



Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Fırçasız Doğru Akım Motorunun (BLDC) Kısa Devre Arıza Analizi

Mehmet Recep MİNAZ*

Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt

mehmetrecepminaz@siirt.edu.tr ORCID: 0000-0001-8046-6465, Tel: (484) 212 11 11 (3034)

Kadriye YILDIZ

Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt

47kadriyeyildiz@gmail.com 47kadriyeyildiz@gmail.com

Geliş: 30.07.2019, Revizyon: 21.06.2020, Kabul Tarihi: 30.08.2020

Öz

Üç fazlı sürekli mıknatıslı fırçasız makineler, güvenilirlik ve hata toleransının önemli olduğu birçok uygulamada kullanılır. Bu çalışmada, dış rotorlu sürekli mıknatıslı bir fırçasız doğru akım (BLDC) motorunun arızasının benzetimini yapmak için, stator faz devresine ek paralel bir empedans eklenerek sargıda oluşan yalıtım bozulması modellenmiştir. Arıza empedansı, manyetik bozulmaya neden olan dolaşım akımını hesaplamak için gereklidir. Motor akım imza analizi (MCSA) arızalı motorun akım işaretleri üzerindeki değişimi göz önünde bulundurularak farklı şiddette arıza tespiti için analizler yapılır. Kısa devre arıza modellemesi sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilip kullanılan program ile stator çıkış işaretlerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak öznelik çıkarımı elde edilmiştir. Sınıflandırıcı olarak k en yakın komşu (k -NN), çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağları (MLP), karar ağaçları (RT) gibi farklı sınıflandırma metotları uygulanarak kısa devre arızaların oluşumunu ve şiddetini tahmin etmede kullanılmıştır. İki farklı öz nitelik çıkarımı ile arıza tespitinin doğruluğu karşılaştırıldıktan sonra uygun öz nitelik veri seti seçilip, sunulan kriterin kısa devre hatası tespit edilmiştir. Arıza tespitinde, MLP sınıflandırma metodu %80 başarı oranına sahip olmasına karşın k -NN ve RT metotlarında %100 başarı elde edilmiştir. Bu durumda arıza tespiti için uygulanan k -NN ve RT metotlarının oldukça başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi; Arıza modelleme; Spektral analizi; Öznelik çıkarımı; Arıza tespiti

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Sürekli mıknatıslı motorlar besleme kaynaklarının türlerine göre, sürekli mıknatıslı senkron motor (PMSM) ve fırçasız doğru akım motoru (BDCM) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu motorlardan içsel sürekli mıknatıslı (IPM) tipi motorlar, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik dâhil olmak üzere mükemmel performans özelliklerine sahiptir. Bu nedenle motorlu sistemleri de dâhil olmak üzere hibrit elektrikli araç ve elektrikli araç aralarında bulunduğu çok çeşitli endüstriyel ve transit uygulamalarda, her türlü elektrikli tahrik sisteminde aktif olarak kullanılmaktadır. BLDC sürücü sistemleri ile çalışan IPM motorlar, sağlamlıkları ve yüksek performansları nedeniyle birçok güvenlik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır [1], [2].

İzolasyon arızası nedeniyle meydana gelen stator arızaları, sarım-sarım, bobin-bobin, faz-faz ve faz-toprak hatası olarak sınıflandırılır. Erken ve doğru sarım-sarım hata teşhisi, yukarıda bahsedilen diğer hataların ortaya çıkmasını önler ve sürekli mıknatıslı senkron motorların (PMSM) yüksek güvenilirliğini sağlar [1]. Bobinler birbirlerinden ve makinenin gövdesinden yalıtkan kâğıt kullanılarak izole edildiğinden, sarımlar arası arıza en sık görülen elektrikselsel arızalardan olmak ile birlikte diğer stator arızalarına kıyasla daha muhtemeldir. Kısa devre arızası ilk aşamada tespit edilmezse, yüksek akım nedeniyle faz-toprak arızasına neden olabilir. Bu da yüksek ısı üretir [3]–[6]. Faz-toprak arıza akımının büyük olması nedeniyle stator sargı arızası nüveye zarar verebilir. Bu nedenle, stator sargılarında oluşan kısa devre arızası teşhisi oldukça gereklidir. Bu durum sistemin güvenilirliğini artırabilir ve ciddi hasarları önleyebilir. Geleneksel olarak, stator sarım arızaları empedans değerlerindeki değişimin izlenmesiyle tespit edilir [7], [8].

Toliyat ve Lipo, bu hataların makine empedansında deneysel olarak birçok deneme yaparak makinenin dengesiz faz akımları çizmesine neden olduğunu göstermiştir [9]. Bu

da hatta akan negatif bileşen akımlarının sonucudur. Bununla birlikte, negatif bileşen akımlarına, gerilim dengesizliği, makine nüvesinin doyuma ulaşması gibi birçok sorun neden olabilir [10]. Elektrikli makinelerde kısa devre arızasının bir veya birkaç nedeni vardır. Bunlar ısıl, elektrikselsel, mekanik ve çevresel stresleri içerir [4].

Bu çalışmada SEY kullanılarak sağlıklı makinenin analizi yapılmıştır. Daha sonra tasarımı yapılan makinede kısa devre arızası oluşturularak makinenin davranışları incelenmiştir.

Arıza Teşhis teknikleri

Gelişen teknolojileri ile birlikte her geçen gün kullanılmakta olan veri miktarı hızlı bir şekilde büyümekte ve hızla artan veri miktarı da bu verilerin analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Her 20 ayda bir dünyadaki veri miktarının ikiye katlandığı tahmin edilmektedir [11]. Uygun sinyal işleme aracını kullanarak bir sinyalden bilgi elde edilebilmektedir. Bu veriler veri madenciliği tekniği ile elektrik makinalarında oluşabilecek arızaların erken teşhisi için oldukça önemlidir [12]. Literatürde son dönemlerde arıza teşhisi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Özellikle rulman arızalarında kullanılan bu yöntemler oldukça başarı göstermektedir [13]–[16]. Sonlu elemanlar yöntemi bir asenkron motorun mekanik arıza teşhisinde başarı göstermiştir. K-NN, MLP, RT yöntemleri kullanılarak etkin bir sonuç alınmıştır. [17].

Weka ilk olarak 1997 yılında uygulanmış bir Waikato ürünüdür. Bu makine öğrenme paketi, halka açık ve gerçek dünyadaki veri madenciliği sorunlarını çözmek için bir algoritmalar koleksiyonu sunmaktadır. Yazılım tamamen Java ile yazılmış ve standart makine öğrenme tekniklerinin bir dizi standart bir ara yüz içerir. Weka'daki birincil öğrenme yöntemleri olan sınıflandırıcılar ve verileri modelleyen bir kural kümesi veya karar ağacı oluştururlar. Weka ayrıca kurallarını

ve kümelenme verilerini öğrenmek için algoritmalar içerir. Tüm uygulamalarda tek biçimli bir komut satırı ara yüzü vardır. Ortak bir değerlendirme modülü veri setine göre öğrenme algoritmasının göreceli performansını ölçer [18]. WEKA, ham verinin işlenmesi, öğrenme metodlarının veri üzerinde istatistiksel olarak değerlendirilmesi, ham verinin ve ham veriden öğrenilerek çıkarılan modelin görsel olarak izlenmesi gibi veri madenciliğinin tüm basamaklarını destekler. Geniş bir öğrenme algoritmaları yelpazesine sahip olduğu gibi pek çok veri ön işleme filtreleri içerir. Bu çalışmada Weka programı ile arızaların şiddetini test etmede yapay sinir ağları (MLP), k-en yakın komşu (k-NN) ve karar ağaçları (RT) sınıflandırma yöntemleri olarak seçilmiş ve doğruluk yüzdesi açısından uygun görülmüştür. Kullanılan tüm sınıflandırıcı algoritmalar doğruluk oranları ve işlem süreleri farklılık gösterse bile benzer mantıkla çalışmaktadır.

▪ ***K en yakın komşu Algoritması (k-NN)***

K-NN algoritması, T. M. Cover ve P. E. Hart tarafından önerilen, örnek veri noktasının bulunduğu sınıfın ve en yakın komşunun, k değerine göre belirlendiği bir sınıflandırma yöntemidir. Yeni karşılaşılan bir örnek, eğitim setinde yer alan örnekler ile arasındaki benzerliğe göre sınıflandırılmaktadır [19]. Algoritmanın sınıflandırma işlemindeki başarısını etkileyen faktörlerden biri k değerinin doğru seçilmesidir. Bu değerinin çok büyük veya çok küçük seçilmesi, aynı sınıfta bulunması gereken örüntülerin farklı sınıflara atanabilmesine neden olabilmektedir. Farklı k değerleri ile deneyerek en başarılı olan k değerinin belirlenmesi en yaygın yöntemdir, ancak bu işlem zaman açısından maliyetli bir işlemdir. Sınıflandırılacak örüntülerin boyutları, k-NN işlem hızını etkileyen diğer bir parametredir [20].

▪ ***Çok katmanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağları (MLP)***

Genel olarak yapay sinir ağları insan beyninin biyolojik sinir yapısını taklit ederek sinirsel

algılayıcılar yardımı ile önceden öğrenilmiş ya da sınıflandırılmış bilgileri kullanarak yeni bilgiler türetebilen ve oluşturabilen, karar verebilen bilgisayar programlarıdır. Örüntü tanıma, sistem tanılama, robotik, sinyal işleme, doğrusal olmayan denetim alanları gibi birçok uygulama alanında MLP yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. İleri beslemeli sinir ağlarında, nöronlar katman şeklinde düzenlenir. Katmandaki nöronlar önceki katmandan girdi alır ve çıktılarını diğerine aktarır. Bu tür ağlarda aynı veya önceki katmanlardaki nöronlara bağlantılara izin verilmez. Son nöron katmanına çıkış katmanı ve katmanları denir [22].

Yapay sinir ağları ile yapılan sınıflandırma en küçük arıza şiddetini teşhis etmede başarısız olmuştur. Motorun arızaya karşı duyarlı çalışma koşullarında yani en küçük arızanın bile istenmeyen sonuçlara neden olacağı durumlarda bu teşhis matrisi yetersizdir. Bundan dolayı ilerleyen bölümde yeni bir öz nitelik çıkarımı (ikinci bir yöntem) ile farklı eğitim sonuçları incelenecektir.

