

PWM EVİRİCİ GÜÇ KAYNAĞI İLE UYARILAN %3 Sİ-FE ALAŞIMLI ELEKTRİK ÇELİKLERİNDE MODÜLASYON PARAMETRELERİNİN DEMİR KAYBI ARTIŞI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nedim TUTKUN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
İncivez 67100 Zonguldak
e-posta: tutkun@karaelmas.edu.tr

Anahtar sözcükler: PWM gerilim uyarımı; modülasyon parametreleri; elektrik çelikleri; demir kaybı artışı

ABSTRACT

The pulse width modulated power sources have increasingly been used to feed various electromagnetic devices for many industrial applications. However when these types of power supplies are employed to energise such devices their magnetic cores are subjected to iron loss increase depending on modulation parameters. The PWM waveform has two main modulation parameters being significantly influential on iron loss increase, therefore various modulation techniques such as eliminating major harmonics are used to minimise loss increase. In this investigation, modulation parameters such as the modulation index, carrier index, the switching frequency, the operating frequency were under consideration for obtaining a better understanding of their effects on loss increase. The results have indicated that at small modulation and carrier indices iron loss increase under PWM voltage excitation were greater than expected.

1. GİRİŞ

Darbe genişlik modülasyonlu (PWM) güç kaynakları elektrik motorları, özel tip transformatörler, statik dönüştürücüler gibi elektromanyetik aygıtların enerjilendirilmesinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Her ne zaman bu aygıtlar PWM evirici güç kaynakları ile beslenirse lamine edilmiş elektrik çeliği nüvesi fazladan bir demir kaybına maruz kalır [1-2]. Bu uyarım altındaki laminasyonlarda meydana gelen demir kaybı artışını bulabilmek için farklı ölçme tekniklerinin kullanıldığı çok sınırlı sayıda araştırma yürütülmektedir [3-4]. Daha önce yapılan bir çalışma, PWM uyarımı altındaki manyetikleşme sürecinin sinüzoidal uyarıma göre çok farklı bir değişime sahip olduğunu göstermiştir [5], özellikle PWM uyarımı altındaki manyetik akı yoğunluğu değişim oranı ve manyetik alan yoğunluğu dalga şekilleri oldukça bozunmuş bir değişim sergilemektedirler. Buna karşın fazladan

kayıp artışlarına yol açtığı düşünülen çok küçük miktarlardaki genlik değişimleri göz ardı edilirse PWM manyetik akı dalga şekli sinüzoidal akı dalga şekline yakın bir değişim göstermektedir. Bu yüzden PWM evirici güç kaynakları ile diğer elektronik olarak üretilen gerilim dalga şekillerine sahip güç kaynakları bir çok elektrik çeliği ve elektrik motoru üreticilerini akı dalga şeklinin bozunmasının neden olduğu fazladan güç kayıpları konusunda ilgilerini çekmektedir [6].

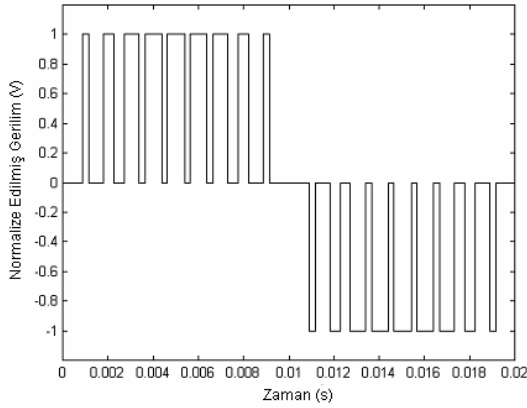
Bu araştırma nümerik yöntemler kullanarak tanecik uyumlu %3 Si-Fe alaşımli 27M4 elektrik çeliğinde PWM uyarımı altındaki güç kaybı artışının tahmin edilmesi suretiyle modülasyon parametrelerinin etkisinin daha iyi anlaşılmasını amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar modülasyon ve taşıyıcı indekslerin belirtilen çelikteki güç kaybı artışı üzerinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiş, düşük indeks değerlerinde güç kaybı artışı artarken büyük indeks değerlerinde bu kayıp azalma göstermiştir. Aynı zamanda benzetim sonuçları 140x113x50 ebatlarında sargılı toroidlerden elde edilen deneysel sonuçlar ile benzer koşullar altında karşılaştırılmış, sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

