AC İndüksiyon Motorlarında Frekans Konvertörü Kullanımı

1. Giriş

Bir elektrik motoruna çeşitli şekillerde yol verilebilmektedir. Bu yol verme yöntemleri bir başlangıç torku oluşturarak, motoru nominal yükteki hızına ulaştırmak amacıyla motora yeterli akımı sağlamak için kullanılmaktadır. Her bir metodun kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunların içerisinde en büyük enerji tasarrufunu frekans konvertörleri sağlamaktadır [Resim-1].

Resim-1: Frekans Konvertörleri

Elektrik motorlarına yol vermek için genellikle üç çeşit yöntem kullanılmaktadır.

- Tam voltajla yol verme,
- Azaltılmış voltajla yol verme ve
- Frekans konvertörüyle yol verme.

En basit yol verme şekli olarak tam voltajla yol vermede, motor kontaktör kullanarak yol almakta ve şebekeden motor klemensine tam şebeke voltajı uygulanmaktadır. Azaltılmış voltajla yol verme ise oto transformatör, yıldız-üçgen veya yumuşak yol verici gibi birkaç yolla yapılabilmektedir.

Her bir yol verme yöntemine göre bir motor için tam yükteki kalkış akımlarının ve momentlerinin mukayesesi aşağıdaki tabloda verilmiştir **[Tablo-1]**. Tablodan da görülebileceği üzere, frekans konvertörü kullanılarak yapılan yol vermede kalkış amperi nominal akım kadar iken, sağlanan tork da nominal momentin yaklaşık 1,5 ile 2,0 katı arasında değişebilmektedir **[1] [2] [3]**.

Yol Verme Metotları		Nominal Akıma Göre Yaklaşık Kalkış Akımı Katı [A]	Nominal Momente Göre Yaklaşık Kalkış Momenti Katı [Nm]
Doğrudan		4,0-8,0	1,5-3,0
Azaltılmış Voltaj	Oto Transformatör	1,7-4,0	0,4-1,9
	Yıldız-Üçgen	1,3-3,0	0,5-1,0
	Yumuşak Yol Verici	2,0-6,0	0,5-1,0
Frekans Konvertörü		1,0	1,5-2,0

Tablo-1: Yol Verme Metotlarına Göre Akım-Tork İlişkisi

2. Frekans Konvertörü

2.1 Frekans Konvertörü Nedir?

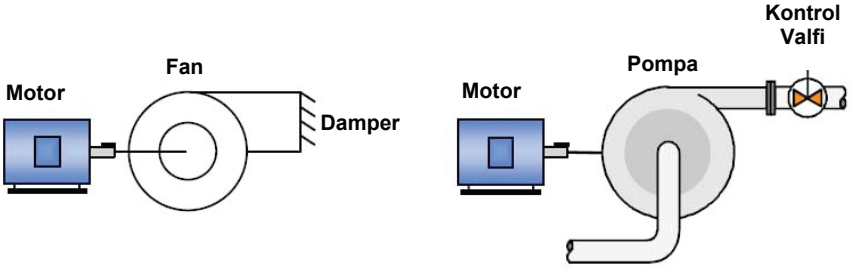
Frekans konvertörlerinden önce elektrik motorlarının hızını değiştirme kabiliyeti kasnaklar, dişli kutuları, elektromanyetik frenler vb şekillerde sağlanabilmekteydi. 1960'larda ilk elektronik cihazlar sahneye çıkmış ve hem BJT'ler (Bipolar Junction Transistor) ve SCR'ler (Silicon Controlled Rectifier) hem de GTO'lar (Gate Turn Off Tyristor) ile donatılmış doğrudan frekans çeviriciler (Cyclo-converters) ve frekans konvertörleri pazarda satılmaya başlanmıştır. Bu cihazlar sadece çok düşük frekanslarda ve genellikle 600 Hz'e kadar anahtarlanabilmekteydiler. 1990'lı yıllarda, IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) anahtarlama frekansını 20 kHz'e çıkararak sürücü teknolojisinde çok büyük bir gelişme yaratmışlar ve bunun sayesinde de harmonikler ve duyulabilir gürültü azaltılmıştır. Bugün hemen hemen tüm frekans konvertörleri IGBT'li olarak üretilmektedir. Bu yeni teknoloji uzun süre gömülü halde duran rulman problemlerinin tekrar canlanmasına neden olmuştur.

Bir indüksiyon motorunun hızı, doğrudan AC şebekenin frekansı ile orantılıdır. Şebekenin frekansını ayarlamak mümkün olabilseydi, motorun hızını da kontrol etmek mümkün olabilecekti. Frekans konvertörü, motorun hızını kontrol etmek için kullanılan bir yol verme yöntemidir. Frekans konvertörleri, sabit frekanslı AC gücün girişini, değişken frekanslı çıkışa çeviren elektronik cihazlar olup motora sağlanan elektrik gücün frekansını kontrol ederek, alternatif akımın döner hızını, böylece de motorun hızını kontrol edebilmek için kullanılmaktadırlar [4].

2.2 Frekans Konvertörünün Faydaları

Bir frekans konvertörü;

- Kapasite ihtiyacını kontrol ederek % 50'ye kadar enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.
- Diğer bütün yol vericilere nazaran en düşük kalkış akımına sahiptir.
- Motordaki ve yük sistemindeki termal ve mekanik stresleri azaltmakta, böylece sistemin ömrünü uzatmaktadır.
- Kurulumu, şebekenin frekans konvertörüne bağlanması kadar basittir.
- Harici güç faktörü, düzeltme kapasitörlerini ortadan kaldırarak, yüksek güç faktörü sağlamaktadır.
- Voltaj düşümlerini ve güç kesintilerini azaltarak daha düşük toplam güç (kVA) sağlamakta, böylece sistemde bulunan diğer makineler daha az etkilenmektedir.
- Motorun mekanik kabiliyeti ile sınırlı kalmak kaydıyla, yüksek hız kabiliyeti sağlamaktadır.
- Pahalı ve enerji israfına yola açan kontrol valfleri ve çıkış damperi gibi kısma mekanizmalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [Şekil-1].

