



Bulanık Mantık Tabanlı Rogers ve IEC metotlar Kullanarak Güç Transformator Arızalarının Belirlenmesi

Determination of Power Transformer Faults Using Fuzzy Logic Based Rogers and IEC Methods

Abdurrahim TURAN^{1*}, Abuzer ÇALIŞKAN²

¹ TEİAŞ, abdurrahimtrn@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8582-9720>

² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ, acaliskan@firat.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8262-7912>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Şubat 2024
Revizyon 11 Mayıs 2024
Kabul 24 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Transformator arızaları, Bulanık mantık, Gaz analizi

ÖZ

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında kullanılan teçhizatlardan biri olan güç transformatorlerinde meydana gelebilecek arızaların önceden tespit edilmesi; sistemin ve teçhizatın korunmasını sağlar. Arızaların tespiti için kullanılan yağda çözünmüş gaz analizi ile daha arızanın başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilmektedir. Arızalar sonucu oluşan bu gazlar transformator yağından örnekler alınarak yağda çözünmüş gaz analiz (DGA) sistemlerinde değerlendirilir. DGA temel olarak iki şekilde uygulanır. Bunların en bilineni klasik yöntemler ve son zamanlarda geliştirilen akıllı sistemler yani esnek hesaplama yöntemleridir. Klasik sistemlerin arıza belirlemedeki doğruluğunu arttırmak için akıllı sistemler kullanılır. Bu çalışmada gaz oranları kullanarak bulanık mantık tabanlı Rogers ile IEC (International Electrotechnical Commission) oran ve klasik IEC ve Rogers oran yöntemleri kullanarak arızaların tespiti yapılmıştır. Bulanık mantık tabanlı yöntemlerin klasik yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği bulunmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 February
Received in revised form 11 May
Accepted 24 June
Available online 30 June 2024

Keywords:

Transformer faults, Fuzzy logic, Gas analysis

ABSTRACT

Preliminary detection of malfunctions that may occur in power transformers, one of the equipment used in the transmission and distribution of electrical energy; Provides protection of the system and equipment. With the oil dissolved gas analysis used to detect malfunctions, the malfunction can be intervened at the initial stage of the malfunction. These gases formed as a result of malfunctions are evaluated in DGA systems by taking samples from the transformer oil. DGA is basically implemented in two ways. The most well-known of these are classical methods and recently developed intelligent systems, that is, flexible calculation methods. Intelligent systems are used to increase the accuracy of classical systems in fault detection. In this study, faults were detected using fuzzy logic-based Rogers and IEC (International Electrotechnical Commission) ratio and classical IEC and Rogers ratio methods using gas ratios. It has been found that fuzzy logic-based methods give better results than classical methods.

Doi: 10.24012/dumf.1442331

* Sorumlu Yazar

Giriş

Elektrik enerjisini, kayıpları azaltarak daha verimli bir şekilde iletebilmek için gerilim seviyesi yükseltilmektedir. Elektrik enerjisi tüketileceği yere iletdikten sonra dağıtım merkezlerinde gerilim seviyesi düşürülmektedir. Elektrik enerjisinin sabit güç ve frekansta gerilim seviyesini yükseltip/azaltmak için güç transformatörleri kullanılmaktadır. Güç transformatörleri farklı gerilim, güç ve yalıtım malzemesine göre sınıflandırılabilir. Güç transformatörlerinde normalde meydana gelen arızalar; ark, kısmi deşarj, düşük enerjili kıvılcım, aşırı yüklenme ve yalıtım sisteminin aşırı derecede ısınmasıdır. Güç transformatörlerinde yalıtım için kullanılan yağlar arızalar sebebiyle çeşitli termal ve elektriksel streslere maruz kalırlar. Bu streslere bağlı olarak güç transformatörlerinde yalıtım malzemesinin bozulmasına ve farklı konsantrasyonlarda çeşitli gazların oluşmasına sebep olurlar. Meydana gelen bu gazlar; Etan (C₂H₆), Hidrojen (H₂), Asetilen (C₂H₂), Metan (CH₄), Etilen (C₂H₄) ve selülozik yalıtıktan oluşan Karbondioksit (CO₂) ve Karbon monoksit (CO) gazlarıdır. Ayrıca montaj aşamasında bağlantı gevşekliğinde Oksijen(O₂) ve Azot(N₂) gazları da ortaya çıkar. Transformatörlerde yağda çözünmüş gaz analiz yöntemi kullanılarak arızanın daha başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilmektedir. Farklı arıza türleri farklı gaz türlerini ürettiğinden, belirli gazların varlığı arıza tipini belirlemek için kullanılabilir [1].

Genel kısmi deşarj arızasında Hidrojen ve Metan oluşurken, termal arızalarda Etan, Etilen, ark arızasında ise Hidrojen ve Asetilen gazları ortaya çıkar [2]. Gazın artış hızı arızanın ciddiyetini belirlemektedir. Arızalı gazların tespit edilmesinde çeşitli teknikler vardır. Yağda çözünmüş gaz analiz yöntemi (DGA) en etkili yöntem olarak kabul edilmiştir. Bu yöntemde transformatörden küçük hacimli yağ numuneleri alınıp laboratuvarında analiz edilerek arıza değerlendirmesi yapılır. DGA'da çeşitli yöntemler vardır ve en yaygın olanları; Anahtar Gaz (Key Gaz), Rogers oranı, Doernenburg oranı, Logaritmik nomograf, IEC oranı ve Duval üçgenidir. Bu yöntemler klasik metot olarak tanımlanmaktadır. Klasik teşhis metotları, tek bir arızadan veya birden fazla arızadan ancak bir baskın yapıya sahip olan gazların oranına dayanır. Bir transformatörde birden fazla arızadan kaynaklanan gazlar toplandığında, farklı gazlar arasındaki ilişki çok karmaşık hale gelir ve bunlar önceden tanımlanmış kodlarla eşleşmeyebilir. Bu durumları teşhis etmek için akıllı yöntemler kullanılmaktadır [3]. Akıllı sistemler olarak da tanımlanan bu yöntemlerin bazıları şunlardır; bulanık mantık, destek vektör makinaları, bayes ağları, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalarıdır [4]. Bulanık mantık kolay analiz edilmeyen çok karmaşık sistemlerin davranışını etkili bir şekilde ortaya koyar. Klasik yöntemlerde 0 veya 1 olan sonucu, bulanık mantık 0 ile 1 değerleri arasında bir değer olarak bulabilir [5].

Atalar ve Kuntman tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç transformatöründen yağ numuneleri alınarak, IEC oran yöntemi ve bulanık mantık yöntemi ile yağda çözünmüş gaz arıza analiz değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, bulanık mantık yönteminin klasik yöntemlere göre daha doğru arıza analizi yaptığı belirtilmiştir [6].

