

Tek Saç Testi (SST) Yöntemi ile Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi

Measurement of Core Losses in Magnetic Materials with Single Sheet Tester (SST) Method

Ahmet Demir¹, Zehra Saraç¹

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bülent Ecevit Üniversitesi

ahmetfatmademir@hotmail.com, saraczehra@yahoo.com

Özet

Enerji verimliliği sürekli önem kazanmaya devam etmektedir. Elektrik makineleri elektrik tüketiminin çoğundan sorumludur. Dolayısıyla elektromanyetik cihazların verimliliğinde küçük kazanımla büyük enerji tasarrufu elde edilebilir. Makina verimliliğini artırmak için makina tasarım aşamasında nüve kayıpları doğru ölçülmelidir. Nüve kayıp verileri genellikle sınırlı frekans ve akı yoğunluğu aralıkları içinde nüve üreticileri tarafından sağlanmaktadır. Bu veriler elektrikli makinalarda nüve kayıpları tahmini için yeterli değildir. Bu çalışmada bilim çevrelerinde son yıllarda ilgiyle izlenen tek saç test cihazı (SST) tasarlanarak, nüve kaybı ölçümlerinde kullanılmıştır. Mıknatıslanma akımı yöntemi ile manyetik alan şiddeti, akım değerleri ve nüve kayıpları hesaplanmış, değişik manyetik akı ve frekanslarda (50 Hz-500 Hz) nüve kayıp eğrileri elde edilmiştir. Test değerlerinden eğri uydurma yöntemi ile kayıp katsayıları bulunmuştur. Elde edilen histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıp katsayıları vasıtasıyla M4, M3 ve M5 kalite Si-Fe saç malzemelerin kayıp modelleri oluşturulmuştur. Literatürde mıknatıslanma akımı yöntemiyle çalışan SST cihazı ile kayıp katsayılarının bulunması yapılmamıştır. Çalışmada bu konuda literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Abstract

Energy efficiency continues to gain importance. Electrical machines are responsible for most of the electricity consumption. Therefore, with small increase in the efficiency of the electromagnetic machine, large energy-saving can be achieved. Accurate measurement of core losses is required to improve the efficiency of the machine during the machine design. Core loss data, usually within a limited range of frequency and flux density is provided by core producers. These data are not sufficient to estimate the core losses of electrical machines. In this study, mentioned with interest in scientific communities in recent years, SST tester is proposed and implemented for core loss measurement. With the magnetization current method the

magnetic field strength, current values and core losses are calculated, core loss curves were obtained for various frequencies (50 Hz-500 Hz) and magnetic flux. Then, with the help of test core loss values, the loss coefficient was found using curve fitting method. Through the obtained hysteresis, eddy current and abnormal core loss coefficient, the loss models have been developed for M4, M3 and M5 quality Si-Fe core materials. In the literature, there is no study for determination of the loss coefficients with SST which is worked with the magnetization current method. This study aims to contribute to the literature.

1. Giriş

Enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bir dünyada elektrik enerjisi harcayan cihazların tasarımı önemlidir. Artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için ilave enerji santrallerinin devreye girmesi gerekmektedir. Bu yöntem hem çok maliyetlidir, hem de çevreye CO₂ saldığı için zararlıdır. Enerji talebini karşılamak için diğer çözüm, mevcut enerjinin tasarruflu şekilde kullanılmasıdır. Küresel ısınmayı azaltma talepleri, verimlilik sınıflarını yükseltme girişimleri, düşük elektrik giderleri isteğı ve enerji darboğazı gibi konular yüzünden nüve kayıplarını azaltma projeleri bilim adamlarının üzerinde çok çalıştığı konular haline gelmiştir. Ekonomik ve çevresel nedenler yüksek verimli elektrikli cihazların araştırılmasını öne çıkarmıştır. Elektromanyetik makinalarda önemli yer tutan nüve kayıplarının azaltılması bu sorunla başa çıkmak için önemli adımlardan biridir. Gelişen teknolojik nedenlerden dolayı elektrik makinelerinin yapısında mevcut olan manyetik malzemelerin yüksek akı yoğunluklarında ve az kayıpla çalıştırılması gerekir. Manyetik akı yoğunluğunun ve frekansın artışı, manyetik kayıpları artırır. Verimli cihaz üretmek için, araştırmacıların manyetik malzemelerin kayıplarını daha geniş frekans ve akı yoğunluğu bölgesinde bilmesi gerekir. Manyetik indüksiyon altında ferromanyetik malzemelerin özelliklerinin incelenmesi güç kayıplarını azaltan böyle bir malzeme tasarlamak için yardımcı

olabilir. Bu nedenle, elektrik çelik saçlarının güç kayıpları değerlendirilmek önemlidir. Daha gerçekçi verileri hesaplamak ve verimliliği artırmak için deneysel çalışmalar yapmak makine tasarımcıları için tek mümkün yoldur [1].