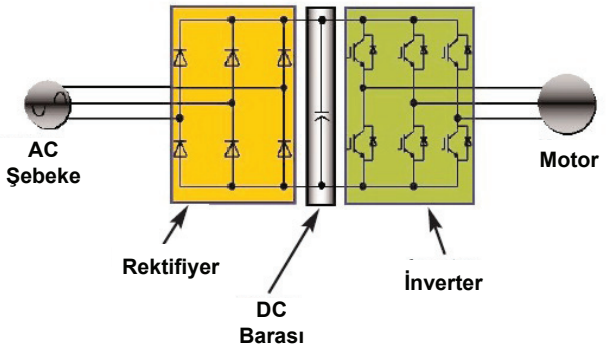


Şekil-1: Fan Damperi ve Pompa Kontrol Valfi

2.3 Frekans Konvertörünün Ana Yapısı

Bir frekans konvertörü üç ana bölümden meydana gelmektedir **[Şekil-2]:**

- Rektifiyer (Doğrultucu)
- Doğru akım (DC) dağıtım barası
- İnverter (Evireç)



Şekil-2: Frekans Konvertörünün Ana Yapısı

Rektifiyer, frekans konvertörüne gelen AC gücü DC güce çevirmekte kullanılmaktadır. Güç rektifiyerden geçtikten sonra DC barasında stoklanır. DC bara, rektifiyerden gelen gücü stoklayan ve daha sonra da invertör bölümüne gönderen kapasitörleri içermektedir. Frekans konvertörünün son bölümü inverterdir. İnverterde, gücü motora gönderen transistorlar bulunmaktadır.

Modern frekans konvertörlerinde bu amaçla IGBT'ler kullanılmaktadır. IGBT'ler saniyede binlerce kez anahtarlama (açkapa) yaparak gücün hassas bir şekilde motora dağıtılmasını sağlamaktadır. IGBT'ler, istenilen frekansta akım sinüs dalgası simülasyonu için PWM (Pulse Width Modulated) metodunu kullanmaktadır **[Resim-2] [5].**

Resim-2: IGBT-Insulated Gate Bipolar Transistors

Azalan maliyetler, enerji bilinci ve süreçlerde sağlanan gelişmeler nedeniyle, motor sistemlerinde frekans konvertörü kullanımı 1990'lı yıllardan itibaren artarak devam etmektedir. IGBT kullanan PWM teknolojisinin ortaya çıkışı ile birlikte, frekans konvertörü boyutları ve maliyetleri büyük oranda düşmüştür. Sağladıkları enerji tasarrufu sayesinde iki-üç yıl içerisinde kendilerini geri ödeyebileceklerinin anlaşılması ile birlikte frekans konvertörlerinin kullanım hızı daha da artmıştır.

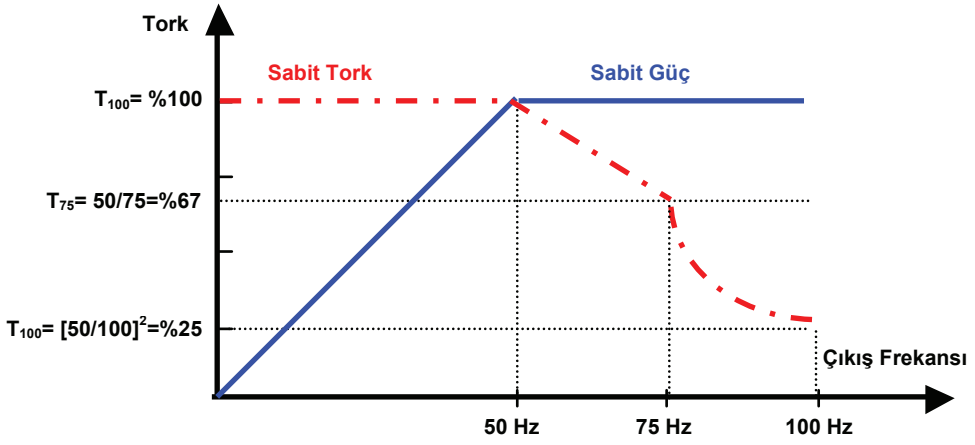
Birçok endüstriyel şirket, hızı ya da basıncı değiştiren kullanışsız veya güvenilmez mekanik sistemlerin çoğunu ortadan kaldıran frekans konvertörlerinin, üretimde duruşları ve bakım maliyetlerini azaltarak, üretimi artırabileceğini fark etmiştir **[6].**

Frekans konvertörleri, pompa ve fan uygulamalarında en büyük enerji tasarrufu sağlayan sistemlerdir. Bir çok tesiste, santrifüj pompaları ve fanlar sabit hızda çalışmaktadır.

Frekans konvertörleri, pompa ve fan uygulamalarında en büyük enerji tasarruf sağlayan sistemlerdir. Bir çok tesiste, santrifüj pompaları ve fanları sabit hızda çalışmaktadır. Geleneksel olarak, akışkan hızı mekanik bir sistem tarafından değiştirilmektedir. Frekans konvertörü ile motor hızı elektronik olarak değiştirilebilmektedir. Bir pompa veya fanın hızını istenilen orana ayarlayarak, çok önemli miktarda enerji maliyetini azaltılabilmektedir.

Geleneksel olarak, akışkan hızı mekanik bir sistem tarafından değiştirilmektedir. Frekans konvertörü ile motor hızı elektronik olarak değiştirilebilmektedir. Bir pompa veya fanın hızı istenilen orana ayarlanarak, çok önemli miktarlarda enerji maliyeti azaltılabilmektedir.

Küçük güçlerdeki motorlar, nominal hızın iki katında (% 200'ünde) çalışabilecek kabiliyette tasarlanırlarken, motorun gücü arttıkça, motorun yüksek hız kaldırma kabiliyeti sıfıra kadar düşmektedir. Nominal hızın üstünde, frekans konvertörü ve motor sistemi sabit güç modunda çalışmaktadır. Tork, % 150'ye kadar yüksek hızlarda doğrusal olarak, bunun üzerindeki hızlarda ise genellikle V/Hz oranının karesi olarak düşmektedir **[Şekil-3] [7]**. Nominal hızdan daha düşük hızlarda ise frekans konvertörü ve motor sistemi, sabit tork modunda çalışmaktadır.



Şekil-3: Frekans Konvertöründe Frekans-Tork Karakteristiği

3. Frekans Konvertörünün Elektrik Motoruna Olan Etkileri

Frekans konvertörlerinin kullanımının artması ile birlikte yeni elektrik motoru problemleri de ortaya çıkmaktadır. Bunlar, PWM çıkış formundan gelen; yansıtıcı dalgalar, harmonikler, motorun ısınması, mil akımları vb. tür problemlerdir. PWM teknolojini kullanan frekans konvertörleri, bir elektrik motorunun elektriksel, mekaniksel ve termal kapasitesini aşağıdaki konularda doğrudan etkilemektedir [8].

Frekans konvertörü ile kullanıldığında, frekans konvertörünün çıkış dalgalarındaki harmonik dalga formlarının içeriği nedeniyle, elektrik motorlarına gelen akımın neden olduğu harmonik voltajların ve akımların ana etkisi, harmonik frekanslarda demir ve bakır kayıpları nedeniyle sıcaklığın ve de dolayısıyla kayıpların artmasıdır. Böylece harmonik bileşenler, makinanın verimliliğini ve tork üretimini etkilemekte, motorun aşırı ısınmasına neden olmaktadır [9].

