

Elektrik Motorlarında Kalkış Duruş Esnasında Yapılan Titreşim Ölçümleri ile Arızaların Tanılanması

A. Akgül ⁽¹⁾, E. Orhon ⁽¹⁾ ve H.T. Belek ⁽²⁾

⁽¹⁾ Pro-Plan Ltd. Şti., ⁽²⁾ İ.T.Ü. Makina Fakültesi

Elektrik motorlarında görülen arızalar ve yüksek titreşimler genellikle mekanik ve elektromagnetik nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu makinalarda titreşimlerin nedenlerini belirlemenin en etkili yolu tahrik motoru üzerinde yapılan kalkış (run-up) ve duruş (coast-down) testleridir. Kalkış ve duruş esnasında yapılan mertebe analizi (order tracking) yardımıyla arızaların belirlenmesi kolayca gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada bir demir-çelik işletmesinde bulunan sinter bacagazı fanını tahrik eden elektrik motoru ve fan üzerinde yapılan titreşim ölçümleri tanıtılacak, sistemdeki titreşimlerin nedenleri ortaya konulacaktır. Pratik bir problemin çözümünü yansıtan bu çalışma arıza tanılmasında sistematik bir yaklaşımın önemini ortaya koymakta ve benzer sorunlarla karşılaşan bakım mühendislerine önemli bir örnek oluşturmaktadır.

1. GİRİŞ

Elektrik motorlarında ölçülen titreşimlerin frekans düzleminde incelenmesi, bu makinalarda üretilen titreşimlerin diğer dönel makinalarda görülen titreşimlere benzediğini göstermektedir. Rotordaki dengesizlik veya rotor milindeki eğiklik devir hızında ve katlarında üretilen kuvvet bileşenleri nedeniyle bu frekanslardaki pikler olarak frekans düzleminde izlenir. Motorun rulmanlı yataklarındaki arızalar da rulmanlı yatak arıza frekanları olarak görülür. Ancak elektrikli motorlarda, bu arızaların yarattığı titreşimlerin yanı sıra, çalışma ilkesi gereği elektromagnetik kuvvetlerin yarattığı çok sayıda farklı kuvvetler de yer alır.

Her elektrik motoru, ister motor ister jeneratör olarak çalışsın, kendine özgü bir titreşim işaretiyle sahiptir. Bu karakteristik titreşim sinyalini belirleyen unsurlar; motorun devir hızı, rotordaki kutup sayısı, rotor ile statordaki olukların sayısı ve diğer parametrelerdir. Bazı titreşim frekansları makinanın temel tasarımı ve yapısına bağlı olarak sabit kalırken, bazı titreşim frekansları ise zaman içinde makinanın yaşlanması ve belirli komponentlerin aşınması sonucu ortaya çıkabilir, [1].

Bu bildiride bir demir çelik tesisinde sinter fanını tahrik eden yaşlı bir elektrik motorunda karşılaşılan titreşim problemi ele alınarak ileri sinyal işleme teknikleri ile

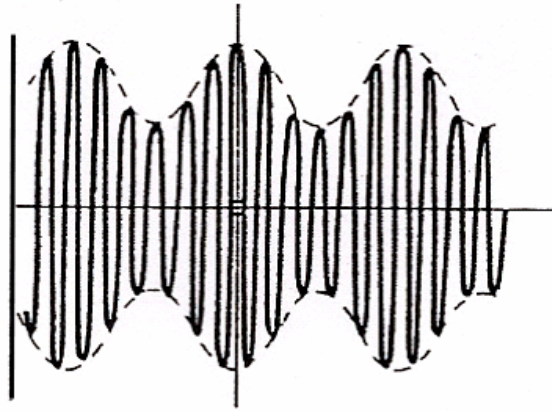
motor arızası teşhis edilecek ve ayrıca fanda görülen dengesizlik nedeni ortaya konulacaktır.

2. ELEKTRİK MOTORLARI İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER, [2]

Bu çalışma kapsamında, endüstride en çok kullanılan tahrik makinası olan ve sadece şebeke cereyanı ile beslemeli devir sayısı sabit asenkron motorlar göz önüne alınacaktır. Bu makinalarda titreşimleri yaratan arızaların kökeni üç ana grupta toplanabilir, bunlar:

- Mekanik
- Magnetik
- Mekanik + Magnetik

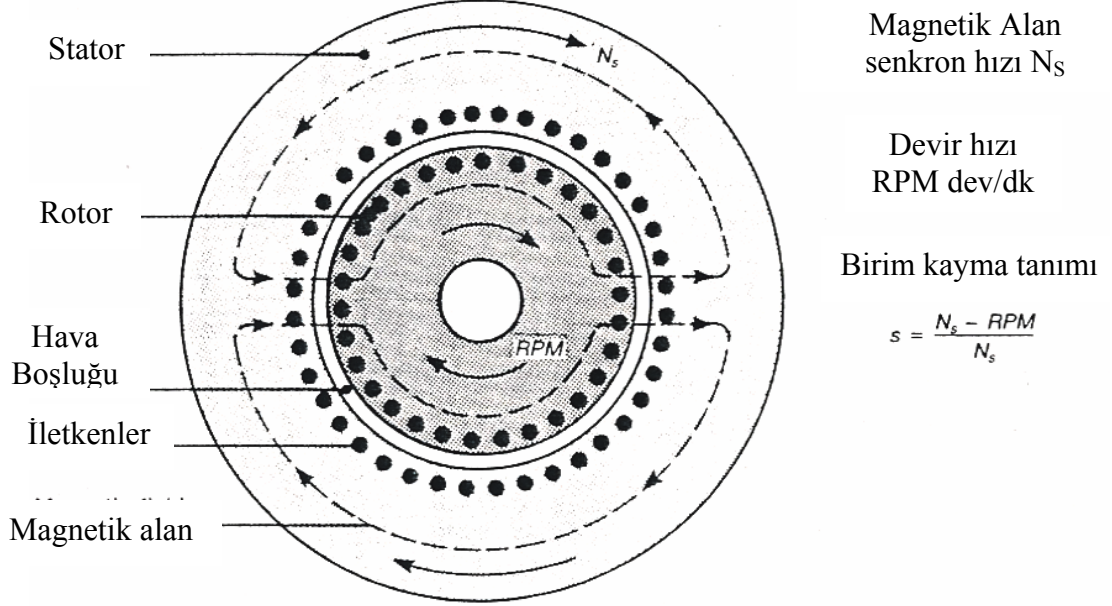
kökenli arızalardır. Arızanın magnetik mi yoksa mekanik mi olduğunu ayırt etmenin en kolay iki yolu; vuru sesini dinleme ve enerjiyi kesme testleridir. Sistem çalışırken vuru sesi varsa, sorun magnetik veya mekanik artı magnetik kombinezonu olması gerekir. Vuru sesi yoksa sorunun salt mekanik olduğu düşünülmelidir. Vuru sinyali Şekil 1 de görüldüğü gibi dalgalı bir sestir. Uygulanabilecek ikinci test ise enerji kesme testidir. Bu test esnasında enerji kesilir, enerji kesildiğinde magnetik kökenli titreşimler yok olur.



