

Asenkron Motor Stator Nüvesinde Lokal Akı Yoğunluğu ve Güç Kayıplarının DGM Uyarımı Altında Ölçülmesi

Nedim TUTKUN¹, Mahmut ÖZER²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 67100, Kozlu, Zonguldak

¹e-posta: tutkun@karaelmas.edu.tr ²e-posta: mozer@karaelmas.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektrik Makinaları, Manyetik Kayıplar, Darbe Genişlikli Modülasyon Eviriciler

ABSTRACT

The pulse width modulated (PWM) inverter is widely used to feed small induction motors for variable speed and torque control. When a laminated stator core is energised in this way additional iron losses occur due to localised distorted flux. Flux density and power loss distribution under PWM and sinusoidal voltage excitations were measured in a typical induction motor stator core lamination at 1.3T, 50Hz using a computer-aided magnetising system to set up flux distribution as would occur in a practical 3-phase stator core. The iron loss increased 15-20% under PWM excitation. The loss increase under PWM excitation in the stator core laminations was 3% lower than in Epstein strips of the same electrical steel under the same conditions showing an effect of the magnetic circuit geometry.

1. GİRİŞ

Darbe Genişlikli Modülasyon (DGM) eviricileri düşük maliyetli ve kolay kontrol edilebilirliğinden dolayı değişken hızlar için asenkron motorların tahrikinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılır. DGM gerilim dalga şekli genellikle taşıyıcı ve referans gerilim dalga şekillerinin lojik olarak karşılaştırılması ile elde edilir. Bu bakımdan bu dalga şekli sentez edilmiş bir dalga şekli olup birbirinden farklı darbelerin toplamından oluşur. Bu yüzden dalga şekli bir çok harmonik içerir ve bu harmonikler anahtarlama frekansının katlarının civarında meydana gelir. Her ne zaman asenkron motorların stator nüveleri DGM tipi evirici güç kaynakları tarafından enerjilendirilirse nüve laminasyonlarından her biri sinüzoidal uyarıma nazaran fazladan bir güç kaybına maruz kalır. [1, 2]. Boglietti [3], Kaczmarek ve Amar [4] tarafından yapılan araştırmalarda, DGM gerilim uyarımı altında güç kaybı artışını farklı ölçüm teknikleri kullanarak bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar, daha çok farklı yapıdaki elektrik çeliklerinde meydana gelen ekstra kayıpların Epstein ölçüm sistemi kullanılarak

araştırmalarına yönelik olmuştur [5]. Oysa son zamanlarda DGM ve sinüzoidal uyarımlar altında stator nüve üzerindeki güç kaybı ve manyetik akı dağılımının bulunması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Moses ve Rahmetizadeh tarafından yapılan bir araştırma, manyetik akı dağılımını etkileyen geometri, stres vb. gibi etmenlerin yanında gerilim dalga şeklinin de etkili olduğunu göstermiştir [6]. Bununla birlikte Benamrouche ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir araştırma, stator nüvesindeki güç kaybı dağılımının evirici beslemeli asenkron motorlarda oldukça farklı olduğunu göstermiştir [7]. Daha sonraları Guo ve arkadaşları [8], nüve üzerindeki akı ve güç kayıplarını saptamak için yeni bir yaklaşım önermiş olmakla beraber DGM uyarımı altında, stator nüve üzerinde lokal akı yoğunluğu ve güç kaybı dağılımı tam olarak araştırılmamıştır. Bunun yanında önceki çalışmalardan birinde DGM uyarımı altındaki manyetizasyon prosesinin sinüzoidal uyarımına nazaran aynı manyetik akı yoğunluğu seviyesinde ve işletim frekansında daha farklı bir değişim gösterdiği görülmüştür [9]. Özellikle, sinüzoidal ve DGM uyarımı altında manyetik akı yoğunluğunun zamanla değişim oranına bakıldığında oldukça bozunmuş bir dalga şekli olduğu görülür. Diğer taraftan DGM akı dalga şekli ise sinüzoidal dalga şekline benzer bir değişim göstermekle birlikte çok küçük genliklerde gerilim değişimlerini içermekte olup bu değişimlerin ilave güç kayıplarına neden olduğuna inanılmaktadır. DGM uyarımı altında, farklı yüzdelerde Silisyum-Demir (Si-Fe) alaşımından yapılmış olan elektrik çeliklerindeki Si içeriğinin etkisi frekansa bağlı kayıplardaki artışı nasıl sınırlandırdığını göstermek için değişik Si yüzdelerinden yapılmış alaşımların Epstein stripleri üzerinde ölçümler yapılmıştır [10]. Buna ilave olarak, aynı şartlar altında farklı iç yapı özelliği olan, ve demir tozlarının sıkıştırılması ile yapılmış toroid nüvelerdeki güç kayıpları ölçülüp Si-Fe alaşımlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar demir

