

Türkiye’de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve Şebeke Kalkışı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

Berkan Zöhra^{1*}, Mehmet Akar²

¹Elektronik ve Otomasyon Bölümü / Merzifon Meslek Yüksekokulu, Amasya Üniversitesi, Türkiye

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü / Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Türkiye

*Corresponding author: berkan.zohra@amasya.edu.tr

Özet – Elektrik motorları her gelişen ülkede olduğu gibi Türkiye’de de tüketilen elektrikte büyük paya sahiptir. Ayrıca mevcut verilere göre Türkiye elektriğinin %35’lik kısmı sanayide yoğun olarak tercih edilen asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir. Bu nedenle bu motorların daha verimli hale getirilmesi ile elektrik tüketiminde de gözle görünür azalma sağlanabilmektedir. Ayrıca büyük oranda asenkron motorların kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda daha verimli motorların tercih edilmesi durumunda, firma enerji giderlerinde de tasarruf sağlanabilmektedir.

Günümüzde elektrik motorları pazarında çalışma koşullarına cevap verebilecek birçok ürün mevcuttur ve bu ürünler uluslararası standartlar ile karakterize edilmektedir. Elektrik motoru üreticileri tarafından kabul gören bu standartlar ile piyasaya sunulan elektrik motorlarının çerçeve boyutları ve çalışma şartları gibi birçok konuda düzenleme yapılmaktadır. Yoğun olarak kabul gören IEC 60034-30-1 elektrik motoru standartlarına göre 0.12 – 1000 kW mil gücü aralığındaki elektrik motorları verimliliklerine göre; IE1 - Standart Verimlilik, IE2 - Yüksek Verimlilik, IE3 - Premium Verimlilik ve IE4 - Süper Premium Verimlilik şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Asenkron motorlar teknolojik sınırlamalar ve malzeme limitleri neticesinde IE3 ve altı verimlikte piyasa sunulabilmektedir. Buna karşın asenkron motor rotorunun yüksek performanslı sabit mıknatıslar kullanılarak modellenmesi ile yüksek verim, güç faktörü ve güç yoğunluğu sunabilen elektrik motorları üretilebilmektedir. Rotorunda sincap kafesi ve sabit mıknatısların bir arada kullanılması neticesinde hibrit bir yapıya sahip olan bu motorlar literatürde “Şebeke Kalkışı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor” olarak yer almaktadır. Asenkron motorlar gibi sağlam ve az bakım gerektiren bu motorlar, rotorunda yer alan sabit mıknatıslar sayesinde IE3 üstü standartlarda verimlilik sunabilmektedir. Diğer bir yandan bu motorların üretim süreci sabit mıknatıs nedeni ile asenkron motorlara göre daha karmaşık ve maliyetli olmaktadır.

Yapılan bu çalışma ile üretim maliyeti yüksek olan şebeke kalkışı sabit mıknatıslı senkron motorların Türkiye pazarına giriş ücretleri ve yüksek verimli çalışma koşullarında motorun ne kadar zamanda alım maliyetini amorti edeceği tartışılmıştır. Ayrıca Türkiye’deki verimli motorlara geçiş sürecine ışık tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Şebeke kalkışı, Yüksek Verimli, Senkron Motor

Abstract – Electric motors have a large share of the electricity consumed in Turkey as in every developing country. In addition, according to the available data, 35% of Turkey's electricity is consumed by asynchronous motors, which are heavily preferred in the industry. Therefore, with the introduction of these motors more efficient still, visible reduction in electricity consumption can be achieved. In addition, if more efficient motors are preferred in industrial applications where asynchronous motors are used to a large extent, the company can also save on energy costs.

Today, there are many products available in the electric motors market that can meet operating conditions and these products are characterized by international standards. With these standards adopted by electric motor manufacturers, regulation is made on many issues such as frame sizes and operating conditions of electric motors which are introduced to the market. According to the highly accepted IEC 60034-30-1 electric motor standards and according to the electric motors in the range of 0.12 – 1000 kW shaft power efficiency; It is classified as IE1 - standard efficiency, IE2 - High Efficiency, IE3 - Premium efficiency and IE4 - Super Premium Efficiency.

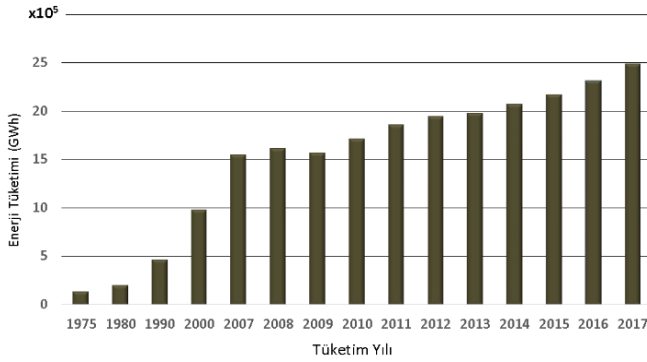
As a result of technological limitations and material limits, asynchronous motors can be offered to the market in IE3 and below efficiency. However, by modeling the asynchronous motor rotor using high performance permanent magnets, electric motors capable of delivering high efficiency, power factor and power density can be produced. As a result of the combination of squirrel cage and permanent magnets in their rotor, these motors, which have a hybrid structure are known in the literature as “Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor”. These robust and low maintenance motors, such as asynchronous motors, offer efficiency in standards above IE3 thanks to the Permanent magnets in their rotor. On the other hand, the production process of these motors is more complicated and costly than asynchronous motors because of the permanent magnet.

With this study, it was discussed how long it would take to pay the purchase cost of the motor under high production costs and the fees for the introduction to the Turkish market of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors. In addition, the transition to efficient motors in Turkey has been shed light on the process.