Şekil 1. Vuru olayı.

Elektrik motorlarındaki arızaları tanılamak için kullanılan titreşim analizörlerinin belirli özelliklere sahip olması istenir. Bu analizörlerin frekans çözünürlüğü yüksek olmalı ve istenilen bir frekans bölgesine gerçek “zoom” yapabilmelidir. Elektrik motorlarındaki arızaların belirlenmesi oldukça karmaşık bir problemdir. Karşılaşılan mekanik problemler nedenlerinden çok ortaya çıkan sonuçlarla ilgilidir. Elektromagnetik problemler ise ortaya çıkan sonuçlardan kaynaklanmaktadır. Problemi daha da karmaşık hale getiren unsurlar ise motorun tahrik ettiği iş makinası ve bu makinadan kaynaklanan sorunların yanı sıra bu makina temelinin etkileridir.

Şekil 2 de iki kutuplu bir asenkron elektrik motorunun kesiti görülmektedir. Stator sargısına üç fazlı gerilim uygulandığında hava aralığında döner bir magnetik alan oluşur. Böylece rotor devresinin impedansına bağlı olarak rotor akımları oluşur. Lenz kanununa göre döner alan ve rotor akımının bileşkesi bir döndürme momenti yaratır.



Şekil 2. Bir asenkron elektrik motorunun kesiti.

Burada

$$\begin{aligned} N_s &= \text{Senkron hız (dev/dk)} \\ (N_s - N) &= \text{Kayma hızı} \\ s &= (N_s - N) / N_s \text{ (Birim Kayma)} \end{aligned}$$

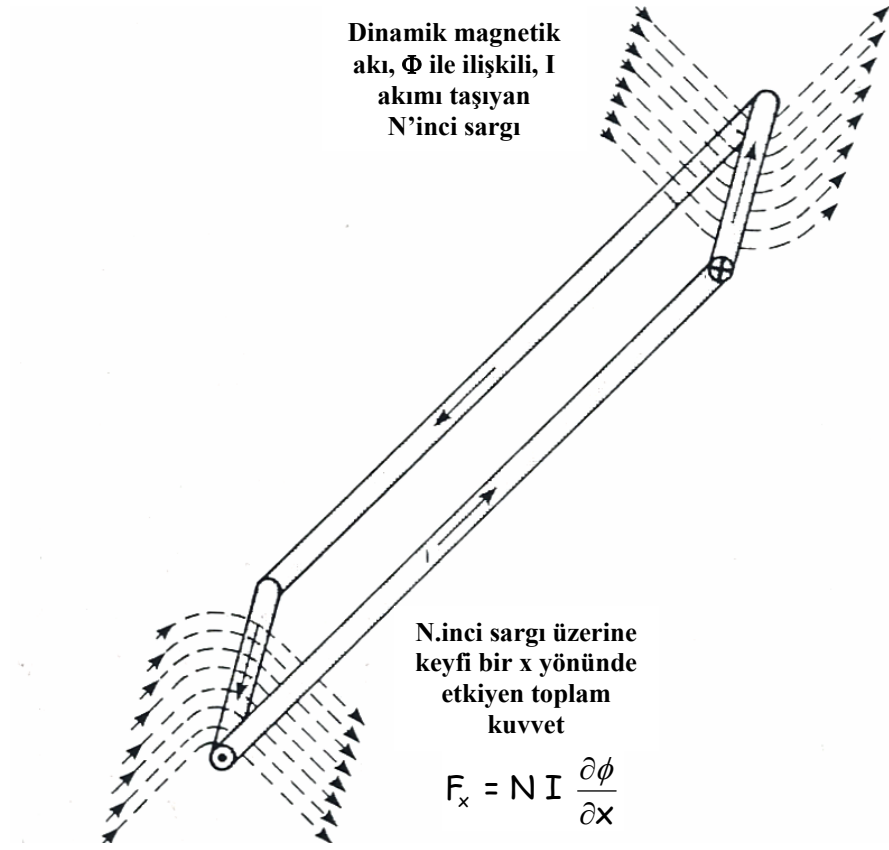
olmak üzere tanımlandığında, rotor akım şiddeti kayma hızı, $(N_s - N)$ ile doğru orantılı ve motordaki döndürme momentini yaratan teğetsel kuvvet ise rotor akım şiddeti ile orantılıdır. Bu kuvvet

$$F_x = N I \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada

$$\begin{aligned} N &= \text{Sargı sayısı,} \\ I &= \text{Akım,} \\ \partial \phi / \partial x &= \text{Magnetik akının kuvvet doğrultusunda değişim miktarı,} \\ NI &= \text{elektromagnetik (em) kuvvetidir.} \end{aligned}$$

İletkenlerdeki elektromagnetik kuvvet dalgasının, stator ve rotor arasındaki hava aralığında yarattığı magnetik akı dalgası, asenkron motordaki döner kuvvet alanını oluşturur, Şekil 3.



Şekil 3. Asenkron motordaki döner kuvvet alanı.

2.1. Rotor ve Stator Üzerindeki Kuvvetler

Rotor ve Stator akımındaki süreksizlikler

$$k \sin s\omega t \cdot \sin (s\omega t + \theta) \text{ veya } (k/2) (\cos \theta - \cos (2s\omega t + \theta))$$

terimleri ile orantılı kuvvetler üretir. Burada

ω = şebeke frekansı

s = birim kayma

k = genlik

θ = faz açısı

olarak tanımlanmıştır.

Eksantrisite nedeniyle hava aralığının değişmesi ise magnetik akı ifadesinin

$$\phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (2)$$

biçiminde olması nedeni ile elektromagnetik kuvvetin değişimi sonucunu yaratır.

Burada

F_m = Toplam elektromagnetik kuvvet

R_m = Devredeki toplam magnetik direnç

olmaktadır. Elektrik motorlarında iki türlü eksantrisite söz konusudur, statik eksantrisite olması halinde devredeki toplam magnetik direnç sadece konumun fonksiyonu olarak ifade edilir, $R_m = R_m(r)$. Motorda dinamik eksantrisite olması durumunda ise toplam magnetik direnç konuma ve zamana bağlı değişir, $R_m = R_m(r,t)$. Yataklarda aşınma ve statordaki eğiklik zamanla değişmeyen ve konuma bağlı parametreler olması nedeniyle statik eksantrisite yaratır. Buna karşılık eğik rotor ve sorunlu rotor iletken çubukları ise dinamik eksantrisitenin kaynağıdır. Statik ve dinamik eksantrisiteden kaynaklanan arızalar ve nedenleri Tablo 1 de özetlenmiştir.

