



## Değişken Hız Sürücüsü ile Tahrik Edilen Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği Tespitine Yönelik Ölçüm Yöntemleri ve Standartları

### Test Methods and Standards for Determining Energy Efficiency of Converter-Fed Electric Motors

Serdar BÜYÜK<sup>1,\*</sup> , Engin ÖZDEMİR<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Elektromanyetik Laboratuvarı, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-8773-3519

<sup>2</sup> Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-0882-332X

#### Derleme Makale

Gönderilme Tarihi : 25/04/2021

Kabul Tarihi : 26/12/2021

#### Anahtar Kelimeler

DHS ile Sürülen AC Motor Verim

#### Özet

Şebeke ile beslenen ve Değişken Hız Sürücüsü (DHS) ile beslenen elektrik motorlarının verimini tespit etmek için IEC tarafından yayımlanan standartlarda test ve ölçüm metodları tarif edilmiştir. İlk olarak 2007 yılında yayımlanmış olan ve şebeke ile beslenen elektrik makinelerinin verim tespit metodlarını içeren IEC 60034-2-1 standardı üzerinde hâlihazırda laboratuvarlar, akademisyenler ve üreticiler geniş bir tecrübe kazanmıştır. DHS ile tahrik edilen elektrik motorlarının verim tespiti ve kayıpları ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Ancak DHS ile tahrik edilen motorların verim tespiti metodlarını içeren IEC 60034-2-3 standardı 2020 yılında yayımlanmış ve bu metodlarla ilgili olarak IEC 60034-2-1'deki kadar geniş bir birikim bulunmamaktadır. IEC 60034-2-3 testleri için, IEC 60034-2-1'deki temel donanımlara (dinamometre veya yük motoru, tork ve devir sensörü, en az 3 kanallı güç ölçer, sinüzoidal güç kaynağı) ek olarak standartta tanımlanan referans sürücüye ve 6 kanallı bir güç ölçere ihtiyaç vardır. Ölçüm metodları da temelde IEC 60034-2-1 ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle mevcut altyapılar yeni standarda göre modernize edilebilir. DHS ile yapılacak testlerde elektrik motorunun verim tespiti için 4 adet ölçüm metodu belirlenmiş ve bunlardan ikisi standart tarafından "tercih edilen metod" olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada bu metodların uygulamaları üzerinde değerlendirme ve bir örnek hesaplamasının uygulaması yapılmaktadır.

#### Review Paper

Received Date : 25/04/2021

Accepted Date : 26/12/2021

#### Keywords

Converted-fed A.C. Motor Efficiency

#### Abstract

Test and measurement methods for determining efficiency of converter-fed electric motors and mains supplied motors are described in IEC test standards. There has been an enormous experience of laboratories, academia and manufacturers on IEC 60034-2-1 standard, which was prepared for determining efficiency of electrical machines, first published in 2007. Some studies on determining losses and efficiency of converter-fed motors have been conducted, however there is no such a wide experience on IEC 60034-2-3, standard for determining efficiency of converter fed electric motors which was first published in 2020. In order to test motors according to IEC 60034-2-3, a so called reference converter and a six channel powermeter are needed in addition to IEC 60034-2-1 equipment (dynamometer or a load machine, torque and speed sensors, sinusoidal power supply). Measurement methods are basically similar to IEC 60034-2-1 methods, so a modification of an existing test setup is possible. 4 different methods are defined in the standard for efficiency measurements. 2 out of these 4 methods are defined as "preferred methods" in the standard. In this study, applications of these two methods are interpreted.

## 1. Giriş

Tüm dünyada sanayide tüketilen elektrik enerjisinin %70'i elektrik motoru tahrikli sistemlerde kullanılmaktadır. Bu sistemlerin tükettiği elektrik

enerjisinin dünyada tüketilen elektrik enerjisine oranı ise %40'tır [1]. Elektrik motorları 2017 yılında 735 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) diğer bir ifadeyle 8976,28 Teravatsaat (TWh) elektrik enerjisi tüketmiştir. Bu değer dünyanın en büyük elektrik üreticisi Çin'in aynı yıl ürettiği