▪ ***Karar Ağaçları (RT)***

Karar Ağaçları, veri madenciliğinde ‘böl ve yönet’ stratejisini uygular. Bir karar ağacı algoritmasının prensipte görevi veriyi özyinelemeli olarak alt veri gruplarına dallanma yaparak bölmektir. Bu ayırım aşamasında oluşan her yeni dal bir kuralı ifade etmektedir. Temel olarak iki adımdan oluşur. Birinci adım ağacın oluşturulması, diğer adım ise veri tabanındaki her bir kaydın bu ağaca uygulanarak verilerin sınıflandırılmasıdır [23], [24].

Sınıflama aşamasında girilen test verisi, sınıflama kurallarının veya karar ağacının doğruluk yüzdesini bulmak üzere kullanılır. Eğer kabul edilebilir bir doğruluk yüzdesi varsa, bu sınıflandırma algoritması yapılan çalışmanın verileri sınıflandırılması amacıyla kullanılır [23], [25].

Test Motorunun Modellenmesi

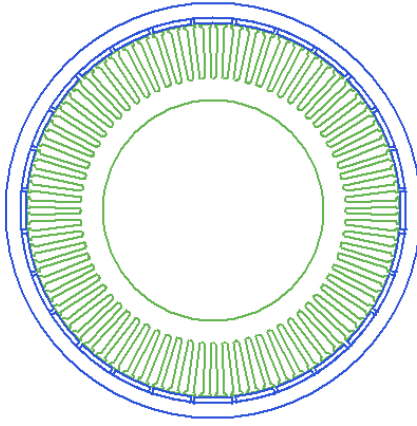
Bir BLDC motor, bir tür senkron motordur. Bu, stator tarafından oluşturulan manyetik alanın ve sürekli mıknatıslı rotorun manyetik alanının

senkron olarak döndüğü anlamına gelir. BLDC motorlarda normalde asenkron motorlarında görülen “kayma” oluşmaz. BLDC motorları farklı sayıda faz konfigürasyonuna sahiptir. Bunlardan, 3-fazlı motorlar birçok uygulamada en popüler olanlardır. Bu çalışmada; 3-fazlı, sürekli mıknatıslı, dış rotorlu BLDC arıza teşhis teknikleri uygulanmak üzere SEY ile tasarlanmıştır. Kullanılan program, maxwell denklemlerini sonlu bir uzayda bulunan bölgede problem çözerken, elektromanyetik problemleri çözmek için SEY kullanılmaktadır. Yüksek performanslı, düşük frekanslı bir elektromanyetik alan benzetimi kullanılmıştır. Bu benzetim tasarlanacak elektrik motoru, generatör ve transformatör gibi elektrik makine davranışlarının modellenmesini sağlamaktadır. Böylece çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan değişik

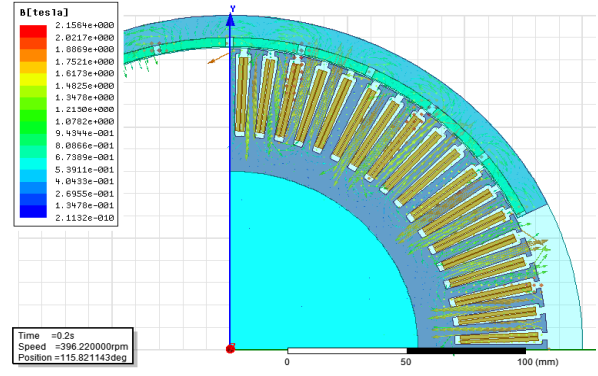
geometrilere ve özelliklere sahip makinelerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak vermektedir. Bu çalışmada SEY’den yararlanarak BLDC motorun tasarımı yapılmıştır. Bu gibi benzetim araçlarının kullanılması, araştırmacıların bir elektrik makinesindeki hataların neden olduğu etkileri vurgulamalarına ve hata tespit yöntemleri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. SEY analizini kullanarak, herhangi bir hata nedeniyle makinenin elektrik, manyetik ve mekanik davranışlarındaki değişiklikler incelenebilir. Bu da makineyi açmaya gerek kalmadan veya laboratuvarlarda deney yapmadan kolayca gözlemlemeye olanak sağlar.

Tablo 1. BLDC Motoruna Ait Tasarım Parametreleri

Makine kutup sayısı	28	
Stator Dış Çapı	270	mm
Stator İç Çapı	160	mm
Rotor Dış Çapı	300	mm
Rotor İç Çapı	272	mm
Stator oluk Sayısı	72	
Anma Gerilimi	48	V
Giriş Gücü	1500	W
Anma Hızı	380	rpm
Anma momenti	36.16	Nm
Anma Akımı	31.62	A(rms)
Atalet Momenti	0.227	kgm ²



a

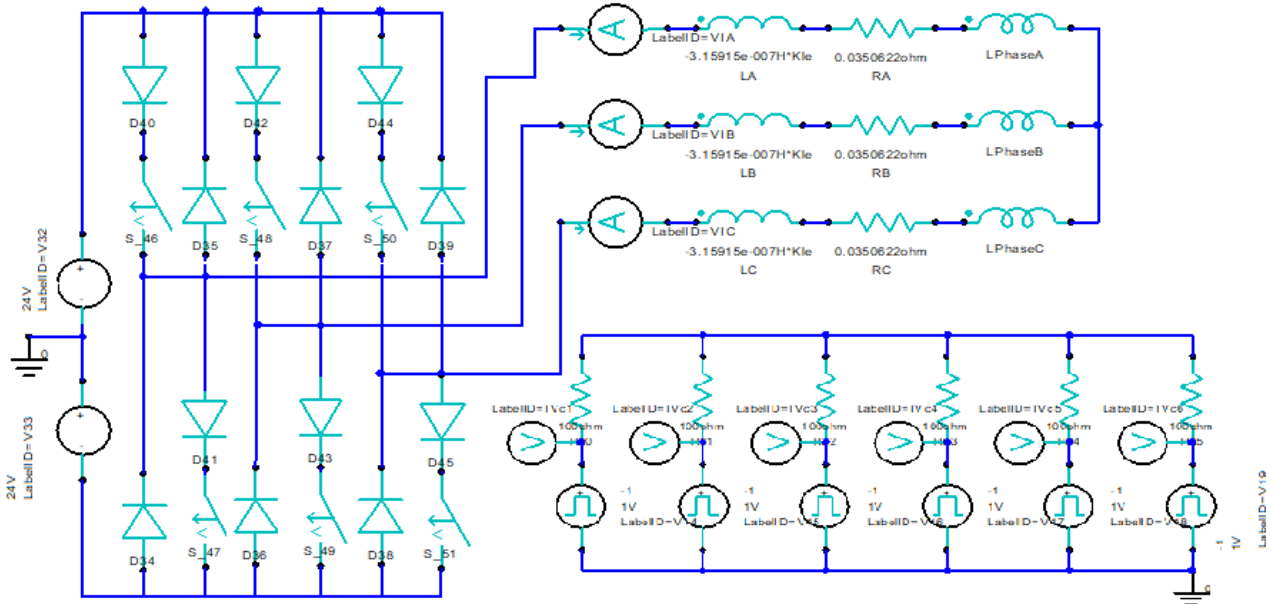


b

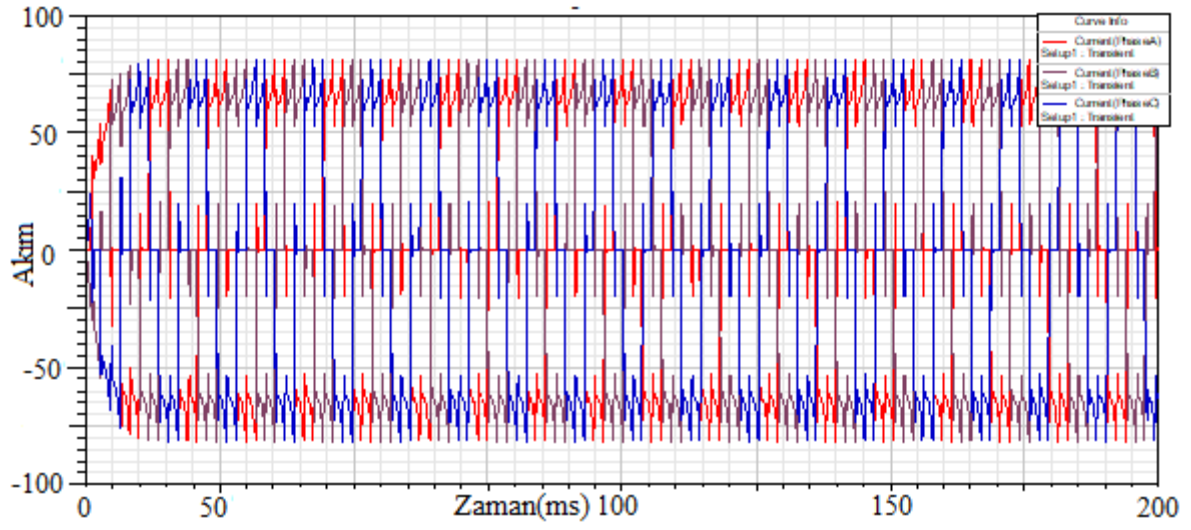
Şekil 1.a) RMXprt modeli, b) 2D görünümlü BLDC motorunun manyetik akı dağılımı

Sunulan geometrik bileşenin yanı sıra, benzetim modeli ayrıca fiziksel parametrelere sahiptir. Benzetim modelinin matematiksel çıkarımı devre modeli aracılığıyla daha anlamlı hale getirilebilir. Stator olukları bobin ile temsil edilirken iletkenin direnci, anahtarlama elemanları, besleme gerilimleri (güç kaynağı) ve çeşitli ölçüm cihazları devre modelinde görselleştirilmiştir.