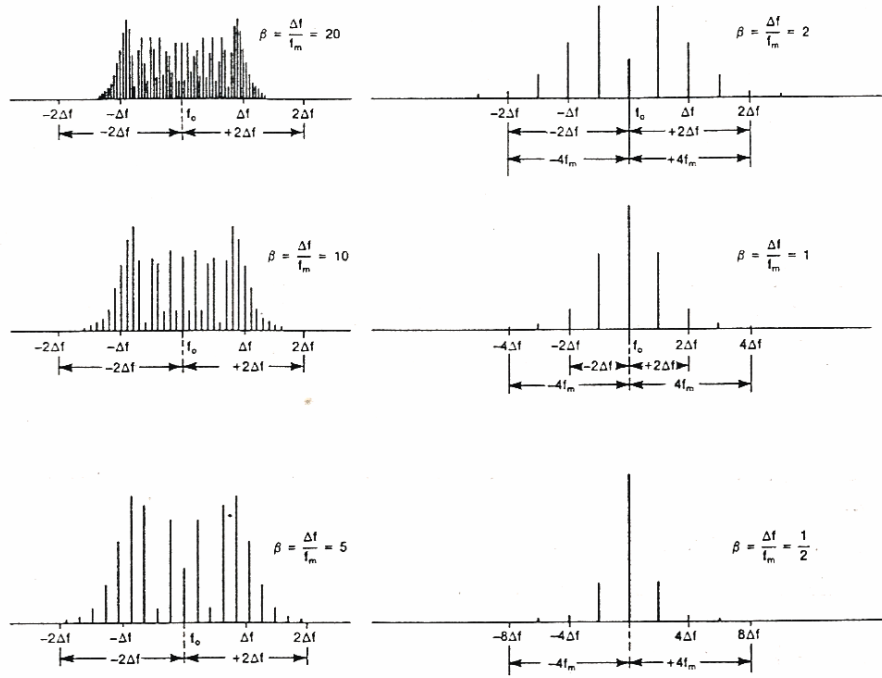
Tablo 1. Statik ve dinamik eksantrisiteden kaynaklanan arızalar ve nedenleri.

Problemın Tipi	Arızanın Frekansları	Arızanın Tıpkı Nedenleri	
		Hava aralığının değişmesi	Akımın Değişmesi
Sabit	2 x şebeke frekansı	Statik eksantrisite, stator mesnetinin zayıflığı	Stator sargısı arızalı
Dönel	1 x devir sayısı ve 2 x kayma frekansında yan bantlar	Dinamik Eksantrisite Gevşek rotor iletken çubukları	Kırık veya çatlak rotor iletken çubukları veya rotor izolasyonu sargı tabakalarında kısa devre

Elektrik motorlarında devir hızındaki değişimden kaynaklanan frekans modülasyonu da magnetik kökenli titreşim kuvvetlerinin doğmasına yol açar. Magnetik çekim kuvvetlerindeki süreksizlik sonucu hız dalgalanmaları ortaya çıkar. Dinamik eksantrisite yaratan mekanik arızalar bu tür hız dalgalanması yaratabilir. Hız dalgalanmasının şiddeti rotorun kütleli atalet momentine bağlıdır. Kütleli atalet momenti yüksek olan motorlarda hız dalgalanması daha az şiddetlidir çünkü bu durumda rotor volan etkisi yaratarak hız dalgalanmasını azaltır. Hız dalgalanmasını tanımlayan parametre β modülasyon indeksidir. Hız dalgalanması sonucu frekans düzleminde ortaya çıkan yan bantların sayısı modülasyon indeksine (β 'ye) bağlıdır, Şekil 4.

Modülasyon indeksinin farklı değerleri için yan bantların nasıl değişeceği Şekil 4'te gösterilmiştir. Büyük modülasyon indeksi değerleri için frekans çözünürlüğü yüksek ve zoom özelliğine sahip titreşim analizörleri kullanılmalıdır.

Elektrikli asenkron motorlarda en sık görülen mekanik arızaların bir özeti Tablo 2 de verilmektedir.



Şekil 4. Hız dalgalanması sonucu ortaya çıkan yan bantlar.

Tablo 2. Mekanik Kökenli elektrik motoru arızaları.

Problemın Tipi	Arıza Frekansları	Titreşim Etki Doğrultusu	Faz İlişkisi(3)
Dengesizlik	1 x dev/dk	Radyal [2]	Statik Dengesizlikte 0 der. Moment etkisi 180 der. Radyal
Eğik Mil veya	1 x, 2 x [1] dev/dk	Eksenel	Dinamik Dengesizlikte 0- 180 der. 180 der. Eksenel [4]
Açısal Eksen Kaçıklığı	1 x, 2 x [1] dev/dk	Radyal	0 der. Radyal
Paralel Eksen Kaçıklığı			180 der. Radyal 180 der. Eksenel [4]
Mekanik Gevşeklik	1 x, 2 x [5] dev/dk	Radyal	Değişken

[1] Problemın büyüklüğüne ve sistemin hareketliliğine bağlı olarak yüksek seviyede 2 x dev/dk frekanstatitreşimolabilir.

[2] Ankastre çalışan rotorlarda genellikle eksenel bileşen kuvvetlidir ancak eksenel titreşimler daima bir kuvvet çifti ile beraber bulunur.

[3] Faz ilişkisi milin bir ucunda ölçülen faz açısı ile diğer ucunda ölçülen faz açısı arasındaki farktır.

[4] İyeme transdüserleri milin iki tarafındaki yataklara ters doğrultularda yerleştirilmişse 180 derecelik gerçek faz açısı yerine 0 derece gösterebilir.

[5] Yüksek harmoniklerin yanısıra 0.5 x dev/dk'sı ve 1.5 x dev/dk çarpımlarındaki frekans bileşenleri de, non-lineerlik özellikleri nedeniyle sinyal formunda kesiklikler olarak görülebilir.