Keywords – Line Start, High Efficiency, Synchronous Motor

I. GİRİŞ

Gelişen her ülkede olduğu gibi Türkiye’de de enerjiye olan ihtiyaç giderek artış göstermektedir. Ülkemizin 1975-2017 yılları arasındaki yıllara göre enerji tüketiminin yer aldığı Şekil 1’deki grafikte de görüldüğü gibi bu tüketim 2017 yılı itibarı ile 25×10^3 GWh seviyelerine kadar ulaşmış durumdadır [1]. Bununla beraber sınırlı kaynaklar ile bu enerji arzının karşılanması olanaksız hale gelmektedir. Kendi enerjisini üretebilen ve sahip olduğu enerji kaynaklarını doğru kullanan ülkeler diğerlerinin bir adım önüne geçebilmektedir. Ayrıca bu durum ülkenin ekonomik kalkınmasını ve toplumsal refahını da olumlu etkilemektedir. 1970’li yıllarda ile kez tüm dünyada etkili olan enerji krizi ile birçok ülkede konu ile ilgili farkındalık oluşmuştur. Konu ile ilgili yapılan araştırma faaliyetleri günümüze değin hız kazanarak artmıştır. Günümüz ürün geliştirme süreçlerinde verimlilikte ön plana çıkan bir tasarım unsuru haline gelmiştir. Nüfustaki artış ve teknolojinin ilerlemesi gibi nedenlerden dolayı enerjiye olan ihtiyaç giderek artarken daha az enerji tüketen verimli ürünlerin kullanımı da giderek daha fazla önem kazanmıştır.



Şekil 1. Türkiye’de yıllara göre enerji tüketimi

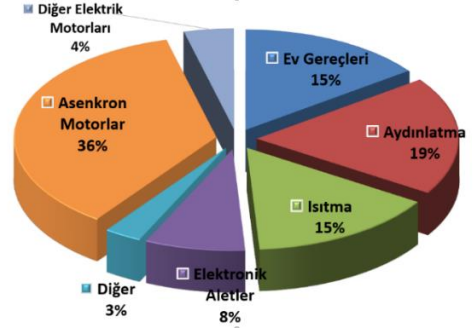
Endüstriyel uygulamalarda sağlamlık, güvenilirlik ve alım maliyetlerinin düşük olması nedeni ile büyük oranda Asenkron Motorlar (ASM) tercih edilmektedir. ASM’ler söz konusu avantajlarının yanında düşük verim ve güç faktörü sunmaları dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Şekil 2 ile sunulan Türkiye’de tüketilen elektriğin uygulama alanlarına göre dağılımı grafiğinde görüldüğü gibi tüketilen elektriğin %40’ı elektrik motorları kaynaklı iken bu tüketimin %36’lık kısmını ASM’ler oluşturmaktadır [2]. Söz konusu tüketim oranları göz önünde bulundurulduğunda endüstriyel uygulamalarda kullanılan ASM’lerin daha verimli hale getirilmesi ile ülkemiz enerji tüketiminde gözle görülür azalma sağlanabilmektedir. Ayrıca bu yolla işletme enerji giderlerinde de tasarruf sağlanmaktadır.

Günümüzde uluslararası elektrik motorları pazarı endüstrinin tüm alanlarını yakından ilgilendiren oldukça önemli bir sektördür. Elektrik motorları pazarında çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilecek birçok ürün mevcuttur ve bu ürünler uluslararası düzeyde kabul gören standart serisi ile karakterize edilmektedir [3], [4]. Hem üretici hem de tüketicileri bağlayan standart serisi ile pazara çıkan motorlara performans, gövde boyutları, işletme şartları gibi konularda alt ve üst limitler belirlenmiştir. [5]. IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından elektrik motorlarının standardize edilmesine yönelik önerilen IEC 60034 serisi standartlar [6] başta AB ülkeleri olmak üzere dünyanın büyük çoğunluğu tarafından benimsenmektedir. Söz konusu standart serisi ile 2009 yılından itibaren pazara sunulan

elektrik motorları verimliliklerine göre IE kodu ile karakterize edilerek düşük verimli motorları kademeli olarak piyasadan çekilmiştir. 2014 yılında güncellenerek bugünkü halini alan IEC 60034-30-1 (IE Kodu) standardına göre 0,12 – 1000 kW çıkış gücü aralığındaki elektrik motorları verimliliklerine göre;

- IE1 - Standart Verimlilik
- IE2 - Yüksek Verimlilik
- IE3 - Premium Verimlilik
- IE4 - Süper Premium Verimlilik

şeklinde sınıflandırılmaktadır [7].



Şekil 2. Türkiye’de tüketilen elektriğin uygulama alanlarına göre dağılımı [2]

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında sektörde yoğun olarak tercih edilen ASM’lerin teknolojik sınırlamalar ve malzeme limitleri neticesinde IE3 üstü verimlilikte üretilmediği görülmektedir [8]. Dolayısı ile mevcut elektrik motoru pazarında ASM’lerin IE3 ve altı verimliliklerde piyasaya sunulduğu bu söylemek mümkündür. Diğer bir yandan ASM rotorlarının nüvelerine yüksek performanslı sabit mıknatısların (SM) yerleştirilmesi ile motordan yüksek verim ve güç faktörü elde edilmektedir. Söz konusu yeni motor tasarımı, rotorunda hem sincap kafesi hem de SM’ler yer alması neticesinde ASM ve SM motorların avantajlarını bir arada sunabilmektedir. Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (ŞK-SMSM) olarak isimlendirilen bu motorlar ASM’ler gibi sağlam ve az bakım gerektirmelerinin yanında rotorunda yer alan SM’ler sayesinde IE3 üstü standartlarda verimlilik ve doğrusal devir sağlayabilmektedir [8], [9]. Diğer bir yandan bu motorların üretim süreci sabit mıknatıs nedeni ile ASM’ye göre daha karmaşık ve maliyetli olmaktadır.