2. YÖNTEM VE ANALİZ

PWM gerilim dalga şekli kesikli olup referans bir dalga şekli (genellikle sinüzoidal dalga) ile taşıyıcı dalga şekli (genellikle üçgen dalga) Şekil 1'de görüldüğü gibi karşılaştırılması ile elde edilir. Her iki dalga şeklinin bir periyot içerisinde karşılaştırılması zaman eksenine göre simetri sergileyen ve zamanla değişen pozitif ve negatif darbelerin oluşmasını sağlar. PWM dalga biçimi muhtelif modülasyon stratejileri ile elde edilebilmesine karşın sinüzoidal PWM (SPWM) modülasyon tekniğinin kullanılarak elde edilmesi yönünde bir eğilim vardır. Bu modülasyon tekniğinde, modülasyon indeksi m , taşıyıcı indeksi n , çalışma frekansı f ve anahtarlama frekansı veya

taşıyıcı frekans f_c kullanılan başlıca modülasyon parametreleridir. Modülasyon indeksi referans gerilim genliğinin taşıyıcı gerilim genliğine, benzer şekilde taşıyıcı indeks taşıyıcı frekansın referans frekansına oranları olarak tanımlanabilir. Frekansa bağlı kayıpların artışı anlamak için oldukça gerekli olan SPWM gerilim dalgasının frekans spektrumu bir periyottaki toplam darbe sayısı p ile doğrudan ilişkilidir. Toplam darbe sayısı ile taşıyıcı indeks arasındaki bağıntı $p=n-1$ şeklinde verilebilir. Ayrıca yarım periyot içerisindeki toplam darbe genişlikleri $\sum \tau_k$ modülasyon ve taşıyıcı indeksleri arasında bir bağıntı mevcuttur.

Elektromanyetik bir aygıtta bakır sargı direncini ihmal ettiğimizde indüklenen gerilim V ile manyetik akı yoğunluğu B_m arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur. Bu bakımdan nominal yük şartları altında manyetik akı yoğunluğunu sabit tutabilmek için indüklenen gerilimin birinci harmoniği V_1 ile çalışma frekansı arasındaki oran sabit tutulabilir. Manyetik akı yoğunluğunun zamanla değişimi $2B_m/\sum \tau_k$ demir kaybı ile doğrudan ilişkili olduğundan her iki parametrenin seçimi toplam kayıplar üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu bakımdan sinüzoidal ve PWM uyarımları altındaki demir kayıpları arasında anlamlı bir karşılaştırma yapmak için PWM manyetik akı yoğunluğu B_m ve onun ilk harmoniği B_{1m} modülasyon parametreleri türünden bir birleri ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 1. Tipik sinüzoidal PWM gerilim dalga biçimi

Böylece PWM için ortalama indüklen gerilim V_a evirici DC link gerilimi E , çalışma frekansı f , yarım periyot içerisinde toplam darbe genişlikleri $\sum \tau_k$ türünden $2Ef\sum \tau_k$ ifadesi türünden hesaplanabilir. Ayrıca yarım periyot içerisindeki toplam darbe genişlikleri ilk harmoniği B_{1m} olan PWM manyetik akı yoğunluğu B_m ile Eşitlik (1)'de gösterildiği şekilde ilişkilendirilebilir.

$$B_m = \frac{B_{1m} \pi f_c \sum \tau_k}{mn} \quad (1)$$

Burada $\sum \tau_k$, m , n , ve f_c sırasıyla yarım periyottaki toplam darbe genişliği, modülasyon indeksi, taşıyıcı indeks ve anahtarlama frekansındır.

Bu ifade manyetik akı yoğunluğu ile modülasyon ve taşıyıcı indeksler arasında ters bir orantının bulunduğunu, ancak anahtarlama frekansı ve yarım periyottaki toplam darbe genişlikleri arasında ise doğrusal orantının bulunduğunu göstermektedir. Her uyarım altındaki toplam demir kaybı P_t daha önceden geliştirilmiş kayıp ayrımı modeline göre Eşitlik (2) ile ifade edilebilir.

$$P_t = P_h + P_c + P_e \quad (2)$$

Burada P_h , P_c , ve P_e histeresis kaybı, klasik girdap akım kayıpları ve bilinmeyen kayıplar veya ilave girdap akım kayıplarıdır. PWM gerilim uyarımı altındaki histeresis kaybı genellikle Steinmetz formülü yardımıyla hesaplanır ve Eşitlik (3) ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_h = a (f B_m)^x \quad (3)$$