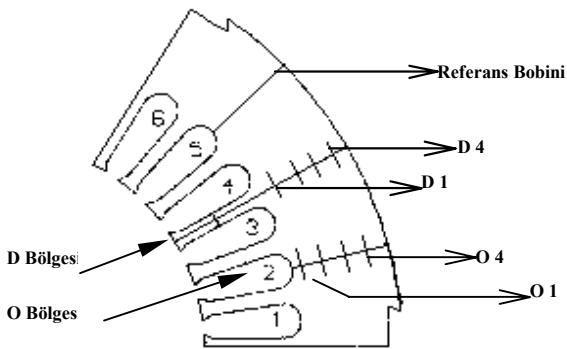
tozlarından yapılmış olan toroidlerdeki güç kaybı artışının, aynı şartlar altında, Si-Fe alaşımlarındaki nazaran %3 kadar daha fazla olduğu göstermiştir.

Son zamanlarda bir çok elektrik çeliği ve küçük ölçekte elektrik makinası üreten firmalar elektronik olarak üretilen gerilim dalga şekillerinden kaynaklanan bu tür artışları azaltmak için alternatif yöntemlere yönelmektedirler. Kullanım alanı yaygın olması bakımından DGM gerilim dalga şekline sahip olan evirici güç kaynakları elektrik çeliği ve elektrik motoru üreten firmaların ilgi alanına girmeye başlamıştır.

Bu çalışmada, tipik stator laminasyonundaki dişlerin ve oyukların arka bölgelerinde DGM ve sinüzoidal uyarımlar altında lokal akı ve güç kaybı dağılımlarının araştırılmasını amaçlamaktadır.

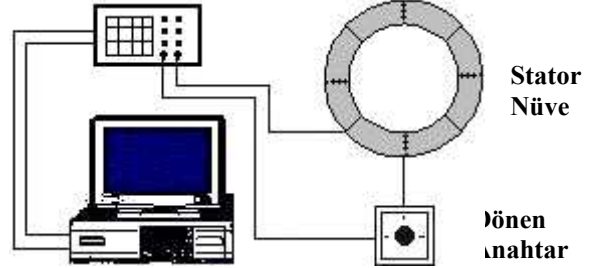
2. DENEYSEL YÖNTEM VE ANALİZ

Ölçümler DGM ve sinüzoidal uyarımlar altında $92 \times 126 \times 165$ mm ölçütlerinde, oriyente edilmemiş, silisyum içermeyen, 0.65 mm kalınlığındaki üç fazlı asenkron motor stator laminasyonları kullanılarak yapılmıştır. Stator nüve laminasyonlarının yapıldığı çeliğin standart kodu 800-65-D5 olup karbonsuzlaştırma tavlama yapıldıktan sonra 1.3T ve 50Hz'te 4.5 W/kg spesifik güç kaybına sahiptir. Akı yoğunluğunun 1.3T'de sabit bırakılmasının nedeni stator nüve dişlerinde oluşması beklenen satürasyondan kaçınmak içindir. Şekil-1'de gösterilen ortogonal tek sargılı işaret algılayan bobinler tek bir laminasyon üzerine yerleştirildikten sonra laboratuvar şartlarında oluşturulmak istenen stator nüve için hazırlanan ve yedi laminasyondan oluşan paketin ortasına yerleştirilir. Sistemin enerjilendirilmesi ile lokal akı ve güç kaybı bilinen yöntemler kullanılarak ölçülür. Radyal ve teğetsel akı bileşenlerini ölçen tek sarımlı polyester kaplı 0.1 mm çapındaki işaret algılayıcı bobinin uzunluğu sırasıyla 5mm ve 100mm olarak tasarlanmıştır. Bu bobinlerin sarılması için kullanılan deliklerin çapı akı dağılımının etkilemeyecek şekilde yeterince küçük olarak yapılmıştır. Şekil-1 algılayıcı bobinlerin ve termistörlerin laminasyon üzerine yerleştirildikleri bölgeleri göstermektedir.