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): [serdar.buyuk@tubitak.gov.tr](mailto:serdar.buyuk@tubitak.gov.tr)



elektrik enerjisinden (536,6 MTEP) fazladır. Ayrıca, 2011'de elektrik motorları kaynaklı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımının 6 gigaton (Gton) olduğu hesaplanmıştır. 2011 itibarıyla dünyada hizmette bulunan motorların 2,23 milyar adet olduğu ve bu motorların 15660 TWh/yıl enerji tükettiği tahmin edilmektedir [2]. 2025'te dünyadaki elektrik motoru pazarının 214,5 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmektedir. Bu pazarın 2018'deki büyüklüğü 125 milyar ABD dolarıdır [3-4]. Türkiye'de de elektrik motorlarının verimliliği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. 2015'te Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yaptığı çalışmada 887 işletmede 7,5 kW üstü motorların bilgileri elde edilmiştir. Ülkemizde net elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %36'sı elektrik motorları kaynaklıdır. Elektrik motorlarının 2015'teki toplam tüketimi ise 78,23 TWh olarak hesaplanmıştır. Motorların yılda ortalama 5456 saat çalıştığı ve ortalama yaşlarının 12 olduğu tespit edilmiştir. Bir elektrik motorunun normal şartlar altında ömrü 15-20 yıldır. Atatürk, Keban ve Karakaya barajlarının toplam elektrik üretimi 2015 yılında 15 TWh tir [5]. Bu nedenle Türkiye de dâhil olmak üzere dünyada pek çok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede özellikle sanayide kullanılan elektrik motorlarının verimlilikleri ile ilgili yasal düzenlemeler yürürlüğe girmiştir. Bunun yanında mevcut motorların kullanıma bağlı olarak verimliliklerini arttırmaya yönelik projeler ve mevcut motorların daha verimli olanlarıyla değiştirilmesine yönelik teşvik ve çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar neticesinde tüm dünyada %10'a yakın bir tasarruf beklenmektedir [6].

Elektrik motorlarının tüm dünyada tam yük altında çalışmadığı, motorların değişken hız sürücüsü (DHS) ile çalışması halinde daha az enerji tükettiği bilinmektedir [5-6]. Şekil 1'de bir alternatif akım (A.C.) motorunun etiketi görülmektedir. DHSler motorun besleme gerilimi ve frekansı üzerinde değişiklik yaparak değişken devir ihtiyacının olduğu uygulamalarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak bu sistemde de bir miktar enerji kaybı olacağından, bu kayıpların tespit edilmesi gereklidir. Bu çalışmada DHS ile çalışan A.C. elektrik motorlarında kayıplar ve verimin tespiti için standart metotlar açıklanmaktadır.

## 2. Verim Tespit Standartları

### 2.1. IEC 60034-2-1

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) elektrik motorları için verim tespit metotlarını ve verim seviyelerini ortaya koyan IEC 60034-2 serisini yayınlamıştır. IEC 60034-2-1 elektrik makineleri için verim tespit metotlarını tarif etmektedir [7]. Dünya genelinde sincap kafesli asenkron motorlar için bu standardın 2-1-1B metodu veya

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE)'nin yayımladığı IEEE 112B metodu kullanılmaktadır. Kuzey Amerika'da IEEE 112B kullanılırken Avrupa, Asya ve Güney Amerika ülkeleri genel olarak IEC standardını temel alan ulusal veya uluslar arası standartları kullanarak verim tespiti yapmaktadır. Her iki standart da kayıpların deneylerle ayrı ayrı tespit edilip hesaplanması ilkesini temel almaktadır. İki standart arasındaki fark, boşta test sırasında IEC standardının demir nüvedeki gerilim düşüşünü de hesaba katması ile sınırlıdır. Her iki standarda göre yapılan testler sonucunda verim farklarının %0,1-0,2 arasında değiştiği görülmüştür [8]. Bu nedenle kayıpların ayrıştırılarak toplanması metodunun dünyada genel kabul görmüş bir metot olduğu ifade edilebilir.

Bir motorun IEC 60034-2-1 ile belirlenen verim değeri kullanılarak IEC 60034-30-1 standardında tarif edilen IE kodu tespit edilmektedir [9]. Şekil.1'de bir A.C. elektrik motorunun etiketi (plakası) verilmektedir.