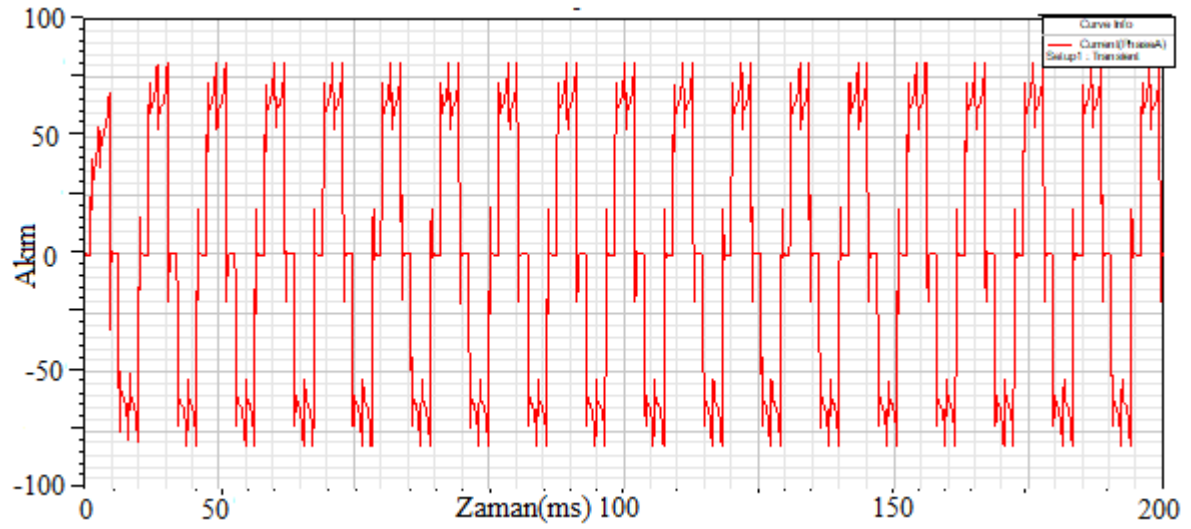
Elektriksel bileşenlerinin yanında manyetik bileşenlerde içerir ve dolayısıyla devre tam olarak bir elektrik devresi değildir. Devre editörü ile BLDC devre modeli Şekil 2'de gösterilmektedir. Üç fazlı stator akımlarının zamanla değişimi Şekil 3'te, A fazına ait stator akım-zaman işareti değişimi verilmiştir. Şekil 5'te ise moment işaretlerinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



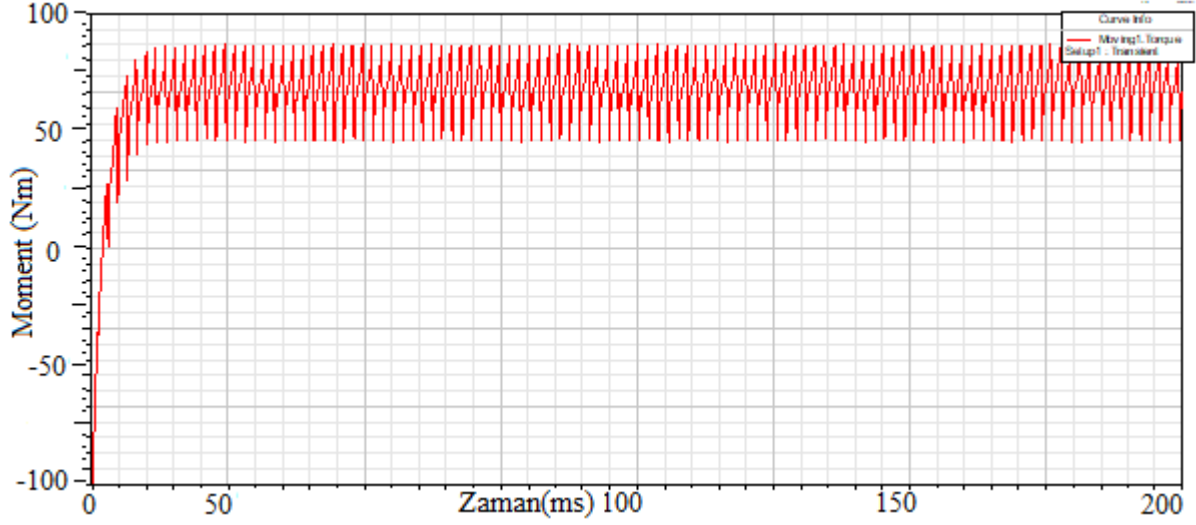
Şekil 2. BLDC eşdeğer devre modeli



Şekil 3.3 Fazlı Stator Akımlarının Zamanla Değişimi.



Şekil 4.A Fazlı stator Akım-Zaman işareti



Şekil 5. Moment işareti

Arıza Modelleme

SEY kullanılarak, gerçek bir sürekli mıknatıslı BLDC motorun özelliklerine dayanarak tasarlanan bu sağlam motor modeli yardımıyla dört tane arızalı motor modeli oluşturulmuştur. Tüm benzetimler 0.0001 sn adım aralıklarıyla 0.2 sn boyunca 2000 adımda gerçekleştirilmiştir. Bunun ardından zaman domeninde elde edilen akım işaretine FFT uygulanarak, yüz örnekleme frekansı elde edilip spektral analizi gerçekleştirilmiştir. FFT analizi motorun akım işaretine 114.5 sn ile 123.5 sn aralıklarında tam bir dalga boyu için uygulanmıştır. Bu frekans analiz yöntemi tek periyot ve çoklu frekans fikrine dayanmaktadır. Elde edilen çıkış işareti (bu motorun stator akım işareti trapezoidal bir sinyaldir) sinüs ve kosinüslerin toplamı olarak ifade edilir. Analiz sonucu temel frekans ve bunların katları olmak üzere dB cinsinden çıkış harmonikleri elde edilmiştir. Referans alınan aralık tüm arızalı motor modelleri için aynı alınmıştır. Bu işaretlerin arızalara ve arıza şiddetlerinin artışına karşı gösterilen değişimleri incelenerek sağlıklı motor ile arızalı motorların davranışları karşılaştırılmıştır.

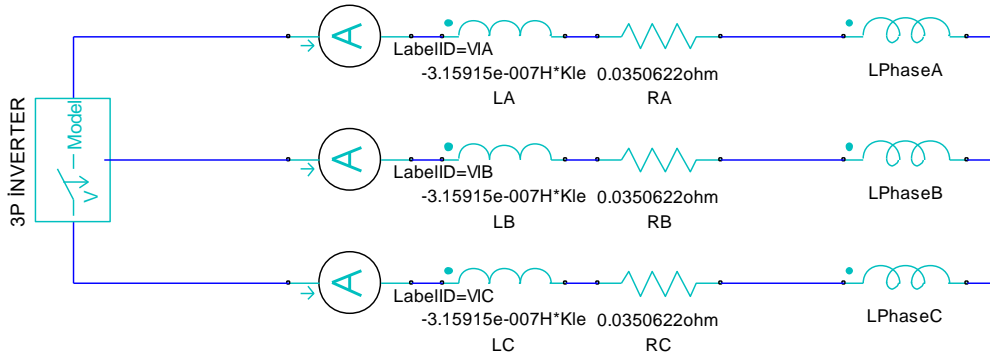
Stator Sargılarında Yalıtım Arıza Model Benzetimi

Elektrik makinedeki stator arızaları kısa devre veya stator sargısının açık devresi nedeniyle ortaya çıkabilir. Kısa devre arızaları, açık devre arızaları ile karşılaştırıldığında daha yaygındır. Kısa devre arızaları, sistemin stator izolasyonunun bozulmasından kaynaklanır [26], [27]. Genel olarak alternatif akım motorlarının kısa devre döngüsünün toplam empedansı iki parametreden oluşur, bunlar hata direnci R_f ve kısa devre olan sarımların kendi içlerinde oluşturdukları indüktans L_s değerleridir. Oluşturulacak olan kısa devre arızası için bu iki değer uygun bir şekilde benzetiminin yapılması gerekir. Gerçek bir uygulamada, kısa devre arızası meydana geldiğinde, iki iletken doğrudan temas eder. Bu nedenle, kısa devre döngüsündeki hata direnci genellikle çok düşük bir değere sahiptir [28]. Sıfır hataya karşı yüksek direnç, önerilen yöntemin performansını etkileyebilecek ana faktörlerden biridir. Sıfır hata direnci, sadece ideal bir kısa devre hatası için geçerlidir. Gerçekte, akım iletme geçtiğinde iletkenler arasındaki hata direnci, çok düşük bir düzeydedir. Arıza hata direnci büyüdükçe, önerilen yöntem kısa devre sarımların sayısını doğru olarak tahmin etmede güçlük çekecektir [28], [29]. Bunların yanında,

stator sargılarında oluşan kısa devre arızaları, aynı zamanda manyetik problemlere neden olabilen en yaygın makine kaynaklı hatalardan biri olarak kabul edilir. Kısa devre arızası aynı zamanda büyük bir arıza akımına yol açarken demagnetizasyon arızasını beraberinde getirir [6].

Sürekli mıknatıslı BLDC motorunda kısa devre arızası, bir hata direnci (R_f) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu hata direnci motorun herhangi bir fazına paralel olarak

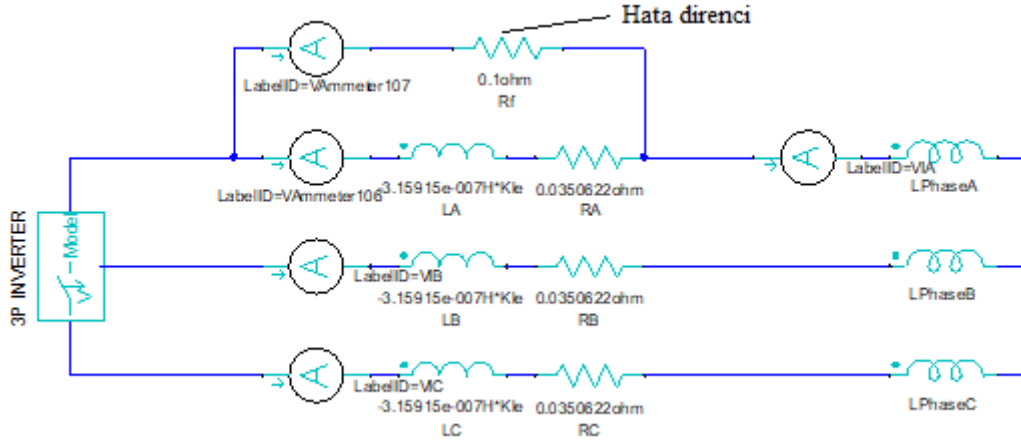
bağlanıldığında o faza ait olan empedans değerini değiştirecektir. Bu da motorda fazlar arasında bir dengesizliğe yol açacaktır. Bu oluşan fazlar arasındaki dengesizliğin kendini elektriksel işaretlerde göstermesi beklenir. Bu çalışmada motorun A fazına ait bobin parametreleri üzerinde çalışılarak kısa devre arızasının benzetimi yapılmıştır. Arıza analizi gerçekleştirilecek olan motorun eşdeğer devresi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6. BLDC motorunun statora indirgenmiş eşdeğer devresi