Frekans konvertörü taşıyıcı frekanslarına bağlı olarak, motor klemensinde pik voltajlar meydana gelmektedir. Motor klemensinde saniyede 2.000 ile 20.000 kere arasında tekrarlanan voltaj pikleri, koronaya (havadaki nitrojenin iyonlaşması sonucunda ozon ve nitrik asit oluşmasına ve oluşan mikro arklar nedeniyle de sargı tellerinin yalıtımlarında zayıflama meydana gelmesine) neden olmakta ve kısmi boşalmalar nedeniyle sargıların yavaş yavaş dielektrik direncini zayıflatarak, motoru yanmaya doğru götürmektedir [10].

Bir motorun dielektrik dayanımı, kullanılan yalıtım kalınlığına ve tipine, verniğin kalitesine, sargı geometrisine, sıcaklığa ve neme bağlıdır. Nem ne kadar yüksekse, dielektrik dayanımı da o kadar az olacaktır. Bunun yanında, motorun dielektrik dayanımı yüksek sıcaklıklarda daha da düşecektir.

Bir invertör tarafından beslenen bir standart motorun ömrü % 75 kadar azalabilmektedir. Bundan dolayı, düşük harmonik içerikli invertör ile birlikte, geliştirilmiş yalıtımlı, düşük ve homojen iç sıcaklık dağılımına sahip motorlar seçilerek kullanılmalıdır.
Ortalama olarak, frekans konvertörü ile beslenen motorlar, yükte ve nominal hızda 15 °C civarında daha fazla sıcaklık artışına sahiptirler (Motorun yalıtım sınıfının limitinin üzerindeki her 10 °C'lik artışın motor ömrünü yarıya düşürdüğü bilinen bir gerçektir).

3.2 Cebri Fan Kullanım İhtiyacı

Harmonikler, motorda bu şekilde aşırı sıcaklık yarattığı için frekans konvertörü ile sürülen çoğu motor, rotor hızından bağımsız harici bir fan ile yani cebri fan ile soğutulmaktadır. Motorun hızı düştüğünde, soğutma kapasitesi de düşmektedir [11]. Harmonik bozulma, hava aralığında titreme yaratan düzenli olmayan akı dağılımına da neden olmaktadır. Motorun soğutması, motoru so-

Motorun hızı düştüğünde, soğutma kapasitesi de düşmektedir. Frekans konvertörü ile sürülen motorlarda harmonikler motorda aşırı sıcaklık yarattığı için hem soğutma ihtiyacının karşılanması hem de frekans konvertörünün yarattığı aşırı sıcaklığın motordan atılarak motorun soğuma ihtiyacının giderilmesi için motorlar rotor hızından bağımsız cebri fan ile soğutulmakta ya da motor büyüklüğü artırılmaktadır. ç

ğutan fanın hızı doğrudan mil hızı ile orantılı olduğu için motor hızının bir fonksiyonudur.

Düşük hızlarda motorun soğuması çok dikkat edilmesi gereken bir husustur. Düşük hız nedeniyle motorun kendi fanının yeterli soğutma sağlayamadığı durumlarda cebri fan kullanarak ya da motor büyüklüğü artırılarak motorun soğuma ihtiyacı giderilmelidir. Bazı invertör ile sürülmeye uygun motorlar, üreticileri tarafından 1000:1 azalma oranını karşılayabilen fanlarla satılmaktadır.

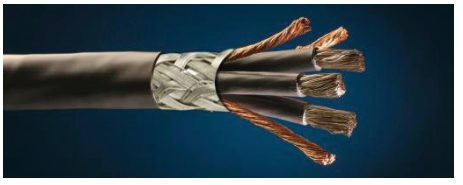
3.3 Voltaj Yansıması

Hızlı yükselen voltaj darbeleri sargılarda bobinler ve sipirler arasında düzenli olmayan voltaj dağılımlarına neden olmaktadır. Yükselme süresi ne kadar kısalırsa, bobinler ve sipirler arasındaki voltaj da o kadar yükselmektedir. Bu durum, elektrik motoru klemens voltajının frekans konvertörünün DC bara voltajını 1,9 kat geçtiği durumlarda voltaj yansıması olarak ortaya çıkmaktadır.

Bugün elektrik motoru üreticileri tarafından, frekans konvertörü ile sürülecek motorlar bobinler arası sargı yalıtımı 2,0 µs veya daha fazla sürede 1500 V'a kadar dayanabilecek şekilde tasarlanmaktadır.

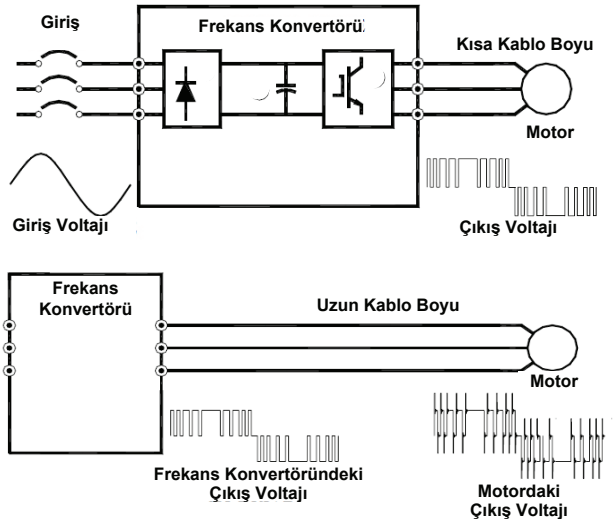
3.4 Kablo Uzunluğu

Inverterden gelen aşırı (dik) ön darbeler, elektrik motoru yalıtımının dayanabileceği voltajı ve yükselme zamanını geçtiğinde, sargılarda genellikle kısmi boşalma periyodunu takip eden, bobinler veya sipirler arası kısa devreler ile sonuçlanan yansıtıcı dalga arızaları meydana getirmektedir.



Resim 3: Frekans Konvertörü Kablosu

Motor yalıtımının bozulmasına neden olan bir diğer faktör, frekans konvertörü ile motorun birbirine bağlandığı motor kablosunun uzunluğudur [Resim-3]. Bu durum, motorun empedansının sargı telinin empedansından çok daha fazla olduğu durumlarda ortaya çıkan potansiyel bir sorundur. Frekans konvertörünün orijinal olarak ilettiği dalgalara ilave olarak yansıtıcı dalgalar meydana getirmektedir. Böylece, sonunda arızaya neden olacak olan, motorun ya da kablonun yalıtım kabiliyetini aşan iki kat genlikli ani voltaj yükselişi yaratmaktadır. Küçük motorlarda motorun empedansının büyük motorlardan daha fazla olması nedeniyle, bu problem daha çok küçük motorlarda meydana gelmektedir. Bu problemi azaltabilmek için daha kaliteli kablo ve motor yalıtımı kullanmak gerekmektedir **[12].**



Şekil-4: Frekans Konvertöründe Kablo Boyunun Etkisi

Frekans konvertörünü motora bağlayan kablonun uzunluğu 60 metrenin üzerine çıktığında, sinüs dalgaları için önemsiz olan indüktansın ve kapasitansın küçük değerleri, 2000 V'un üzerine çıkabilen tepe voltaj çınlamasına ve yansıyan dalgalara neden olabilmektedir [Şekil-4].