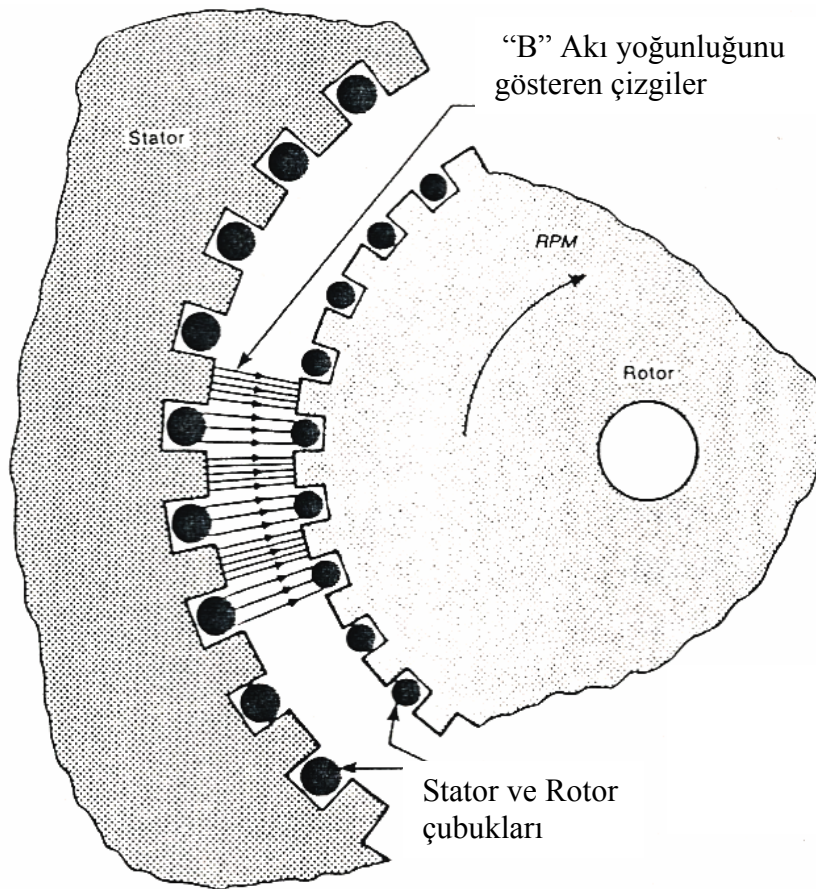
Stator ve rotor olukları da magnetik alanda süreksizlik yarattığı için titreşimlere yol açarlar. Şekil 5 de görüldüğü gibi oluklar karşı karşıya geldiğinde zayıflayan magnetik akı yoğunluğu, oluk kenarlarında artmakta ve rotorun dönüşü esnasında sürekli değişim göstermektedir. Bu nedenle oluşan tahrik kuvvetlerinin frekansı (3) denklemi ile hesaplanabilir.

$$f = \omega \times (R_s(1-s)/p \pm K_1) \quad (3)$$

Bu denklemde yer alan terimler

$K_1 = 0$ veya çift bir sayı,
 R_s = Rotordaki olukların sayısı,
 p = Çift kutup sayısı,
 s = Birim kayma,
 ω = Devir hızı

ifadeleridir.



Şekil 5. Stator ve rotor oluklarında akı yoğunluğunun değişimi.

Elektrik motorlarında zaman zaman görülen önemli bir arıza da yataklardaki sorunlar nedeniyle rotorun statora sürmesi veya çarpmasıdır. Bu durumda ortaya çıkan titreşim sinyalinde modülasyon etkilerinin yanısıra sinyal formunda Şekil 6' da görüldüğü gibi kesiklikler oluşur. Böyle bir zaman sinyali ise frekans düzleminde Şekil 4'de olduğu gibi $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_2 - \omega_1$, $2\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 + 2\omega_2$ frekanslarında yan bantlar üretir.

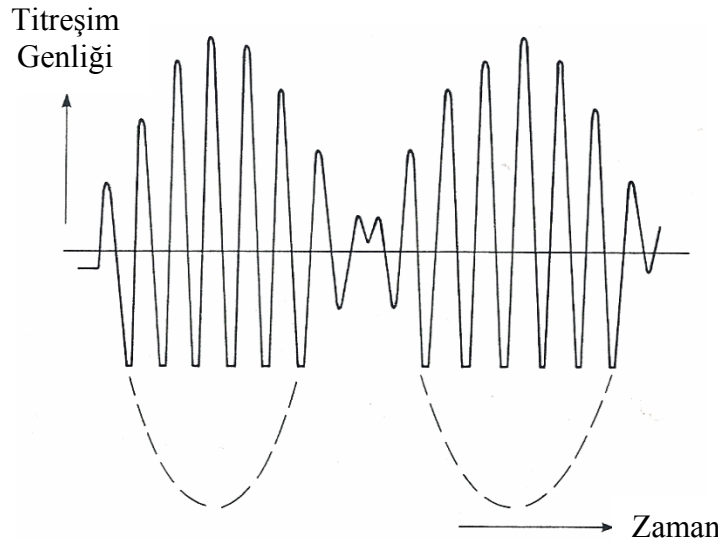
2.2.1. Eksantrisite ile ilgili arıza frekansları

Statik eksantrisitenin oluk etkilerinin yarattığı frekanslara olan etkileri ve dinamik eksantriste nedeni ile oluşan harmonik frekanslar

$$\omega \times \left[\left((n R_s \pm k_s) \times (1-s) / p \pm k_1 \right) \right] \quad (4)$$

formülü yardımı ile hesaplanabilir. Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

- ω = Şebeke frekansı
- n = Herhangi bir tamsayı
- R_s = Rotordaki oluk sayısı
- k_s = Eksantrisite mertebesi, (statik eksantrisite için=0; dinamik eksantrisite için ise küçük bir tamsayı)
- s = Birim kayma
- p = Kutup çifti sayısı
- k_1 = Sıfır veya çift bir tamsayı



Şekil 6. Çarpma ve sürtme etkilerinin zaman düzleminde görüntüsü.

Elektrik motorlarında en sık görülen tüm arızalar ve olası nedenleri Tablo 3 de özetlenmiştir. Bu tablonun sadece yönlendirici bilgiler içerdiği ve her makinanın kendine özel yapısı yanısıra tahrik makinası ve iş makinasından oluşan bir bütün olduğu gözden uzak tutulmamalıdır.

Tablo 3. Sabit devir hızında çalışan asenkron elektrik motorlarında görülen titreşimlerin nedenleri.