Abdullayev tarafından gerçekleştirilen güç transformatörlerinin güvenilirliğinin artırılması isimli çalışmada arıza teşhisinde kromatografik analiz yöntemi kullanılmıştır. Güç transformatöründen alınan yağ numuneleri General Electric Kelman Transport X tarafından kromatografik olarak analiz edilmiştir. Açık gaz analizi ve duval üçgen diyagramı ile değerlendirilen analiz sonuçları ENTRA test cihazı ile elde edilmiştir. Farklı yöntemlerle edilen bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada daha detaylı sonuç elde etmek için DGA analizlerinin 6-12 ay sonra tekrarlanması istenmiştir [7].

Khan vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IEC-60599 standardından kaynaklanan sınırlamaları aşmak için bulanık mantık ve ANFIS yöntemi kullanılmıştır. Yağda çözünmüş gaz analiz yöntemlerinden olan Rogers ve Doernenburg oran yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntem de transformatör arızalarını tespit etmek için uygun bulunmuştur. Ancak ANFIS'in tanı kapasitesinden elde edilen sonuçların bulanık mantık yöntemine göre daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Bu çalışmada ANFIS de %98 doğruluk oranı, IEC standardı için kullanılan Rogers ve Doernenburg için ise sırasıyla %97 ve %99 doğruluk oranları bulunmuştur [8].

Ramesh ve Sushama tarafından yapılan çalışmada 138/13.8 kV, 100MVA'lık güç transformatörü simule edilmiştir. Aynı çalışmada %1, %3, %5, %10, %15 ve %25 gibi farklı sargı yüzdelerinde bir transformatörün primer ve sekonder sargılıları kısa devre edilerek terminallerde oluşan akım değerleri ölçülmüştür. Terminallerdeki kısa devre durumlarında oluşan iç arıza akımlarının ihmal edilebilir küçüklükte olduğu belirtilmiştir. Simetrik bileşen yaklaşımı kullanılarak negatif bileşen akımlarındaki önemli değişiklikler saptanmıştır. Negatif bileşen akım genliğindeki yüzdelik değişim (%MAG) ve arıza oluş periyodu sırasında transformatörde meydana gelen faz kaymaları (PS) değerlendirilerek bulanık mantık girişlerine uygulanmıştır. Burada bulanık mantık sadece transformatör şartlarını izlemek için değil aynı zamanda önerilen şemanın hassasiyetini geliştirmek içinde kullanılmıştır. Önerilen şemanın düşük seviyeli iç sargı arızalarını tespit etmede geleneksel diferansiyel koruma yöntemlerine göre arıza belirleme sınırlamalarını ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. Bu nedenle mevcut güç transformatörü arıza tespit yöntemlerine çok iyi bir tamamlayıcı olduğu vurgulanmıştır [9].

Aziz vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak geleneksel arıza algılama hassasiyetlerini geliştirmek için yeni bir aktarma algoritması önerilmiştir. Önerilen bulanık tabanlı geçiş algoritması, akı-diferansiyel akım türevi eğrisi, harmonik kısıtlama ve yüzde diferansiyel karakteristik eğrisinden oluşturulmuştur. Algoritma MATLAB yazılım programıyla simule edilmiş, hızlı ve doğru bir şekilde açma ürettiği ortaya konmuştur [10].

Koroğlu vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada güç sisteminde bulunan gerçek bir transformatöre ait DGA sonuçları üzerinden arıza analizi yapılmıştır. DGA sonuçlarının değerlendirmesinde kılavuz gaz, Duval üçgen, Rogers gaz oranları ve Doernenburg gaz oranları gibi konvansiyonel değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Tüm değerlendirme yöntemlerine göre, arızanın yüksek enerjili deşarj olduğu belirtilmiştir. Transformatörde yüksek enerjili bir deşarj biçimi olan faz toprak kısa devre arızasının

meydana geldiği yapılan fiziksel kontrollerde görüldüğü belirtilmiştir [11].

Genç S. ve Karagöl S. tarafından yapılan çalışmada klasik yöntemlerden biri olan IEC oran yöntemi kullanılarak bulanık mantık tabanlı analiz yapılmış [12].

A. Abu-Siada vd. tarafından yapılan çalışmada, uzman personele bağımlılığı azaltmak ve DGA yorumlama tekniklerinin standartlaştırılmasına yardımcı olmak için yeni bir bulanık mantık yaklaşımı sunulmuştur [13].

Alawode ve Olowolafe tarafından yapılan çalışmada güç transformatörlerindeki arızaları tespit etmek için DGA'ya dayanan iki akıllı yöntem tanıtılmıştır. Yanlış teşhisler, herhangi bir kararın ortaya çıkmadığı ya da kural dışı durumların ortaya çıktığı durumlar gibi mevcut zorluklar ele alınmıştır. Rogers oranı, IEC oranı, Dornenburg oranı ve Duval üçgeni yöntemleri gibi geleneksel teknikler için bulanık mantık modelleri geliştirilmiştir [14].

Apte vd. tarafından yapılan çalışmada gazlar iki veya daha fazla arızadan oluştuğunda, farklı gazlar arasındaki ilişki çok karmaşık hale gelir ve önceden tanımlanmış oran kodlarıyla eşleşemez hale gelir ve bu durum teşhisin başarısız olduğunu ortaya koyar. Bu nedenle bu tür sorunlardan kaçınmak için bulanık mantığa odaklanılmış ve Rogers oranı ve IEC oran kodlarını kullanarak teşhis gerçekleştirilmiştir [15].

Dhote ve Helonde tarafından yapılan çalışmada özellikle DGA sonuçlarının standart dışı çıkması durumunda bazen tanı koymakta başarısız olduğu vurgulanmış ve geleneksel yöntem kodları veya transformatörde birden fazla arıza mevcut olduğunda bunları aşmak için bulanık çıkarım sistemi (FIS) önerilmiştir [16].

Hussein vd. tarafından yapılan çalışmada, güç transformatörlerinde arızaları teşhis etmek ve izolasyon yağının durumunu ve kalitesini değerlendirmek için bir ANFIS uzman sistemi kullanılmıştır. Yağdaki DGA'ya bağlı olarak Rogers oranı yöntemi önerilmiştir. MATLAB ortamındaki grafik kullanıcı ara yüzü kullanılmış, arıza teşhisi ve yağ kalitesi değerlendirmesi için etkili olduğu kanıtlanmıştır [17].