3.5 Gürültü Seviyesi

Frekans konvertörü ile çalıştırıldığında, harmonikler nedeniyle, motorun gürültü seviyesi artmaktadır. PWM'li frekans konvertörüyle sürülen motorlarda morun gürültü seviyesi, motorun nominal hızında 2,0 ile 15,0 dB arasında artmaktadır.

3.6 Rezonans ve Vibrasyon

Frekans konvertörü ile sürülen motorlarda, motor milinde tork dalgalanmaları meydana gelmektedir. Makinanın doğal

frekansına yakın çalıştırılmaması ve dolayısıyla oluşacak rezonanstan kaçınabilmek için frekans konvertörleri önceden programlanabilmektedir. Buna rağmen, harmonikler motorda farklı frekanslarda meydana gelmekte ve motorun vibrasyon seviyesini tümüyle artırabilmektedir. Vibrasyonun ciddiyetine bağlı olarak, mil voltajı üreten düzensiz bir manyetik alan oluşabilmektedir. Bunun ötesinde, motorun mekanik parçalarının ömrü büyük oranda azalabilmektedir. Daha iyi balans ve daha iyi mekanik katılık (rijitlik-esnemezlik) ile bu durumun üstesinden gelinebilmektedir. İlave olarak, motorların çoğu nominal hızlarının altında çalıştığı için, doğal frekansları 50Hz'in üzerinde olmalıdır.

3.7 Taşıyıcı Frekanslar

PWM'nin ürettiği darbe frekansları 3,5 KHz ile gürültü olarak kabul edilebilecek 15 kHz arasında değişebilmektedir. Bu frekanslar taşıyıcı frekanslar olarak bilinmekte ve frekans seviyeleri frekans konvertörü üreticisine göre değişebilmektedir [13]. Bu taşıyıcı frekanslardan düşük taşıyıcı frekanslar, motordan gelen sesler (gürültü) sorun olmadığı takdirde motor için daha iyidir. Gürültüye, frekans konvertörünün çıkış dalga formunda bulunan harmonik frekanslara cevap veren motor laminasyonları neden olmaktadır. Bu durum özellikle fan kullanımında, havalandırma kanalları gibi yerlerde rezonansa sebep olabileceğinden daha fazla gürültüye neden olmaktadır. Fan uygulamalarında frekans konvertörü ile motor arasına filtre yerleştirilmesi sayesinde, gürültü bu filtrede tutularak kontrol edilebilmektedir.

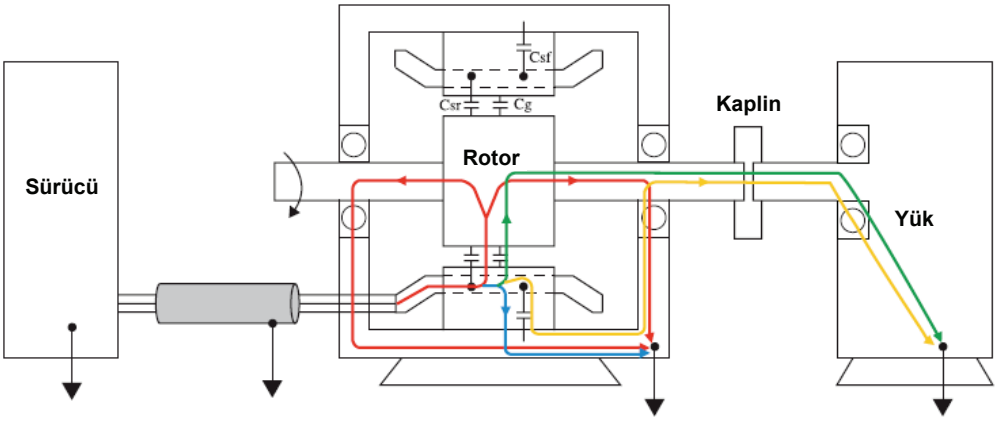
Yüksek taşıyıcı frekanslar ise yansıtıcı dalgalara neden olan voltajı iki katına çıkararak fazladan gerilim ilave edebilmekte, hem frekans konvertöründe hem de motorda daha fazla sıcaklık yaratmaktadır. Normalde 813 V olan tepe seviyesi 2000 V'lara kadar yükselebilmektedir. Voltaj gerilimini azaltmanın en iyi yolu IGBT'nin etrafında iyi bir filtre kullanılmasıdır.

Ayrıca, frekans konvertörleri, kısmi boşalma yaratarak motor yalıtımına ve motorun besleme kablosuna zarar veren yüksek genlikli darbeler oluşturmaktadır. Bu boşalma, düşük voltajlı (<600 V) motorlarda da meydana gelebilmektedir. Kısmi boşalma, yalıtım sistemindeki küçük boşluklarda ozon oluşumuna ve yalıtım sisteminin bozulmasına neden olmaktadır.

3.8 Mil Akımları

3.8.1 Mil Akımlarının Nedenleri

PWM voltaj kaynağı ile sürülen motorlarda meydana gelen birkaç MHz'lik geçişlere kadar yüksek frekanslarda kapasitif eşleşmiş akımlar, manyetik tel yalıtımı, stator oluk içi yalıtımı, hava aralığı, rulman geresi ve stator oluk ağzı yalıtımı yoluyla akabilmektedir.



Şekil-7: Kapasitif Eşleşmiş Akım Yolları

Şekil-7, kapasitif eşleşmiş çeşitli akım yollarını göstermektedir. Stator sargılarında yaratılan yüksek dV/dt, stator paketi ve motor gövdesi ile kapasitif olarak eşleşmektedir. Bu yollarda akan akımın göreceli büyüklüğü fazlasıyla bu yolların empedansına bağlıdır. Rulmanlardaki hasar, bu akımları rulmanları akım döngüsünün dışında bırakacak düşük empedanslı yollar yaratarak azaltılabilmekte veya yok edilebilmektedir.