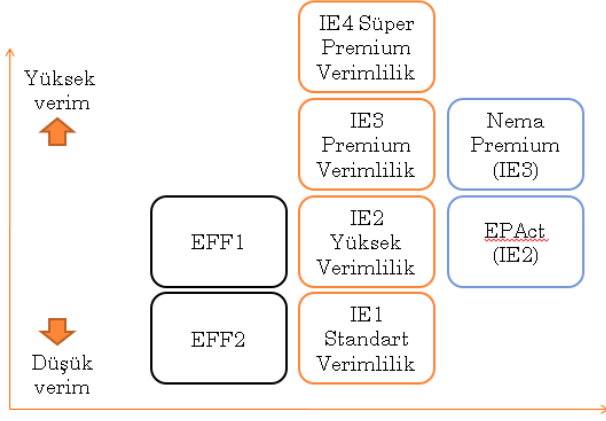
Yapılan bu çalışma ile üretim maliyetleri ASM’lere göre daha yüksek olan ŞK-SMSM’lerin yapısı, ASM’lere göre avantaj – dezavantajları, mevcut elektrik motoru pazarındaki yeri ve Türkiye pazarına giriş ücretleri tartışılmıştır. Ayrıca yüksek verimli çalışma koşullarında motorun ne kadar zamanda alım maliyetini amorti edeceği irdelenmiştir. Türkiye’deki verimli motorlara geçiş sürecine de ışık tutulmuştur.

II. ELEKTRİK MOTORLARINDA VERİMLİLİK STANDARTLARI

Dünya çapında enerji talebinin 2050’ye kadar iki katına çıkması ön görülmele beraber çevre için artan endişeler dünya genelinde daha katı enerji verimliliği düzenlemelerinin yapılmasına neden olmaktadır. Söz konusu düzenlemelerin endüstriyel işletmeler üzerindeki etkisinin azaltılması ve geçişin kolaylaştırılması ile ilgili düzenlemelere geçiş süreci belirli bir takvim çerçevesinde zamana yayarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu geçiş süreci ilk planda işletmeler üzerinde fazladan bir maliyet oluştururken, endüstriyel elektriğin büyük bölümünün bu motorlar tarafından tüketildiği göz önünde bulundurulduğunda uzun

vadede elde edilebilecek enerji tasarrufu geçiş sürecini işletmeler içinde cazip hale getirmektedir [10].

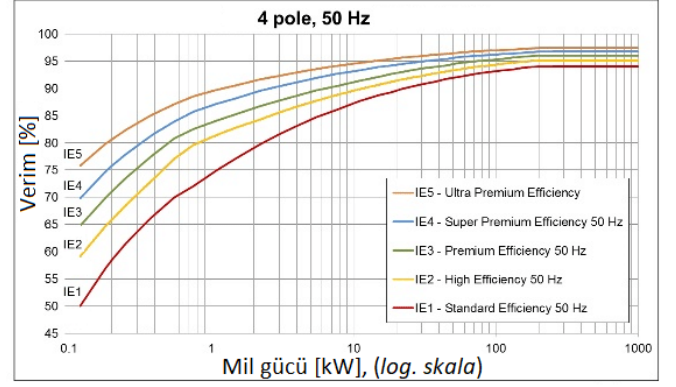
Dünya genelinde enerji verimliliği hareketine yönelik yürüttüğü politikalarla öncü konumunda olan ABD tarafından 1992 yılındaki bir kongre ile elektrikli motorlar için minimum verimlilik seviyelerine Enerji Politikası Yasasının (EPA Act) bir parçası olarak sınırlamalar getirildi [11]. 1998 yılında elektrik motoru kullanımında daha verimli motorlara geçilmesi amacı ile Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Sistemleri Üreticileri Komitesi (CEMEP) tarafından motor üreticileri için bağlayıcı olan EFF serisi üç elektrik motoru verimlilik sınıfı önerildi [12]. 2007 yılında AB tarafından çıkarılan Enerji İstikrarı ve Güvenliği Yasası (EISA) ile konu ile ilgili temel hükümlerin hazırlanmasında Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA) ile ortak çalışmalar yapıldı. Çalışmalarda hem genel amaçlı hem de özel kullanıma yönelik motorları kapsayan, verimsiz motor sistemlerinin optimize edilmesi ve daha çevreci olması amacı güden düzenlemeler önerildi. Yapılan düzenlemeler ile motor verimlilikleri Standart verimli, Enerji verimli ve Premium verimli olarak karakterize edildi.



Şekil 3. Elektrik motoru verimlilik standartlarının karşılaştırılması

Geliştirilen yenilikçi motor teknolojileri ile her geçen gün daha verimli motorların üretilmesi olanaklı hale gelirken, gelişmelere paralel olarak konu ile ilgili mevzuat ve standartlarda da güncellemelere gidildi. 2009 yılında başta AB ülkeleri olmak üzere dünyanın büyük çoğunluğu tarafından benimsen IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) 60034 serisi standartları ile motor verimlilikleri tekrar güncellenirken [6] düzenlemelerin kapsamı artırılarak performans, gövde boyutları, işletme şartları gibi konularda da alt ve üst limitleri belirlemeye yönelik sınırlamalara da yer verildi [5]. Söz konusu standart serisi ile 2009 yılından itibaren pazara sunulan elektrik motorları verimliliklerine göre IE kodu ile (IE1 - Standart Verimlilik, IE2 - Yüksek Verimlilik, IE3 - Premium Verimlilik) karakterize edilerek düşük verimli elektrik motorları kademeli olarak piyasadan çekildi. Aynı yıl AB ülkeleri için bağlayıcı olan AB Enerji ile İlgili Ürünler Direktifi (ErP) ile 1 Ocak 2015 tarihinden itibaren IE3 altı verimlilikte motorların piyasadan çekileceği ön görülürken IE2 verimlilikteki motorlara sadece ayarlanabilir hızlı sürücülerle kullanılma şartı getirildi [10]. 2014 yılında "IE4 - Süper Premium" verimlilik sınıfının da dahil edilerek güncellenen IEC 60034-30-1 (IE Kodu) standardına göre 0,12 – 1000 kW çıkış gücü aralığındaki elektrik motorların verimliliklerinde düzenlemeye gidildi [13]. Teknolojik gelişmelere paralel olarak güncellenen elektrik motoru verimlilik standartlarının karşılaştırıldığı Şekil 3'teki grafikte de