Nemeth, vd. tarafından yapılan çalışmada, hali hazırda mevcut verileri kullanarak güç transformatörleri için gerçekçi bir yöntem açıklanmıştır. Yönteme göre, veri elde etme konusundaki pratik sınırlamaları IEC, IEEE ve CIGRE kriterlerini kullanan parametreler üzerindeki olası kısıtlamaları dikkate almıştır. Yöntemde yalnızca tipik test sonuçları değil aynı zamanda fiziksel gözlemler, kademe değiştirici, buşing durumu, yük geçmişi, bakım iş emirleri, yaş, trafo arızalarının eğilimleri vb. gibi bilgiler de kullanılmıştır. Hesaplama, bulanık mantık kullanılarak durum derecelendirmelerini, ağırlıklandırma faktörlerini ve belirli durum parametrelerine atanan puanları içermiştir. İlk sonuca ulaşmak için öncelikle DGA sonuçlarını kullanan bir sinir ağı uygulanmıştır. Daha sonra ayrıntılı teşhisi gerçekleştirmek için çeşitli bulanık denklemler oluşturulmuştur. Farklı bulanık denklemlerde çok sayıda veri ve ilgili DGA bilgisi seçildiğinde, ayrıntılı teşhisin doğruluğunun daha yüksek olduğu vurgulanmıştır [18].

Taha vd. tarafından yapılan çalışmada, bulanık mantık tabanlı Rogers ve Duval üçgen metotları kullanılarak transformatör arıza değerlendirmesi yapılmıştır [19].

Permana vd. tarafından yapılan çalışmada, Endonezya'da bir jeotermal santralde kullanılan transformatörün gaz analiz değerlerinin Duval üçgen metodu kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir [20].

Poonnoy vd. tarafından yapılan çalışmada, anahtar gaz, IEC oran, Duval üçgeni teknikleri ve bulanık mantık yaklaşımı kullanarak işletme sırasında güç transformatörlerinde meydana gelen arızalardan kaynaklanan çözünmüş gaz analizleri ile problemlerin tanımlanması tanımlanmıştır [21].

Wani vd. tarafından yapılan çalışmada, klasik çözünmüş gaz analizi (DGA) tekniğini çoklu arıza teşhisi yapacak şekilde geliştirmek için yeni bir akıllı sınıflandırma yaklaşımı önerilmiştir. Duval üçgeni tabanlı optimize edilmiş bulanık çıkarım sistemi ile hem tekli hem de çoklu başlangıç hatalarına duyarlı sinir ağı modelleri oluşturulmuştur [22].

Bulanık mantık yöntemi kullanılarak geliştirilecek sistemler güç transformatörünün ana yağ tankına monte edilerek ve belli aralıklarla yağ numunesi alıp analiz sonuçlarını değerlendirip ve bunları bir ağ haberleşmesi üstünden kullanıcılara iletilebilecek sistemler olarak geliştirilebilir. Geliştirilecek bu sistemler sayesinde transformatör arızaları önceden tespit edilebilecektir.

Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinden (TEİAŞ) alınan gaz limit değerleri hesaba katılarak, bulanık tabanlı IEC oran, bulanık tabanlı Rogers oran, klasik IEC oran ve klasik Rogers oran metotlarıyla gaz konsantrasyon değerleri kullanılarak arıza değerlendirmesi yapılmıştır.

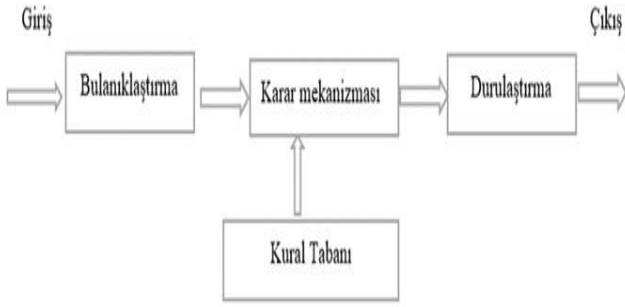
Bulanık Mantık Tabanlı Güç Transformatör Arızalarının Belirlenmesi

Bu bölümde ilk olarak bulanık mantık hakkında genel bilgiler verilmiş, devamında ise bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri kullanılarak MATLAB programında arıza tespit etme sistemleri geliştirilmiştir.

Bulanık Mantık

Bulanık mantık, insan matematiğini standart matematikle birleştirmek için bir çerçeve ve esneklik sağlayan, basit ve sağlam analitik çözümler üreten karmaşık veya yanlış tanımlanmış mühendislik problemlerini çözüme yararlıdır. Bulanık mantık algoritması belirli bir matematiksel ifadeyi işlemez, ancak dilbilimsel değişkenlere dayalı çıkarım kurallarını kullanır.

Bulanık mantık sistemleri bir uzmanın bilgi, beceri ve tecrübeleri numerik hesaplamalar için kullanarak, bunları bir otomatik kontrol sistem stratejisine çevirebilir. Temel olarak bulanık mantık sistemleri; giriş verisi, bulanıklaştırma, bilgi tabanı, karar mekanizması, durulaştırma ve çıkış verisinden meydana gelir. Şekil 1'de bulanık mantık yapısının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı [23]

Bulanık mantık yöntemi temel olarak üyelik derecesi [0, 1] aralığında olan üyelik fonksiyonlarından oluşur. Klasik yöntemlere göre insan algısına daha yakın olan bulanık mantık yöntemi daha doğru arıza analizi yapılmasına imkân sağlar. Bu sisteme IEC oran ve Rogers yöntemleri uyarlanabilir. Gaz oranları bulanık mantık sisteminin girişleri olarak kabul edilerek arıza değerlendirmesi yapılır. Özellikle çoklu arızaların saptanmasında daha iyi sonuçlar verir [13]. Bu çalışmada Mamdani karar mekanizması yöntemi kullanılmıştır.

IEC Yöntemi

Bulanık mantık tabanlı sistem için kullanılacak gaz oran değerleri dilsel değişkenler olarak ifade edilmiştir. Girişler klasik yöntemdeki 0, 1 ve 2 yerine düşük, orta ve yüksek olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de bu girişlere denk gelen dilsel değişkenler verilmiştir.