Kırmızı renk ile gösterilen akım yolu, dönüş yolu rulmanlardan ve sonunda da motorun topraklama bağlantısından toprağa geçen, rotora eşleşmiş kapasitif akımdır. Bu yol, sonunda muhtemel bir rulman hasarına neden olacak şekilde motorun rulmanlarından geçen bir akım yaratmaktadır. Rulmanlardan geçen bu akım iki olgunun sonucudur. Ortak mod voltajında ani dV/dt geçişi oluştuğu anda eğer mil (örneğin rulman bilyelerinin temas etmesiyle) motor gövdesine kısa devre olursa akım motor rulmanlarından geçerek akabilmektedir. Rulman iletken haline geldiğinde, deşarj akımı rulmanın bir yalıtıcı gibi ilk davranışından sonra motor rulmanlarından geçerek akabilmektedir. Voltaj, rulman gresinin dayanma gerilimini ve gres film tabakasını aştığında deşarj akımı meydana gelebilmektedir. Kırmızı renkli akım, akım yolunun tamamıyla motorun içinde olmasından dolayı doğrudan ölçülememektedir.

Yeşil ile işaretlenen yol, yine stator sargılarından rotora kapasitif olarak eşleşmiş akımı göstermektedir. Eşleşme kırmızı renkli akım yolu mekanizması ile aynı şekilde olabilmekte ancak yeşil renkli akım bileşenleri, motorun kasnak tarafındaki rulmandan, daha sonra kaplinden yükün toprağına ve geriye sürücünün toprağına geçen bir tercih yolu bulmaktadır. Kırmızı renkli akımda tartışılan aynı iki olgu yeşil renkli akım yolunda da meydana gelebilmekte, bu durumda sadece kasnak tarafındaki rulmanın iletken ya da yalıtılmış durumu akım yolunun tipini belirlemektedir. Bu yol, motorun kasnak tarafındaki rulmanında ve motoru yüke bağlayan bazı kaplin çeşitlerinde kaplinin kendinde hasar meydana getirmektedir. Bu akım, motor milinin çevresine bir yüksek frekans akım sensörü konularak ölçülebilmektedir.

Sarı akım yolu, stator sargıları ile motor gövdesi arasında kapasitif olarak eşleşmiş akımı göstermektedir. Bu akım, yüksek frekanslarda kapasitif iletken olan stator sargı yalıtımından akmaktadır. Sarı renkli akım, motor gövdesi, motor rulmanı, motor mili, kaplin, motorun kasnak tarafındaki rulman, yükün toprağı ve en sonunda sürücünü toprağından geçerek akmaktadır. Bu yoldan geçen akım, kapline olduğu kadar, motora ve motorun kasnak tarafındaki rulmanına da hasar verecek potansiyele sahip bulunmaktadır.

Tüm bu akım yolları içerisinde, rulman hasarını azaltacak tercih yolu mavi yoldur. Bu yolda, motordan ve motorun kasnak tarafındaki rulmandan geçen bir akım yolu bulunmamaktadır **[14].**

Frekans konvertörü ile sürülen motorlarda, motor rulmanlarında malzeme erozyonuna ve erken mekanik arızalara yol açan aşırı dik ön darbeli PWM voltaj kaynağı, özellikle motordaki elektrik problemlerinin büyüklüğünü artırmakta, değişken/kararsız hava aralığı manyetik akısı nedeniyle, motorun rulmanlarını kullanarak geçen ve rulman ömrünü anormal bir şekilde azaltan mil akımları oluşabilmektedir.

Rulman ömrü, rulman bilyelerinde ve rulman yüzeylerinde aşınmaya neden olarak mil, rulmanlar ve motor rulman yataklarından gelen elektrik akımı akışı nedeniyle etkilenmektedir [15]. Bu durum, elektrik motorunun mekanik ömrünü önemli bir şekilde azaltma etkisine sahiptir. 2,0 V'un üzerindeki değerleri yıkıcı olarak değerlendirilen 0,4 V'dan daha büyük değerler, zararlı mil akımları geliştirebilmektedir **[16].**

PWM'li frekans konvertörlerinde kullanılan yüksek hızlı anahtarlama frekansları nedeniyle tüm frekans konvertörleri, IGBT'nin anahtarlama frekansları ile AC motorlarda mil akımları indüklemektedir.

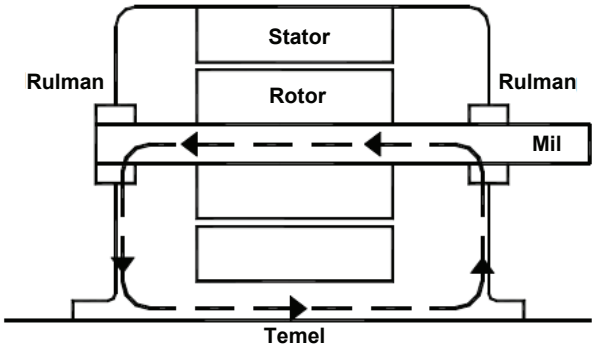
70 V ve üzerinde olabilen bu voltaj değerleri bir osiloskop probunun motor çalışırken mile değdirilmesi ile kolayca ölçülebilmektedir. Bu voltajlar rulmanlarda bulunan gresin dielektrik özelliğinin üstesinden geldiğinde, en az dirence sahip olan rulmanları kullanarak motor gövdesine bir yol oluşturarak toprağa akmakta ve bu arada rulman bileziğinde elektro erozyon aşınmalarına ya da kraterlerine neden olmaktadır. Bu deşarjlar çok sık olduğu için tüm rulman bileziği zamanla çukurlarla dolmaktadır. Bu hasarlanma sürdükçe çukurlar artmakta ve sonunda rulmanların ses yapmasına ve hasarlanmalarına neden olmaktadır **[17].**

PWM voltaj kaynaklı frekans konvertörü sürücülerindeki elektro erozyon akımlarının varlığı, aşağıdaki şartların tümünün oluşmasına bağlıdır:

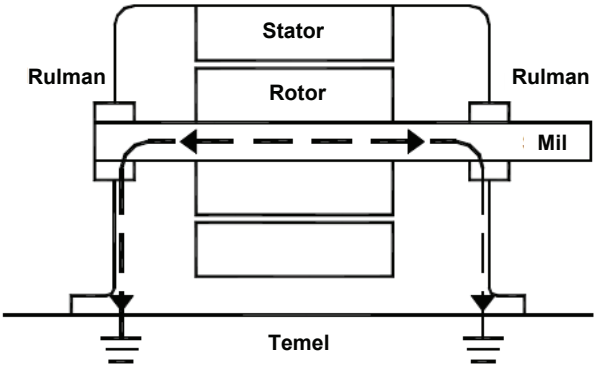
- Kaynak voltajı tarafından toprağa sağlanan uyarılma.
- Stator ve rotor arasında kapasitif eşleşme mekanizması.
- Rulmanın kapasitans varlığına bağlı olarak yeterli rotor voltajı oluşması.