Sağlıklı makine devre modeline dayalı hata devresi benzetimi bir hata direnci (R_f) kullanılarak yapılmıştır. Bu direnç değerine göre arıza şiddeti belirtilmiştir. $R_f=0$ olduğunda sargının tamamı kısa devre durumuna geçecektir, $R_f=\infty$ olduğunda ise bağlı olduğu kol yüksek empedans durumuna geçip hata direnci üzerinden akım geçmeyecektir ki bu motorun sağlıklı durumunu ifade etmektedir. Bu iki durum dışında R_f in farklı değerleri için kısa devre arıza şiddetleri kolay bir toplam empedans hesaplama ile birlikte oran orantı işlemi ile tespit edilebilir. R_f direncinin değeri düştükçe arıza oluşturulan fazdaki empedans

değeri düşecektir. Bu durumda kısa devre edilmiş faz üzerinden daha yüksek akımlar çekecektir. Bu da daha düşük uç gerilimlerine sebep olur. Yani hata direnci düştükçe faz sargısı ısınır, güç kaybı ve bunun yanında gerilim düşümü de artacaktır. Bu durum makinanın verimini önemli ölçüde etkiler. Arıza şiddetleri olarak R_f direnci değerleri için; 0.01Ω , 0.05Ω , 0.1Ω , 1Ω olmak üzere farklı dört arıza şiddeti belirlenmiştir. İzolasyon arıza şiddetinin değişiminin motor üzerindeki etkisi incelenebilecektir. Stator sargısının A bobininde oluşturulan hata direncine ait sargı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 7. BLDC motorunun yalıtım direnci üzerinden kısa devre arızası gösterimi

Hata direnci üzerinden oluşturulan kısa devre arızasının şiddeti, sargı empedansı ile paralel bağlı R_f direncinin oluşturduğu net empedansın, sağlam durum empedansına oranı ile belirlenmiştir. Paralel bağlanan R_f direncinin değeri arttıkça net empedans sağlam motorun empedansına yaklaşacaktır. Bu durumda küçük şiddetteki arızalar da basit bir hesaplama ile R_f direnci belirlenerek oluşturulabilir. Aşağıda önerilen yaklaşımın matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$X_{LA} = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot LA \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$Z_A = R_A + jX_{LA} \quad (\Omega) \quad (2)$$

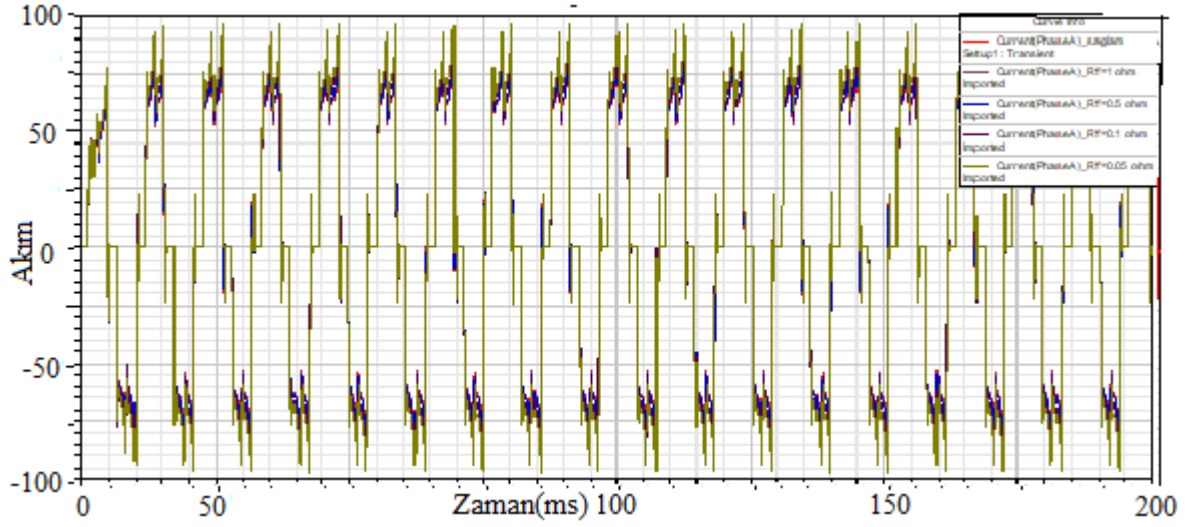
$$Z_T = \frac{R_f \times Z_A}{R_f + Z_A} \quad (\Omega) \quad (3)$$

Yukardaki denklemlerde Z_A A fazına ait empedans, Z_T arızalı motorun Afazına ait karakteristik empedansını göstermektedir. Sağlıklı durumun empedans değeri %0 kısa devre arızası olarak belirlendiğinde arızalı durumlarda küçük bir oranlama işlemi

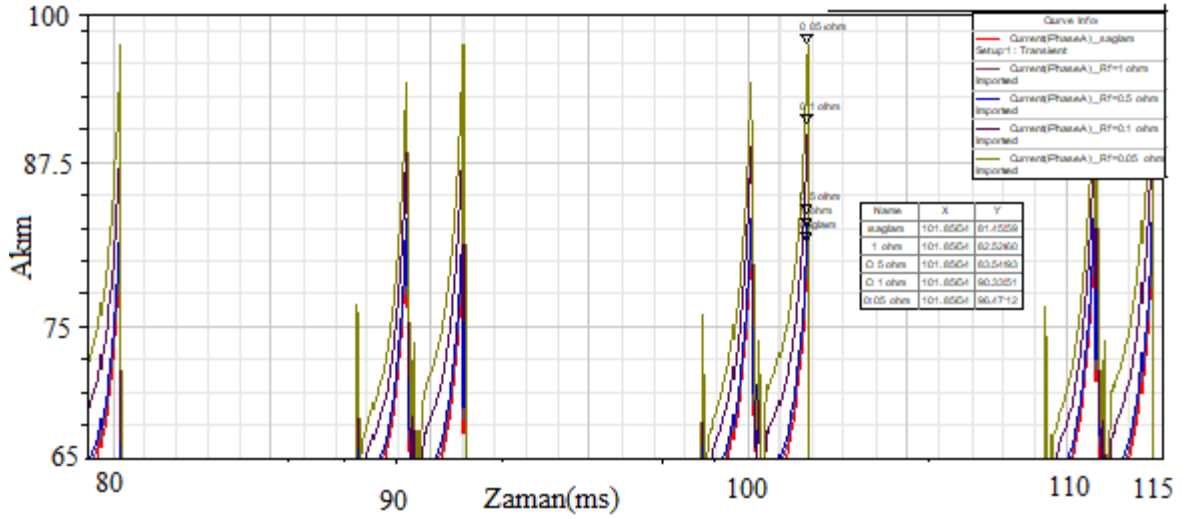
uygulanarak arıza şiddeti tespit edilebilir. Arıza şiddetinin belirlenmesinde oluşturulan formül aşağıda verilmiştir.

$$\%KD = \frac{Z_T \times 100}{Z_A} \quad (4)$$

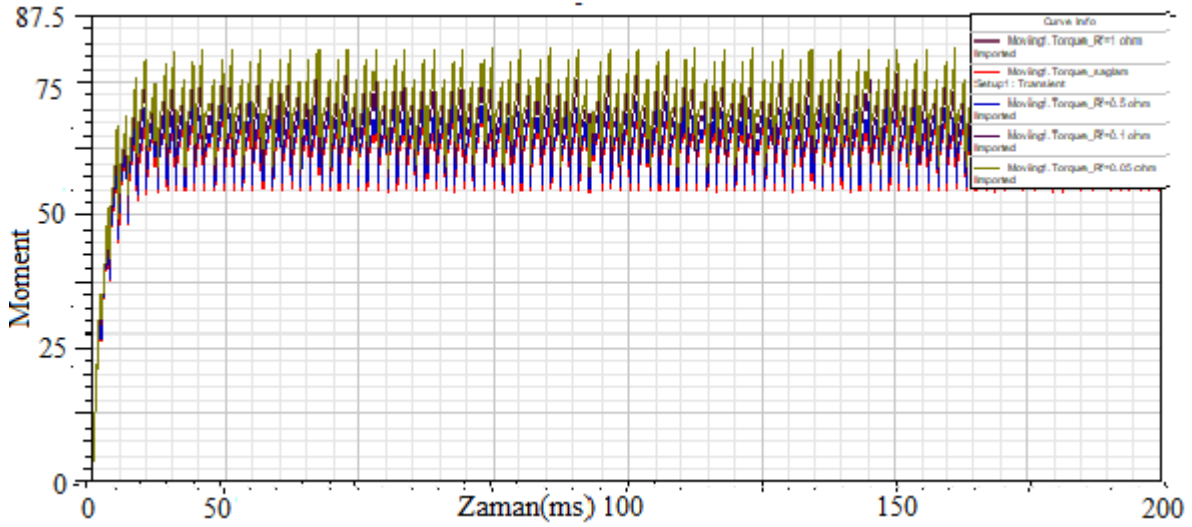
Bu durumda kısa devre (KD) oranı ; $R_f = 1$ için %3.5 KD, $R_f = 0.5$ için %6.5 KD, $R_f = 0.1$ için %26 ve $R_f = 0.05$ için %41.5 KD olmak üzere dört farklı arıza şiddeti oluşturulmuştur. R_f direncinin değişimine bağlı olarak A fazındaki toplam empedans değişimi üç sargı arasında dengesizliğe neden olur. Bu dengesiz yüklenme durumu elektriksel işaretlerde kendini gösterecektir. Bu şekilde arızalı durumlar MCSA arıza teşhisinde öznel olarak çıkarımı için kullanılabilir. R_f direnci değiştirildikten sonra devre programa aktarılarak sağlam motorun sargı parametreleri değiştirilmeye zorlanmıştır. Verilen sinyaller direnci ile belirtilirken, arıza teşhisi R_f yaparken sınıflandırmada bu hata direncine karşılık gelen kısa devre oranları kullanılacaktır.