Tablo 1. IEC gaz oranına karşılık gelen bulanık mantık girişleri tablosu [13]

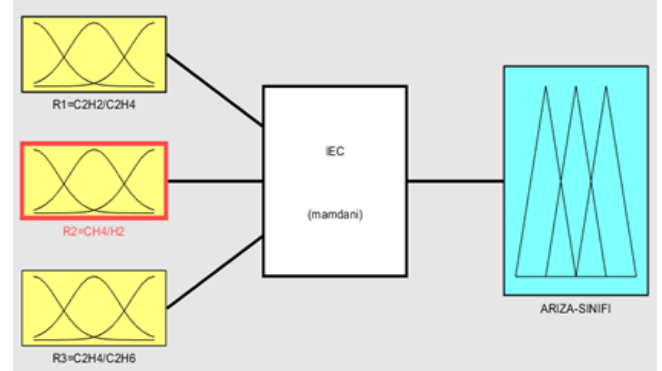
Gaz Oranları	Oran Değer Aralığı	Oran Kodu
$R1 = C2H2/C2H4$	$R < 0.1$	0 (Düşük =Low)
	$0.1 \leq R \leq 3.0$	1 (Orta = Med)
	$R > 3.0$	2(Yüksek =High)
$R2 = CH4/H2$	$R < 0.1$	1 (Düşük =Low)
	$0.1 \leq R \leq 1.0$	0 (Orta = Med)
	$R > 1.0$	2(Yüksek =High)
$R3 = C2H4/C2H6$	$R < 1.0$	0 (Düşük =Low)
	$1.0 \leq R \leq 3.0$	1 (Orta = Med)
	$R > 3.0$	2(Yüksek =High)

Tablo 2'de bulanık mantık çıkarım sisteminde R1, R2 ve R3 gaz oranlarına karşılık gelen kodlara göre meydana gelen arıza türü verilmiştir.

Tablo 2. IEC arıza tanımları tablosu [26]

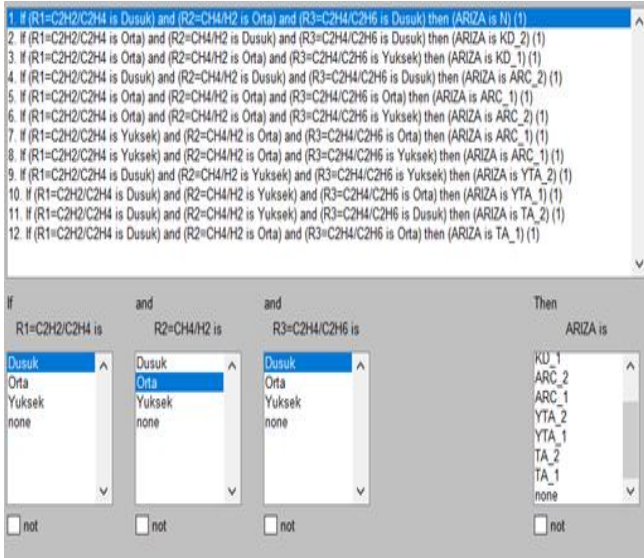
R1	R2	R3	Arıza	Kısaltma
0	0	1	Termik Arıza <150 C	TA_1
0	2	0	Termik Arıza 150C-300	TA_2
0	2	1	Termik Arıza 300C-700	YTA_1
0	2	2	Termik Arıza >700 C	YTA_2
1-2	0	1-2	Düşük Enerjili Ark	ARC_1
0	1	0	Yüksek Enerjili Ark	ARC_2
1	0	2	Düşük Enerjili Korona	KD_1
1	1	0	Yüksek Enerjili Korona	KD_2
0	0	0	Normal (Arıza Yok)	N

Bulanık mantık sisteminde her bir giriş ve çıkış bir üyelik fonksiyonudur. Bu üyelik fonksiyonları kullanılarak kurallar oluşturulur ve çıkışa ulaşılır. Şekil 2'de MATLAB programında oluşturulan bulanık mantık tabanlı IEC oran yönteminin çıkarım sistemi verilmiştir. Bu çıkarım sisteminde üyelik giriş fonksiyonları, Mamdani karar mekanizması ve kural tabanına göre oluşturulan arıza değerlendirme sınıfından oluşturulmuştur.



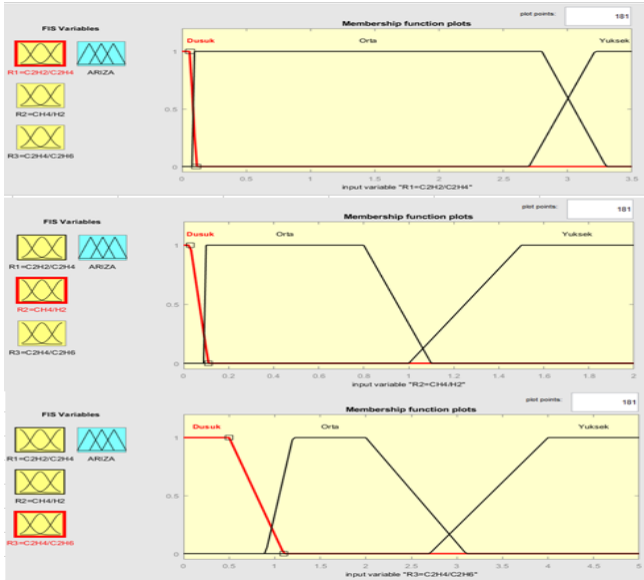
Şekil 2. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine ait çıkarım sisteminin genel görünümü

Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi ile transformatör arızalarını tespit etmek için Tablo 2'de verilen IEC arıza tanımları tablosu kullanılarak MATLAB programında oluşturulan on iki adet bulanık kural tabanı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yönteminde arızaların sınıflandırılması için kullanılan kural tabanı

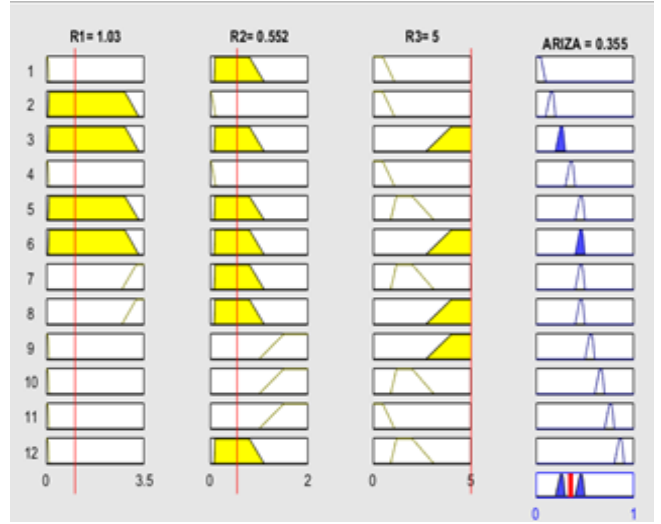
Şekil 4’de MATLAB programında oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Üyelik fonksiyonları Tablo 1’de belirtilen IEC gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişlerine göre oluşturulmuştur.