Şekil 1. Bir A.C. elektrik motorunun etiketi

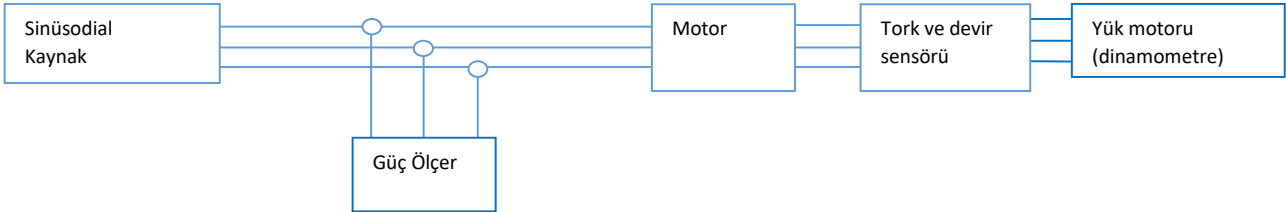
### 2.2. IEC 60034-2-3

DHS ile sürülen bir motorda, değişken yük noktalarında (tork-devir) çalışma sırasında oluşan kayıpların ölçümü için 2020 yılında IEC 60034-2-3 standardı yayımlanmıştır. Standart ilk olarak 2013 yılında IEC TS 60034-2-3 adıyla "Teknik Spesifikasyon" sınıfında yayınlamıştır. Teknik Spesifikasyon terimi henüz geliştirme aşamasında olan standart taslakları için kullanılmaktadır. Bu taslakta önerilen metotlar daha çok DHS kaynaklı Dalga Genlik Modülasyonunun (PWM) neden olduğu harmoniklerin üzerinde durmaktadır. Motorlar DHS ile çalışırken, DHS'nin çıkış geriliminin dalga şekli (genelde dalga genlik modülasyonu - PWM) nedeniyle motorda harmoniklerin oluşması kaçınılmazdır. Bu da yüksek frekanslı akımlara neden olur ve bunun sonucunda Eddy akımları kaynaklı direnç kayıpları meydana gelmektedir. 2013 tarihli taslakta IEC 60034-2-1'de verilen ve kayıpların ayrıştırılıp toplanması ilkesine dayanan 2-1-1B metodu esas alınmıştır. IEC 60034-2-1 2-1-1B metodu sinüzoidal kaynakla beslenen motorlar için geçerlidir. IEC TS 60034-2-3'te, 2-1-1B metoduna göre hesaplanan yük kayıplarına,

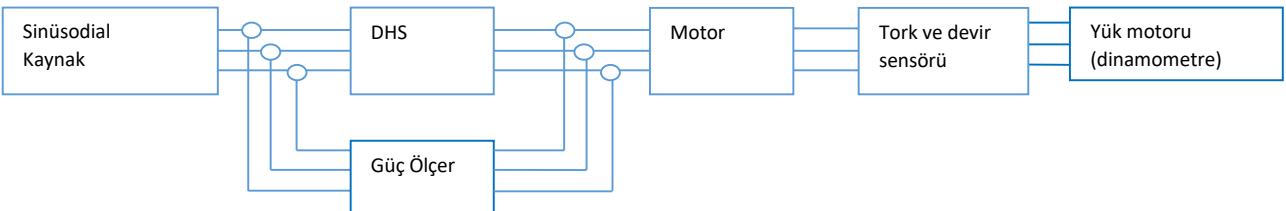
DHS ile besleme sırasında oluşan yük kayıpları eklenerek DHS kaynaklı harmonik kayıpları hesaplanmıştır. Bu kayıp da diğer kayıplara (stator kaybı, rotor kaybı, demir kaybı, sürtünme ve ventilasyon kayıpları) eklenerek nihai toplam kayıp hesaplanmıştır [9]. Literatürde 2013 tarihli ilk yayında standardın önerdiği metotlarla ilgili çeşitli değerlendirmeler bulunmaktadır. Bu yayında DHS ile kayıplar deneyler yoluyla bulunurken, DHS'nin yalnızca motorun anma gerilimi ve frekansına ayarlanması; farklı tork ve devir sayılarındaki kayıpların dikkate alınmaması eleştiriler almıştır. Sanayide kullanılan DHS tahrikli motorların büyük bölümünün değişken devir ve yük ihtiyaçları için kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda bu eleştirinin yerinde olduğu söylenebilir. Bunun yanında, DHS'nin neden olduğu harmonik kaynaklı kayıpların IEC 60034-2-1, 2-1-1B metodu temel alınarak ayrıştırılması karmaşık bir dizi matematiksel işlem gerektirmektedir. İşlem dizisinin yol haritasının net çizgilerle belirlenmemesi de önemli bir sorun olarak görülmektedir. Tüm bu olguların laboratuvarlar ve işletmeler arasında yorumlama farklarına neden olduğu ve bunun sonucu olarak karşılaştırılabilirlik ve tekrarlanabilirlik koşullarını sağlıklı bir şekilde karşılayamadığı görüşleri ortaya çıkmıştır. [10-13]. Standart komitesi bu görüşleri dikkate almış ve 2020 yayınında doğrudan verim ölçümü (giriş-çıkış güçlerinin oranlanması) metodu tercih edilen metot olarak belirlemiştir. Bu nedenle, farklı laboratuvar ve ortamlarda yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir olması için deney sırasında uygulanacak DHS parametreleri ve test koşulları