Burada a ve x sırasıyla histeresis kayıp katsayısı ve Steinmetz indeksi olup bu parametreler tanecik uyumlu (GO) %3 Si-Fe alaşımli elektrik çeliği için 50Hz frekansındaki sinüzoidal uyarım altında 0.0045 ila 1.7 değerleri arasındadır. PWM evirici gerilimi ve yarım periyottaki toplam darbe sayısına bağlı olarak kilogram başına histeresis kaybı Eşitlik (4) ile verilmektedir.

$$P_h = a \left(\frac{E}{2NA} \sum \tau_k \right)^x \quad (4)$$

Burada E , N ve A sırasıyla PWM evirici DC giriş gerilim seviyesi, sekonder sargıdaki sarım sayısı ve ön kesit alanıdır. İkinci olarak PWM uyarımı altındaki klasik girdap akım kayıpları toplam darbe genişlikleri türünden Eşitlik (5) ile ifade edilebilir.

$$P_c = \frac{2\sigma d^2 B_m^2}{3g \sum \tau_k} \quad (5)$$

Burada σ , d , ve g sırasıyla elektrik çeliğinin iletkenliği, manyetik nüve laminasyonunun kalınlığı ve manyetik malzemenin özgül kütesidir. Son olarak PWM uyarımı altındaki aşırı girdap akım kayıpları Eşitlik (6) ile bulunabilir.

$$P_e = \frac{5.66 \sqrt{\sigma A G V_o}}{g} \frac{B^{3/2}}{(\sum \tau_k)^{1/2}} \quad (6)$$

Burada G ve V_o sırasıyla boyutsuz bir katsayı ve yerel koersif alanların statiksel dağılımına karşılık gelen parametredir. Aşırı girdap akım kaybının hesaplanması kullanılan elektrik çeliğinin manyetik yapısı ile ilişkili olup bu parametrelerin belirlenmesi ile olur. Bu yüzden bu kayıp, ya ölçülen toplam manyetik kayıptan histerezis ve girdap akım kayıplarının toplamının çıkarılması ile yada kullanılan elektrik çelikleri için bilinmeyen parametre değerlerinin belirlenmesi ile bulunur. Ancak ilk yaklaşımın kullanılması durumunda deneysel hata kaçınılmaz olarak güç kaybına dahil olur. İkinci yaklaşımın kullanılması durumunda ise parametre değerlerinin tahmini kullanılan prediksyon yöntemlerinden kaynaklanan hatalardan dolayı belli bir hata miktarı içerir.

Bu çalışmada G ve V_o parametrelerinin tahmin edilmesinin zorluğundan dolayı aşırı girdap akım kaybı ilk yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece toplam demir kaybı belirlenen manyetizasyon ve manyetik akı yoğunluğu değerlerinde manyetik kayıp bileşenlerinin toplanması ile hesaplanabilir. Böylece PWM uyarıtımı altındaki toplam manyetik kayıp sinüzoidal kayıp bileşenleri ve yarım periyottaki toplam darbe genişlikleri türünden Eşitlik (7) ile hesaplanabilir.

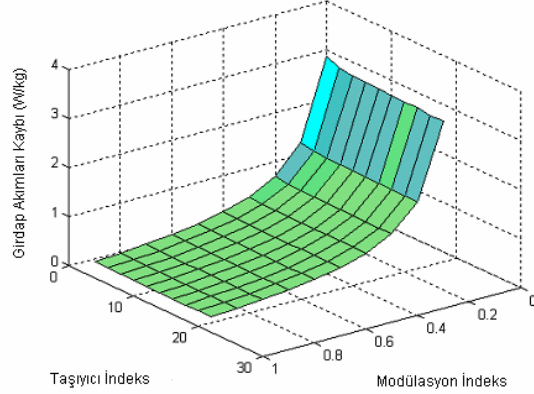
$$P = P_h + \frac{4}{\pi^2} \frac{1}{\sum \tau_k} \frac{P_c}{f} + \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\sum \tau_k}} \frac{P_e}{\sqrt{f}} \quad (7)$$

Burada P_h , P_c , ve P_e sırasıyla histerezis kaybı, sinüzoidal uyarıtım altındaki klasik girdap ve aşırı girdap akımları kayıplarıdır.