Şekil 4. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları

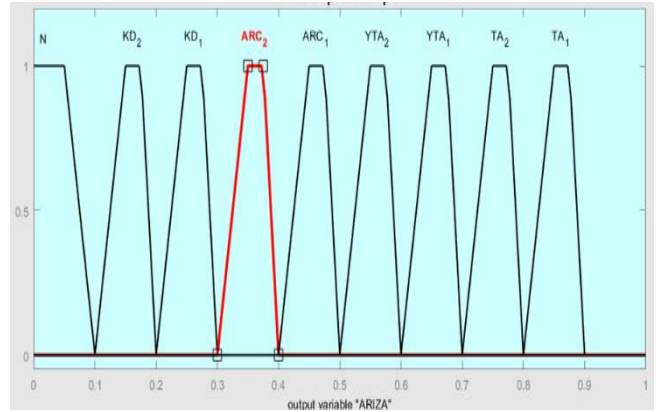
Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine ait oluşturulan modelde Tablo 5’te verilen ve TEİAŞ’tan alınan numune bilgilerinden ikincisi kullanıldığında Şekil 5’deki arıza çıktısı elde edilmiştir.

İkinci numune değerleri: H_2 :636, CH_4 :351, C_2H_4 :782, C_2H_6 :72, C_2H_2 :804, CO :920 ve CO_2 :2297



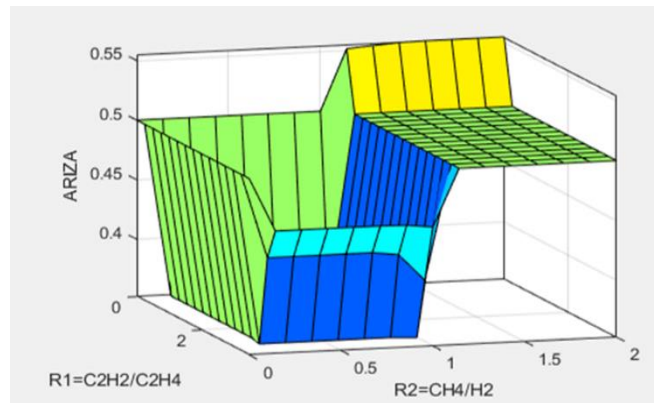
Şekil 5. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre 2. numuneye karşılık gelen arıza çıktısı

Tablo 5’te verilen numune değerlerinden ikincisi kullanılarak bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi ile elde edilen arıza değerlendirilme sonucu Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre 2. numuneye karşılık gelen arıza (ARC_2)

Şekil 7’de R1,R2 ve R3 gaz oranları arasındaki ilişkiye göre elde edilen arıza çıktısı üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Bulanık mantık tabanlı IEC Oran yönteminde gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi

Tablo 5'te verilen ikinci numunenin değerleri esas alınır, bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi kullanılarak arıza değerlendirmesi yapıldığında arızanın türünün doğru olarak belirlendiği verilen sonuçlardan görülmektedir.

Rogers Yöntemi

Bulanık mantık tabanlı Rogers sisteminde her bir giriş ve çıkış bir üyelik fonksiyonudur. Bu üyelik fonksiyonlarından kurallar oluşturularak çıkışta elde edilir. Rogers yönteminde kullanılan 5,0,1 ve 2 giriş kod bilgileri sırasıyla düşük, orta, yüksek ve çok yüksek değerlerine karşılık gelir. Tablo 3'te bu girişlere karşılık gelen dilsel değişkenler verilmiştir [13].

Tablo 3. Rogers oran metodunda gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişleri [16]

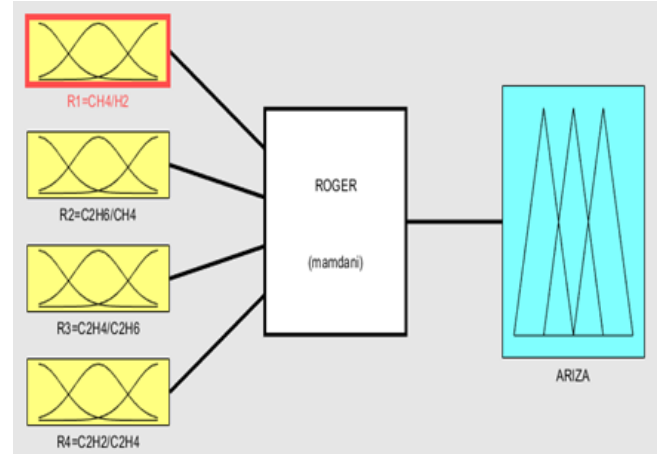
Oran Kodu	Aralık	Kod
R1	$R1 < 0.1$	5 (Düşük)
	$0.1 \leq R1 \leq 1.0$	0 (Orta)
	$1.0 \leq R1 \leq 3.0$	1 (Yüksek)
	$R1 > 3.0$	2 (Çok Yüksek)
R2	$R2 < 1.0$	0 (Düşük)
	$R2 \geq 1.0$	1 (Yüksek)
R3	$R3 < 1.0$	0 (Düşük)
	$1.0 \leq R3 \leq 3.0$	1 (Orta)
	$R3 > 3.0$	2 (Yüksel)
R4	$R4 < 0.1$	0 (Düşük)
	$0.1 \leq R4 \leq 3.0$	1 (Orta)
	$R4 > 3.0$	2 (Yüksek)

Rogers arıza tanımlama tablosu Tablo 4'te verilmiştir [26, 27]. Bu tabloda R1, R2, R3 ve R4 gaz oranlarına karşılık gelen arıza türleri tanımlanmıştır. Örneğin R1=0, R2=1, R3=0 ve R4=0 ise bu durum termik arızaya (TA_3) 200°-300° karşılık gelmektedir.