Elektrik makinalarının önemli ve az kayıplı tercih edilen yapısal parçası nüve malzemesidir. Genel olarak en çok Si-Fe alaşımı nüve malzemesi tercih edilmektedir. Tanecikleri yönlendirilmiş (Grain-Oriented) %3 Si-Fe çelikler trafo nüvelerinde kullanılır. Yönlendirilmemiş Si-Fe çelikleri motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılır. Kullanılan manyetik malzemelerin histerisiz çevrimi ve nüve kaybı gibi manyetik özellikleri, birçok tasarımcı ve üretici için araştırma konusu olmuştur [2]. Elektrik makinalarının verimli çalışması için nüvelerde meydana gelen kayıpların çok iyi şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bunun bilenebilmesi için imalat öncesinde modellemeye ihtiyaç vardır. Elektrik makinalarının verimli çalışacak şekilde tasarlanıp üretilmeleri için, kayıpların üretim öncesinde bilinmesi gereklidir.

Manyetik malzemelerde kayıp ölçmelerinde Epstein, toroit ve SST olmak üzere üç çeşit nüve kayıp cihazı kullanılmaktadır. Epstein yöntemi ve SST (tek saç test) yöntemi elektrik çelik saç manyetik özelliklerinin ölçümü için yürürlükte olan iki standart yöntemdir. Epstein yöntemi çok kullanılan yöntem olmasına rağmen bazı problemleri vardır. Bu yüzden çalışmada çift boyunduruklu SST cihazının test cihazı olarak kullanılması uygun görülmüştür.

Manyetik malzemelerde kayıp ölçmede en çok kullanılan manyetik test cihazlarında uyarım ve ölçme üzere iki sargı mevcuttur. Bu iki sargı test yapılacak nüve malzeme üzerine sarılır. Epstein, toroit ve SST olmak üzere üç çeşit nüve kayıp cihazı kullanılmaktadır. Epstein yöntemi [3] ve SST (tek saç test) yöntemi [4] elektrik çelik saç manyetik özelliklerinin ölçümü için yürürlükte olan iki standart yöntemdir. Farklı sonuçlar üretebilen iki standart yöntem olan Epstein çerçevesi ve SST cihazı paralel bir şekilde kullanılmaktadır.

Sievert makalesinde nüve kaybının fiziksel ve mühendislik yaklaşımına yer vermiştir [5]. Mühendislik yaklaşımına göre mıknatıslanmış bir nüvenin ortalama manyetik kaybı, o nüve malzemenin manyetik kalitesini ortaya çıkarır. Literatürde kayıp çeşitleri histerisiz, girdap akımı ve anormal olmak üzere üç çeşittir. Bu çalışmada kayıp çeşitlerinin modellerini oluşturmak için kullandığımız kayıp katsayıları eğri uydurma yöntemi ile bulunmuştur. Literatürde toroit, SST ve Epstein cihazları ile kayıp ölçümleri yapılmıştır. SST cihazı bu iki cihaza göre hızlı, örnek miktarı az ve hassastır. Bu yüzden bu çalışmada gittikçe yaygınlaşan ve üstünlükleri fazla olan geleceğin ölçüm cihazı SST ile nüve kayıplarının ölçümü yapılmıştır.

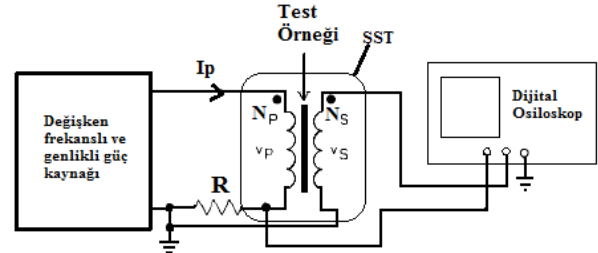
Günümüzde nüve kayıpları, nüve malzemesi üreticilerinin verdikleri grafikler ile sınırlıdır. Mıknatıslanma akımı yönteminin kullanıldığı SST cihazı test çalışmaları ile nüve kayıp değerleri makina tasarımcılarının istediği kadar geniş frekans ve manyetik akı yoğunluğu bölgesinde belirlenebilir. Çalışmada bu ispatlanmıştır. Söz konusu yöntemin SST cihazı ile deneysel uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslanma akımı yöntemi bir SST nüve kayıp ölçme sisteminin sonuçları verilerle literatüre katkı sağlanmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