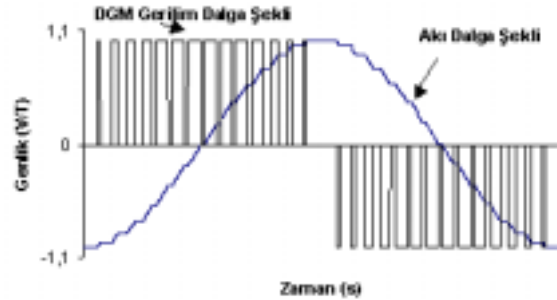
Şekil-1. Algilayıcı bobinlerin ve termistörlerin yerleştirildikleri pozisyonların laminasyon üzerinde gösterilmesi.

Stator nüve oyuklarının ve dişlerinin arka bölgelerine yerleştirilen algılayıcı bobinlerin pozisyonları O1-O4 ve D1-D4 olarak adlandırılmıştır. Deneysel olarak oluşturulan laminasyon paketi ya üç fazlı sinüzoidal yada DGM uyarımı altında manyetize edilmiştir. Şekil-2 sinüzoidal ve DGM uyarımları altında lokal akı ve güç kaybını ölçmek için kullanılan ölçüm sisteminin şematik diyagramını göstermektedir.



Şekil-2. Tipik bir stator nüvedeki lokal akı ve güç kaybını ölçen sistemin şematik diyagramı.

Ortogonal olarak yerleştirilmiş işaret algılayıcı bobinlerde indüklenen gerilim dalga şekli uygun işaret kuvvetlendirici devreler vasıtasıyla güçlendirilmiş ve daha sonra integrasyonu alınmıştır. Ayrıca indüklenen işaret üzerindeki gürültü etkilerini belli bir seviyeye indirmek için analog bir filtre devresi yardımıyla filtre edilmiştir. Böylece elde edilen işaret analog dijital dönüştürücü yardımıyla sayısal hale dönüştürülmüş, daha sonra elde edilen sayısal veriler nümerik proste kullanılmak için bilgisayarda saklanmıştır. Şekil-3 modülasyon indeksi 0.7, çalışma frekansı 50Hz ve anahtarlama frekansı 1.5kHz olan sinüzoidal DGM gerilim dalga şeklini göstermektedir.



Şekil-3. 50Hz çalışma frekansındaki DGM gerilim dalgasının ve akısının zaman ile değişimi.

DGM gerilim uyarımı altındaki ölçümler esnasında, anahtarlama frekansı, modülasyon indeksi ve çalışma frekansı parametreleri sırasıyla 1.5kHz, 0.7 ve 50Hz değerlerinde sabit tutulmuştur.

Stator nüvedeki dişlerin ve oyukların arka bölgelerinde lokal akı ve güç kaybı dağılımı yukarıda tarif edilen ölçme sistemi kullanılarak ölçülmüştür. O1-O4 ve D1-D4 pozisyonlarındaki akı yoğunluğu bileşenlerinin yerleşimleri Şekil 4, 5, 6, 7 ve Şekil 8, 9, 10, 11'de sırasıyla gösterilmiştir. Radyal akı yoğunluğu dalga şekli teğetsel bileşene nazaran daha fazla bozunmuş olmakla beraber genliği teğetsel akı

bileşeninden daha küçüktür. Bu yüzden teğetsel akı yoğunluğu bileşeni daha fazla dikkate alınması gerekir. Radyal akı yoğunluğunun genliği ile teğetsel akı yoğunluğunun genliğinin oranı dişlerin ve oyukların başlangıç noktasından radyal olarak yukarı gidildikçe artış göstermektedir.