Tablo 4. Rogers arıza tanımlama tablosu

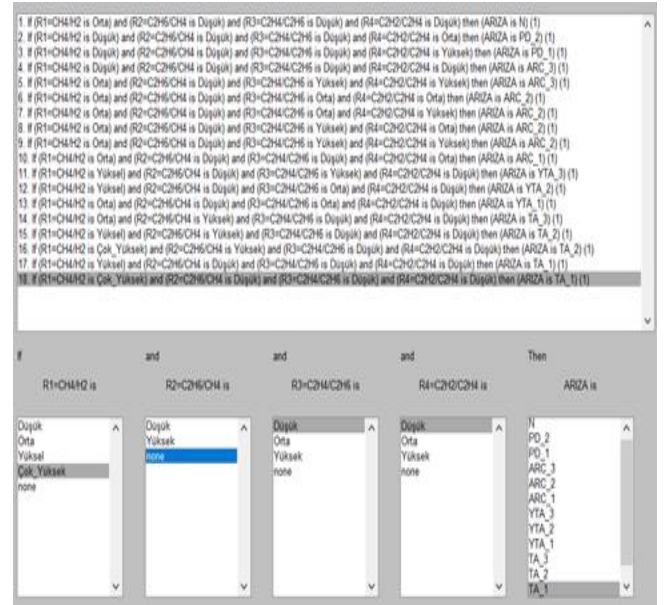
R1	R2	R3	R4	Arıza Tanımı	Arıza Türü
1_2	0	0	0	Termik Arıza <150°C	TA_1
1_2	1	0	0	Termik Arıza 150°-200°	TA_2
0	1	0	0	Termik Arıza 200°-300°	TA_3
0	0	1	0	İletkende aşırı ısınma	YTA_1
1	0	1	0	Sargı sirkülasyon akımları	YTA_2
1	0	2	0	Nüve/Tank sirkülasyon akımları	YTA_3
0	0	0	1	Flaş	ARC_1
0	0	1_2	1_2	Ark	ARC_2
0	0	2	2	Sürekli kıvılcım	ARC_3
5	0	0	0	Kısmi Deşarj	PD_1
5	0	0	1_2	Yüksek Enerjili Deşarjlar	PD_2
0	0	0	0	Normal	Normal

Şekil 8'de MATLAB programında çizilen bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin genel yapısı verilmiştir.



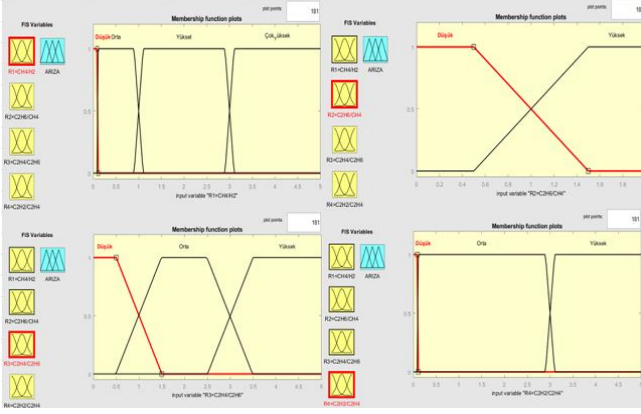
Şekil 8. Bulanık Rogers oran yöntemine ait çıkarım sisteminin genel görünümü

Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile arızaların sınıflandırılması için Tablo 4'te verilen Rogers arıza tanımlama tablosu kullanılarak MATLAB programında oluşturulan 18 adet kural tabanı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile arızaların sınıflandırılması için oluşturulan kural tabanı

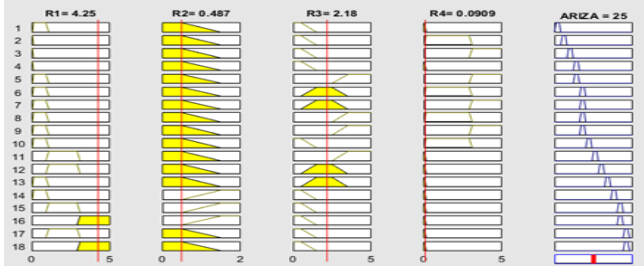
Şekil 10'da MATLAB programında bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Belirtilen üyelik fonksiyonları Tablo 3'te verilen Rogers gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişleri kullanılarak oluşturulmuştur.



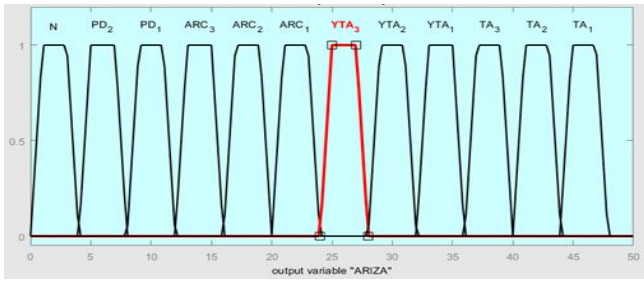
Şekil 10. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları

Şekil 11'deki arıza çıktısına ait grafik Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune bilgilerinden beşinci numunenin değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı numune değerleri için bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile elde edilen arıza sonuç bilgisi Şekil 12'de gösterilmiştir.

Beşinci numune değerleri: $H_2:44$, $CH_4:187$, $C_2H_4:198$, $C_2H_6:91$, $C_2H_2:18$, $CO:845$ ve $CO_2:6348$

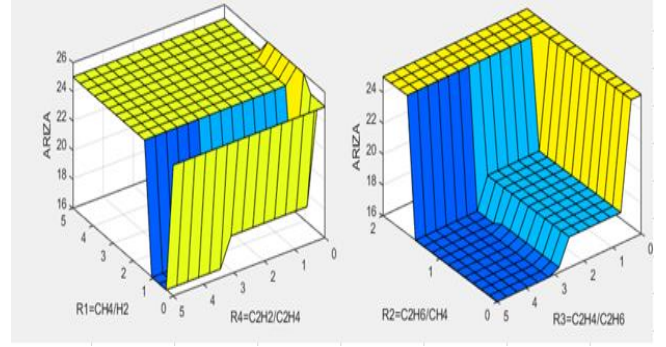


Şekil 11. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemine göre 5. numuneye karşılık gelen arıza çıktısı



Şekil 12. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemine göre 5. numuneye karşılık gelen arıza sonuç bilgisi (YTA_3)

Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminde R1,R2, R3 ve R4 gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi 3 boyutlu olarak Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminde gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi

Tablo 5'te verilen beşinci numunenin değerleri esas alınıp, bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi kullanılarak arıza değerlendirilmesi yapıldığında arızanın türünün doğru olarak belirlendiği verilen sonuçlardan görülmektedir.