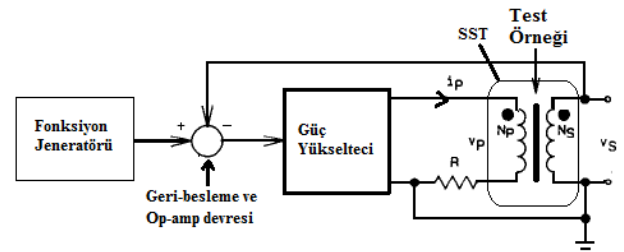
Nüve kayıplarını ölçmeye ve ayırtırmaya yönelik bu çalışmada üç çeşit silisli çelik saç için birçok test yapılmıştır. Kullanılan örnekler trafo gibi elektrik donanımlarında kullanılan M3, M4 ve M5 kalite olarak bilinen %3 silisli çelik lamine saçlardır. Kayıpları ve histerisiz eğrilerini elde ederken mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada SST ölçüm cihazı kullanılmıştır. SST için kullanılan besleme kaynağı sinüzoidal kaynaktır. Normal veya geri-beslemeli test düzenekleri kullanılarak 50 Hz frekandaki nüve kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde 50 Hz ile 500 Hz arasında kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerin eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemler bu bölümde görüleceği üzere toplam kaybın üç bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayırışımında kullanılacaktır.

2.1. SST Test Yöntemi

Manyetik özelliklerin elde edildiği SST ölçme sistemi en basit olarak güç kaynağı, SST cihazı, R ölçüm direnci ve dijital osiloskoptan oluşur (Şekil 1). Ayrıca yüksek akılarda SST çıkış vS geriliminin sinüzoidal şekilden uzaklaşmaması için geri-besleme devresi kullanılmaktadır. Eğer geri-besleme amaçlı toplayıcı işlemsel kuvvetlendirici (Op-amp) devresi kullanılırsa fonksiyon jeneratörü ve güç yükseltici, güç kaynağı yerine kullanılır (Şekil 2). Fonksiyon jeneratörü yeterli akımı sağlamadığı ve op-amp devresi çıkış gücü güç küçük olduğu için yükseltici kullanılmıştır.



Şekil 1: SST ölçme sisteminin genel prensip şeması.



Şekil 2: SST ölçme sisteminin geri-beslemeli prensip şeması.

2.1.1. Ölçüm Tekniği

Bu çalışmada nüve malzemelerin kayıp güç ve H manyetik alan şiddeti ölçümlerinde mıknatıslanma akımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin bir göze çarpan avantajı H manyetik alan

şiddetini belirleme basitliğidir. Manyetik alan şiddeti H , Amper kanununu uygulayarak mıknatıslanma akımı i vasıtasıyla belirlenebilir.

$$H = N \cdot i / l_m \quad (1)$$

H manyetik alanın şiddetinin hesaplandığı eşitlik (1)'de, N mıknatıslanma sargısının sarım sayısını, l_m ortalama manyetik akı yolunu gösterir.

Kilogram başına nüve kayıp değeri eşitlik (2) ile hesaplanır. Burada N_p , i_p primer yani mıknatıslanma sargısı parametreleri, N_s , i_s ise sekonder (B manyetik akısı ölçme bobini) sargı parametreleridir. Nüve kayıp gücü mıknatıslanma akımı ve B ölçme bobininde indüklenen gerilim ile hesaplanır. Test örneğinin kütlesi m ile ifade edilir. Kilogram başına nüve kaybı P ile belirtilmiştir. Kütle olarak SST boyundurukları arasında kalan nüve örneğinin ağırlığı testlerde kullanılmıştır.

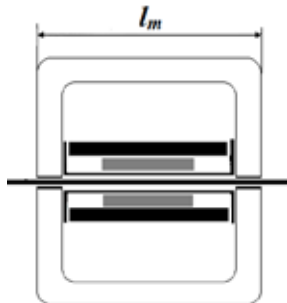
$$P = \frac{1}{m} \frac{N_p}{N_s} \int_0^T v_s i_p dt \quad (2)$$

Bir kayıp eğrisini oluşturmak için bir seri test yapılmıştır. Her bir hesaplanan güç noktası birleştirilerek eğriler oluşturulmuştur. Her bir test noktasından sonra nüve test örneği demanyetize edilerek sonraki nokta testine geçilmiştir. Demanyetize için test örneği yüksek akı değerini (doyma, saturasyon) görmesi ve daha sonra akı yavaşça azaltılarak sıfıra kadar inmesi gereklidir.