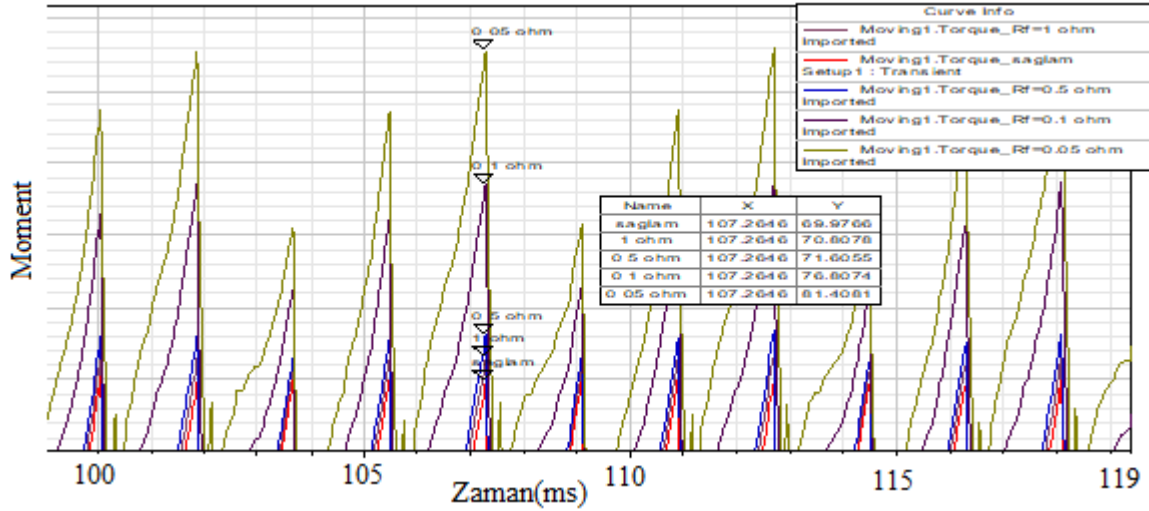
Şekil 8. BLDC motorda kısa devre(KD) arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş akım dalga formları



Şekil 9. BLDC motorun KD arıza şiddetleri için çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları



Şekil 10. BLDC motorun Farklı kısa devre (KD) arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş moment dalga formları



Şekil 11. BLDC motorun Farklı KD arıza şiddetlerine ait çözünürlüğü artırılmış moment dalga formları

Tablo 2. Farklı şiddetteki devre arızalarının akım ve moment karşılaştırılması

	Max Faz Akımı	Max Moment
Sağlıklı	81.4559 A	69.9766 Nm
$R_f = 1$ ohm	82.5260 A	70.0878 Nm
$R_f = 0.5$ ohm	83.5493 A	71.6055 Nm
$R_f = 0.1$ ohm	90.3351 A	76.8074 Nm
$R_f = 0.05$ ohm	96.4712 A	81.4081 Nm

Oluşturulan arıza ait akım ve gerilim işaretlerinin hata direncinden doğrudan, indüktans değeri ve sarım direncinden ise dolaylı olarak etkilendiği

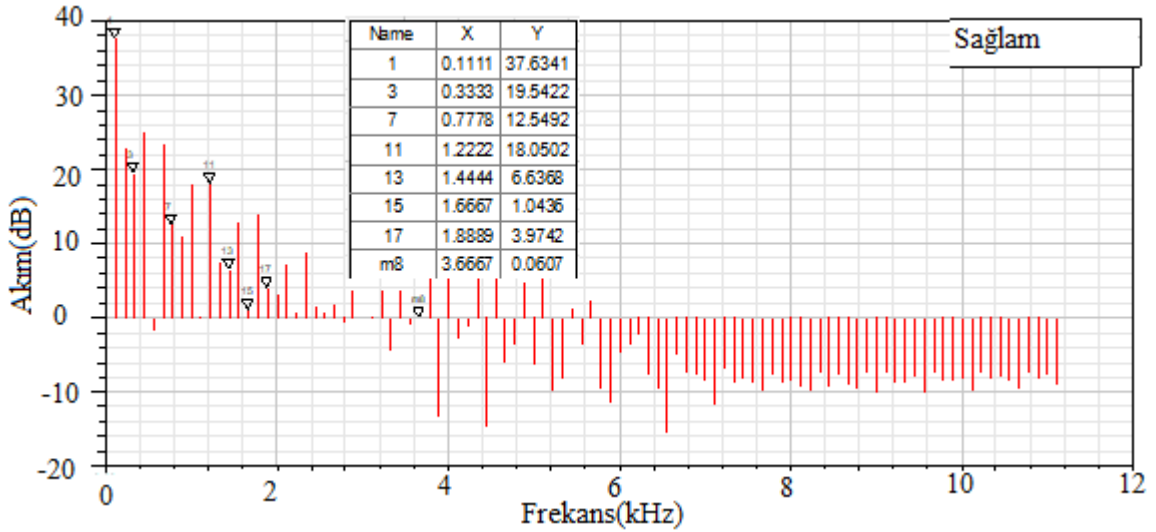
gözlemlenmiştir. Oluşan bu dalgalanmalar erken tespit yöntemi olarak kullanılmaktadır. Küçük indüktans ve direnç değişikliklerinde avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Yukardaki sonuçlar incelendiğinde, aynı akım da, kısa devre akımının genliği, yalıtım direncinin değeri azaldıkça artığı gözlemlenmiştir. Benzetimdeki kısa devre akımının genliği ile gerçekte oluşturulacak olan kısa devre arızası arasında bazı farklılıklar beklenmektedir. Bunun sebebi eğer arıza analiz ve teşhis modülü kablolu sistemler ile haberleşmeyi sağlayacaksa bu yan elemanların

dirençleri kısa devre döngüsünde arıza dirençlerine eklenir.

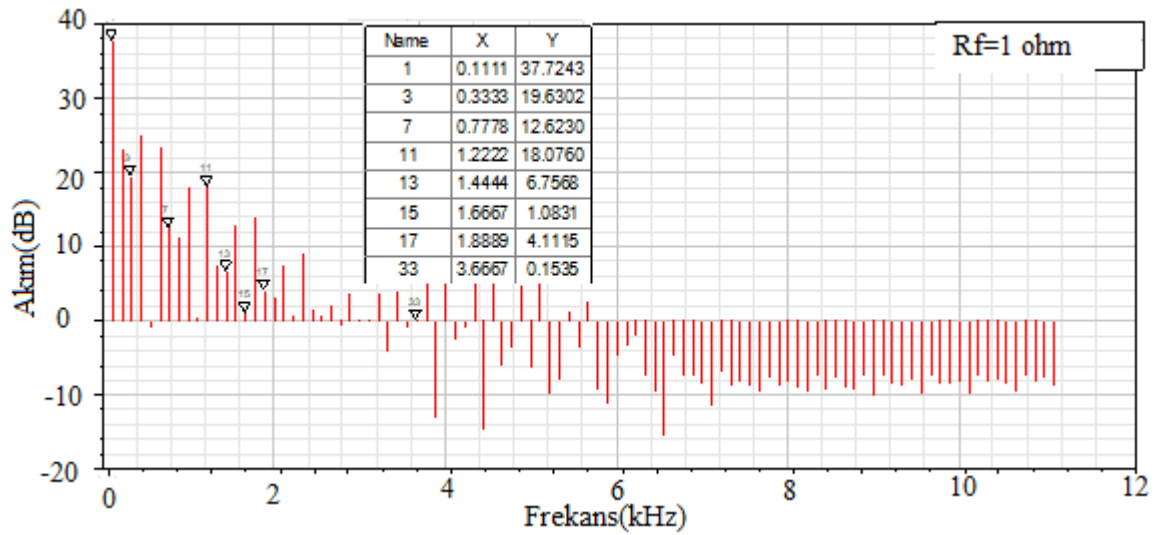
Arıza Tespit Yöntemi

Elektrik makinalarda MCSA arıza teşhisi, hızlı bir şekilde uygulanabilmesinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bir faz akımına sensor bağlanarak verileri çevrimiçi olarak anlık arıza tespiti yapılabilir. Yazılım tarafında, karakteristik hata harmonikleri arayışında akımın güç spektrumunu oluşturmak için FFT gereklidir [30]. Elektrik makinelerinde sabit olmayan koşullarda, makineden alınan işaretlerin kararlı değildir. Temel olarak, çoğu endüstriyel uygulamada sabit koşullar yoktur ve makine çalışma noktası (hız veya yük) zamana göre değişmektedir. Böyle bir durumda, makinenin doğru bir şekilde izlenmesi zordur. FFT dâhil olmak üzere geleneksel yöntemlerin

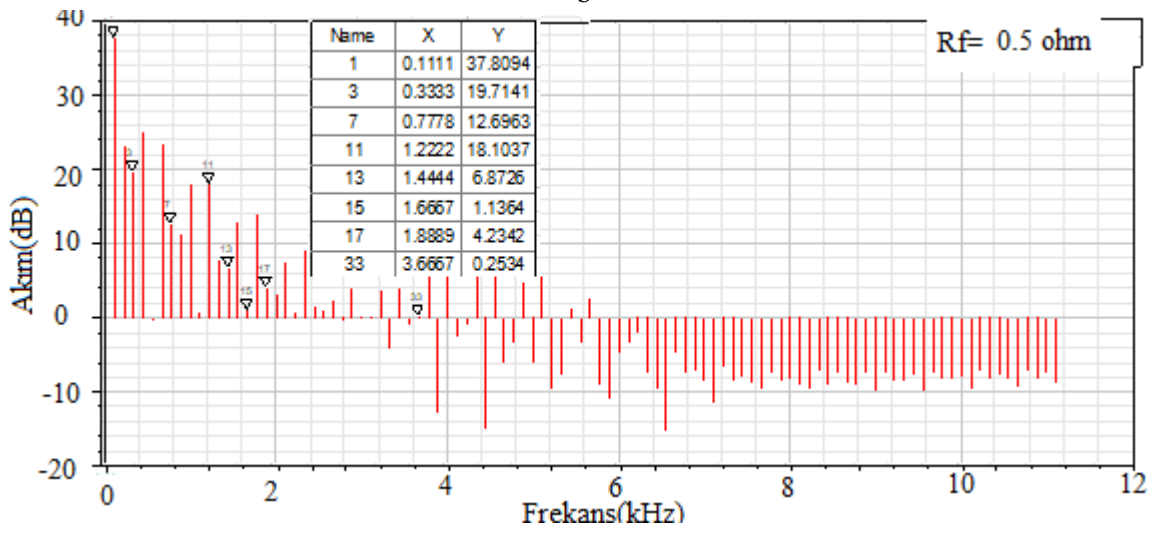
uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle, daha gelişmiş bir sinyal işleme tekniği uygulanmalıdır [31]–[33]. Ancak mevcut çalışmada farklı arıza şiddetlerine bağlı durağan sinyallerdeki (tam yüklenme ve sabit hızda) frekansları, FFT kullanarak stator akımını kendi frekans alanına dönüştürerek analiz edilmiştir. Akım ve gerilim işaretlerinde değişim kendini lineer bir şekilde belli etmesine rağmen özellik çıkarımı için daha elle tutulur sonuçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Stator akımının FFT analizini kullanarak kısa devre arıza analizinin yan bant frekans genlikleri belirlenmiş ve spektral analiz sonuçlarının daha belirgin ve somut veriler elde edilmiştir.