3. SONUÇLAR VE İRDELEME

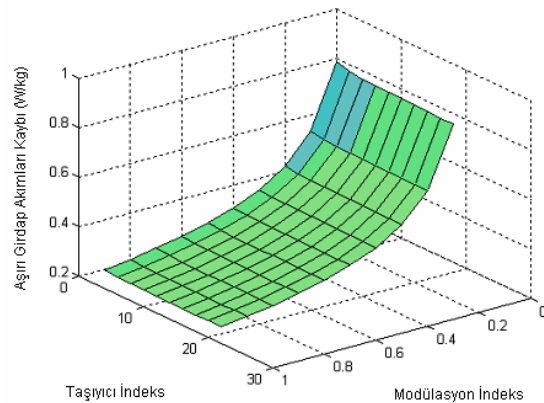
Tanecik uyumlu %3 Si-Fe alaşımli elektrik çeliği 1.7T, 50Hz'de PWM uyarıtımı altında manyetize edildiğinde oluşan histerezis kaybı küçük histerezis kapalı alanlarının oluşmadığı varsayıldığında sinüzoidal histerezis kaybı ile aynı olup bu değer 0.54W/kg civarındadır. Ancak dinamik kayıplar olarak bilinen klasik ve aşırı girdap akım kayıpları 1.7T, 50Hz'lik manyetizasyonda modülasyon parametreleri ile doğrusal olmayan bir değişim sergilemektedir. Bu kayıplardan klasik girdap akım kayıpları modülasyon indeksi ve taşıyıcı indeks parametreleri ile doğrusal olmayan bir değişim göstermekte özellikle 0.5 veya daha düşük modülasyon indeks değerlerinde hızlı bir artış göstermesine karşın taşıyıcı indeks değerleri ile değişimi Şekil 2'de görüldüğü gibi daha küçük olmaktadır. 0.1-0.2 aralığındaki modülasyon indeks değerlerinde klasik girdap akımları 0.5 W/kg değerinden daha büyük olması bu kayıplarda nedeni daha ayrıntılı araştırılması gereken bir öğenin bu hızlı artışın nedeni olduğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte bu kayıplar 3 ila 10 arasında taşıyıcı indeks değerlerinde çok küçük miktarda bir değişim

göstermektedir. Ayrıca 1.7T, 50Hz'lik manyetizasyonda en düşük modülasyon ve taşıyıcı indeks değerlerinde meydana gelen en büyük girdap akım kayıpları 3W/kg civarında olduğu yine Şekil 2'den görülmektedir.



Şekil 2 Klasik girdap akımlarının 1.7T, 50Hz'de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi

Aşırı girdap akım kaybının modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi, klasik girdap akım kayıpları ile benzer olup tahmin edilen en büyük kayıp değeri 0.8W/kg değerinden daha küçüktür. Şekil 3'ten görüldüğü gibi aşırı girdap akım kaybının taşıyıcı indeks ile değişimi klasik girdap akım kaybı ile değişiminden çok az farklılık göstermektedir. Daha önce yapılan bir araştırmada [4], aşırı girdap akım kaybı, klasik girdap akım kayıbından daha fazla artış gösterdiği tespit edilmiş nedeni, bozunmuş gerilim uyarıtımı altındaki farklı manyetikleşme prosesi olarak gösterilmiştir.

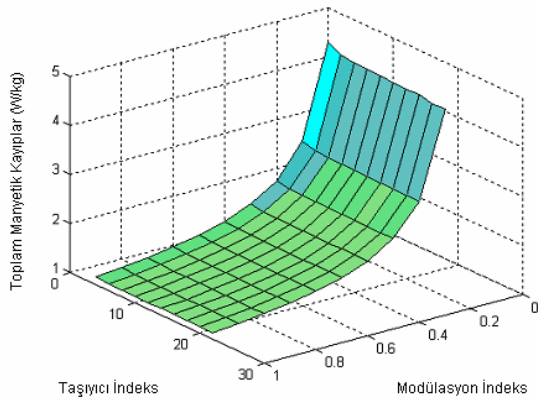


Şekil 3 Aşırı girdap akımları kaybının 1.7T, 50Hz'de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi

Yapılan tahmini hesaplar sonucunda aşırı girdap akım kaybı modülasyon ve taşıyıcı indekslerin sırasıyla 0.6 ve 10 alındığı durumda sinüzoidal uyarıtım altında meydana gelen kayıplardan %20 ila %25 arasında daha fazla artış sağladığı tespit edilmiştir.