belirlenmiştir. Örneğin anma hızı 3600 d/d ya kadar olan motorlar için DHS anahtarlama frekansı 5 kHz'den fazla olmamalı, 3600 d/d'dan yüksek olan motorlar içinse 10 kHz'den fazla olmamalıdır. Karşılaştırılabilir DHS'den daha az harmonik üreten DHSlerle test yapılması durumunda dahi referans DHSler için tanımlanmış koşullar uygulanır. Bu koşullar motorun IEC 60034-30-2 standardında tanımlanan IE kodlarına göre verim sınıfının tespiti için de gereklidir [14].

IEC 60034-2-3:2020 standardında 4 adet metot tanımlanmıştır. A ve B metotları ölçüme dayanan metotlar olmaları bakımından öne çıkmaktadır. Metot C daha çok üreticilere yöneliktir. Analitik bir modelin geliştirilmesini ve geniş bir veri seti oluşturmayı gerektirir. Metot D ise 2MW'tan büyük güçteki motorlar için hesaplama temelli olarak verimin kestirilmesi ilkesine dayanır. Standartta göre motorun veriminin tespiti (yasal düzenlemeler bakımından) için tercih edilecek olan metot A'dır. Diğer metotlar deklarasyon amacıyla kullanılabilir [15]. Bu çalışmada C ve D Metotları ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Şekil.2 ve Şekil.3'te sırasıyla IEC 60034-2-1 için deney düzeneği ve IEC 60034-2-3 için deney düzenekleri görülmektedir. Standartta 1 kV üzerindeki gerilimlerde çalışan motorlar için referans DHS tanımlanmamıştır. Bu gerilimlerde çalışan yüksek güçlü DHSlerin darbe şekillerinin üreticiden üreticiye büyük değişkenlikler göstermesi ve anma yükü ile boşa yükte harmonik kayıplarının değişmesi gerekçeleriyle bu tür sistemlerin bir bütün olarak test edilmesi önerilmiştir.



Şekil 2. IEC 60034-2-1 için deney düzeneği



Şekil 3. IEC 60034-2-3 için deney düzeneği

### 2.2.1. IEC 60034-2-3 Metot A

Piyasada birçok farklı özellikte DHS mevcut olduğundan, motorda oluşan DHS kaynaklı yüksek frekans kayıplarını ölçerken karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir

sonuçlar elde edebilmek için IEC 60034-2-3'te "karşılaştırılabilir DHS" kavramı ortaya atılmıştır. Deneyler göstermektedir ki, DHS frekansı aynı kaldığı sürece yüksek frekans kayıpları motorun tüm tork ve hız aralığında sabit kalmaktadır. Metot A; dinamometre, tork ve devir sensörü ve elektriksel güç ölçümünden faydalanarak, doğrudan giriş

gücü ve çıkış gücünün oranlanması ilkesine dayanır. Motor ısıl rejime ulaşana kadar belirlenen hız ve yükte çalışır, daha sonra 7 farklı yük noktasında motorun çıkış torku  $T_c$ , devir sayısı  $n$ , motor giriş gücü  $P_{1c}$  kaydedilir. Motorun ısıl rejime girme ölçütü motor sıcaklığının değişim hızının 1K/dakika'dan daha az olmasıdır. Motor çıkış gücü  $P_{2c}$ , Eş.(1)'de verildiği gibi hesaplanarak Eş.(2)'de verilen  $P_{1c}$  ve  $P_{2c}$  büyüklüklerinin oranlanması ile verim  $\eta$  bulunur. Bu metot doğrudan giriş çıkış güçlerinin ölçümü ve oranlanması bakımından IEC 60034-2-1'deki 2-1-1A metoduyla benzerlik göstermektedir. Ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve hassasiyetinin yeterli düzeyde sağlanabilmesi için ölçüm cihazlarının teknik gereklilikleri standartta verilmiştir. Bu değerler IEC 60034-2-3 standardına özgü olmayıp, IEC 60034 serisinin diğer standartlarında da şart koşulmaktadır.