B akı değeri eşitlik (3) ile hesaplanır. V_s gerilim değeri SST'nin B ölçme bobininden alınan etkin değerdir. N_s B ölçme bobininin sarım sayısı, f mıknatıslanma akımını oluşturan gerilimin frekansı, A ise test örneğinin kesit alanıdır. Kayıp testini yaparken H değerleri de elde edilmiş olur. H değeri mıknatıslanma akım yönteminden elde edilen eşitlik (4)'e göre hesaplanır. Mıknatıslanma akımı i_p , SST sistemindeki mıknatıslanma (primer) sargısına seri bağlı R ölçme direncinden okunan değerdir. Etkin manyetik yol uzunluğu olarak belirtilen l_m ise SST boyundurukları arası iç mesafedir.

$$B = V_s / (4.44 \cdot N_s \cdot A \cdot f) \quad (3)$$

$$H = N_p \cdot i_p / l_m \quad (4)$$



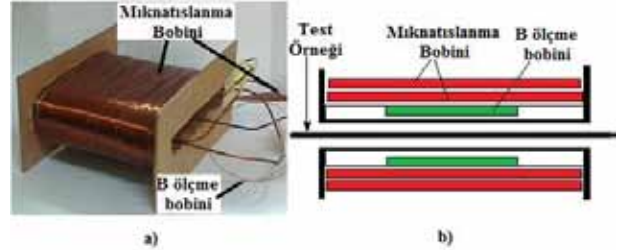
Şekil 2: SST için etkin manyetik yol.

2.1.2. SST Test Düzenegi

SST cihazı alt, üst boyunduruklar ve karkas üzerine sarılmış B ölçme bobini ile mıknatıslanma bobininden oluşur (Şekil 3). Karkas merkezindeki boşluk saç şeklindeki test örneğini yerleştirmek içindir. B ölçme bobini kaçak akıdan etkilenmemesi için

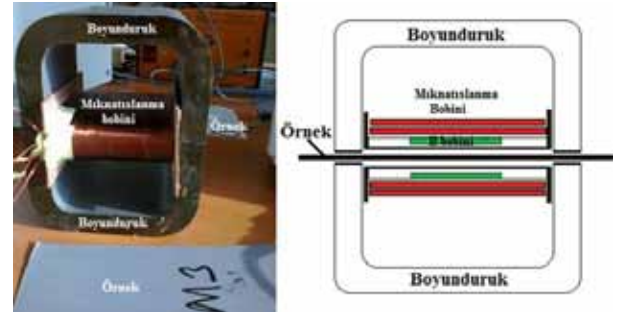
iç kısma sarılıdır. Mıknatıslanma bobini bu yüzden her zaman üstte sarılır.

Boyunduruklar lamine Si-Fe trafo saçlarının üst üste bindirilip U şeklinde bükülmesiyle oluşturulmuştur. Test esnasında U boyundurukların açık uçları birbirine üzerine kapatılır. Böylece iki boyunduruk arasında kalan test örneği manyetik devreyi boyunduruklar üzerinden tamamlar.



Şekil 3: SST bobinlerinin yerleşimi, a) B ve mıknatıslanma bobinleri, b) Bobinlerin ve test örneğinin kesitten görünümü.

SST'de test örneğinin boyunduruklar arasına yerleşimi ve teste hazırlanması önem taşımaktadır (Şekil 4). Numunenin kesilmesi ile oluşan gerilmeler kayıp değerlerini arttırmakta ve doğru olmayan değerlere sebep olmaktadır [6]. Sonuçları etkilememesi için örnek boyu uzun tutularak mekanik gerilmeler merkezden uzaklaştırılmıştır.



Şekil 4: SST'de boyunduruklar, bobinler ve test örneği için yerleşim resimleri.

Şekil 5'deki nüve kayıplarını ölçmede kullanılan sistemde değişken frekanslı güç kaynağı, SST cihazı ve osiloskop görülmektedir.