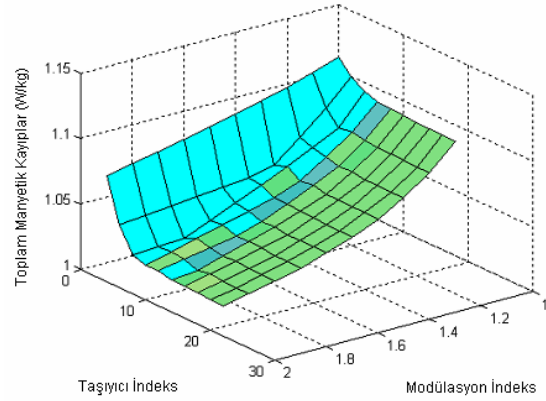
Bunun yanı sıra toplam manyetik kayıplar ile modülasyon ve taşıyıcı indekslerin değişimi klasik ve aşırı girdap akım kayıplarındaki değişime benzer bir trend göstermiştir. Şekil 4'te gösterildiği gibi toplam manyetik kayıplar küçük indeks değerlerinde oldukça büyük bir artış göstermiş olup 1.7T, 50Hz'de toplam manyetik kaybın aldığı en büyük değer 4.35W/kg olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca yine Şekil 4'ten görülebileceği gibi toplam manyetik kayıplar modülasyon indeks değerleri ile kuadratik bir değişim göstermesine karşın taşıyıcı indeks ile özellikle 0.2'nin üzerindeki değerler için doğrusal bir değişim göstermiştir. Genellikle en çok kullanılan 0.7 ile 0.9 arasındaki modülasyon indeks değerlerinde toplam manyetik kayıplar 1.19 ile 1.32W/kg arasında tahmin edilmiş olup aynı şartlar altındaki deneysel sonuçlar ile uyumluluk göstermiştir [5].

Bunun yanı sıra modülasyon indeksinin 1 ile 2 aralığında aldığı değerlerde, yani, aşırı modülasyon durumunda toplam manyetik kayıplar ile modülasyon ve taşıyıcı indeksler arasındaki değişim Şekil 5'te verilmiştir. Bu aşırı modülasyon indeks değerlerinde meydana gelen kayıplar sürpriz bir şekilde artmamakla birlikte tersine modülasyon indeks değeri arttıkça toplam kayıplarda bir azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte aşırı modülasyon durumunda kayıplar taşıyıcı ve modülasyon indeks değerleri ile kuadratik bir değişim göstermiş olup meydana gelen kayıplar bu aralıkta 1.00 ile 1.11 W/kg değerleri arasında tahmin edilmiştir.



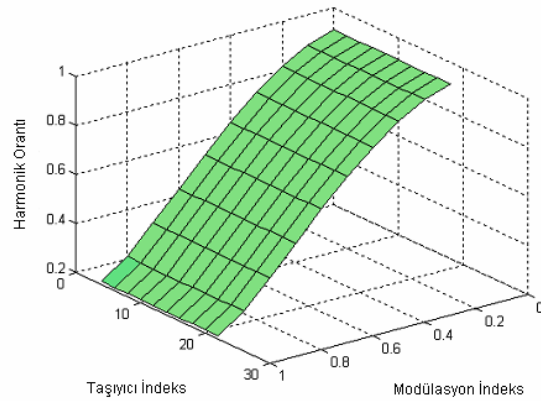
Şekil 4 Tahmini toplam manyetik kayıpların 1.7T, 50Hz'de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi

Dinamik kayıplar üzerinde anahtarlama frekansı etkisinin daha iyi anlaşılması için SPWM gerilim dalgasında ikinci en büyük harmonik bileşenin temel bileşene oranı olarak tanımlanan harmonik orantının modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi tahmin edilmiş, Şekil 6'da bu değişim grafik olarak gösterilmiştir. 0.8 ile 1.0 aralığındaki modülasyon değerlerinde harmonik orantı 0.2 değeri civarında bulunmuş, ikinci harmoniğin genlik değerinde diğer harmoniklerin genliklerine göre bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5 Tahmini toplam manyetik kayıpların 1.7T, 50Hz'de aşırı modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi

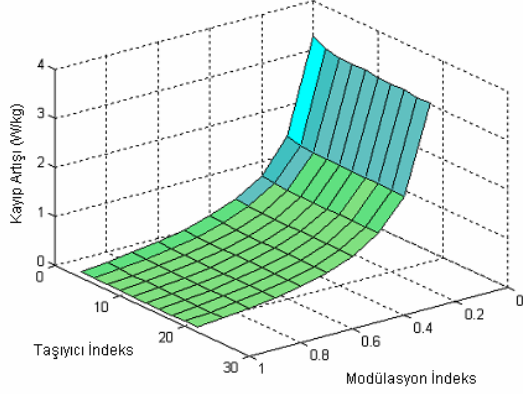
Modülasyon indeks ile doğrusal olmayan değişim gösteren harmonik orantı taşıyıcı indeks ile değişimi sabit kalmıştır. PWM ve sinüzoidal gerilim uyarımları altındaki güç kaybı farkı muhtelif modülasyon ve taşıyıcı indeks değerlerinde tahmin edilmiş olup bu değişimin grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 7'de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi verilen güç kaybı artışı daha önce Şekil 4'te verilen toplam manyetik kayıpların değişim grafiği ile benzerlik göstermektedir.



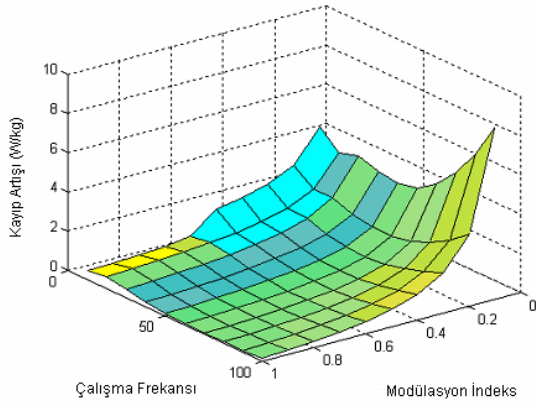
Şekil 6 Harmonik orantının 1.7T, 50Hz'de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi

En büyük kayıp artışı yine düşük modülasyon indeks değerlerinde (özellikle 0.1 ile 0.3) meydana gelmesine karşın bu aralıktaki taşıyıcı indeks değerinde güç kaybı artışı hemen hemen sabit kalmıştır. Manyetik kayıp artışının çalışma frekansı ile değişimini görebilmek için çalışma frekansının 0-100Hz aralığındaki değerleri için kayıp artışının tahmin edilerek değişim grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Çalışma frekansının 75 ve 100Hz aralığında ve küçük modülasyon indeks değerlerinde güç kaybı artışı küçük frekans değerlerine göre artış göstermiş

olmasına karşın aynı frekans aralığında ve modülasyon indeksinin 0.8 ile 1.0 aralığındaki değerlerinde azalma göstermiştir. Değişim grafiği Şekil 8’de verilen güç kaybı farkı modülasyon indeks ve çalışma frekansı değerlerinde doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir.



Şekil 7 Güç kaybı farkının 1.7T, 50Hz’de modülasyon ve taşıyıcı indeksler ile değişimi



Şekil 8 Güç kaybı farkının 1.7T, 50Hz’de modülasyon indeks ve çalışma frekansı ile değişimi

4. SONUÇLAR

Modülasyon ve taşıyıcı indeksler gibi temel modülasyon parametrelerinin SPWM uyarıtımı altında özellikle klasik ve aşırı girdap akımlarının neden olduğu kayıp artışı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. SPWM uyarıtımı altında meydana gelen manyetik kayıpların düşük modülasyon ve taşıyıcı indeks değerlerinde beklenenden daha büyük oranda arttığı görülmektedir.

Tersi durumda, yani, 1’den büyük modülasyon indekslerinde (aşırı modülasyon) hesaplanan toplam manyetik kayıp artışı 0 ile 1 arasındaki modülasyon değerlerine göre daha küçük olup 0.95 ile 1.12 W/kg arasında değişmektedir. Diğer taraftan SPWM dalga şeklinin başka önemli bir parametresi olan çalışma frekansı, modülasyon indeksinin 0.4’ten küçük olan değerlerinde ilave kayıplar üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] S. Takada et al, “Magnetic losses of electrical iron sheet in squirrel cage induction motor driven by PWM inverter”, IEEE Trans. on Mag., pp. 621-30, 1997.
- [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] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and F. Profumo, “Effects of modulation index on the iron losses in soft magnetic materials supplied by PWM inverter,” IEEE Trans. on Mag., vol. 29, No. 6, pp. 3234-3236, Nov. 1993.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. Kawano, S. Okamura, and T. Terashima, Kawasaki Steel Technical Report, No. 39, October 1998.