Titreşimlerin Nedeni	Arızanın Görüldüğü Frekans	Titreşim Doğrultusu	Açıklamalar
Dengesizlik	1 x dev/dk	Radyal	Dengesizlik cinsi faz bağıntısından anlaşılabilir, Tablo 2'ye bakınız.
Eğik mil veya Aqsal Eksen Kaçıklığı	1 veya 2 x dev/dk	Eksenel	Daha fazla bilgi için Tablo 2'ye bakınız.
Paralel eksen kaçıklığı	1 veya 2 x dev/dk	Radyal	Daha fazla bilgi için Tablo 2'ye bakınız.
Mekanik Gevşeklik	1x, 2x, 3x, 4x dev/dk veya 0.5x, 1.5x dev/dk	Radyal	Çok sayıda harmonikler ve alt harmonikler sinyal formundaki kesikliliğin belirtisidir.
Rulman Arızası	(1-20 kHz aralığında) yatak ve makina gövdesinin rezonans frekansında titreşimler	-	Rulmanın bir noktasındaki arızanın yarattığı darbeler rezonansa neden olur. Bunun yanısıra darbeciklerin tekrarlama frekansları diğer sinyaller arasında kaybolur ilaveten elçek frekanslarda gürültü sinyalleri de vardır.
Kaymalı yatakta yağ tabakasının kararsızlığı	0.43x - 0.48 x dev/dk	Radyal	Kaymalı yataklara daha çok büyük motorlarda rastlanır.
Statik eksantrisite	2 x şebeke frekansına $\omega \times [nR_s (1-s)/p \pm k_1]$ frekanslarındaki bileşenler	Radyal	Motorda iç geometrik uyumsuzluktan, rulman aşınmasından veya statorun noktasal ısınmasından kaynaklanabilir, motor ısındıkça titreşimler artar, [1].
Stator Bağlantılarında Zayıflık / Gevşeklik Dengelenmemiş faz dirençleri veya sargı uçları Stator sargılarında veya halkalarında kısa devre	2 x şebeke frekansı	Radyal	Bu gruptaki titreşimleri sadece titreşim analizi ile ayırtmak zordur, yük altında görüldüğü gibi yüksüz çalışmada görülebilir.
Gevşek stator sargı tabakaları	2 x şebeke frekansında ve 1 kHz civarında 2 x şebeke frekansı aralıklarıyla ortaya çıkan bileşenler	Radyal	Titreşim genlikleri yüksek olmakla beraber genellikle hasar vermezler. Yüksek frekanslardaki bileşenleri statik eksantrisitede görülen bileşenleri andırır.
Dinamik eksantrisite	1 x dev/dk frekansında 2 x kayma frekanslı yan bantlar ve $\omega \times [(nR_s \pm k_s) \times (1-s)/p \pm k_1]$ frekanslarındaki bileşenler	Radyal	Rotordakleğilme, aşınma veya noktasal ısınmadan kaynaklanabilir, [2]. motor ısındıkça titreşimler artar.
Kırık veya çatlak rotor çubukları, Gevşek rotor çubukları, Rotor sargılarında kısa devre, Kötü uç halka bağlantıları	1 x dev/dk frekansında 2 x kayma frekanslı yan bantlar ve dinamik eksantrisitede görülen benzer bileşenler	Radyal	Kayma yan bantlarının düzeyi düşüktür ölçüm cihazının dinamik ölçüm aralığının büyük ve frekans aralıkları için seçilebilir bölgelerin çok olması gerekir. Metinde verilen örnekte görüldüğü gibi oluk harmoniklerinin esas titreşim frekansının civarında da kayma frekanslarında yan bantlar bulunmaktadır.

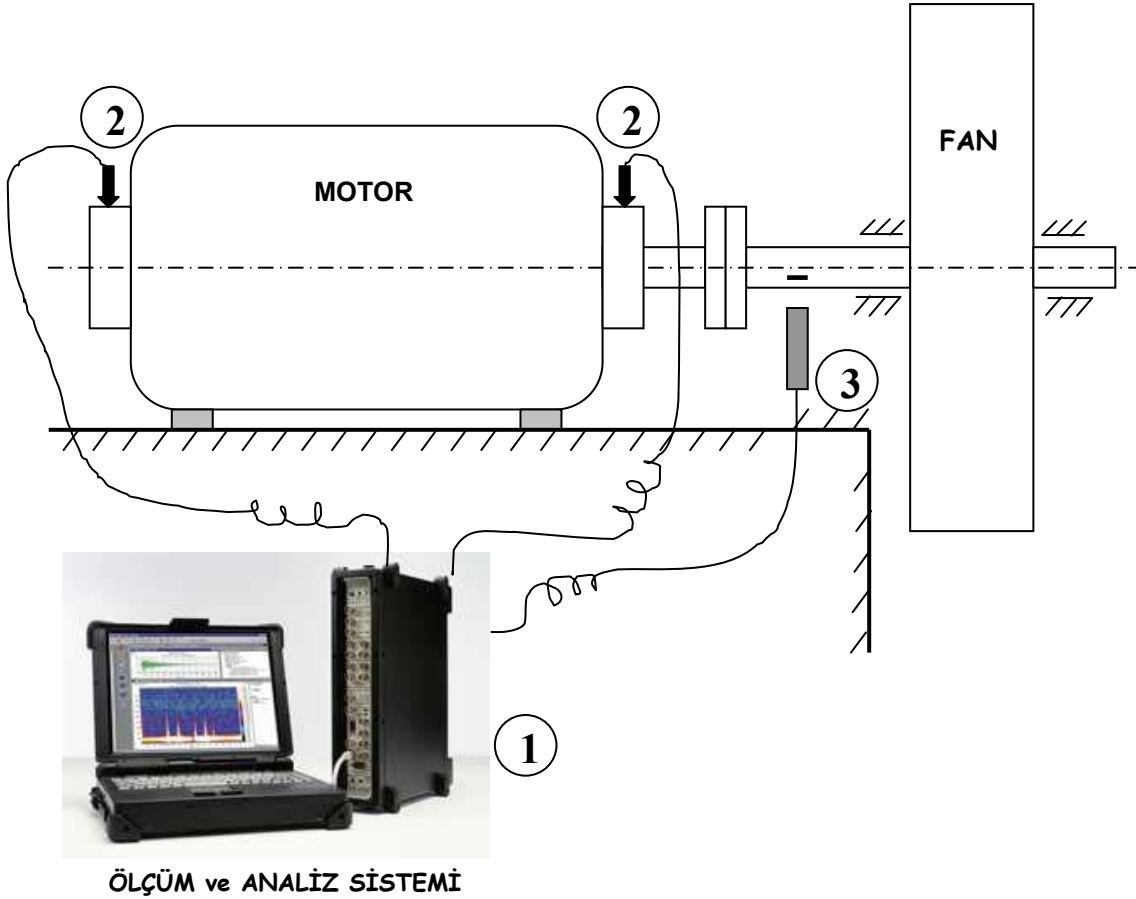
[1] Noktasal ısınma stator sargı tabakalarındaki kısa devreden kaynaklanabilir.