görüldüğü gibi yürürlükte olan standartlara göre en yüksek motor verimliliği "IE4 - Süper Premium" olarak ifade edilmektedir. Bununla beraber henüz resmi olmasa da teknolojik gelişmelere paralel olarak standartların bir sonraki sürümünde "IE5 - Ultra Süper Premium" verimlilik sınıfına da yer verilmesine yönelik çalışmalar yürütülmektedir [14]–[16]. Şekil 4 ile sunulan grafikte henüz resmi olmayan IE5 verimlilik sınıfının da dahil edildiği IEC elektrik motoru verimlilik limitleri görülmektedir.



Şekil 4. IEC elektrik motoru verimlilik limitleri

Konu ile ilgili Türkiye'de yürütülen çalışmalar incelendiğinde 2009 yılında yayınlanan IEC 60034-30-1 standardının 2010 yılı itibarı ile ülkemizde de yürürlüğe girdiği görülmüştür [17]. Söz konusu standart orijinal standartta yapılan güncellemeler de gözetilerek 2012 [18] ve 2014 [19] yılında tekrar düzenlenmiş ve bugünkü halini almıştır.

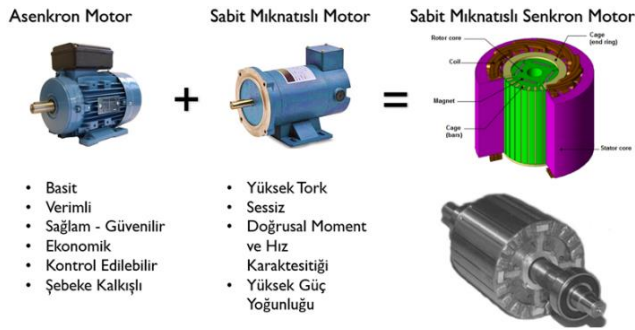
Burada üzerinde durulması gereken bir diğer konu da elektrik motoru test koşullarının belirlenmesine yönelik yürütülen standardizasyon çalışmalarıdır. Elektrik motorlarının performansının test edilmesi ve verimliliğinin belirlenmesi oldukça meşakkatli olabilen ve hassasiyet gerektiren bir konudur. Söz konusu testlerin yapılmasında kullanılan donanım, ortam değişkenleri (ortam sıcaklığı, nemi vs.) ve testleri yapan personelin yetkinliği elde edilen sonuçları da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle testlerin yapılmasında kullanılan donanım, ortam değişkenleri ve test sürecine IEC 60034-30-2 standardı ile düzenleme getirilmiştir [20], [21]. Söz konusu düzenlemeleri takiben Türkiye'de de ilgili mevzuat hazırlanmış olup 2011 yılında TS EN 60034-2-2 standardı yürürlüğe girmiştir [22].

Yukarıda sözü geçen elektrik motoru standartları büyük oranda motorun kullanımına yönelik olup motor üreticileri için bağlayıcı nitelik taşımaktadır. Buna ek olarak motorda kullanılan, sarım teli, laminasyon çeliği, izolasyon ve SM malzemeleri de belirli standartlarda piyasaya sunulmaktadır. Söz konusu standart malzemeler daha kolay ve ekonomik şekilde temin edilebilmekte, dolayısı ile elektrik motoru üreticileri tarafından da kabul görmektedir. Öyle ki standart olarak uluslararası pazara sunulmayan bir üretim materyalinin temin edilmesi hem meşakkatli hem de oldukça maliyetli olabilmektedir. Buna ek olarak söz konusu standartlarda piyasaya sunulan üretim malzemelerinin manyetik, ısıl ve mekanik başta olmak üzere birçok karakteristik özelliği temin edilen firma tarafından sağlanmaktadır. Karakteristik özellikleri iyi bilinen malzemelerin kullanılması ise tasarım sürecinde avantaj sağlamaktadır [23].

III. ŞEBEKE KALKIŞLI SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR (ŞK-SMSM)

Endüstriyel uygulamalarda sağlamlık, güvenilirlik ve alım maliyetlerinin düşük olması nedeni ile büyük oranda ASM'ler tercih edilmektedir. Bu motorların rotorunda yer alan sincap kafesi sayesinde sürücüye gerek duymadan, doğrudan şebekeden beslenerek kalkış yapabilmeleri de uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Diğer bir yandan motor milinden alınan tork kayma ile orantılı olarak üretilmekte bu da motorun senkron dönüş üretememesine neden olmaktadır. Dahası piyasa beklentilerine göre alternatif motor teknolojilerine göre daha az verim ve güç faktörü sunabilmektedirler.

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında ASM'lerin teknolojik sınırlamalar ve malzeme limitleri neticesinde IE3 üstü verilikte üretilmediği görülmektedir [8]. Dolayısı ile mevcut elektrik motoru pazarında ASM'lerin IE3 ve altı verimliliklerde piyasaya sunulduğu söylemek mümkündür. Diğer bir yandan ASM rotorlarının nüvelerine yüksek performanslı sabit mıknatısların (SM) yerleştirilmesi ile motordan yüksek verim ve güç faktörü elde edilmektedir. Söz konusu yeni motor tasarımı, rotorunda hem sincap kafesi hem de SM'ler yer alması neticesinde ASM ve SM motorların avantajlarını bir arada sunabilmektedir (Şekil 5). Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (ŞK-SMSM) olarak isimlendirilen bu motorlar ASM'ler gibi sağlam ve az bakım gerektirmelerinin yanında rotorunda yer alan SM'ler sayesinde IE3 üstü standartlarda verimlilik ve doğrusal devir sağlayabilmektedir [8], [9].