PMW ile sürülen elektrik motorlarında meydana gelen mil akımlarının nedenlerini anlamak ve bu akımların neden olduğu rulman hasarlarını yok edebilmenin bir çözümünü bulmak için birçok çözüm yolu ortaya konmuştur. Ancak, uzun vadeli olarak bu sorunu çözebilecek pratik, ekonomik ve etkin bir teknik henüz geliştirilememiştir **[18].** Bazı çözümler ya dar kapsamlı ya uygulanmaları çok maliyetli ya da teknik olarak uygulanabilir durumda değildir.

Mil akımlarının oluşturduğu hasarların ilk adımda önlenebilmesi için, indüklenen mil akımı, rulmanlar yardımıyla boşalmadan korunmalı ve yalıtımı ve/veya alternatif bir yolla toprağa verilmelidir.



Şekil-7 İndüktif Dolaşım Akımları



Şekil-8 Kapasitif Eşleşmiş Akım Akışı

Mil voltajları 300 mV'u geçtiğinde, sirküle eden mil akımlarının hasarından rulmanları korumak için, motorun rulmanlarından birinin yalıtılması gerekmektedir **[Şekil-7**]. Yalıtılacak rulman normal olarak, pervane tarafındaki rulman seçilir. Kasnak tarafındaki rulman yalıtıldığı takdirde, sürülen yük, akımın toprağa akmasını sağlayacak döngüyü tamamlayan bir yol sağlayabilmektedir.

Sirküle eden mil akımlarının hasarından rulmanları korumak için, motorun rulmanlarından birinin yalıtılması gerekmektedir. Yalıtılacak rulman normal olarak, pervane tarafındaki rulman seçilir. Kasnak tarafındaki rulman yalıtıldığı takdirde, sürülen yük, akımın toprağa akmasını sağlayacak döngüyü tamamlayan bir yol sağlayabilmektedir

PWM sürücüler, stator, rotor ve rulman döngüsünü sağlayan ortak mod akımları tarafından üretilmiş sirkülasyon akımlarının akmasına neden olabilmektedir. Bu, kapasitif etkiden daha çok indüktif bir etkidir. Motor, ağırlıklı olarak oluk içerisindeki ilk birkaç sipirin bulunduğu bölgede, yüksek frekanslı kapasitif eşleşmiş akımlar nedeniyle yüksek frekanslarda daha fazla asimetrik hale gelmektedir. Düzensiz (kalıpsız) sarılmış motorlarda sipirlerin yerleştirilmesi üretici tarafından iyi kontrol edilemediğinden dolayı, düşük frekanslarda simetrik olan bir motor bile yüksek frekanslarda asimetrik hale gelebilmektedir. Buna ilave olarak, yapısında BJT (Bipolar Junction Transistors) veya IGBT bulunduran PWM sürücüler elektro erozyon tezgâhı akımlarına neden olabilmektedir [Resim-4]. PWM inverterler, stator sargıları, rotor ve motor gövdesi arasında kapasitif eşleşmeye neden olmaktadırlar. Bu ortak mod akımları sirküle etmemekte ancak toprağa doğru seyahat etmektedir. Toprağa giden yol her iki motor rulmanı ve/veya yük ya da yardımcı teçhizatın rulmanları vasıtasıyla olabilmektedir **[Şekil-8] [19].**

3.8.2 Mil Akımlarının Azaltılması Yöntemleri

3.8.2.1 Rulmanların İzolasyonu

Rulmanların yalıtımı ya rulman bileziklerine ya da rulman yatağına (motor kapağına) yalıtım bileziği veya seramik kaplama gibi yalıtım malzemesi ilave ederek veya seramik rulman bilyeleri kullanarak yapılabilmektedir. Bu tür uygulamalar sonucunda, mil akımları toprağa geçebilmek için başka yollar kullanmaktadır.

Kapasitif etkisi nedeniyle bazen seramik kaplama kullanılsa da, seramik kaplamada frekans konvertörünün indüklediği akımlar yalıtım tabakasından geçebilmektedir. Rulmanların yalıtılması yöntemi kullanıldığında, pompa ve enkoder gibi doğrudan bağlanan ekipmanlar, topraklama için bir yol sağlayabilmektedir. Bunun dışındaki yalıtım ve diğer rulman yalıtım stratejilerin uygulamaları çok pahalı olmalarının yanında modifikasyonunu gerektirmekte ve kısmi fayda sağlayabilmektedir.

3.8.2.2 Alternatif Boşaltma Yolları

Doğru olarak uygulandığında rotor ve stator arasında genellikle bir fırça formunda iletken bir bağ oluşmaktadır. Bu stratejiler yalıtım için tercih edilmektedir, çünkü mil voltajları için alternatif bir boşaltma yolu sağlamakta ve mil akımlarını önlemektedir. AC motor rulmanlarını mil akımlarının hasarlarından korumak için birkaç alternatif boşaltma teknolojisi vardır:

a. Faraday Kalkanı

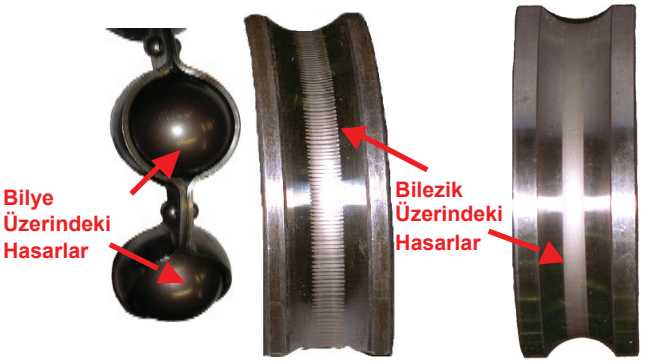
Motorun içinde rotor ve stator arasında bulunarak, kapasitif bir engelle bloklayarak mile doğru etkin bir şeklide indüklenen frekans konvertörü akımlarını engelleyen iletken bir kalkandır. Çok pahalı ve pratik olmadığı için bu çözümü uygulamak aşırı zordur [Şekil-9].

b. İzole Edilmiş Rulman

Genellikle iletken olmayan bir reçine veya seramik tabaka yalıtım malzemesidir. Mil akımlarını gövde üzerinden boşaltarak rulmanları yalıtmakta ve mil akımlarından korumaktadır. Bu yalıtım, pompa veya diğer yük elemanlarını kullanarak, toprağa geçmesi için akımı başka bir yol armaya zorlamaktadır. Rulman yataklarının yalıtımının yüksek maliyeti nedeniyle, bu çözüm daha büyük NEMA ve IEC motorları ile sınırlıdır. Bazen, frekans konvertörü tarafından indüklenmiş yüksek frekanslı akımlar kapasitif olarak yalıtım tabakası ile eşleşebilmekte ve rulmanın içinde hasara neden olabilmektedir. Zaman içerisinde yalıtımın kirlenmesi sonucunda, yalıtım bölgesinde akımın rulmanlara akmasına neden olan bir akım yolu oluşabilmektedir.

c. Seramik Rulmanlar

İletken olmayan seramik bilyelerin kullanımı, mil akımlarının rulmanlar vasıtasıyla boşalmasını engellemektedir. Diğer yalıtım tedbirleri ile birlikte, mil akımları muhtemelen motora bağlı bir ekipmanı kullanarak toprağa akmak için alternatif bir yol aramaktadır. Bu tür rulmanlar çok pahalıdır ve birçok durumda uzun teslim sürelerini gerektirmektedir.