[2] Noktasal ısınma rotor sargı tabakalarındaki kısa devreden, kırılmış veya çatlamış rotor çubuklarından kaynaklanabilir.

3. KALKIŞ (RUN-UP) VE DURUŞ (COAST-DOWN) TESTLERİ

Rejim durumunda olmayan değişken sinyallerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi için çeşitli ölçüm teknikleri bulunmaktadır. Bu ölçüm yöntemleri arasında devir hızını izleyen filtrelerin kullanılması, üç boyutlu spektrum gösterimi, “wavelet” analizi gibi teknikler sayılabilir. Herhangi bir makinada kalkış ve duruş esnasında üretilen titreşimler çok değerli bilgiler içerir. Zira bu süreçte makina çok farklı frekanslardaki kuvvetlerle kısa bir süre içinde tahrik edilir ve bu tahrik kuvvetlerine makinanın verdiği tepki makinanın döner ve sabit elemanlarının yapısal özelliklerini ortaya koyar. Amaç makinanın dönel elemanlarının rezonans frekanslarını saptamak ve bu frekansları yapısal rezonanslardan ayırt etmektir.

Kısa süre içinde art arda çok sayıda frekans spektrumu üretebilmek için çok güçlü ve hızlı bir titreşim veri toplama ve analiz sistemi kullanılmalıdır. Kalkış ve duruş testlerinde kullanılan titreşim ölçüm sistemi Şekil 7 de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kalkış ve duruş testlerinde kullanılan titreşim ölçüm sistemi, [3].

Ölçümlerde kullanılan cihazlar şunlardır:

1. Brüel & Kjær PULSE Titreşim Analizörü
2. Brüel & Kjær Tip 4391 Endüstriyel İvmeölçer (2 Adet)
3. Brüel & Kjær Tip MM0024 Fotoelektrik Takometre
4. Dell Inspiron 2500 Notebook Bilgisayar

3 nolu fotoelektrik takometre devir hızını ölçmekte ve istenilen devir hızı aralıkları ile ölçümleri tetiklemektedir. Kullanılan 1 nolu Pulse titreşim analizörü 4 kanallı olup 2 nolu ivme transdüserlerinden gelen sinyalleri proses etmektedir. Pulse sistemi Notebook Bilgisayar üzerindeki bir yazılım aracı ile istenildiği gibi programlanabilmektedir. Sistem istenildiği gibi seçilen devir hızı aralıklarında titreşimleri ölçmekte ve gerçek zamanda frekans düzlemine aktarabilmektedir. Böylece kalkış veya duruş esnasında art arda alınan yüzlerce titreşim spektrumu bilgisayar ekranında görsel olarak sonuçları yansıtabilmektedir.

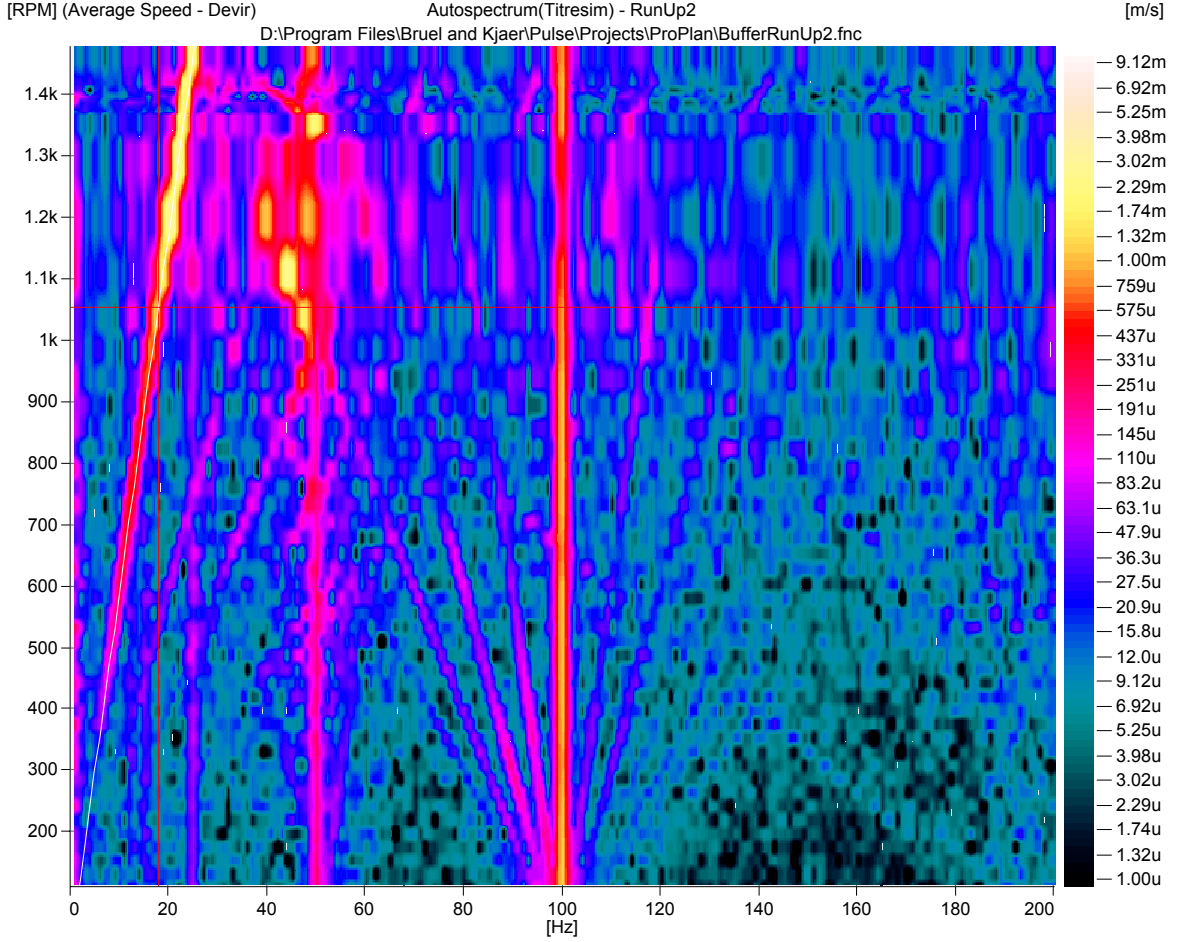
4. SİNER BACAGAZI FANI ve MOTORU ÜZERİNDEKİ ÖLÇÜMLER

Kalkış ve duruş testlerinin uygulaması ile ilgili örnek çalışma, bir demir-çelik işletmesinde bulunan sinter bacagazı fanını tahrik eden oldukça eski bir elektrik motorunda yaşanan titreşim probleminin nedenlerinin araştırılması ile ilgilidir.