Laminasyon üzerindeki ortalama akı yoğunluğunu ayarlamak için tek sarımlı referans bobini kullanılmıştır. Lokal manyetik akı yoğunluğu ölçümleri sırasında belirsizlik oranı ölçülen değerin yaklaşık olarak $\pm\%5$ 'i civarındadır.

Sinüzoidal ve DGM uyarımları altındaki lokal güç kayıplarını ölçmek için kullanılan termistörler ticari olarak OK1ZUM1-20 şeklinde adlandırılmış olup 20°C 'lik çevre sıcaklığında $20\text{ k}\Omega$ 'luk direnç değerine sahiptir. Termistörlerin yerleştirildiği laminasyonun bulunduğu test düzeneği ısı olarak yalıtılmış bir kabın içersine yerleştirilmiş ve bağlantı uçları ısı transferini en aza indireyecek şekilde kabın içersinden dışarı çıkarılmıştır. Kullanılan termistörler 1mm küplük hacimde olup çok küçük sıcaklık artışlarını algılayabilme kapasitesine sahiptirler. 20°C ' lik ortam sıcaklığında her bir termistörde kaybolan güç, 0.6V DC gerilim değeri ile beslenen Wheatstone köprüsünde yaklaşık olarak 13 mW olarak ölçülmüştür. Bu miktar ölçülen değerde $\pm\%2$ lik deneysel hataya yol açmaktadır. Termistör kullanılmasıdaki temel nokta, ısı üretilen bir noktadaki sıcaklık artışının o noktada üretilen ısı miktarı ile doğru orantılı olmasındandır. Lokal güç kayıplarının termistör vasıtasıyla ölçülmesi, mevcut termistörün yerleştirildiği bölgedeki sıcaklık değişiminin algılanması prensibine dayanır. Algılanan bu değer, eşitlik (1)'de yerine koyulmak suretiyle spesifik güç kaybının hesaplanmasını sağlar.

$$\frac{P}{g} = c \frac{\partial T}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

Burada P, g, c, T, V ve t sırasıyla lokal güç kaybı, malzemenin kütlesi, sıcaklık değişimi ile malzeme tarafından absorbe edilen ısıya karşılık gelen katsayı, sıcaklık artışı, termistör üzerine gelen gerilim ve zaman olarak alınmıştır.

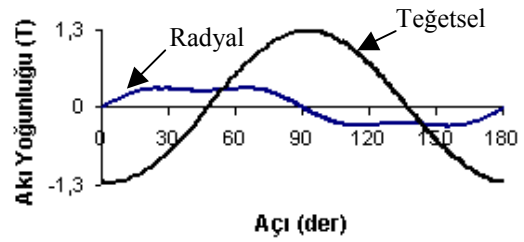
Bu bakımdan laminasyon üzerindeki sıcaklık artışlarını algılamak için daha önceden belirlenmiş ortogonal algılayıcı bobinlerin yerleştirildikleri pozisyonlara, termistörler ısı iletkenliği yüksek ve elektriksel iletkenliği zayıf olan bir yapıştırıcı madde ile yapıştırılarak geçici bağlantılar yapılmıştır. Daha sonra 3-fazlı sargılı rotor sistemi ile laboratuvar şartlarında oluşturulan yedi laminasyondan oluşmuş stator nüvesi, gerçek yüksüz asenkron motorda olduğu gibi, 20 saniye aralıklarla manyetize edilmiş ve bu süre zarfında daha önceden geliştirilen bilgisayar destekli ölçüm sistemi (BDÖS) [11] ile ilgili pozisyonadaki güç kaybı ölçülüp kaydedilmiştir.

Lokal güç kayıplarının ölçümü sırasında meydana gelen toplam hata miktarı ölçülen değerin $\pm\%7$ 'ü

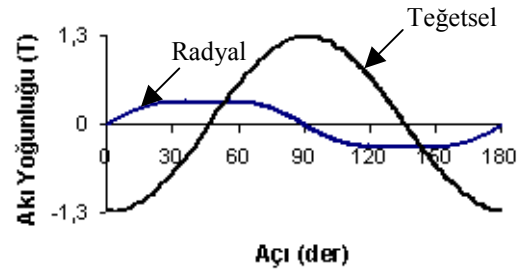
olarak tespit edilmiştir. Bu hatanın kaynağı olarak termistörün hassasiyeti, çevre şartları, yazılım ve donanımdaki kompüsyonel işlemler gösterilebilir.