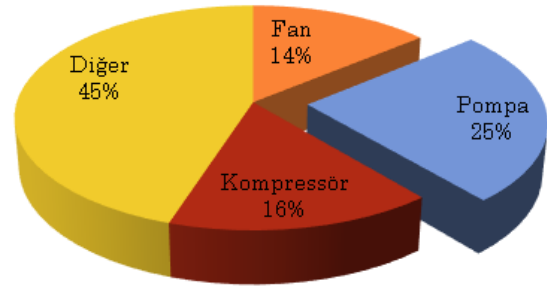
Şekil 5. ŞK-SMSM yapısı

Şekil 5 ile sunulan görselde de görüldüğü gibi rotorunda sincap kafesi ve SM yer alan ŞK-SMSM'ler ASM'ler gibi basit, sağlam ve doğrudan şebekeden kalkabilme avantajlarının yanı sıra SM motorlar gibi sessiz çalışma, doğrusal hız ve tork, yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları da sunabilmektedir.

Karakteristik açısından kalkış ve hızlanma evrelerinde ASM'ler gibi çalışan ŞK-SMSM'ler, kalkış sonrasında ASM'lerden farklı olarak SM manyetik alanının etkisi ile senkron hızda dönmeye devam edebilmektedir. Dolayısı ile bu motorlarda sincap kafesi üzerinde indüklenen kalkış torku ve SM torku olmak üzere iki ana tork bileşeni etkili olmaktadır. SM motorlar kendi sabit manyetik alanına sahip olması neticesinde daha verimli çalışabilmektedir. Diğer bir yandan motorda SM kullanılması, tutma torku ve torkta dalgalanma gibi gereçler ile motor mil torkunun kalitesinde düşüşe neden olmaktadır. Tutma torku stator manyetik alanının rotoru belirli bir konumda tutmaya çalışmasından ileri gelirken, torkta meydana gelen dalgalanmalar stator dişleri ve rotorun düzensiz manyetik karakteristiği gibi nedenlerden dolayı hava aralığında meydana gelen düzensiz akı dağılımlarından ileri

gelmektedir. ŞK-SMSM'lerde her iki durumda da gözlemlenmekle beraber SM tarafından üretilen tutma torku motor kalkışında ciddi performans kayıplarına neden olabilmektedir. Bu durum kafes torku motoru hızlandırırken (motor kalkış evresi), SM manyetik alanının rotor üzerinde bir tutma torku üreterek motoru yavaşlatmaya çalışmasından ileri gelmektedir. Bu nedenle motorun hızlanmasına olanak sağlayan kalkış torku, yük torku ve ataletin yanı sıra SM tarafından üretilen frenleme torkunu da yenmek zorundadır [24].

Motor kalkış karakteristiği göz önünde bulundurulduğunda, ŞK-SMSM'lerin motorların kalkış anında düşük yük etkisi gösteren uygulamalar için daha uygun olduğunu söylemek mümkündür. Nitekim endüstriyel uygulamalarda büyük oranda bu yük karakteristiğine sahip pompa ve fanların kullanıldığı görülmektedir [25]–[28]. Santrifüj pompaları, fan ve körikler gibi akış gücü ile çalışan uygulamalarda yük torku dönüş hızının karesi ile orantılı olarak artmaktadır [8]. Dolayısı ile tutma torkunun en etkin olduğu düşük hızlarda yük torkunun yüksek olmaması neticesinde motor çok daha kolay kalkış yapabilmektedir.



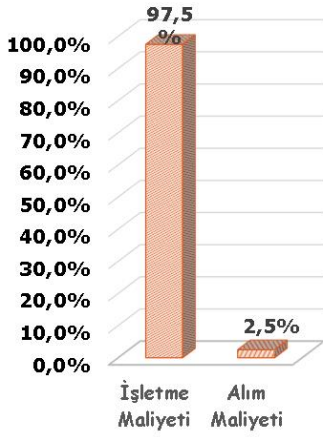
Şekil 6. Elektrik motorların kullanım alanlarına göre dağılımı

Sanayide büyük oranda pompa ve fan gibi ekipmanların kullanıldığı düşünüldüğünde ŞK-SMSM'lerin sektörde her geçen gün daha fazla yaygınlaşacağını söylemek mümkündür (Şekil 6). Söz konusu motorlarda alım maliyetleri ASM'lere göre daha yüksek olsa da düzenli çalışma rejimlerinde bir ila üç yıl arasında fazladan ödenen satın alım ücretini telafi edebilmektedir. Dolayısı ile IE4 ve üstü verimlilikte piyasa sunulan ŞK-SMSM'lerin verimli elektrik motorlarına geçiş sürecinde aktif rol oynayacağı düşünülmektedir.