Elektrik makinelerinin doğası olarak yük altındaki motorların parametrelerinde dalgalanmalar meydana gelebilir. Bu nedenle ölçümlerin en az 15 s boyunca yapılması gerekmektedir. Motorun sıcaklık ölçümü sargıların dirençlerinin değişimi ile yapılabileceği gibi, sıcaklık ölçümü cihazlarıyla da yapılabilir. Ancak tecrübeler sıcaklık ölçüm metodunun daha kararlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Elektriksel büyüklüklerin ölçümünde izin verilen en yüksek belirsizlik %0,2'dir. DHS ile yapılan deneylerde 50 Hz ve 60 Hz dışındaki frekanslarda da ölçüm alınacağından tüm frekans bandındaki gerilim, güç ve akım değeri en fazla %0,3 hata ile ölçülebilmelidir. Standart 0 Hz'ten – anahtarlama frekansının en fazla 10 katına kadar bant genişliği tavsiye etmektedir. Güç ölçerinin Fast Fourier Transformation (FFT) özelliği olmalıdır. Güç kaynağı frekansının ölçümü tam ölçeğin %0,1'i kadar doğrulukla ölçülebilmelidir. Devir sayısı 3000 d/dak'ya kadar en az 0,1 d/dak doğrulukla, daha yüksek hızlarda en az %0,03 doğrulukla ölçülmelidir. Tork değerinin, motorun beklenen veriminin %92'ye kadar olması halinde %0,2 doğrulukla, beklenen verim değerinin %95'e kadar olması halinde %0,1 doğrulukla, daha yüksek verimlerde ise %0,05 doğrulukla ölçülmesi gerekmektedir. Bir deneyde kullanılacak olan en düşük tork değeri ölçüm cihazının anma değerinin en %10'undan daha az olmamalıdır. Belirlenen kıstaslara göre 3 fazlı güç ölçerler piyasada bulunabilmektedir. Ayrıca tork ve devir ölçen ve doğrudan motor miline akuple edilebilen (in-line transducer) veya sadece rotor kısmı mile akuple edilebilen tork-devir ölçüm sensörleri de piyasada bulunabilmektedir.

$$P_{2c} = 2\pi T_c n \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \quad (2)$$

Standartta ölçüm yapılması gerekli görülen 7 adet yük noktasının anma hız ve anma tork değerlerine göre bağlı değerleri Tablo.1'de görülmektedir. Bu tabloda en yüksek yük noktası olarak motorun tam gücünün 0,9 katı alınmış olmasının nedeni, DHS'lerin motorların gücüne göre uygun olarak seçildiğinde, tam yükte çalışacak gücü sağlayamaması olarak görülebilir. Standartta, ayrıca ikinci bir tabloda zorunlu olmayan alternatif yük noktaları tanımlanmış ve bu tabloda en yüksek yük noktası olarak %100 devir ve %100 tork değerleri esas alınmıştır.

**Tablo 1.** 7 farklı yük noktası

Yük noktaları	n, devir (anma devir sayısına oran)	T, Tork (anma tork değerine oran)	P, güç (anma güç değerine oran)
P1	0,9	1	0,9
P2	0,5	1	0,5
P3	0,25	1	0,25
P4	0,9	0,5	0,45
P5	0,5	0,5	0,25
P6	0,5	0,25	0,125
P7	0,25	0,25	0,0625

Deney esnasında tork sensöründe bir sapma olup olmadığının kontrol edilmesi için tork sensöründeki sapma deney başında ve sonunda kontrol edilmelidir. P1 noktasında alınan ölçümlerden yapılan verim hesaplaması motorun IEC 60034-30-2 standardına göre verim sınıfının belirlenmesinde kullanılır. Diğer noktalarda alınan ölçümler ise motorun o noktalardaki çalışma süreleri göz önüne alınarak ortalama verim değeri elde etmede kullanılır.

### 2.2.2. IEC 60034-2-3 Metot B

Bu metot besleme gerilimindeki (DHS çıkışı) harmonik bileşenlerinin motorda kayıplara sebep olması ilkesine dayanır. Burada motorun kendi kayıplarına ek olarak harmonik kaynaklı kayıplar ölçülür. Bu metotta önce boşa çalışan motorun değerleri kaydedilir, çünkü standarda göre tecrübeler göstermektedir ki, harmonik kayıplar yük ile değişmemektedir (histerezis kayıpları frekans ile Eddy akımı kayıpları ise frekansın karesiyle artmaktadır) [10].

Bu metotta motorun bir sinüzoidal güç kaynağı ile beslendiğinde (IEC 60034-2-1 Metot 2-1-1B) oluşan boşa kayıplar, PCsin ve DHS ile beslendiğinde oluşan boşa kayıplar, PCcon ölçülür. Eş.(3) ile verilen iki ölçüm arasındaki fark PLHL, DHS kaynaklı harmonik bileşenlerinin neden olduğu kayıptır.