3. DENEYSEL BULGULARIN İRDELENMESİ

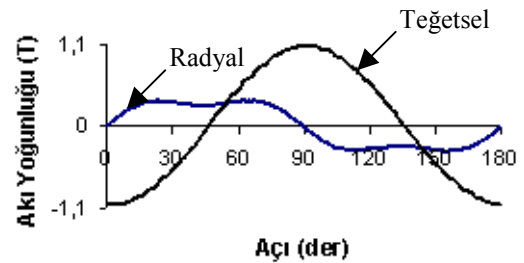
DGM ve sinüzoidal uyarımlar altında lokal akı ve güç kaybı dağılımları stator nüvenin diş ve oyukların arka kısımlarındaki bölgelerde Şekil-2'de gösterilen ölçme sistemi kullanılarak bulunmuştur. Tüm bölgelerdeki teğetsel ve radyal akı yoğunluklarının zamanla değişimleri $1.3T$ 'lik ortalama akı yoğunluğunda ölçülmüştür. Şekil 4, 5, 6 ve 7, DGM uyarımı altında radyal ve teğetsel akı yoğunluklarının O1, O2, O3 ve O4 pozisyonlarındaki değişimlerini göstermektedir.



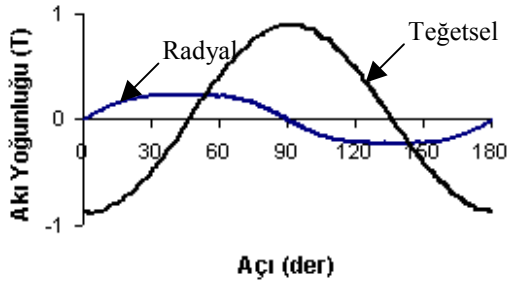
Şekil-4. O1 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında $1.3T$ 'de zamanla değişim grafiği.



Şekil-5. O2 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında $1.3T$ 'de zamanla değişim grafiği.



Şekil-6. O3 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında $1.3T$ 'de zamanla değişim grafiği.

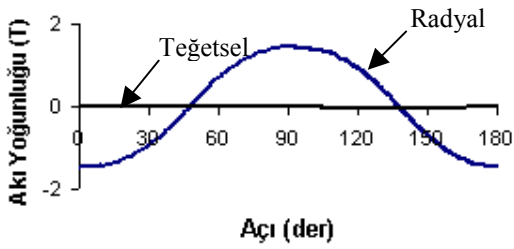


Şekil-7. O4 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T'de zamanla değişim grafiği.

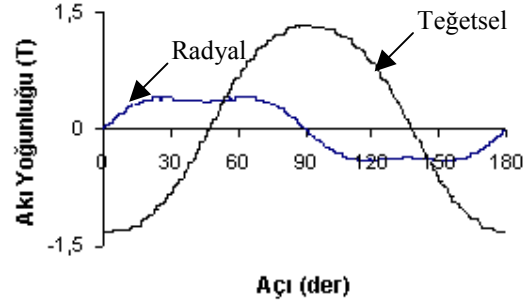
Radyal akı yoğunluğu teğetsel akı yoğunluğuna nazaran daha fazla distorsiyona uğramış olmakla beraber genel olarak sinüzoidal bir değişim göstermektedir. Bu yüzden radyal akı yoğunluğunun diğerine göre daha fazla harmonik içereceği aşikar olup bunun da frekansa bağlı kayıplarda artış sağlaması kaçınılmaz olacaktır.

Halbuki teğetsel akı yoğunluğu küçük değişimlerin haricinde sinüzoidal değişim ile benzerlik gösterir. Yine beklenildiği gibi teğetsel akı yoğunluğunun genliği radyala nazaran 3 ila 4 kat daha büyüktür. Şekil 8, 9, 10, 11 ve 12 DGM uyarımı altında radyal ve teğetsel akı yoğunluklarının D0, D1, D2, D3 ve D4 pozisyonlarında zamanla değişimlerini göstermektedir.