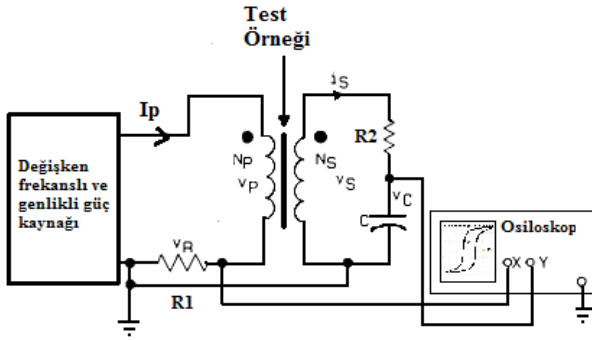
Şekil 5: SST yöntemi ile nüve kayıplarının ölçüldüğü cihazlar.

2.2. Histerisiz Eğrileri

Histerisiz, manyetik malzemenin mıknatıslanması sonucunda meydana gelen olaydır. Statik kayıp olarak da anılan histerisiz kaybı, histerisiz olgusundan kaynaklanır. Histerisiz çevrimdeki kapalı alanın büyüklüğü histerisiz kaybıyla orantılıdır [7]. Bu yüzden histerisiz kaybı az olan bir nüve için bu eğriler daha ince olacaktır. Bu çalışmada üç farklı nüve malzemesi için histerisiz eğrisi elde edilmiştir. Kullanılan test örnekleri M3, M4 ve M5 kalite %3 silisli çelik lamine saçlardır. Histerisiz, H ve B eğrilerini oluşturmak için düzeneğe integral almak için RC devresi eklenmiştir (Şekil 6).

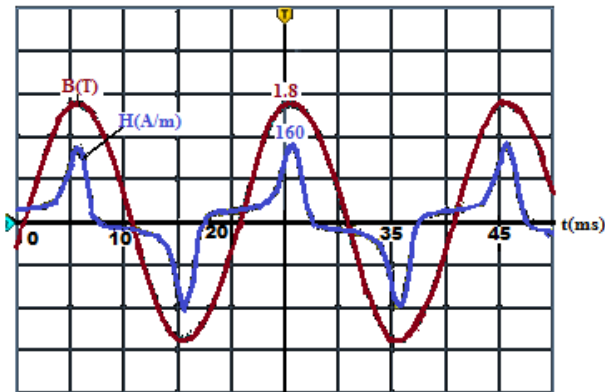
B değerlerini bulmak için eşitlik 5'te her iki tarafın integrali alınmalıdır [8]. RC ile integral devresi oluşturuldu.

$$v_s = N_s A_m \frac{dB(t)}{dt} \quad (5)$$

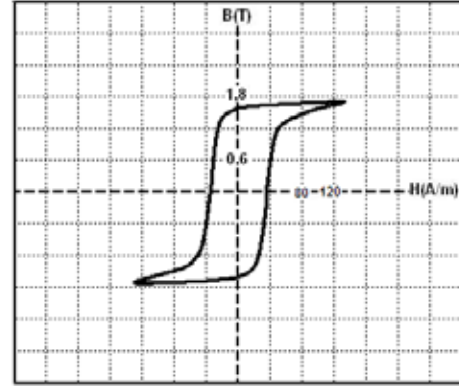


Şekil 6: Histerisiz, H ve B eğrileri eldesi için düzeneğin devre şeması.

Histerisiz, B ve H eğrileri oluşturulurken güç kaynağı frekansı 50 Hz seçilmiştir. R1 direnci üzerinden H eğrisi, C kondansatörü üzerinden B eğrisi çizdirilmiştir. M4 elektrik çeliği için B ve H eğrilerinin zamana bağlı eğrileri Şekil 7'de, histerisiz eğrisi Şekil 8'de gösterilmiştir.



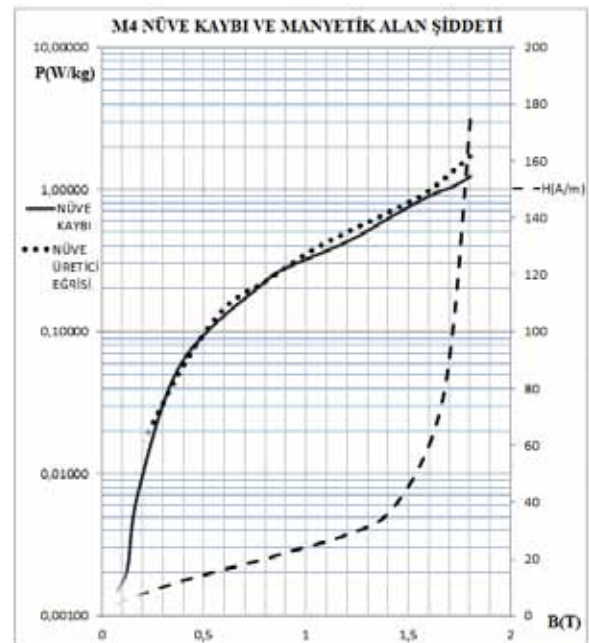
Şekil 7: M4 kalite Si-Fe nüve çeliğinin B ve H eğrileri.