Son yıllarda SM teknolojilerinde hatırı sayılır ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerleme ile SM fiyatları da olumlu etkilemiş ve söz konusu malzemelerinde daha uygun fiyatlarda temin edilmesi olanaklı hale gelmiştir. Nitekim ŞK-SMSM'lerin, geleneksel ASM'lerden farklı olarak yapısında SM içermesi nedeni ile üretim maliyetleri ASM'lere göre hala daha yüksektir. Ayrıca yapısında yüksek teknoloji SM'ler yer alması bu motorların üretim sürecinin de daha meşakkatli olmasına yol açmaktadır. Dolayısı ile bu motorlar, mevcut ASM'lere göre daha yüksek ücret ile piyasaya sunulabilmektedir. Yapılan piyasa araştırmalarında IE3 ve altı motorlarda bir üst verimlilik sınıfına geçmek için alım maliyetinde %10 civarında fark oluştuğu görülmüştür. Konu IE4 motorlara geçiş açısından değerlendirildiğinde ise henüz ülkemizde söz konusu verimlilik sınıfında mevcut bir pazar oluşmadığı görülmüştür. Ancak yapılan yurtdışı pazar araştırmaları sonucunda IE4 sınıfı motorların motor teknolojisindeki değişiklikler nedeni %20 civarında fiyat farkı ile piyasaya sunulduğu görülmüştür. Söz konusu artış oranları göz önünde bulundurularak IE3 ve altı motorlarda bir üst

verimlilik sınıfına geçmek için alım maliyetinde 22 kW bir motor için 300 ₺, 75 kW bir motor için ise 900 ₺ civarında bir fark ödendiği kabul edilmiştir (Söz konusu oran ve hesaplamalar ortalama veriler olup, üretici firma ve pazar koşullarına farklılık gösterebilmektedir). Söz konusu rakamlar göz önünde bulundurularak IE4 sınıfı bir motorun alımında IE3 sınıfı bir motora göre, 22 kW bir motor için 600 ₺, 75 kW bir motor için 1800 ₺ fark ödenmesi gerektiği kabul edilmiştir (yapılan hesaplamalara vergiler dahil edilmemiştir).

Bir elektrik motorunun toplam maliyeti alım maliyeti ile motorun işletilmesi için harcanan enerjinin toplamına tekabül etmektedir. Şekil 7 ile sunulan görselde bir kez satın alındıktan sonra uzun yıllar kullanılan elektrik motorlarının alım maliyeti ile işletme maliyeti karşılaştırılmıştır. Grafikte de görüldüğü gibi motorun alım maliyeti işletme maliyetinin yaklaşık 1/40'na tekabül etmektedir.



Şekil 7. 5.5 kW gücündeki bir motor için alım maliyeti ile işletme maliyetinin karşılaştırılması

Şekil 7 ile sunulan karşılaştırma 5.5 kW bir motor için elde edilmekle beraber hesaplanan oran motor gücü ile orantılı olarak daha da fazla artmaktadır. Aynı durum IE4 sınıfı 22 kW ve 75 kW gücündeki elektrik motorlarının kullanımında elde edilen örnek tasarruf verilerinin yer aldığı Tablo 1'de gözlemlenmektedir. Söz konusu tablo incelendiğinde referans alınan çalışma saati için IE4 sınıfı üst seviye verimliliğe sahip motorların bir yıl gibi kısa bir sürede alımda harcanan fazladan maliyeti telafi edebileceği görülmüştür.

Tablo 1. IE4 sınıfı 22 kW ve 75 kW gücündeki elektrik motorlarının kullanımında elde edilen tasarruf

		IE1'e göre	IE2'e göre	IE3'e göre
22kW 1500d/d	% η	89,9	91,3	92,7
	Tasarruf (kW/saat)	1,0673kW	0,6921kW	0,3282kW
	Tasarruf (kW/yıl)	4674,77kW	3031,40kW	1437,52kW
	Yıllık Kazanç (₺/yıl)	2.758,12 ₺	1.788,52 ₺	848,13 ₺
75kW 1500 d/d	% η	92,7	93,8	94,7
	Tasarruf (kW/saat)	2,4542kW	1,5055kW	0,7456kW
	Tasarruf (kW/yıl)	10749,40kW	6594,09kW	3265,73kW
	Yıllık Kazanç (₺/yıl)	6.342,14 ₺	3.890,51 ₺	1.926,78 ₺

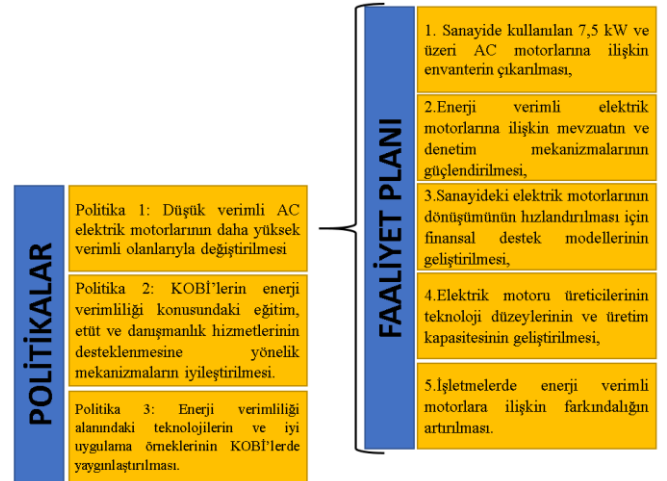
* Yıllık çalışma saati 365 gün/12 saat = 4380 saat kabul edilmiştir. Elektrik tüketimi ücretlendirilmesi vergiler göz ardı edilerek 0,59 ₺ olarak alınmıştır.

IV. VERİMLİ ELEKTRİK MOTORLARINA GEÇİŞ SÜRECİ VE TÜRKİYE'DE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Enerjiye olan talep ve çevre için artan endişeler sonucunda ülkelerin birçoğu her geçen gün daha sıkı kısıtlamalara gitmektedir. Endüstriyel motorlar elektrik tüketimi ile dünya üzerindeki dengelerde küresel düzeyde etkili olmaktadır. Bu nedenle bu motorların daha çevreci olmalarını amaçlayan birçok mevzuat ve standart geliştirme çalışması yürütülmektedir. Bu kapsamda birçok ülke yüksek verimli motorların kullanımı arttırmak ve düşük verimli motorları piyasadan çekmek amacı ile çeşitli projeler geliştirmektedir. Söz konusu atılımlar bir yandan mevcut motorların değişimine yönlentilen işletmeler üzerinde mali bir baskı oluşturulurken diğer bir yandan çeşitli destek programları ile işletme üzerindeki baskı azaltılmaya çalışılmaktadır.