Sistem 1350 kW gücünde ve 1480 dev/dk hızında dönen bir asenkron elektrik motoru ve tahrik ettiği sinter bacagazı fanından oluşmaktadır. Hem motor hem de fanda ayrı ayrı yüksek titreşimler gözlenmiştir. Öncelikle elektrik motorundaki titreşimlerin nedenlerini araştırmak için kalkış ve duruş esnasında sadece elektrik motoru üzerinde titreşim spektrumları ölçülmüştür. Bu diyagramlarda y-ekseni devir hızını, x-ekseni titreşim frekanslarını ve renk tonları ise titreşimlerin şiddetini göstermektedir. Açık renk tonları artan titreşim hızlarını göstermektedir.

Şekil 8 de *kalkış* esnasında ölçülen titreşim spektrumları görülmektedir. Bu diyagramlar her 25 dev/dk lık hız artışında titreşimlerin üç ortalaması alınarak üretilmiştir. Sistem şebekeden enerji almaktadır. 50 Hz ve 100 Hz bileşenleri devir hızından bağımsız elektrik motorlarında görülen tipik elektromagnetik kökenli arıza frekanslarıdır. 50 Hz daha çok rotor ile ilgili yatak boşlukları gibi nedenlerden kaynaklanacak dinamik eksantrisite sorunlarını yansıtmakta, 100 Hz ve civarındaki devir hızı ile ilgili modülasyonlar ise statorda distorsiyon ve olası çatlaklara işaret etmektedir. Sistemde ayrıca 25 ve 15 Hz'de devir hızından bağımsız tahrikler gözlenmektedir. Bu frekanslarda görülen titreşimlerin ise civarda çalışan diğer makinalardan kaynaklanan ve zeminden iletilen titreşimler olduğu saptanmıştır. Devir hızı ile ilgili titreşimler ise orijinden geçen ve 100 Hz etrafındaki eğik çizgiler olarak görülmektedir.

Bu diyagram bize öncelikle statorda ciddi problemlerin olduğunu, devir hızının çalışma devri olan 1480 dev/dk ya ulaştığı noktada, hem zeminden iletilen titreşimlerin, hem de 100 Hz etrafında devir hızının üç katındaki modülasyonun üst üste çakışması sonucu titreşimlerin motor yataklarında 8-9 mm/s'ye ulaştığını göstermektedir.

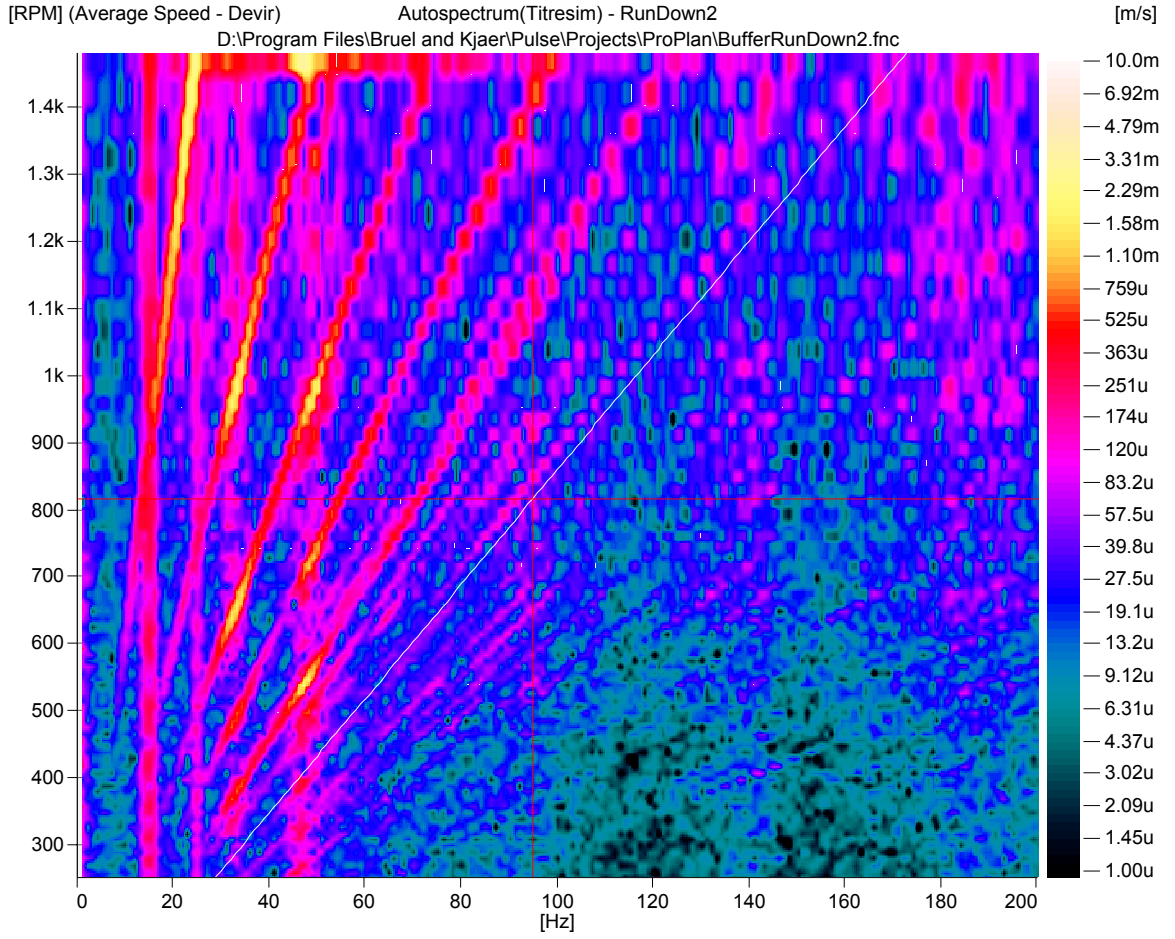


Şekil 8. Kalkış esnasında ölçülen titreşim spektrumları.

Şekil 9 da ise *duruş* esnasında ölçülen titreşim spektrumları görülmektedir. Bu spektrumlar şebekeden sağlanan enerji aniden kesildiğinde motor devir hızı azalırken her 25 dev/dk de bir alınan üç ortalama titreşim spektrumlarının yansıtılması ile elde edilmiştir.

Görüldüğü gibi artık kalkış diyagramında 50 ve 100 Hz de izlenen elektromagnetik kökenli titreşimler bu diyagramda yok olmuş ve sadece devir hızı ve katlarındaki eğik çizgiler kalmıştır. Ancak sistemde daha önce de görülen ve civarda çalışan diğer makinalardan kaynaklanan, zeminden iletilen titreşimler 25 ve 15 Hz'deki devir hızından bağımsız titreşimler aynen durmaktadır.