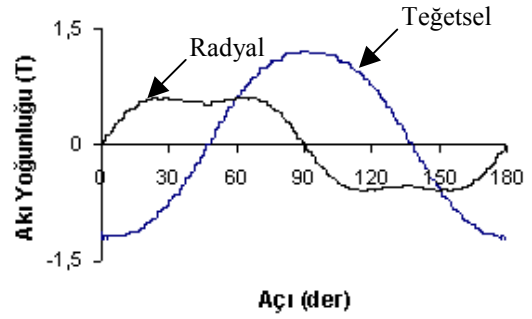
Teğetsel akı yoğunluğu dışlarda yaklaşık olarak sıfır olurken radyal akı yoğunluğu ise bütün bölgelerdeki en yüksek değerine ulaşır. Bu bölgedeki akı yoğunluğunun yüksek olması manyetik malzemenin doyuma ulaşması ile akı dalga şekillerinde bozunmaya yol açar.



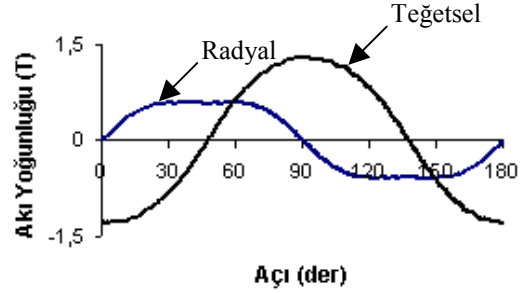
Şekil-8. D0 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T'de zamanla değişim grafiği.



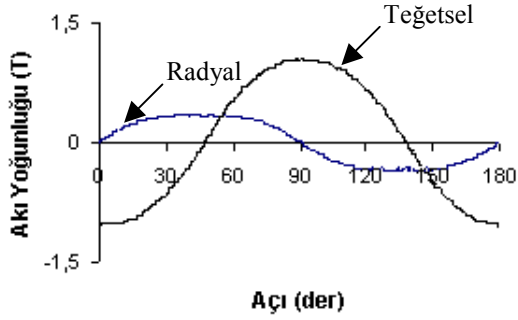
Şekil-9. D1 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T'de zamanla değişim grafiği.



Şekil-10. D2 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T'de zamanla değişim grafiği.



Şekil-11. D3 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T'de zamanla değişim grafiği.



Şekil-12. D4 bölgesindeki radyal ve teğetsel akı yoğunluğunun DGM uyarımı altında 1.3T’de zaman ile değişim grafiği.

Şekil-3’te görülen manyetik akıdaki değişim miktarının zamandaki değişim miktarına oranının (dB/dt) dalga şekli her ne kadar sinüzoidal değişim göstermese de DGM akı dalga şekli sürpriz bir şekilde sinüzoidal değişim gösterir. Bu, işaret algılayıcı bobinlerde endüklenen gerilimin nümerik olarak entegre edilmesi sonucu daha düzgün hale gelmesi ile açıklanabilir. Bileşke akı yoğunluğu stator nüvenin dışlarında maksimum olurken nüvenin kıyı bölgelerinde minimum olmakta ve akı yoğunluğu dışlardan nüvenin kıyı bölgesine doğru gidildikçe azalmaktadır. DGM akı yoğunluğundaki azalma trendi sinüzoidal akı yoğunluğu ile benzerlik göstermektedir. Deneysel olarak stator nüve üzerindeki çeşitli bölgeler için elde edilen sonuçlar Tablo I ile verilmiştir.

Tablo-1. Manyetik akı yoğunluğu ve güç kaybı dağılımı.