Resim-4 Mil Akımlarının Rulman Üzerindeki Etkileri

d. İletken Gres

Teorik olarak, bu tür bir gres iletken parçacıklar içerdiği için, rulman vasıtasıyla sürekli bir geçiş yolu oluşturmaktadır. Bu şekilde mil voltajları yavaş yavaş rulmanlar vasıtasıyla ancak onlara hasar vermeden boşalabilmektedir. Bunun yanında, gresin içerisindeki iletken parçacıklar mekanik aşınmaya neden olabilmektedir. Bu metot uygulanan bir yöntem değildir.

e. Topraklama Fırçası

Motor miline temas eden bir metal fırça, toprağa düşük empedans yolu sağlamak için özellikle büyük motorlarda daha pratik ve ekonomik bir yoldur. Ancak bu fırçalar aşağıdaki gibi birçok sorunu da beraberinde getirmektedir:

- Mile temas ettikleri için mekanik aşınmaya maruz kalmaktadır.
- Metal kılları nedeniyle kirlenmekte, bunun sonucunda fırçaların etkinliği azalmaktadır.
- Oksidasyon oluşması engellenememekte, bu durum topraklamanın etkinliğini azaltmaktadır.
- Düzenli olarak bakıma ihtiyaç hissettirmekte, bu durum ise servis ömrü maliyetini artırmaktadır.

Topraklama fırçalarının çoğu motora dışarıdan monte edilmektedir. Bunun için milde uygun bir alana ihtiyaç bulunmaktadır. Fırçalar yüksek hızlarda ısınmaya da neden olabilmektedir. Bu nedenle 1500 devirin üzerindeki hızlarda kullanılmaya uygun değildir. Motorlarda rulman değiştirilmesine ihtiyaç hissedildiğinde, sıklıkla topraklama fırçalarının da değiştirilmesi gerekmektedir. Fırçaların mil çevresi boyunca homojen olarak görev yapmaması durumunda, temas eden kısmın karşı tarafında mil akımları geçişini daha da kötü bir duruma getirebilmektedir. Bunun önüne geçilmesi için milin her iki çıkışında da fırça kullanmak gerekebilmektedir.

f. Mil Topraklama Bileziği

Klasik topraklama fırçaları gibi uygulanmaktadır. Bu bilezikler, mil akımların yeniden yönlendirerek, güvenilir, milden gövdeye çok küçük empedansa sahip yol oluşturan ve rulmanları tamamen atlayacak şekilde geliştirilmiş iletken mikro fiber kıllar içermektedir. Bilezikler, elektron transfer oranını artıran iyonizasyon prensibini kullanan patentli bir teknoloji kullanmaktadır. Bu bilezikler frekans konvertörünün indüklediği yüksek frekanslı mil voltajlarını boşaltan aşırı etkin bileziklerdir. Yüz binlerce boşaltım kanalı sayesinde, rulmanlar hasardan korunabilmektedir. Mil topraklama bilezikleri düşük maliyetli çözümlerdir ve neredeyse her türlü güçteki AC motora uygulanabilmektedir **[Şekil-10].**

4. Frekans Konvertörü ile Sürülecek Elektrik Motoru Sargılarının Sahip Olması Gereken Özellikler

Düşük voltajlı motorlara frekans konvertörü uygulanmasında göz önünde tutulması gereken çok önemli bir konu, motor sargı yalıtımlarındaki voltaj gerilimleridir. Frekans konvertörü, DC kaynaktan AC çıkış dalga formu üretmektedir. DC'den AC'ye evirtim, genellikle bazıları çok hızlı dV/dt yükselme zamanlarına sahip olabilen yarı iletken anahtarlama cihazları tarafından yapılmaktadır. Yüksek dV/dt, motor yalıtımına stres yüklemektedir (motor ve sürücü arasındaki kablonun uzun olması gibi durumların oluşturduğu yüksek miktardaki kapasitans sayesinde de bu stres artmaktadır).

Frekans konvertörü kullanılmaya uygun motorlar, frekans konvertörünün çıkış dalga formundaki voltaj gerilimlerine dayanabilecek şekilde özel olarak tasarlanmak zorundadır. Bu özel tasarım;

- Dielektrik dayanım kapasitesini artırabilmek için frekans konvertörü ile sürülmeye uygun bobin teli kullanılmasını,
- Daha yüksek dielektrik dayanımı için faz ve fazlar arası yalıtım kabiliyetinin geliştirilmesini,
- Motor sargılarının konsantrikten (yarım kalıptan), bindirme sargıya (tam kalıba) değiştirilmelerini,
- Sargılara, çoklu daldırma ve kurutma veya vakum basınçlı vernik emdirme uygulaması yapılmasını ve
- dV/dt etkisini azaltabilmek için sargıların ilk bir kaç bobin başının sarılarak daha sıkı yalıtılmasını

içermektedir.

Frekans konvertörü ile sürülecek motorlarda kaliteli bir kalıpsız sargılı stator oluk yalıtım sistemi üreticiden üreticiye değişmekle birlikte genelde aşağıdaki özellikleri içermektedir **[Şekil-11] [20]:**

4.1 Sargı Teli İzolasyonu

Sarımda kullanılan yuvarlak bakır iletkenin üzerinde bir yalıtım tabakası bulunmaktadır. Bu yalıtım tabakası, sipirler arası yalıtımı sağlamaktadır. Daha yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışacak ve kaplama kalınlığını artırmayacak şekilde daha yüksek dielektrik direnci sağlayacak yeni yalıtım kaplamalarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları, tel üreticileri tarafından sürdürülmektedir. Motor üreticileri oluk içerisine ihtiyaç duyulan miktardaki teli yerleştirmek zorunda oldukları için yalıtım tabakası ile birlikte toplam bakır tel kalınlığı, fazla artmaması gereken bir ölçüdür. Frekans konvertörü ile sürülecek motorlar, 0,1 µs yükselme zamanında nominal voltajın 3,1 katını karşılamak zorundadır. Bu nedenle sarım sırasında sipirler arası yalıtım kabiliyetinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır

Şekil-11: Frekans Konvertörü ile Sürülecek Elektrik Motorunda Oluk İzolasyonu Yapısı

VTepe ≤ 1,1 x 2 x 2 ½ x VNominal

VTepe ≤ 3,1 x VNominal

Yükselme Zamanı ≥ 0,1 µs

Bu değer, 380 V'luk şebeke geriliminde, 1178 V'luk ani voltaj yükselişlerine karşılık gelmektedir.