Günümüzde birçok ülke çevreci teknolojilerin kullanımı ve enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik projeler yürütmektedir. Tüketiminde önemli paya sahip olan ısınma, aydınlatma ve elektrik motorları gibi konularda daha verimli ürünlere geçilmesini amaçlayan projelerde sunulan teşvikler ülkeye ve projenin içeriğine göre değişiklik göstermektedir. Bununla beraber tüm projelerde ortak hedef işletmelerin daha çevreci ve verimli olan ürünlere teşvikinin sağlanmasıdır [29]–[31].

Verimli elektrik motorlarına geçiş sürecinde yurtiçi ve yurtdışı birçok projeye rastlanmaktadır [32]. Örneğin ABD tarafından yürütülen ticari indirim programı kapsamında her beygir gücü için belirli bir oranda mali destek sağlanırken vergilendirilebilir kazancı olan enerji tasarruflu donanımların alımına yönelik yatırımlarda ilk yıl %100 oranında destek verilmektedir. İrlanda tarafından yürütülen benzer bir programda ise enerji tasarruflu donanımların alımında %100 oranında sermaye desteği sağlanmaktadır.



Şekil 8. 10. Kalkınma Planında yer alan eylem politikaları ve yürütülen faaliyetler

Konu ile ilgili Türkiye'de yapılan çalışmalar incelendiğinde elektrik motorlarına ilişkin finansal teşvikler, performans limitlerini belirleyen standartlar, eğitim ve kapasite geliştirilmesine yönelik programlar yürütüldüğü görülmektedir [33]. Onuncu kalkınma planında yer verilen ilgili özel bölümde, verimli elektrik motorlarına geçiş konusunda önem arz eden politikalar belirlenmiştir (Şekil 8). Söz konusu politikaların birinci adımında verimsiz AC elektrik motorlarının verimli olanlarla değiştirilmesi hedeflenerek bir faaliyet planı çıkarılmıştır. Söz konusu faaliyetler ile eğitim, finansal destek, envanter durumunun

belirlenmesi ile ilgili konularda çalışmalar yürütülmüştür [33]–[37].

Mevcut durumun belirlenmesine yönelik yapılan alan çalışmalarında endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılan 7.5kW ve üzeri mil gücüne sahip motorların envanter bilgileri toplanmıştır. 62 ilde yıllık enerji tüketimi 50 TEP ve üzeri olan 887 sanayi işletmesini kapsayan çalışmada 95.000 adet elektrik motorunun bilgileri toplanmıştır [38]. Çalışma sonucunda firmalarda kullanılan elektrik motorlarının ortalama yaşı 12yıl olarak hesaplanırken, söz konusu motorların %88'inin düşük verimli sınıfta motorlar olduğu görülmüştür. Dahası işletme şartları incelendiğinde ortalama yüklem oranı %77 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca söz konusu motorların %26'sının pompalarda, %25'inin fanlarda, %11'inin ise taşıyıcı sistemlerde kullanıldığı tespit edilmiştir [38].

Yürütülen faaliyet planı çerçevesinde bir sonraki adım olarak bir pilot il belirlenerek eğitim ve finansal destek çalışmaları yürütülmeye başlanmıştır. Pilot il olarak Kayseri'nin belirlendiği çalışmada her bir KOBİ işletmesi için en fazla 300.000 TL olacak şekilde kredi desteği sağlanmıştır. Söz konusu çalışmada her ne kadar geri ödeme kolaylığı sağlansa da (bir yıl geri ödemesiz, %0 faiz) değişim projesine katılım beklentinin altında kalarak proje 2016 yılında sonlandırılmıştır [38].

Kayseri pilot ili için her ne kadar başvurular beklentinin altında kalsa da çalışmalar hız kesmeyerek ikinci pilot il olarak Bursa seçilmiştir. Söz konusu proje 2017 yılında hayata geçirilmiştir.

V. TARTIŞMA

Yapılan bu çalışma ile üretim maliyeti yüksek olan ŞK-SMSM'lerin Türkiye pazarına giriş ücretleri ve yüksek verimli çalışma koşullarında motorun ne kadar zamanda alım maliyetini amorti edeceği tartışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda söz konusu motorların, sektörde yoğun olarak tercih edilen ASM'lere alternatif olabileceği, özellikle sanayide yoğun olarak kullanılan santrifüj pompaları, fan ve körükler gibi uygulamalarda enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür. Ayrıca Türkiye'deki verimli motorlara geçiş sürecine ışık tutulmuştur. Bu kapsamda elektrik motorları verimlilik standartlarının Türkiye ve dünyadaki durumu irdelenmiştir.

REFERENCES

- [1] TEİAŞ, "Türkiye ve Kişi Başına Kurulu Güç Brüt Üretim Arz ve Net Tüketimin Yıllar İtibariyle Gelişimi (1975-2017)," *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.(TEİAŞ)*, 2018. [Online]. Available: <https://www.teias.gov.tr/tr/iii-elektrik-enerjisi-uretimi-tuketimi-kayıplar-0>. [Accessed: 30-Dec-2018].
- [2] E. Akgün, "Motor Kullanılan Sistemlerde Enerji Verimliliği," in *9. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı*, 2018.
- [3] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. A. C. Fong, and C. U. Brunner, "Electric motor standards, ecodesign and global market transformation," *Conf. Rec. - Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, pp. 1–9, 2008.
- [4] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and J. A. C. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 17, no. 1, pp. 12–19, 2011.
- [5] C. U. Brunner, A. De Almeida, A. Arquít Niederberger, and H. de Keulenaer, "Standards for Efficient Electric Motor Systems SEEEM-Building a Worldwide community of Practice," *Conf. Proc. Energy-Efficiency Mot. Driven Syst.*, pp. 1443–1455, 2007.
- [6] C. U. Brunner and R. Werle, "IEC - Governments & International Organizations > Examples by industry sector: Electric motors - measuring efficiency," 2019. [Online]. Available:

- https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric_motor_s.htm. [Accessed: 30-Nov-2019].
- [7] IEC 60034-30-1, "Rotating electrical machines Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE code)," *BSI Stand.*, 2014.
- [8] A. Hassanpour Isfahani and S. Vaez-Zadeh, "Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities," *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1755–1763, Nov. 2009.
- [9] H. Behbahani and A. Sadoughi, "Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Performance and Design ; a Review," *J. World. Elect. Eng. Tech.*, vol. 4, no. 2, pp. 58–66, 2015.
- [10] Schneider Electric, "NEMA and IEC Premium Efficiency Motors Choosing the Right Motor Control and Protection Components Data Bulletin," USA, 2017.
- [11] American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), "Motor Provisions in the Energy Policy Act of 1992," 2019. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110501200008/http://aceee.org/motors/epactapp.htm>. [Accessed: 01-Dec-2019].
- [12] Siemens, "Motors Answers for industry. ABC of Motors," 2009.
- [13] Siemens AG, "Efficiency classes for IEC line motors - Drive Technology - Siemens," 2018.
- [14] V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev, S. Oshurbekov, and I. Sokolov, "Developing ultra premium efficiency (IE5 class) magnet-free synchronous reluctance motor," in *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2016, no. 1, pp. 2–7.
- [15] J. Sajip, "Ultra Premium Efficiency Motors: The IE5 Efficiency Class," 2019. [Online]. Available: <https://www.ny-engineers.com/blog/ie5-ultra-premium-efficiency-motors>. [Accessed: 01-Dec-2019].
- [16] Y. Enomoto, H. Tokoi, T. Imagawa, T. Suzuki, T. Obata, and K. Souma, "Amorphous Motor with IE5 Efficiency Class," *itachi Rev.*, vol. 64, no. 8, pp. 480–487, 2015.
- [17] TS EN 60034-30, "Döner elektrik makineleri - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu)," *Türk Stand. Enstitüsü*, 2010.
- [18] TS EN 60034-30, "Döner elektrik makineleri - Bölüm 30: Tek hız kademeli, üç fazlı kafesli endüksiyon motorlarının verimlilik sınıfları (IE kodu)," *Türk Stand. Enstitüsü*, 2012.
- [19] TS EN 60034-30-1, "Döner elektrik makineleri - Bölüm 30-1: Şebeke tarafından beslenen a.a motorlar için verimlilik sınıfları (IE kodu)," *Türk Stand. Enstitüsü*, 2014.
- [20] BS EN 60034-1, "Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance," *BSI Stand.*, 2010.
- [21] BS EN 60034-2-1, "Rotating electrical machines Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)," *BSI Stand.*, 2014.
- [22] TS EN 60034-2-2, "Döner elektrik makineleri - Bölüm 2-2: Büyük makinelerin deneylerden ayrı kayıpların tayini için belirli yöntemler," *Türk Stand. Enstitüsü*, 2011.
- [23] B. Zöhra, "Şebeke kalkışı radyal akırlı sabit mıknatıslı senkron motor tasarımı ve prototip üretimi," Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 2019.
- [24] B. Zöhra and M. Akar, "Design Trends for Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors," in *ISMSIT 2019 - 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Proceedings*, 2019.
- [25] B. N. Chaudhari, R. T. Ugale, and A. Pramanik, "Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 141–154, 2014.
- [26] J. Puranen, "Induction Motor Versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications: A Comparative Study," Lappeenranta University, Lappeenranta, 2006.
- [27] B. N. Chaudhari and B. G. Fernandes, "Performance of line start permanent magnet synchronous motor with single-phase supply system," *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 1, p. 83, 2004.
- [28] M. Melfi, R. Schiferl, and S. Umans, "Asymmetric rotor for a line start permanent magnet machine," PCT/US2015/029013, 04-May-2015.
- [29] U. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2019," 2019.
- [30] M. Karmarkar, "Energy-Efficient Electric Motors and Motor Systems Policy Guide," Hong Kong, 2019.
- [31] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems," France, 2011.
- [32] L. Gynther, S. Mustonen, and E. Saarivirta, "Policies and Measures

- for Promoting Efficient Electric Motors in Industry,” Helsinki, 2016.
- [33] M. H. Mete, “Sanayide Düşük Verimli Elektrik Motorlarının Dönüşümü Programı,” *Kalkınmada Anahtar Veriml.*, vol. 29, no. 337, pp. 4–8, 2017.
- [34] B. Çatalbaş and M. Özgül, “Sanayi Ürünleri Güvenliği ve Denetimi Genel Müdürlüğü Elektrik Motorları Projesi (S-EMOP),” *Kalkınmada Anahtar Veriml.*, vol. 29, no. 337, pp. 9–12, 2017.
- [35] G. K. Esen, “TSE Elektrik Motoru Deney Laboratuvarı Projesi Milli Katkısı ve Hedefleri,” *Kalkınmada Anahtar Veriml.*, vol. 29, no. 337, pp. 15–18, 2017.
- [36] T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Elektrik Motorları Envanter Analizi,” *Kalkınmada Anahtar Veriml.*, vol. 29, no. 337, pp. 32–34, 2017.
- [37] F. Çil and G. S. Torun, “KOBİ’lerde Enerji Verimli Motorların Teşvik Edilmesi Projesi,” *Kalkınmada Anahtar Veriml.*, vol. 29, no. 337, pp. 38–39, 2017.
- [38] T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Anahtar Dergisi - Motor Dönüşüm Programı,” *Anahtar*, vol. 337, 2017.