Şekil 8: M4 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi.

2.3. Nüve Malzemeleri için 50 Hz Testleri

Genel çalışma frekansı olduğu için nüve üreticileri 50 Hz kayıp eğrilerini müşteriye sunarlar. Buna paralel olarak çalışmamızda 50 Hz nüve kayıp eğrileri elde edilmiştir. SST ile yapılan ölçüm sonuçlarından faydalanarak M4 nüve malzemesi için Şekil 9'da kayıp (düz çizgili eğri) ve H eğrileri (kesik çizgili eğri) gösterilmiştir. Dikkat edilirse yüksek akı değerlerinde kaybın ve manyetik alan şiddetinin daha hızlı arttığı görülür. Bunun sebebi M4 için 1,5T ile 1,7T değerindeki akı yoğunluğu Si-Fe nüve malzemeleri için doyma bölgesi olmasıdır. Nüve kaybı için yapılan ölçümler logaritmiktir. Nüve malzeme üreticileri logaritmik kayıp çizelgeleri ile ürünlerini sundukları için bu çalışmada bu uyumluluk devam ettirilmiştir. H ve B için doğrusal çizelge kullanılmıştır. Ayrıca nüve üretici firmasına ait 50 Hz frekanstaki kayıp eğrisi (noktalı eğri) eklenmiştir. Burada noktalı üretici nüve kayıp eğrisi SST ile ölçtüğümüz değerlere yakındır. Ortalama farklılık oranı %3,5'tur.



Şekil 9: M4 nüve malzemesi için kayıp ve H eğrileri.

2.4. Kayıpların Bileşenlerine Ayrılması ve Modellenmesi

Nüve malzeme üreticileri nüve kayıp bilgilerini genellikle sınırlı tablolar halinde vermektedir. Elektrik makina tasarımcıları için daha geniş alanlı B manyetik akı ve frekans aralığında kayıpları bilme ihtiyacı duyar. Bu yüzden nüve kayıp modellemesi ve kayıp katsayılarının bilinmesi önem taşır. Nüve kayıplarının modellenmesi için çalışmada toplam kayıp üç bileşene ayrılmıştır [9]. Bu bileşenler histerisiz kaybı, girdap akımı kaybı ve anormal kayıplardır (Eşitlik (6)).

$$P = k_h \cdot f \cdot B_m^n + k_g \cdot f^2 \cdot B_m^2 + k_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} \quad (6)$$

Burada k_h , k_g , k_a , B , f sırasıyla histerisiz, girdap akımı, anormal kayıp katsayıları, manyetik akının tepe değeri ve frekanstır. Katsayıları bulmak için eşitlik (6) f frekansına bölünürse eşitlik (7) elde edilir.

$$\frac{P}{f} = k_h B^n + k_a \sqrt{f} B^{1.5} + k_g f B^2 \quad (7)$$

Eşitlik düzenlenirse eşitlik 8 elde edilir.

$$\frac{P}{f} = D + G\sqrt{f} + E(\sqrt{f})^2 \quad (8)$$

Burada $D=k_h B^n$, $G=k_a B^{1.5}$ ve $E=k_g B^2$, olarak kabul edilmiştir. D , E , G katsayıları eğri uydurma yöntemiyle bulunabilir. Görüleceği üzere eşitlik (8) ikinci dereceden bir polinoma benzetildi. Sayısal analiz konusu olan eğri uydurma ile bu polinomun katsayıları bulmak mümkündür. Buradan da k_h , k_g , k_a kayıp katsayıları bulunur.

M4 için 1,5T sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde ve 50 Hz ile 500 Hz frekansları arasındaki bölgede kayıp değerleri toplanmıştır. Toplanan değerlerden $f^{1/2} - P/f$ eğrileri çizilmiştir. Eğriler üzerinden eğri uydurma yöntemi yardımıyla eğri denklemleri elde edilmiştir. Denklemler toplam kaybın üç bileşeni olan histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplarına ayrışımında kullanılmıştır. Eğri uydurma ile ikinci derece denklemler oluşturulmuştur. Kayıp bileşenleri katsayıları bu denklem katsayılarından hesaplanmıştır.

