iki sistemi karşılaştırmak gerekirse, ateşleme frekansının azalması akım dalga şekillerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Çünkü rotor kaçak akı reaktansının değeri ateşleme frekansının düşmesiyle azalmaktadır ve yeterli etkiyi gösterememektedir. Stator akımlarında görülen harmoniklerin bir kısmı ateşleme frekansından kaynaklanmaktadır, buna karşın 5. ve 7. harmonikler

doğrultucu devresinin etkisinden dolayı stator akımında görülmektedir.



Şekil-8. hata anındaki kaynaktaki gerilim ve akımlar

5. SONUÇ

Bu çalışmada sonuç olarak anahtarlama frekansının azaltılması veya rotor hız referansının azaltılması, kaynak akımları üzerinde görülen harmoniklerin artmasına sebep olmaktadır. Güç kalitesi açısından düşük frekanslı anahtarlama devrelerinde veya motor hızının düşük olduğu sistemlerde bu harmoniklerin filtrenmesi gerektiği görülmüştür. Gerilim yükselticili devre içeren kayma enerjisi sisteminin diğer sisteme göre daha düşük harmonik etkiye sahiptir.. Ayrıca üç direnç ve kıyıcı içeren sistemde IGBT nin kollektör emiter geriliminin diğer sisteme göre daha yüksek değerlerde olduğu ve bu sebeple, şebekede ki ani gerilim yükselme ve azalmalarına karşı IGBT seçilirken kolektör emiter gerilim parametresinin yeterince yüksek seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma proje numarası 105G129(106G102) olan “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Akışını İzleme, Problemlerinin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi Projesi” kapsamında TÜBİTAK ve TEİAŞ tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve TEİAŞ’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Hansen AD, Sorensen P, Janosi L, Bech J., Wind farm modelling for power quality, THE 27TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY 29 Nov-2 Dec 2001. Denver, CO, USA IECON '01, Volume 3, 2001 p.1959-64.
- [2] Chen Z., Issues of connecting wind farms into power systems, IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005, p. 6.

- [3] The Grid Code, National Grid Electricity TransmissionStd., <http://www.nationalgrid.com/uk>, [online].
- [4] Sürgevil, T., Akpınar, E., Modelling of a 5-kW Wind Energy Conversion System with Induction Generator and Comparison with Experimental Results, INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY, Vol:30, no:6, pp 913-929, May 2005.
- [5] Mattavelli P., Rossetto L., Spiazzi G., Tenti P., General-Purpose Fuzzy Controller for DC-DC Converters, IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS, vol.12 No:1, pp 79-86
- [6] Pravadalioğlu, S., Akpınar, E., Implementation of Fuzzy Controller for DC-Servo Drive Using a Low-cost Microcontroller, 10. INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, Sep., 2002, Dubrovnik, Croatia
- [7] So W.C., Tse C.K. and Lee Y.S., Development of a fuzzy logic controller for dc-dc converters: Design, Computer Simulation and Experimental Evaluation, IEEE TRANS. ON POWER ELECTRONICS, Vol.11, No.1.
- [8] Tunyasrirut, S., Ngamwiwit, J., Furuya, T., and Yamamoto Y., Self-tuning fuzzy logic controller for direct torque control of slip energy recovery system, SICE 2001, Proceeding of the 40TH SICE ANNUAL CONFERENCE, Publication date 2001, pp 320-325.
- [9] Fuzzy Logic Toolbox For Use with Matlab (user's Guide ver.2).
- [10] Balıkcı, A. “Comparing to Two Different Slip Energy Drives Used in WECS Based on Fuzzy Logic Controller”, M.Sc Thesis, DEÜ, 2008.
- [11] Davies, S. Q., Coller J. M. V., Investigating the vulnerability of slip energy recovery converters to voltage dips, 2006 IEEE IAS ANNUAL MEETING, vol 4, pp 1702-1708.