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin} \quad (3)$$

Burada PLHL DHS çıkış geriliminin harmoniklerinin motorun boşa çalışması sırasında sebep olduğu kayıplardır ve bu kayıplar yük altında değişmemektedir. Elde edilen kayıp değeri motorun IEC 60034-2-1 ile yapılan testinde (DHS olmadan sinüzoidal kaynak ile yapılan test) elde edilen kayıp ile toplanarak DHS ile çalışmada elde edilen toplam kayıp hesaplanır. Bu değer DHS'siz testteki kayba oranlanırsa motorun ilgili yük noktasındaki verim değeri elde edilir. Bu değer, metot A'da olduğu gibi yalnızca PCcon'un hesaplandığı yük noktası için geçerlidir. Bu nedenle Tablo.1'deki her bir yük noktasındaki verimin tespit edilebilmesi için ayrı ayrı testler yapılabilir. Verim  $\eta$ , Eş.(4)'te verilen oran ile bulunabilir.

$$\eta = \frac{P_{2\_60034-2-1}}{P_{1\_60034-2-1} + P_{LHL}} \quad (4)$$

Burada, P2\_60034-2-1 IEC 60034-2-1'e göre motorun çıkış gücü, P1\_60034-2-1 ise IEC 60034-2-1'e göre motorun giriş gücüdür. Rivera ve diğerleri 2019'da yaptıkları deney çalışmasında 1,5 kW gücündeki motorun DHS ile tahrik edilmesi halinde harmoniklerin neden olduğu kayıpları hesaplamışlardır. DHS tahrikli motorda harmonik kaynaklı kayıpların şebeke beslemeli motora göre %14,1 daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir [9].

### 2.2.3. IEC 60034-2-3 Metot C ve D

Metot C, Metot A'daki giriş ve çıkış güçlerinden bir veri seti elde edilerek bu verinin geniş bir güç aralığında hesaplama yapılabilmesi için bir analitik araç geliştirilmesi ilkesine dayanır. Bu metot daha çok üreticiler için uygun bir metot olarak öne çıkmaktadır.

Metot D ise 2MW'tan büyük güçteki motorlar için hesaplama temelli olarak verimin kestirilmesi ilkesine dayanır.

### 2.2.4. Herhangi Bir Yük Noktasında Verimin Hesaplanması

Yukarıdaki metotlarla elde edilen 7 noktadaki kayıpları üzerinden bir motorun DHS ile çalışması sırasında herhangi bir yük noktasındaki verim değerinin hesaplanması mümkündür. Bunun için standartta bir iterasyon metodu verilmiştir. Yük noktalarında bulunan kayıp değerleri belirli katsayılarla çarpıldıktan sonra cLn kayıp katsayıları elde

edilir. Bu katsayılar kullanılarak herhangi bir yükteki kayıp PL, Eş.(5) yardımıyla hesaplanır.

$$P_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2}n + c_{L3}n^2 + c_{L4}nT^2 + c_{L5}n^2T^2 + c_{L6}T + c_{L7}T^2 \quad (5)$$

Burada cLn iterasyonla elde edilen katsayılarıdır. Analitik metotla elde edilen bu katsayılar yerine daha yaklaşık sonuçlar verebilen nümerik yöntemlerle de bu katsayılar oluşturulup hesaplama yapılabilir.

### 3. Verim Hesaplama Örneği:

Bu çalışmada Metot A kullanılarak, etiket değerleri Tablo 2'de verilen bir elektrik motoru için verim hesaplama örneği verilmiştir. Bu hesaplamada standardın Annex B maddesinde verilen değerler ve hesaplamalar kullanılmıştır. Motorun hesaplanan referans değerleri Tablo.3'te verilmiştir.

Testlerle belirlenen 7 yük noktasındaki kayıplar Tablo.4'te verilmiştir. Bu kayıplara göre belirlenen interpolasyon katsayıları ise Tablo.5'te verilmektedir. Bu veriler ile motorun herhangi bir yük noktasındaki değerler hesaplanabilir. 400 d/d ve 1 Nm, 1400 d/d ve 5 Nm, 2800 d/d ve 15 Nm için Tablo.6'da bu değerler verilmiştir. Tablo 5'teki interpolasyon katsayıları ve Eş. (5)'te verilen eşitlikle bağıl kayıplar hesaplanabilir.