Araştırma Bulguları

TEİAŞ'tan alınan gerçek bir güç transformatörüne ait gaz numune değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Tablodaki veriler 62.5-250 MVA aralığındaki nominal güçteki transformatlara aittir. Tablo 5'te verilen 1 ve 13 no'lu numunelere ait gaz miktarları IEC 60599 standardına göre limit değerlerinin altında olduğu için her hangi bir metoda tabi tutulmamış ve normal olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5. TEİAŞ'tan alınan numune değerleri

Numune	H_2	$C H_4$	$C_2 H_4$	$C_2 H_6$	$C_2 H_2$	$C O$	$C O_2$	CO_2/CO	Arıza Tipi
1	5	1	1	1	1	64	190	2.97	Normal
2	636	351	782	72	804	920	2297	2.5	Bucholz açma(D2).
3	205	83	222	17	394	198	526	2.66	A faz buşing değişimi sonucunda yüksek enerjili deşarj meydana geldi(D2)
4	70	59	61	27	1	305	1647	5.4	Termik arıza(T3).
5	44	187	198	91	18	845	6348	7.51	Diferansiyel ve bucholz açma (D+T).
6	9504	742	1790	289	5065	1195	1825	1.53	Yüksek enerjili deşarj (D2),Termik

									arıza(T1)
7	630	172	157	17	181	1065	3578	3.36	Yüksek enerjili deşarj (D2)
8	2750	402	551	111	906	1095	1234	1.13	Yüksek enerjili deşarj (D2)
9	20	19	43	9	17	974	6113	6.28	D+T deşarjlar ve termik arıza
10	6	350	27	1199	2	147	4098	27.88	Termik arıza(T1).
11	2550	562	1	1	1	49	6827	139.33	Kısmi deşarj
12	3448	555	543	44	147	1235	6768	5.48	Yüksek enerjili deşarj (D+T).
13	5	1	1	1	1	139	452	3.25	Normal
14	107	4	5	1	29	40	488	6.97	Düşük enerjili deşarj (D1)

Tablo 5 incelendiğinde, IEC gaz limit değerlerini aşan gaz konsantrasyon değerleri bulunmaktadır. Tabloya göre limit değerini aşan gazlar olduğu için IEC oran ve Rogers oran değerlendirmesi yapılabilir. MATLAB programında bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri çalıştırılarak gaz analizi ile arıza değerlendirilmesi de yapılabilir.

Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune değerleri kullanılarak MATLAB programında bulanık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle arıza değerlendirmesi yapıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Bulanık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri için elde edilen arıza değerlendirme tablosu

Numune	Bulanık Mantık Tabanlı IEC Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı Rogers Yöntemi
1	N	N
2	ARC_2	ARC_2
3	ARC_2	ARC_2
4	TA_1	YTA_1
5	YTA_1	YTA_3
6	ARC_1/YTA_2	ARC_1/YTA2
7	ARC_2/KD	ARC_2
8	ARC_2/KD	ARC_2
9	ARC_2/KD	ARC_2

10	TA_2	TA_2
11	ARC_1/ARC_2	ARC_1
12	ARC_2/KD	ARC_2_YTA_3
13	N	N
14	ARC_1/YTA2	YTA_3

Benzer şekilde Tablo 5'te TEİAŞ'tan alınan numune değerleri kullanılarak klasik IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle arıza değerlendirmesi yapılmıştır. Bu değerlendirmeye göre elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Klasik IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle yapılan arıza değerlendirme tablosu

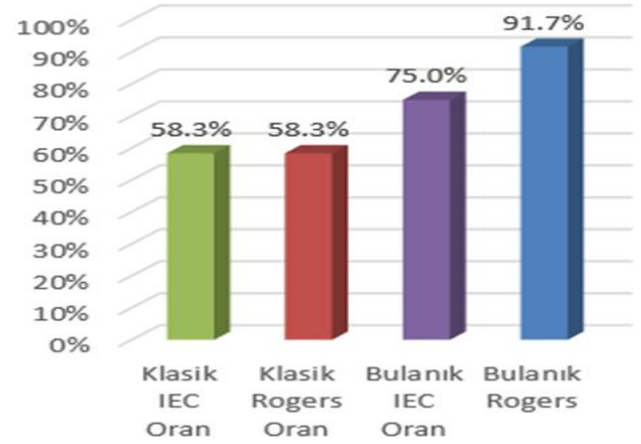
Numune	IEC Oran Yöntemi		Klasik Rogers Oran Yöntemi	
	Arıza Kodu(R1R2R3)	Arıza Türü	Arıza Kodu(R1R2R3R4)	Arıza Türü
1	N	N	N	N
2	102	ARC_2	0021	ARC_2
3	102	ARC_2	0021	ARC_2
4	001	TA_1	0010	YTA_1
5	021	YTA_1	2010	TY
6	112	TY	5021	TY
7	102	ARC_2	0021	ARC_2
8	102	ARC_2	0021	ARC_2
9	102	ARC_2	0021	ARC_2
10	020	TA_2	2100	TA_2
11	100 & 101	TY	0011	ARC_2
12	102	ARC_2	0021	ARC_2
13	N	N	N	N
14	212	TY	0022	ARC_2

Tablo 6 ve Tablo 7'deki veriler ile Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune değerlerine ait arıza türü bilgileri birleştirilerek Tablo 8'deki genel durum elde edilmiştir. Burada IEC oran, bulanık mantık tabanlı IEC oran, Rogers oran ve bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemlerinin sonuçları, gerçek arıza türüyle karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8. Kullanılan yöntemlere göre elde edilen arıza analiz tablosu

Arıza No	IEC Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı IEC Oran Yöntemi	Rogers Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı Rogers Oran Yöntemi	Gerçek Arıza Değerleri
1	N	N	N	N	N
2	D2	D2	D2	D2	D2
3	D2	D2	D2	D2	D2
4	T1	T1	T1	T3	T3
5	T2	T2	TY	T3	D+T
6	TY	D1+T3	TY	D1(T3)	D2+T1
7	D2	D2	D2	D2	D2
8	D2	D2	D2	D2	D2
9	D2	D2	D2	D2	D+T
10	T1	T1	T1	T1	T1
11	TY	D1+D2	D2	D1	KD
12	D2	D2	D2	D2(T3)	D+T
13	N	N	N	N	N
14	TY	D1+T2	D2	T3	D1

Tablo 8’de görüldüğü gibi IEC oran metodu ile 12 numuneden 9 numunenin sonucu belirlenmiş ve üç numunenin sonucu tespit edilememiştir(TY). Sonucu belirlenen 9 numunenin sadece 7 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Bulanık mantık tabanlı IEC yöntemiyle yapılan analizde 12 numunenin tamamının sonucu bulunmuştur. Sonucu bulunan 12 numunenin 9 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Burada bulanık mantık tabanlı IEC metodunun klasik IEC oran metoduna göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Klasik Rogers oran metoduyla yapılan analizde 12 numuneden 10 tanesinin sonucu bulunmuş, iki tane numunenin sonucu tespit edilememiştir. Bulunan 10 numunenin 7 tanesinin değerlendirme sonucu doğru bulunmuştur. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran metoduyla yapılan analizde 12 numunenin tamamının sonucu bulunmuştur. Değerlendirilmesi yapılan 12 numunenin 11 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Şekil 14’de farklı yöntemlere göre yapılan transformatör arızalarının tespit edilme oranları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 14. Kullanılan yöntemlere göre arızaların doğru tespit edilme oranları

Şekil 14’den de görüldüğü gibi bulanık mantık tabanlı Rogers oran metodunda %91.67, klasik Rogers oran metodunda %72.7 başarı elde edilmiş ve bulanık mantık tabanlı Rogers oran metodunun daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bulanık mantık yöntemleri ile yapılan analizlerin, klasik yöntemlerle yapılanlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yine bu çalışmada bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin diğer yöntemlere göre daha doğru analiz yaparak transformatörlerde gerçek arızaları daha yüksek doğruluk oranında tespit ettiği belirlenmiştir. Bu durum akıllı yöntemlerin klasik yöntemlere göre arıza analizindeki önemini ortaya koyar.