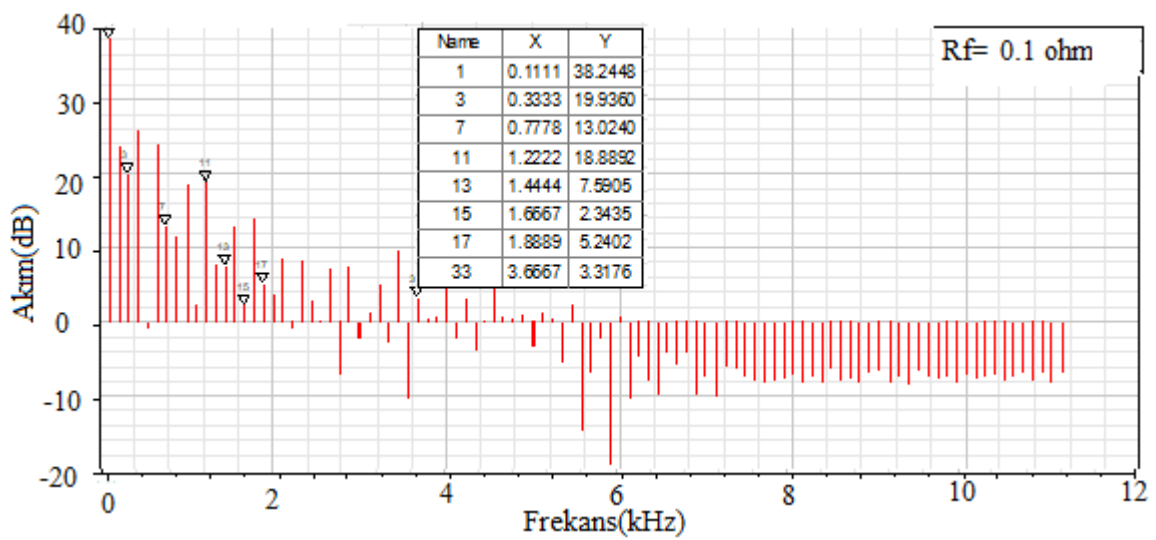
a



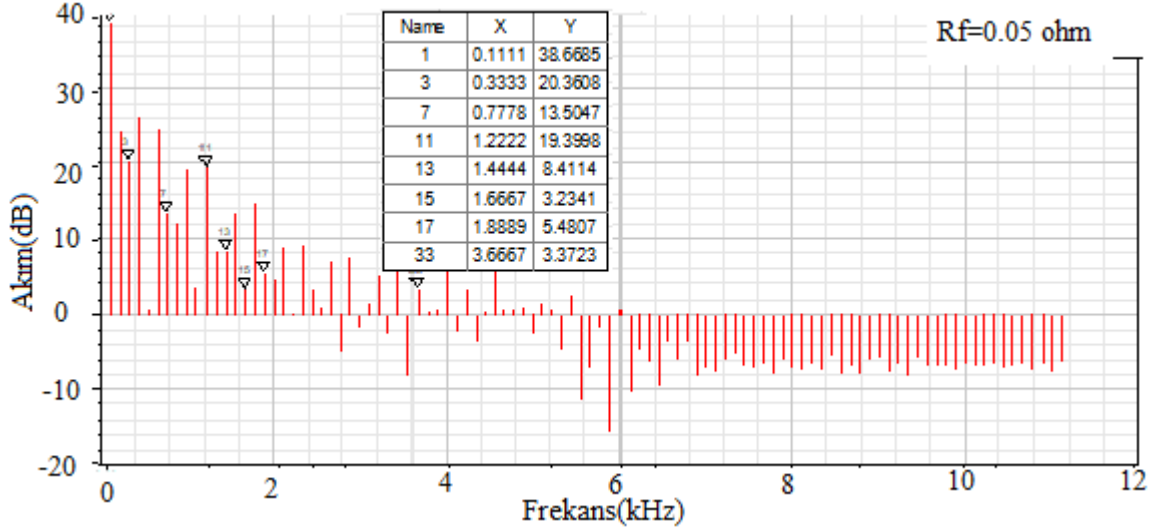
b



c

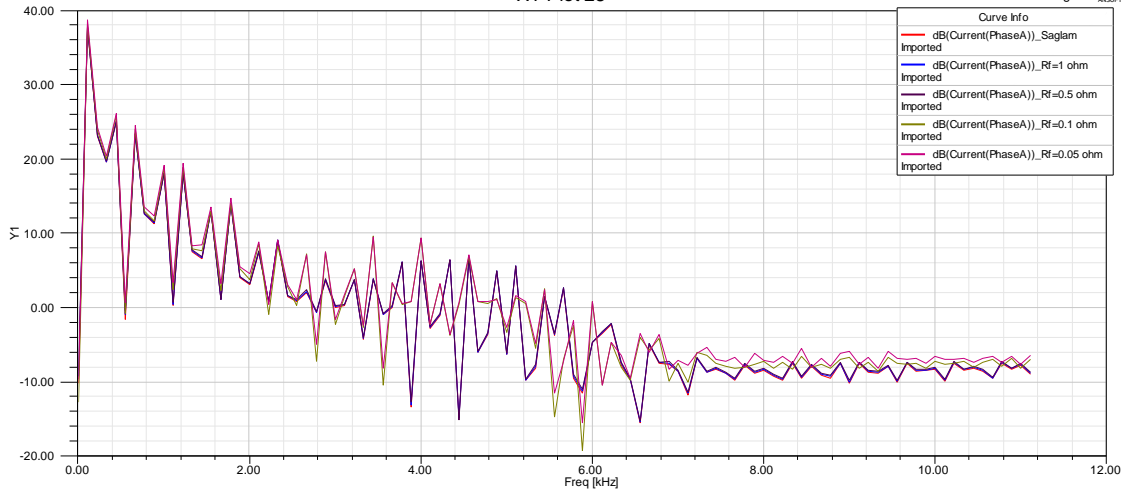


d



e

Şekil 12. Motorun kısa devre arızasına ait FFT spektrumu a) sağlam b) $R_f: 1$ KD c) $R_f: 0.5$ KD d) $R_f: 0.1$ KD e) $R_f: 0.05$ KD



Şekil 13. BLDC motorun kısa devre (KD) arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT işaretleri

Elektrik makinalarında arızalar, sağlıklı motor işaretleri ile arızalı motor işaretlerinin karakteristikleri karşılaştırılarak tespit edilmektedir. Elektriksel işaretlerdeki değişim arıza frekanslarında kendini gösterirken, karakteristik işaretler ile arıza nedeni ile oluşan işaretler, birbirinden karşılaştırma ile ayrılabilir. Karşılaştırma FFT spektrum ve dalga formu grafikleri kullanılarak yapılabilmektedir.

Tablo 3. BLDC motorunun KD arızasına ait tespit edilmiş bazı önemli öz nitelik çıkarımları

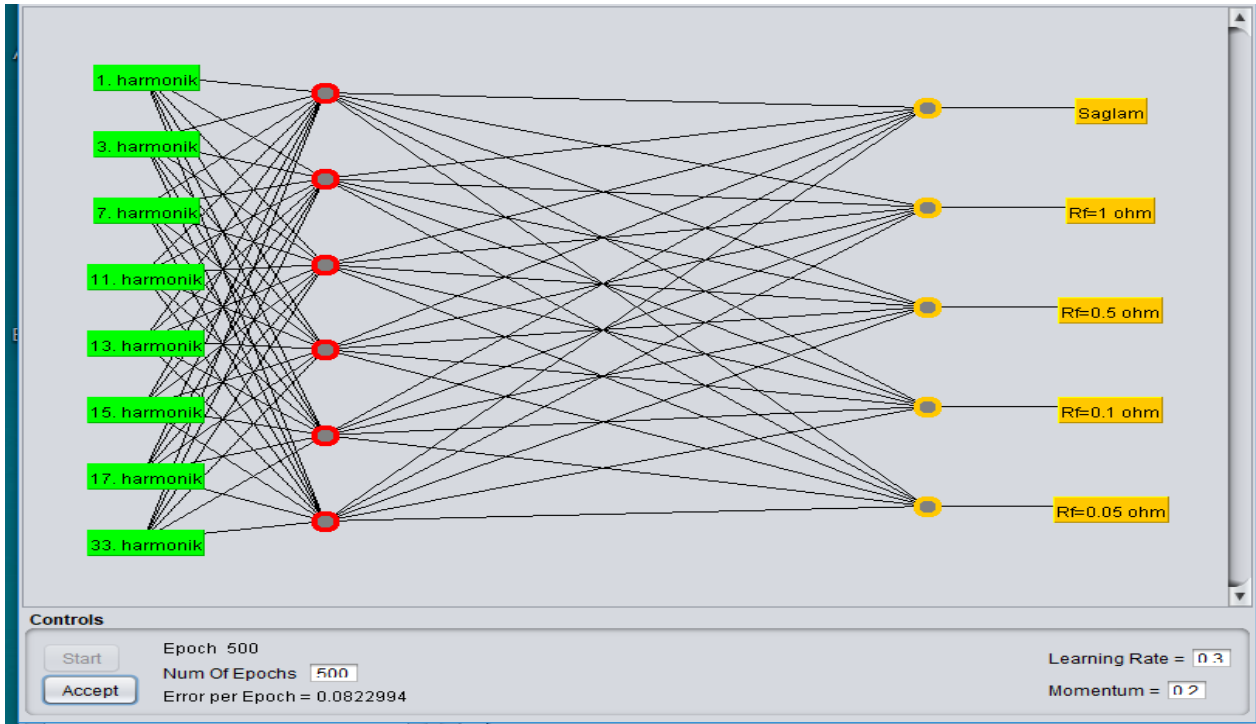
Harmonik	Sağlam	R _f =1 ohm	R _f =0.5 ohm	R _f =0.1 ohm	R _f =0.05 ohm
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.63409	37.72431	37.80944	38.24479	38.66849
3	19.54223	19.63025	19.71411	19.93599	20.36083
7	12.54919	12.62299	12.69626	13.02400	13.50470
11	18.05019	18.07601	18.10367	18.88924	19.39980
13	6.63680	6.75680	6.87262	7.59047	8.41145
15	1.04360	1.08310	1.13643	2.34347	3.23415
17	3.97421	4.11147	4.23423	5.24018	5.48070
33	0.06068	0.15347	0.25339	3.31756	3.37230