**Tablo 2.** Motor etiket değerleri

Büyükölük	Sembol	Değer	Birim
Anma hızı	nN	3000	1 d/d
Anma gücü	PN	5,5	kW

Tablo 7'de keyfi seçilen 3 adet yük noktası için hesaplanan kayıplar ve verim görülmektedir. Bu değerler üzerinden motorun bu yük noktalarındaki bağıl çalışma süreleri göz önüne alınırsa, toplam enerji kaybı PL, Eş. (6) ile, motorun çıkış gücü Po, Eş. (7) ile bulunabilir.

$$0,1 \cdot 18 \text{ W} + 0,6 \cdot 100 \text{ W} + 0,3 \cdot 411 \text{ W} = 185 \text{ W} \quad (6)$$

$$0,1 \cdot 42 \text{ W} + 0,6 \cdot 733 \text{ W} + 0,3 \cdot 4398 \text{ W} = 1763 \text{ W} \quad (7)$$

Böylece 3 adet yük noktasında dönüşümlü olarak çalışan motorun verimi  $\eta$ , Eş.(8)'deki gibi bulunabilir.

$$1763 / (1763 + 185) = 90,5 \% \quad (8)$$

**Tablo 3.** Motor referans değerleri

Büyükölük	Sembol	Değer	Birim
Referans hız	nref	3000	d/dak
Referans güç	Pref	5500	W
Referans tork	Tref	$= (5500 \text{ W}) / (2\pi \times 3000 / 60 \text{ 1/s})$ $= 17,5$	Nm

#### 4. Sonuç

Zamanla artan farkındalık ve tasarruf zorunlulukları nedeniyle, sanayide DHS ile tahrik edilen elektrik motorlarının kullanımının artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle sadece tam yükte değil, farklı yük noktalarındaki kayıplar ve verimin işletmeler tarafından dikkatle takip edilmesi beklenmektedir. Şebekeden beslenen motorlar için yayınlanan ve piyasa denetimi otoriteleri tarafından yaygın olarak kullanılan/yararlanılan IEC 60034-30-1 standardında şebeke beslemeli motorlar için IE kodları tanımlanmıştır. IE kodlarına karşılık gelen verim değerlerinin tespit edilmesi için IEC 60034-2-1 geçerlidir. Yakın gelecekte de benzer modelin IEC 60034-2-3 ve IEC 60034-30-2 arasındaki ilişki ile kurulacağı söylenebilir.

IEC 60034-2-3 standardı DHS ile tahrik edilen A.C. elektrik motorlarının verimlerinin belirlenmesinde karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesini sağlayan metotlar sunmaktadır. Bu metotlar standart

tarafından belirlenmiş 7 adet yük noktasındaki değerler üzerinden motorun herhangi bir yükteki veriminin ve kayıplarının kestirilebilmesi için referans yöntemler önermektedir. Bu metotların karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir olması deney sonuçlarının doğruluğu ve tutarlılığı açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle standardın taslak sürümünde önerilen bazı metotlar standardın ilk resmi sürümünde yeniden düzenlenmiştir. Ancak yine de standardın ilk sürümü olması nedeniyle geliştirmelere de açıktır. Gelecekte kuruluşların standart üzerinde tecrübe kazandıkça yeni metotlar geliştirmeleri veya mevcut metotlar üzerinde iyileştirme yapmaları beklenmektedir.

Bu çalışmada standartta tanımlanan deney metotları hakkında bilgi verilmiş ve standardın tercih edilen metot olarak tanımladığı Metot A kullanılarak örnek bir motorun 3 farklı yük noktasındaki verim değerlerinin hesaplama yöntemi verilmiştir. Örnek hesaplamalardan da görüldüğü üzere, DHS ile sürülen elektrik motorlarında sürücü frekansından kaynaklanan harmonik akımlar, motorun temel kayıplarına ek olarak yeni kayıplara neden olmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda DHS ile sürülen farklı güçlerdeki elektrik motorlarının kayıplarının analizi yapılarak bir karşılaştırma yapılabilir. Ayrıca karşılaştırma sonuçlarından faydalanılarak saha koşullarında tespit edilebilmesi için yöntemler araştırılabilir.

**Tablo 4.** 7 adet yük noktası için kayıplar

Yük noktası	Sembol	Kayıp W	İnterpolasyon için bağıl kayıp
Yük noktası 1 (2700 d/d, 17,5 Nm)	P1	466	$= 466 / 5500 = 0,08473$
Yük noktası 2 (1500 d/d, 17,5 Nm)	P2	302	$= 302 / 5500 = 0,05491$
Yük noktası 3 (750 d/d, 17,5 Nm)	P3	237	$= 237 / 5500 = 0,04309$
Yük noktası 4 (2700 d/d, 8,75 Nm)	P4	248	$= 248 / 5500 = 0,04509$
Yük noktası 5 (1500 d/d, 8,75 Nm)	P5	160	$= 160 / 5500 = 0,02909$
Yük noktası 6 (1500 d/d, 4,38Nm)	P6	96	$= 96 / 5500 = 0,01745$
Yük noktası 7 (750 d/d, 4,38 Nm)	P7	69	$= 69 / 5500 = 0,01255$