Dış Arkasındaki Bölgeler				Oyuk Arkasındaki Bölgeler				
N	Akı Yoğunluğu (T)		Güç Kaybı (W/kg)	N	Akı Yoğunluğu (T)		Güç Kaybı (W/kg)	
	Sinüs	DGM			Sinüs	DGM		
1	1.29	1.31	6.69	8.01	1.32	1.35	6.41	7.68
2	1.18	1.19	6.38	7.49	1.29	1.22	5.79	6.96
3	1.32	1.32	5.84	6.71	1.11	1.12	5.55	6.38
4	1.03	1.05	5.43	6.17	0.98	0.89	4.98	5.66

D ve O bölgelerindeki bileşke akı yoğunluğunun tepe değeri stator nüvenin dış çapına doğru radyal olarak ilerledikçe azalmaktadır. Bunun nedeni akı ve güç kaybı dağılımı üzerinde etkisi olduğuna inanılan nüvenin geometrisi gösterilebilir. DGM uyarımı altında oluşan güç kaybı artışı stator nüve için en fazla %20 olarak bulunmuştur. Halbuki aynı şartlar altında benzer elektrik çeliğinden elde edilmiş Epstein şeritlerinde ise spesifik güç kaybının artış oranı %23 olarak bulunmuştur. Bu güç kaybı artışı elektronik olarak üretilen bütün dalga şekilleri altında çalışan elektromanyetik aygıtlarda kesinlikle mevcut olan bir durumdur.

4. SONUÇ

Asenkron motorun stator nüvesinin DGM gerilim dalga şekli ile enerjilendirilmesi referans dalga şekli ile yapılan uyarıma nazaran en fazla %20 oranında bir güç kaybına yol açar. Güç kaybı artışı dış ve dış yakın bölgelerde yüksek olurken nüvenin kıyı bölgelerinde daha az olmaktadır. Doğal olarak, bu durum nüve geometrisinin güç kaybı artışındaki etkisini anlamak için daha detaylı bir araştırmayı gerektirmektedir. Ayrıca, DGM dalga şekli ile ilgili anahtarlama frekansı, modülasyon indeksi gibi parametrelerinde yine güç kaybı artışı üzerindeki etkileri bu konunun paralelinde araştırılması gereken bir diğer konudur.

KAYNAKLAR

- [1] M. S. Lancarotte and A. Penteado, “Estimation of core losses under sinusoidal or non-sinusoidal induction by analysis of magnetisation rate”, IEEE Trans. on Energy Conversion., pp. 174-179, vol. 16, No. 2, June 2001.
- [2] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and F. Profumo, “Iron losses in magnetic materials with six-step and PWM inverter supply,” IEEE Trans. on Mag., vol. 27, No. 6, pp. 5334-5336, Nov. 1991.
- [3] M. Amar, and R. Kaczmarek, “A General Formula for prediction of iron losses under non-sinusoidal voltage waveform”, IEEE Trans. on Mag., vol. 31, No. 5, pp. 2504-2509, Sept. 1995.
- [4] H. Rahmetizadeh and A. J. Moses “Effects of stress on iron loss and flux distribution of an induction motor stator core”, IEEE Trans. on Mag., Vol. 25, No. 5, 1989.
- [5] R. Kaczmarek, M. Amar, and F. Protat, “Iron loss under PWM voltage supply on Epstein Frame and induction motor core,” IEEE Trans. on Mag., vol. 32, No. 1, pp. 189-194, Jan. 1996.
- [6] H. Rahmetizadeh and, A. J. Moses “Effects of stress on flux distribution in motor stator laminations”, Anales de Fisica, Serie B, vol. 86, pp. 305-307, 1990.
- [7] N. Benamrouche et al, “Determination of iron loss distribution in inverter fed induction motors”, Electric Machines and Power Systems, pp. 649-660, 1997.
- [8] J. Guo and V. S. Ramsden, “Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines”, IEEE Trans. on Mag., vol. 34, No. 4, pp. 2234-42, 1998.
- [9] A. J. Moses and N. Tutkun, “Investigation of power loss in wound toroidal cores under PWM excitation”, IEEE Trans. on Mag., Vol. 33, No. 5, pp. 3763-65, Sept. 1997.
- [10] M. Namikawa et al, “Magnetic properties of 6.5% silicon steel sheets under PWM voltage excitation”, IEEE Trans. on Mag., Vol. 26, No. 5, pp. 2904-2910, Sept. 1998.
- [11] R. S. Albir and A. J. Moses “Improved DC bridge method employed to measured local power loss in electrical steels and amorphous materials”, JMMM, pp. 553-54, 1990.