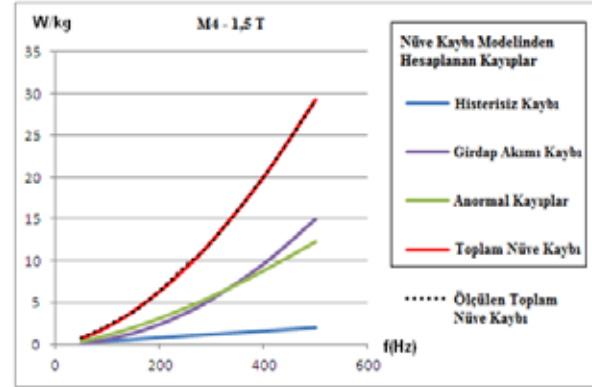
İki farklı B akı değeri için çözümlenince n üstel değeri bulunabilir. Tüm işlemlerden sonra $k_h = 4,13 \cdot 10^{-4}$, $k_g = 2,67 \cdot 10^{-5}$, $k_a = 5,99 \cdot 10^{-4}$ ve $n = 5,6$ bulunmuştur. M4 için kayıp katsayılarını kullanarak oluşturulan nüve kaybı modeli eşitlik 9 ile oluşturulmuştur.

$$P = 4,13 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot B^{5,6} + 2,67 \cdot 10^{-5} \cdot f^2 \cdot B^2 + 5,99 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (9)$$

Şekil 10'da kayıp modeli ile tahmin edilen güç ve ölçülen güç aynı grafikte görülmektedir. Toplam nüve kayıp eğrileri birbirine çok yakındır.

3. Sonuçlar ve Öneriler

SST (tek saç testi) cihazı ile mıknatıslanma akımı yönteminin beraber olduğu nüve kayıpları ölçüm çalışması yapılmıştır. Tek saç testi çalışmasında H manyetik alanı, B manyetik akı yoğunluğu, nüve kayıp ve bileşenleri SST tekniği ile ölçülmüştür.



Şekil 10: B = 1,5T'da M4 kayıp modelinden hesaplanan ve SST'de ölçülen kayıp eğrileri

Çalışma sonunda amaçlanan, mıknatıslanma akımı yönteminin uygulandığı SST ile toplam nüve kaybının hesaplanması ve daha sonra eğri uydurma yöntemi ile kayıp katsayılarının tespit edilmesidir. Çalışma sonunda M4, M5 ve M3 kalite Si-Fe çelik nüve malzemelerinin kayıp katsayıları bulunmuştur. Bulunan katsayılar kullanılarak M4, M5 ve M3 için üç ayrı kayıp modeli oluşturulmuştur. Böylece M4, M5 ve M3 için nüve kayıplarının 50 Hz-500 Hz frekanslar arasındaki değerleri belirlenmiştir. Kayıp modellerindeki f ve B değişkenlerini değiştirerek istediğimiz frekans ve manyetik akı noktasındaki nüve kaybı değerleri tahmin edilmiştir.

Elektrik makinası tasarımcısı, geniş frekans ve akı bölgesinde kayıp değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyacı gidermek için iki adet U boyunduruğa sahip SST cihazı lamine saçlardan oluşturulmuştur. SST bobin karkası üzerine mıknatıslanma akımı bobini ve B ölçme bobini sarılmıştır. Akım ve H manyetik alan şiddeti değerleri mıknatıslanma akımı yöntemi ile okunmuştur. SST ile elde edilen tüm bu değerler yardımı ile eğriler oluşturulmuştur. Oluşturulan sabit 50 Hz frekans ve değişken akıdaki eğrilerin üretici eğrilerine çok yakın olması SST yöntemi için iyi bir sonuçtur. Üretici nüve kaybı eğrisi ile elde ettiğimiz nüve kaybı eğrisi arası ortalama farklılık M4 için %3,5, M5 için %4 ve M3 için %6 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonunda geniş frekans ve akı bölgesinde nüve kayıp değerlerini elde etmek için kayıp modelleri oluşturulmuştur. Kayıp modellemeye hesaplanan nüve kaybı ile ölçtüğümüz kayıp değerleri eğri üzerinde karşılaştırılmıştır. Buna göre manyetik akı yoğunluğu azaldıkça ve frekans yükseldikçe modelleme ile ölçülen kayıp farkı artmıştır. Çünkü kayıp modellemesi yüksek sayılan 1,5T akı değerinde yapılmıştır. Çalışmada modelleme frekans aralığı 50 Hz ile 500 Hz arasıdır. Kayıp modelleme hatasını azaltmak için 50-250 Hz ve 250-500 Hz olmak üzere iki farklı frekans bölgesi için farklı kayıp katsayıları bulunmuştur. Bulunan katsayılar kendi frekans bölgesine uygulanarak yeni kayıp modellemesi elde edilebilir.