Motorun iyi bir oluk doluluk oranına sahip olması, vibrasyon nedenli yalıtım bozulmalarının önüne geçecektir [21].

4.2 Oluk İç Yüzeyi İzolasyonu

Tüm oluk içi yüzeyini kaplayarak, bobin tellerine şase potansiyeline sahip olan stator sacının yalıtımını sağlamaktadır.

4.3 Oluk Ağzı İzolasyonu

Oluğun üst kısmına yakın telleri, stator sacının şase tehlikesinden korumaktadır.

4.4 Oluk İçi Faz Arası İzolasyonu
Bindirmeli (tam kalıp) tip sargılı motorlarda ve bir bobini diğer bobinden yalıtmak için kullanılmaktadır.

4.5 Stator Paketi Sonu Oluk Güçlendirici İzolasyon
Oluk içi yalıtımına mekanik dayanıklılık katkısı sağlamaktadır. Bobinajcının bobin başlarına lastik çekiçle form verdiği durumlarda, bobinleri hasardan korumak için, stator paketlerinin bobinlere yakın uç kısımlarını mekanik olarak korumak için uygulanması gereken çok önemli bir yalıtım uygulamasıdır.

4.6 Bobin Başı Faz Ayırma İzolasyonu
Fazlar arası dielektrik yalıtımını güçlendirmek için yapılmaktadır.

4.7 Bobin Başlarının Sıkılaştırılması
Bobin başlarının hareket etmesinin önüne geçmek için kullanılmaktadır. Bobin başlarını mümkün olduğunca katı hale getirmek yalıtım ömrü açısından çok önemlidir. Nominal voltajla motora yol verilme sırasında, yüksek hızlı fotoğraf makineleriyle alınan görüntüler, bobin başlarının esnediğini ortaya koymaktadır. Bu durumda, bobinler birbirine sürtünerek ve sipirler arası yalıtıma zarar vererek, erken yalıtım arızasına neden olabilmektedir. Bunun yanında, bobin başlarının hareket etmeyecek şekilde sarılması, bobinleri sabit bir şeklide bombardıman altında tutan PWM sinyallerinin neden olduğu vibrasyon nedeniyle, frekans konvertörü uygulamalarında önemlidir. Bunu sağlamak için vernikleme öncesi yapılan ısıtmada, sıcaklık altında sıkılaşan bağlama bantları kullanılmaktadır.

4.8 Vernik İzolasyonu
Vernik, mekanik dayanım yanında ilave yalıtım özellikleri de sağlamaktadır. Stator paketi sarıldıktan ve bobin başları bağlanarak sağlamlaştırıldıktan sonra, sargılı stator ısıtılmakta ve sıcak verniğin içerisine daldırılmaktadır. Vernik, sargıların içerisine akmakta ve bobin telleri arasındaki tüm boşlukları doldurmaktadır. Ani yük salınımları boyunca veya yol verme sırasında oluşan gerilimler nedeniyle bobinlerin esnemeyerek katı bir kütle haline getirilebilmeleri amacıyla vernik daldırma sayısı artırılmaktadır.

Sonuç
Frekans konvertörü ile sürülen motorlar, frekans konvertörünün sağladığı; enerji tasarrufu, düşük kalkış akımı, yüksek tork gibi faydaların yanında, frekans konvertöründen kaynaklanan mil akımları nedeniyle motorun rulmanlarına ciddi hasarlar vererek erken motor arızalarına neden olabilmektedir.

Frekans konvertörü üreticisinin, voltaj streslerinin; yarı iletken yükselme zamanı, taşıyıcı frekanslar, kablo uzunluğu, filtreleme gibi tümü frekans konvertörünün ve motorun tasarımında dikkate alınması gereken motor yalıtım ömrü üzerindeki sonuçlarının farkında olması ve tedbir alması gerekmekte, motor üreticisi firmalar ise, motorun yalıtımını geliştirerek yalıtım gerilimi sorununu gidermek zorundadır. Frekans konvertörlerinin hepsi aynı nitelikte değildir. Frekans konvertörü alırken, motor üreticisinin tavsiyelerinin dikkate alınması gerekmektedir.

[Kaynaklar

[1] AC Motors Starting and Protection Systems, Chapter-4, Schneider Electric, s.67
[2] Starting and Control of Three-Phase Asynchronous Motors, EATON-Moeller, s.11
[3] Starting Characteristics of Squirrel Cage Induction Motors, http://www.joliettech.com/starting_characteristics.htm
[4] http www.ecosmartelectricians.com.austarter-kitc01_57.html
[5] Variable Frequency Drive, Operation And Application of Variable Frequency Drive (VFD) Technology, Carrier Corporation, Syracuse, New York, October 2005
[6] http://www.motordoc.net/ebooks/RepairBook.pdf
[7] TOSHIBA International Corporation–Toshiba Application Guideline #24, Application Considerations When Applying VFD's-PART 2
[8] EMCW'96, 1996, s.109.
[9] IEEE 519-1992, s.35
[10] The Unseen Truth Behind Motors fed by Inverters, by Alex Settimi Sohler, Electrical Engineer, Technical Support Manager for WEG New Zealand, June 1998
[11] Bonneville Power Administration, 1990, s.20
[12] NETA World-The Official Publications of the International Electrical Testing Association
[13] Danfoss, VFD 101, Lesson-3
[14] Inverter-Driven Induction Motors Shaft and Bearing Current Solutions, Baldor Industry White Papers, s. 8
[15] Industry Applications, 1996, s.250 ve Penrose, EMCW'96, 1996, s.111
[16] Industry Applications, 1996, s.252
[17] AEGIS- Preventing VFD/AC Drive Induced Electrical Damage to AC Motor Bearings, William Oh, Engineer, 2007
[18] Shaft Grounding-A Solution to Motor Bearing Currents, H. William Oh Adam Willwerth, 2008.
[19] A Practical Guide to Understanding Bearing Damage Related to PWM Drives Don Macdonald EEE 16. Member, Toshiba International Corporation, Will Gray IEEE Member Toshiba International Corporation.
[20] TOSHIBA International Corporation–Toshiba Application Guideline #37, Important Features of Stator Slot Insulation Systems
[21] TOSHIBA International Corporation–Toshiba Application Guideline #43, What Does 'Inverter Duty' Mean to Toshiba

Ahmet ERECEK
Makine Mühendisi (MBA)
ELSAN Elektrik Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Fabrika Müdürü
04 Haziran 2012