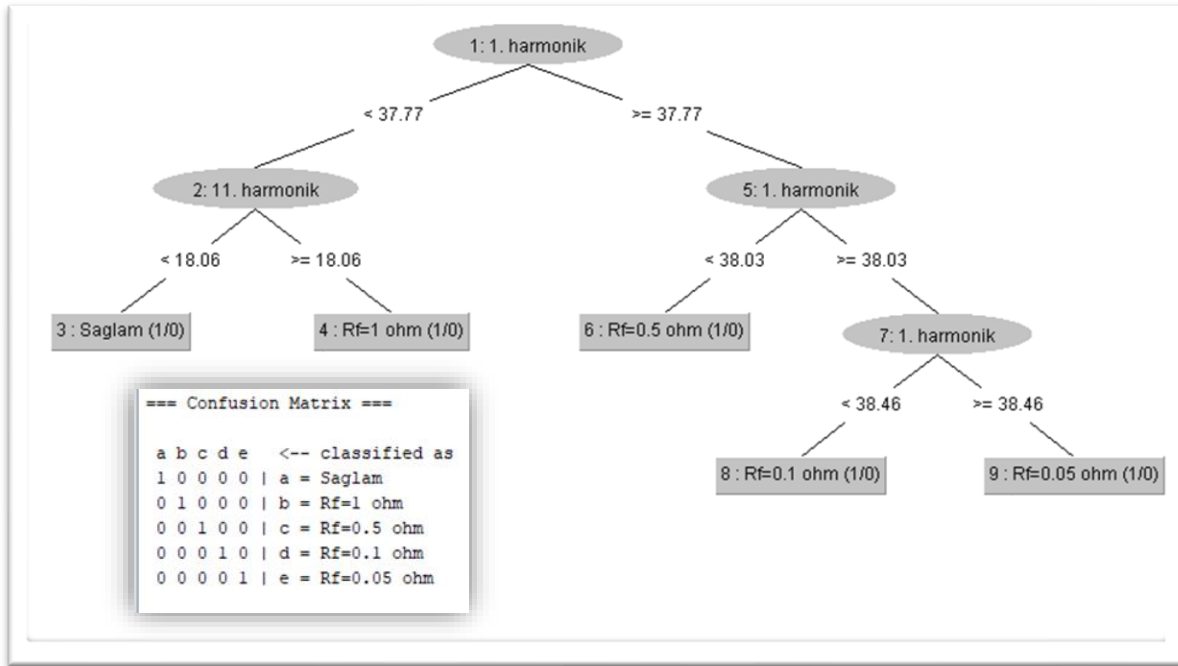
Makinanın çalışma durumuna bağlı olarak alınan giriş işaretlerine FFT uygulanarak arıza nedeni ile artış gösteren frekansların ayırtılması için **Arıza Teşhisinde Birinci Yöntem**

Bu bölümde elde edilen öz nitelik çıkarımları ile giriş verileri oluşturulmuştur. Tablo 3'te seçilen 7 harmonik verisi giriş değeri olarak arıza tespit etmede test verisi olarak kullanılmıştır. Sağlam

edilmesini sağlar. Bu frekanslardaki artışın gözlemlenmesi ve buna uygun sınıflandırma metodları kullanılmıştır.

motorla beraber 5 çıkış durumu vardır. Bu durumda 7 × 5 'lik bir matris oluşturulmuş ve bu test verisine sınıflandırma yöntemleri uygulanmıştır.

**Şekil 14.** Birinci yöntem sonucu kısa devre arızasının tek katmanlı yapay sinir ağı çıktısı



Şekil 15. Birinci yöntem sonucu kısa devre arızasının karar ağaçları ile sınıflandırma çıktısı

Tablo 4. KD arızasının birinci yöntemle göre sınıflandırma metodlarının karşılaştırılması

Kısa Devre Arıza Sınıflandırma Özeti	k-NN	MLP	RT
Doğruluk Yüzdesi (%)	100	80	100
Kappa İstatistiği	1	0.75	1
Ortalama Mutlak Hata	0.16	0.186	0
Kök Ort. Kare Hatası	0.2	0.281	0
Göreceli Mutlak Hata(%)	50	58.1	
Kök Bağ. Kare Hatası(%)	50	70.1	
Doğru Sınıflandırılmış Örnekler	5	4	5

Verilen sınıflandırma durumuna göre, kullanılan Fırçasız sürekli mıknatıslı DC motorun arıza teşhisinde hata etkisinin sınıflandırılmasında en iyi algoritmanın RT tekniği olduğu bulunmuştur.

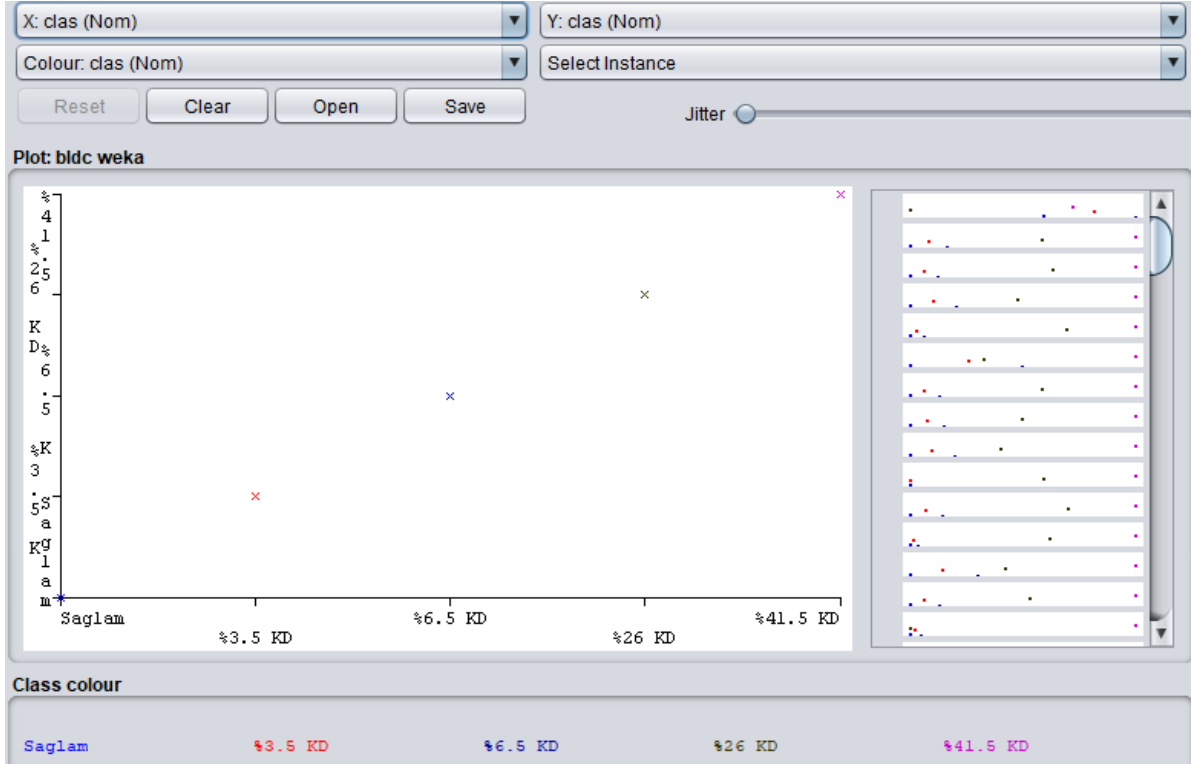
Arıza Teşhisinde İkinci Yöntem

Spektral analiz sonucu elde edilen verilerin tamamı öz nitelik olarak kabul edildiğinde FFT sonucu elde edilen 100 çıkış harmoniği giriş

değeri seçilirken buna karşılık motorun sağlam ve arızalı durumları olmak üzere 5 çıkış değeri vardır. Bu kısımda 100×5 'lik bir matris oluşturularak arıza şiddetlerinin tespiti incelenecektir. Bu yöntemdeki amaç veri setinin büyüklüğünün anlamlı veriler üzerinde etkisinin gösterilmesine yönelik olacaktır. Oluşturulan 100×5 'lik matrisinin test ve doğrulama verisi olarak kullanılarak eğitilen makine öğrenme algoritmalarının kısa devre arızası için doğruluk tahminleri Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5. KD arızasının ikinci yöntemle göre sınıflandırma metodlarının karşılaştırılması

Kısa Devre Arıza Sınıflandırma Özeti	k-NN	MLP	RT
Doğruluk Yüzdesi (%)	100	100	100
Kappa İstatistiği	1	1	1
Ortalama Mutlak Hata	0.16	0.03	0
Kök Ort. Kare Hatası	0.2	0.04	0
Göreceli Mutlak Hata(%)	50	8.18	0
Kök Bağ. Kare Hatası(%)	50	9.54	0
Doğru Sınıflandırılmış Örnekler	5	5	5



Şekil 16. BLDC motorunun ikinci yöntemle göre kısa devre arızası test verisinin çıktısı