Kayıp modeli ile değişik frekans ve akılarda kayıp bileşenleri, toplam kayıp hesaplanarak bulunabilir. Model ile istenen noktada test yapmadan kayıplar bulunabilir ve bu değerler elektrik makina tasarımında kullanılabilir. Manyetik kayıpların tespitine yönelik yapılan çalışmalar daha çok manuel testler ile gerçekleştirilmiştir. Bu ise zahmetli ve zaman alıcıdır. Üreticinin SST

ölçme sitemini daha hızlı ve otomatik olarak kullanması gerekmektedir. Ayrıca tüm kayıp hesaplarının ara bir yazılım ile hızlı bir şekilde yapılarak, eğrilerin gözlemlenmesi mümkündür. İleriki çalışmada bu teknik donanımlar sisteme eklenerek ölçme hızı artırılabilir. Ayrıca görsellik, duyarlılık ve otomasyon özellikleri iyileştirilebilir. Ek olarak kayıp bileşenlerini bulmak için kullanılacak genetik iyileştirme, yapay sinir ağları gibi çözüme yönelik metotlar çalışmaya katılabilir.

4. Kaynaklar

- [1] Alkar, K. (2009) “Measuring Power Losses of Electrical Steel Sheets In One and Two Dimensional Magnetic Fields”, *M. Sc. Thesis*, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communication Engineering, Helsinki, 2009.
- [2] Zhong, J., Guo, Y., Zhu, J., Lu, H., Jin, J., “Development of Measuring Techniques for Rotational Core Losses of Soft Magnetic Material”, *Nature Sciences*, 2(1): 1-12, 2007.
- [3] IEC publ. 60404-2 Ed.3.0 (amended version Ed.3.1 (2008)), “Methods of Measurement of The Magnetic Properties of Electrical Steel Strip and Sheet By Means of an Epstein Frame”, *International Standard. Magnetic Materials – Part 2*, 1996.
- [4] IEC publ. 60404-3 Ed.2. (amended version Ed.2.2 (2010)), “Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of a Single Sheet tester”, *International standard. Magnetic Materials – Part 3*, 1992.
- [5] Sievert, J., “The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel – Survey on Methods and Situation of Standards”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215–216: 647–651, 2000.
- [6] Mthomben, L., Pillay, P., Strnat, R. M. W., “New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22: 614 –620, 2007.
- [7] Küçük, F., “Manyetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2002.
- [8] Thottiyelil, V. J., Wilson, T. G. and Owen, H. A., “High Frequency Measurement Techniques for Magnetic Cores”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5(1): 41-53, 1990.
- [9] Bertotti, G., “General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 24: 621-630, 1988.



Ahmet Demir

1977'de Bursa'da doğmuştur. 1995 yılında Bursa Demirtaşpaşa Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nden mezun olmuştur. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nin (İTÜ) Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 1999-2000 yıllarında EKA Elektronik A.Ş. bünyesinde Ar-ge mühendisi olarak çalışmıştır. Askerlik hizmetinden sonra 2003 yılında Ereğli Demir Çelik Fabrikası'nda elektrik mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Sektörde toplamda yaklaşık 12 yıl çalışma hayatı vardır. Çalışma hayatında motor ve trafo gibi elektrik makinaları konularında yoğunlaşmıştır. 2012 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Yüksek lisans çalışma konusu manyetik malzemelerde kayıpların ölçülmesi olmuştur. Halen Bülent Ecevit Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir.



Zehra Saraç

1992 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden lisansını, 1999 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden yüksek lisansını ve 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden Erlangen Üniversitesi Max-Planck grubunda yapmış olduğu doktora çalışmasını sunarak ta PhD derecesini almıştır. Doktora sonrası çalışmalar yapmak için 2005-2006 yıllarında Sabancı Üniversitesi'nde daha sonra da Kanada'da McGill Üniversitesi'nde çalışmıştır. 2007 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi'nde Yrd. Doç. Dr. olarak çalışmaya başlamıştır. 2012 yılında aynı üniversitede çalışırken doçent olmuştur. Onun araştırma ilgileri mikrodalga fotonik, sayısal holografi, interferometri, optik tomografi görüntü işleme malzeme karakterizasyonu ve elektromanyetik alanlardır.. 50'den fazla konferanslarda sunulan bildirisi ve çeşitli dergilerde yayınlanan bilimsel makalesi vardır.