**Tablo 5.** İnterpolasyon katsayıları

Katsayı	Sembol	Değer
İnterpolasyon katsayısı 1	cLn	-0,000157
İnterpolasyon katsayısı 2	cLn	0,005375
İnterpolasyon katsayısı 3	cLn	0,016506
İnterpolasyon katsayısı 4	cLn	0,010439
İnterpolasyon katsayısı 5	cLn	0,025448
İnterpolasyon katsayısı 6	cLn	0,041480
İnterpolasyon katsayısı 7	cLn	-0,004808

**Tablo 6.** 3 adet yük noktasında hesaplanan çıkış gücü

Hız d/d	Tork Nm	Bağlı çalışma süresi (%)	Hesaplanan Çıkış gücü W
400	1	10 %	$= 2\pi \cdot 400 / 60 \cdot 1 = 42$
1 400	5	60 %	$= 2\pi \cdot 1400 / 60 \cdot 5 = 733$
2 800	15	30 %	$= 2\pi \cdot 2800 / 60 \cdot 15 = 4 398$

**Tablo 7.** 3 adet yük noktasında hesaplanan kayıplar

Bağlı Hız	Bağlı tork	Bağlı kayıplar	Kayıplar W	Verim %
$= 400 / 3 000$ $= 0,1333$	$= 1 / 17,5$ $= 0,0571$	0,0032	$= 0,0032 \cdot 5500$ $= 18$	$= 42 / (42 + 18)$ $= 70,3 \%$
$= 1 400 / 3 000$ $= 0,4667$	$= 5 / 17,5$ $= 0,2856$	0,0182	$= 0,0182 \cdot 5500 = 100$	$= 733 / (733 + 100)$ $= 88,0 \%$
$= 2 800 / 3 000$ $= 0,9333$	$= 15 / 17,5$ $= 0,8568$	0,0747	$= 0,0747 \cdot 5500 = 411$	$= 4398 / (4398 + 411)$ $= 91,5 \%$

**Çıkar Çatışması Beyanı:**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

**Etik Standartlar Beyanı:**

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

**Kaynaklar**

- [1] Falkner H., Holt S., 2011. Walking the torque, proposed work plan for energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. OECDiLibrary.
- [2] De Almeida A., Falkner H., Fong J., Jugdoyal K., 2014. EuP Lot 30: Electric Motors and Drives Task 2: Economic and Market Analysis.
- [3] <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-electric-motor-market>, Erişim tarihi: 21.05.2020.
- [4] <https://www.imarcgroup.com/electric-motor-market>, Erişim tarihi: 21.05.2020.
- [5] Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğü, 2016. İmalat Sanayisinde Kullanılan Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporu, Ankara, Türkiye.
- [6] Esen G. K., 2015. Türkiye ve Dünyada Elektrik Motorları Enerji Tüketimi ve İlgili Teknik Mevzuat, VI. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu EVK 2015, Kocaeli, Türkiye, 4-6 Haziran.
- [7] International Electrotechnical Commission, 2014. IEC 60034-2-1, Cenevre.
- [8] Cao W., 2009. Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 3, pp. 802-808.
- [9] International Electrotechnical Commission, 2013. IEC/TS 60034-2-3, Cenevre.
- [10] Karkkainen H., Aarniovuori L., Niemela M. and Pyrhonen J., 2017. Converter-Fed Induction Motor Efficiency: Practical Applicability of IEC Methods, IEEE Industrial Electronics Magazine 11(2), pp. 45-57.
- [11] Agamloh E., Cavagnino A. Vaschetto S., 2017. Induction machine efficiency measurement using a variable frequency drive source, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, pp. 768-775.
- [12] Kärkkäinen H., Aarniovuori L., Niemelä M. and Pyrhönen J., 2016. Converter-fed induction motor losses in different operating points, 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, pp. 1-8.
- [13] Boglietti A., Cavagnino A., Cossale M. and Tenconi A., 2013. Efficiency determination of converter-fed induction motors: Waiting for the IEC 60034-2-3

standard, Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exhibition, pp. 230-237.

[14] International Electrotechnical Commission, 2016. IEC 60034-30-2, Cenevre.

[15] International Electrotechnical Commission, 2020. IEC 60034-2-3, Cenevre.