Sonuçlar

Güç transformatörlerinde meydana gelebilecek arızaların önceden tespit edilmesi, sistemin ve teçhizatın korunmasını sağlar. Arızaların önceden belirlenmesi ile enerji kesintilerinin önüne geçilir ve böylelikle enerjinin devamlılığı sağlanarak finansal kayıplar önlenir. İzolasyon için kullanılan transformatör yağında, arıza veya arızalar sonucunda bazı gazlar oluşur. Yağda çözünmüş gaz analizi ile arızaların tespiti yapılarak daha arızanın başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilme imkânı doğar. Bu nedenle bu çalışmada, güç transformatörlerinde meydana gelen arızalar sonucunda izolasyon yağında ortaya çıkan ve yağda çözünebilir gazların konsantrasyon değerlerini kullanarak yağda çözünmüş gaz analizi ile arıza değerlendirilmesi yapılmıştır. Arıza sonucu oluşan gazların limit değerleri hesaba katılarak arıza değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirmeler dört farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. DGA’nın klasik metodlarından IEC Oran ve Rogers oran metodlarının arızaların belirlenmesindeki kısıtlamaları nedeniyle doğru analiz güvenilirliğini arttırmak için akıllı yöntemlerden olan bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri de kullanılmıştır. Bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemlerinin klasik yöntemlere göre daha yüksek doğrulukta arıza analizi yaptığı görülmüştür. Yine bu çalışmada bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin güç transformatör arızalarını bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre daha iyi tespit ettiği görülmüştür.

Kaynakça

- [1] Afiqah, R. N., Musirin, I., Johari, D., Othman, M. M., Rahman, T. K. A., & Othman, Z. (2010). Fuzzy logic application in DGA methods to classify fault type in power transformer. In International Conference on Electric Power Systems, High voltages, Electric machines, *International conference on Remote sensing–Proceedings* (pp. 83-88)
- [2] Ahmed, M. R., Geliel, M. A., & Khalil, A. (2013, June). Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. In *21st Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 584-589). IEEE.
- [3] Jha, M. K., Barle, N., & Trivedi, R. (2010). Application of artificial intelligence techniques for dissolved gas analysis of transformers-A review. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 12,244-251.
- [4] Lakehal, A., Ghemari, Z., & Saad, S. (2015, April). Transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis technology and Bayesian networks. In *2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 194-198). IEEE.
- [5] Su, Q., Mi, C., Lai, L. L., & Austin, P. (2000). A fuzzy dissolved gas analysis method for the diagnosis of multiple incipient faults in a transformer. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15 Issue 2, 593-598.
- [6] Atalar, F., & Kuntman, A. Bulanık Mantık Yöntemi Kullanılarak Güç Transformatörleri Arızalarının Belirlenmesi Diagnosis of Power Transformers Faults using Fuzzy Logic Method, https://www.emo.org.tr/ekler/b7f07f081e2e0f6_ek.pdf, Erişim:28 Ocak 2024.
- [7] Abdullayev, İ. (2021). *Güç transformatörlerinin güvenilirliğinin artırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [8] Khan, S. A., Equbal, M. D., & Islam, T. (2015). A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.22 Issue 1, 590-596.
- [9] Ramesh, K., & Sushama, M. (2014, November). Inter- turn fault detection in power transformer using fuzzy logic. In *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)* (pp. 1-5). IEEE.
- [10] Aziz, A. A., Ali, A. A., & Abbas, A. H. (2009). Power Transformer Protection by Using Fuzzy Logic. *Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering*, Vol.5 Issue 1.
- [11] Köroğlu, S., Demirçalı, A., Yıldız, M., Çalı, M. E., & Mihci, G. (2014) Güç Transformatörleri Arızalarının Yağda Çözünmüş Gaz Analiziyle Tanınması, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa.
- [12] Genc, S., & Karagol, S. (2020, June). Fuzzy logic application in DGA methods to classify fault type in power transformer. In *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Abu-Siada, A., Hmood, S., & Islam, S. (2013). A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20 Issue 6, 2343-2349.
- [14] K. Alawode, K. O., & Olowolafe, F. (2023). Fuzzy Logic and Decision Tree Models for Dissolved Gas Analysis in Power Transformer Fault Diagnosis. *Adeleke University Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6 Issue 1, 56-63.
- [16] Apte, S., Somalwar, R., & Wajirabadkar, A. (2018, December). Incipient fault diagnosis of transformer by DGA using fuzzy logic. In *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-5. IEEE.
- [16] Dhote, N. K., & Helonde, J. B. (2014). Improvement in transformer diagnosis by DGA using fuzzy logic. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol.9 Issue 2, 615-621.
- [17] Hussein, A. R., Dakhil, A. M., Rashed, J. R., & Othman, M. F. (2022). Intelligent expert system for diagnosing faults and assessing quality of power transformer insulation oil by DGA method. *Misan Journal of Engineering Sciences*, Vol.1 Issue 1, 47-57.
- [18] Nemeth, B., Laboncz, S., & Kiss, I. (2009, May). Condition monitoring of power transformers using DGA and fuzzy logic. In *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, pp. 373-376. IEEE.
- [19] Taha, I. B., Ghoneim, S. S., & Zaini, H. G. (2016). A fuzzy diagnostic system for incipient transformer faults based on DGA of the insulating transformer oils. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 11 Issue 3, 305-313.
- [20] Permana, S., Sumarto, S., & Saputra, W. S. (2018, July). Analysis of transformer conditions using triangle duval method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 384, No. 1, p. 012065. IOP Publishing.
- [21] Poonnoy, N., Suwanasri, C., & Suwanasri, T. (2020). Fuzzy logic approach to dissolved gas analysis for power transformer failure index and fault identification. *Energies*, Vol.14 Issue 1, 36.
- [22] Wani, S. A., Gupta, D., Farooque, M. U., & Khan, S. A. (2019). Multiple incipient fault classification approach for enhancing the accuracy of dissolved gas analysis (DGA). *IET Science, Measurement & Technology*, Vol.13 Issue 7, 959-967.
- [23] Akkaptan, A. (2012). *Hayvancılıkta Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.