Bu iki diyagram kalkış ve duruş kayıtlarından makina ile ilgili ne kadar çok bilgi üretilebildiğini somut bir biçimde göstermektedir.



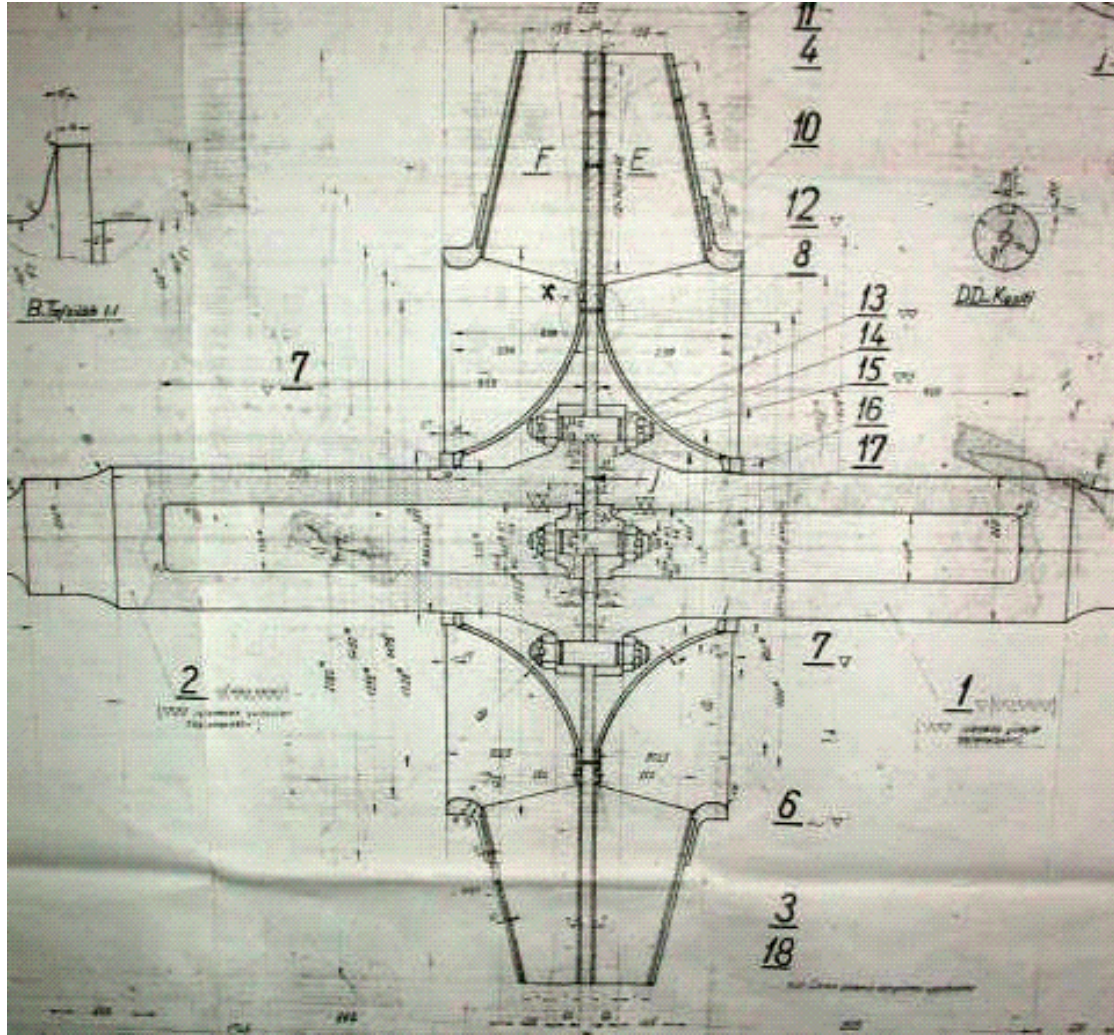
Şekil 9. Duruş esnasında ölçülen titreşim spektrumları.

Motorun tahrik ettiği fanda ise dengesizlik olduğu tespit edilmiştir. Ancak dengeleme çalışmaları sırasında duruş ve kalkışlardan sonra sistemin davranışlarında kararsızlık olduğu gözlenmiştir. Dikkatli bir bakım teknisyeninin yaptığı bir gözleme göre fanın kalkış sırasındaki duruş konumunun titreşimleri etkilediği ifade edilmiştir.

Bu açıklama ışığında fan konstrüksiyonu gözden geçirilmiş ve iki parçadan oluşan fanın sökülerek temizlenmesi istenmiştir. Nitekim Şekil 10 da görülen fanın orta parçasında bulunan boşlukta zamanla 10 kg civarında bir sinter tozunun birikmiş olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu bakım teknisyeninin açıklamalarını doğrulamaktadır. Daha sonra fan dengelenmiştir.

Elektrik motorunun statoru üzerinde gerçekleştirilen boyut ölçümlerinde ve stator kapaklarında yatakları taşıyan flanşlarda yapılan tahribatsız muayenede üç adet çatlak tespit edilmiştir.

Fan ve elektrikli motor üzerinde gerekli önlemler alındıktan sonra titreşimlerin azaldığı ve sistemin sorunsuz çalıştığı ilgili kuruluş yetkilileri tarafından kendi ölçüm cihazları ile yaptıkları ölçümler sonucu ifade edilmiştir.



Şekil 10. Sinter Fanı kesiti.

5. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kalkış ve duruş esnasında devir hızına bağlı olarak yapılan titreşim ölçümleri ve kalkış ve duruş eğrileri devir hızı ile ilgili titreşimlerle

devir hızından bağımsız yapısal rezonansları ayırt etmede son derece yararlıdır.

- Bu ölçümler özellikle elektrik motorlarında mekanik ve elektromagnetik kökenli titreşimlerin kolayca ayırt edilmesini sağlar.
- Bir makinanda titreşimlerin nedenlerinin anlaşılmasında bakım teknisyenlerinin açıklamaları son derece yararlı bilgiler ve önemli ipuçları taşıyabilir.
- Titreşim nedenlerinin anlaşılmasında makinanın iç yapısının bilinmesi son derece yararlı ve aydınlatıcıdır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Goldman, S., “Vibration Spectrum Analysis”, Second Edition, Industrial Press Inc.9, N.Y.,
- [2] Bate, A.H., “Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives”, Brüel and Kjær Application Note
- [3] “Brüel and Kjær Pulse, An Introduction to PULSE Software”, BR 1505-11, 1999.