Birinci yöntem ile ikinci yöntemin Doğruluk yüzdesinin karşılaştırılarak hata toleransında özellik çıkarımının etkisi tartışıldığında, ikinci yöntemin oldukça verimli olduğu gözlemlenebilir. İki tablo karşılaştırıldığında k-NN ve RT’de doğruluk sonuçları aynı iken MLP sonuçları farklılık göstermektedir. Birinci yöntemde MLP sınıflandırmasında doğru sınıflandırmış örnekler 4/5 iken ikinci yöntemde 5/5 ile bütün arıza şiddetleri tespit edilmiş %100 doğruluk yüzdesine sahiptir. Bu durumda ikinci

uygulanan metodun oldukça verimli olduğu da görülmektedir. İlk metotta $R_f=1$ ohm (%3.5 kısa devre) yani en küçük kısa devre durumu tespit edilememiştir. Bu durum küçük arıza şiddetindeki durumun sağlam durum öz nitelik çıkarımına aşırı duyarlı olduğunun sonucudur. Bunun yanında kullanılan veri setinin anlamlı olması da etkilidir. Bu yüzden arıza teşhisi için en iyi sonucun iyi işlenmiş veriler ve doğru tespit edilmiş öznitelikler olduğunu söyleyebiliriz

Sonuç ve Tartışma

Klasik bir zaman serisi analizi ya da anlamsız verileri filtrelemek üzere alınan hızlı bir veri işleme tekniği ile elde edilen veri setleri incelenerek istatistiksel yöntemler ya da yapay zekâ teknolojileriyle oluşturulan tahmin algoritmaları motor arıza teşhisine olanak tanır. Kestirimci bakım yöntemleri, farklı arıza şiddetlerine karşılık tepki verebilmek için büyük miktarda veri tabanına ihtiyaç duyar. Bu verilerin elde edilmesi, yorumlanması ve

işlenerek anlamsız verilerden kurtulması bilgi birikimi gerektiren bir süreçtir. BLDC motorun stator sargı izolasyon bozulmasını dolayısıyla kısa devre arıza durumu ele alınmıştır. SEY ile motor tasarımı, arıza modelleme ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda SEY ile tasarlanan elektrik makinalarında arızalar oluşturulabileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen zaman domenindeki ham verilere FFT uygulanarak işlenmiş veri elde edilmiştir. Bu işlenmiş veriler makine teşhis yönteminde

öznitelik çıkarımı için kullanılmıştır. Teşhis yönteminde sınıflandırma olarak k-NN, MLP, RT yöntemleri kullanılmış ve arıza tespitinde doğruluk yüzdelerinin oldukça iyi olduğu sonucuna varılmıştır. BLDC makinada oluşturulan bu arızaların gerçek arızalarda olduğu gibi sınıflandırma yöntemleri kullanılarak büyük bir doğruluk oranıyla ayrıştırılabileceği de tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarları, verilen destekten dolayı Siirt Üniversitesi Özel Elektrik Makine Laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.
- [2] K.-H. Kim, D.-U. Choi, B.-G. Gu, and I.-S. Jung, "Fault model and performance evaluation of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under winding shorted turn and inverter switch open," *IET Electr. Power Appl.*, 2010.
- [3] J. Faiz and S. A. H. Exiri, "Short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors- an overview," *Jt. Int. Conf. - ACEMP 2015 Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. OPTIM 2015 Optim. Electr. Electron. Equip. ELECTROMOTION 2015 Int. Symp. Adv. Electromechanical Moti*, pp. 18–27, 2016.
- [4] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005.
- [5] J. Lee, Y. J. Jeon, D. C. Choi, S. Kim, and S. W. Kim, "Demagnetization fault diagnosis method for PMSM of electric vehicle," *IECON Proc. (Industrial*

Bu doğrultuda arıza sonrası bakım (acil bakım) ve periyodik bakımın (planlı bakım) yanı sıra arıza tespitinde durumu izlenmesi ile motorda olabilecek arızanın önceden tespit edilmesi açısından kestirimci bakım son derece önemli olduğu düşünüldüğünde önerilen yöntemler oldukça faydalı olabilecektir.

- Electron. Conf.*, no. 1, pp. 2709–2713, 2013.
- [6] H. Li, J. Hang, J. Fang, P. Zhang, S. Ding, and Q. Wang, "Inter-turn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine based on variational mode decomposition," *Proc. 13th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2018*, pp. 2422–2425, 2018.
- [7] J. K. Park, C. L. Jeong, S. T. Lee, and J. Hur, "Early detection technique for stator winding inter-turn fault in BLDC motor using input impedance," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 240–247, 2015.
- [8] Y. Da, X. Shi, and M. Krishnamurthy, "A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 4104–4112, 2013.
- [9] H. A. Toliyat and T. A. Lip, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 241–247, 1995.
- [10] E. Corporate, "A New Approach to On-Line Turn Fault Detection in AIC Motors," 1996.
- [11] A. Witten, I. H., Frank, E., & Mark, *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. 2011.
- [12] P. S. Panigrahy, P. Konar, and P. Chattopadhyay, "Application of data

- mining in fault diagnosis of induction motor,” in *2016 IEEE 1st International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, CMI 2016*, 2016.
- [13] M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, Y. Kaya, and H. M. Ertunç, “A novel feature extraction method for bearing fault classification with one dimensional ternary patterns,” no. xxxx, 2019.
- [14] M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, Y. Kaya, and H. M. Ertunç, “A novel feature extraction method for bearing fault classification with one dimensional ternary patterns,” *ISA Trans.*, 2019.
- [15] Y. Kaya, M. Kuncan, K. Kaplan, M. R. Minaz, and H. M. Ertunç, “Classification of bearing vibration speeds under 1D-LBP based on eight local directional filters,” *Soft Comput.*, vol. 2, 2020.
- [16] K. Kaplan, Y. Kaya, M. Kuncan, M. R. Minaz, and H. M. Ertunç, “An improved feature extraction method using texture analysis with LBP for bearing fault diagnosis,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 87, 2020.
- [17] M. Minaz and K. Yıldız, “Veri Madenciliği Kullanılarak İndüksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisi,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 16, pp. 881–904, 2019.
- [18] F. Gürbüz and F. Turna, “Rule extraction for tram faults via data mining for safe transportation,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 2018.
- [19] E. Taşçı and A. Onan, “K- En Yakın Komşu Algoritması Parametrelerinin Sınıflandırma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi,” *Xviii. Akademi Bilişim Konf.*, p. 8, 2016.
- [20] M. S. Özerdem and K. Karadağ, “Parmak hareketlerine ilişkin ECoG örüntülerin AR tabanlı öznitelikler ile sınıflandırılması,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 5, no. 2, pp. 89–97, 2014.
- [21] M. F. Keskenler and E. F. Keskenler, “Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi,” *Tak. Vekayi ISSN2148-0087*, vol. 5, no. 2, p. 18, 2017.
- [22] M. ATALAY and E. ÇELİK, “Büyük Veri Analizinde Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları - Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Big Data Analysis,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, pp. 155–172, 2017.
- [23] B. Demirel, “Veri Madenciliğinde Çıplak Algoritmasının Sosyal Güvenlik Kurumu Veri Tabanına Uygulanması,” 2010.
- [24] D. Muslu, “Sigortacılık Sektöründe Risk Analizi: Veri Madenciliği Uygulaması,” 2009.
- [25] Ü. Sezer, “Karar Ağaçlarının Birliktelik Kuralları İle İyileştirilmesi,” 2008.
- [26] Z. Ullah and J. Hur, “A comprehensive review of winding short circuit fault and irreversible demagnetization fault detection in PM type machines,” *Energies*, vol. 11, no. 12, 2018.
- [27] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, “Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011.
- [28] M. Zafarani, E. Bostanci, Y. Qi, T. Goktas, and B. Akin, “Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2018.
- [29] C. M. Gheorghită, M. Adam, M. Andrușcă, A. Munteanu, and A. Dragomir, “About contact resistance of the electrical equipment,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Mod. Power Syst. MPS 2017*, no. Mps, pp. 3–6, 2017.

- [30] A. Sapena-Bañó, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, and D. Matic, "Fault Diagnosis of Rotating Electrical Machines in Transient Regime Using a Single Stator Current's FFT," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2015.
- [31] J. Pons-Ilinares, J. A. Antonino-daviu, M. Riera-guasp, M. Pineda-sanchez, and V. Climente-alarcon, "Current Analytic Wavelet Transform via Frequency B-Splines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1530–1544, 2011.
- [32] J. W. Bennett, G. J. Atkinson, B. C. Mecrow, and D. J. Atkinson, "Fault-tolerant design considerations and control strategies for aerospace drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2049–2058, 2012.
- [33] S. Rajagopalan, J. A. Restrepo, J. M. Aller, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Wigner-Ville distributions for detection of rotor faults in brushless DC (BLDC) motors operating under non-stationary conditions," *SDEMPED 2005 - Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives*, vol. 42, no. 6, pp. 1464–1477, 2005.

Short Circuit Fault Analysis of BLDC Motor by Finite Element Method

Extended abstract

Three-phase permanent magnet brushless machines are used in many applications where reliability and fault tolerance are important. In order to simulate the fault of the permanent magnet brushless direct current (BLDC) motor, insulation distortion in the winding is generated by adding an additional parallel impedance to the stator phase circuit.

In this study, BLDC design is made by using finite element method (FEM). Computer-aided numerical techniques were used to obtain flexibility and continuity in design. The use of such simulation tools helps researchers to emphasize the effects of faults in an electrical machine and develop efficient fault detection methods. Using FEM analysis, changes in the electrical, magnetic and mechanical behaviour of the machine due to any error can be easily observed without having to turn on the machine or conducting experiments in laboratories. Using FEM, this robust engine was designed based on the characteristics of a true BLDC motor and four defective motor models were created.

Fault diagnosis of rotating electrical machines by means of the motor current signature analysis (MCSA) is a widely used method with rapid implementation. On the hardware side, the sensor can be connected to a single phase current by taking the data online and diagnosing the fault. There are no fixed conditions in most industrial applications. The speed or load on the machine varies with time. In such a case, healthy monitoring of the machine faces difficulties. It is not possible to implement traditional methods including Fast Fourier Transform (FFT). The frequency amplitudes of short circuit fault analysis were determined by using FFT analysis of stator current and more specific and concrete data of spectral analysis results were obtained.

In this study, after comparing the feature extraction and the accuracy of the fault detection, the appropriate feature data set was selected and the short circuit fault of the presented criterion was determined. Although it has 80% success rate in MLP classification, it has 100% success in k-NN and RT. In this case, k-NN and RT method seems to be very successful.

Keywords: Finite element method, Fault modelling, Spectral analysis, Attribute extraction, Fault detection