

BULANIK MANTIK DENETİMLİ KATODİK KORUMA DEVRESİ TASARIMI

M. Ali AKCAYOL

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara,
TÜRKİYE, e-mail: akcayol@gazi.edu.tr

FUZZY LOGIC CONTROLLED CATHODIC PROTECTION CIRCUIT DESIGN

ABSTRACT

In this study, output voltage of automatic transformer-rectifier (TR) unit of impressed current cathodic protection has been controlled by using fuzzy logic controller. To prevent corrosion, voltage between the protection metal and the auxiliary anode has to be controlled on a desired level. Because soil resistance in the environment changes with humidity and soil characteristics, TRs must control the output voltage between protection metal and auxiliary anode automatically. In this study, a fuzzy logic controller has been developed for tuning output voltage of TR units. PIC16F877 has been used to control the output voltage of the TR unit. The output voltage has not overshoot and oscillated.

Key Words: Fuzzy logic controller, cathodic protection, microcontroller

BULANIK MANTIK DENETİMLİ KATODİK KORUMA DEVRESİ TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, katodik koruma sistemindeki otomatik trafo redresör (TR) ünitesinin çıkış gerilimi ayarı bulanık mantık denetleyici ile yapılmıştır. Korozyonu önlemek için korunacak metal ile yardımcı anot arasındaki gerilimin belirlenen seviyede tutulması zorunludur. Korozif ortamlardaki toprak dirençleri neme ve toprak özelliklerine göre değiştiği için TR ünitelerinin korunacak metal ile yardımcı anot arasındaki gerilimi otomatik olarak ayarlaması gerekmektedir. Bu çalışmada TR ünitesinin çıkış gerilimi ayarı için bir bulanık mantık denetleyici geliştirilmiştir. Denetleyici olarak PIC16F877 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Çıkış gerilimi istenen seviyeye ulaştıktan sonra dalgalanma olmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık denetleyici, katodik koruma, mikrodenetleyici

1. GİRİŞ

Bulanık mantık denetleyiciler son yıllarda kontrol uygulamalarında gittikçe artarak yoğun bir şekilde kullanılmakta ve başarılı sonuçlar alınmaktadır. A. Lütüfî ZADEH tarafından 1965 yılında ortaya atılmasından (1) bu yana bulanık mantık denetleyiciler ekonomi, yönetim, tıp ve işlem kontrol sistemlerinde başta olmak üzere birçok alanda uygulanmıştır (2). Bulanık mantık denetleyici bir uzman kişinin bilgi ve tecrübelerinden yararlanılarak oluşturulur. Böylece uzman operatör dilsel denetleyiciler olarak bilinen; çok artır, biraz artır, çok fazla, çok az... gibi günlük hayatta sıkça kullandığımız kelimeler doğrultusunda esnek bir kontrol metodu geliştirilebilir. Bulanık mantık denetleyicinin temeli bu tür sözlü ifadeler ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuştur (3).

Bulanık mantık insanın düşünüş yapısına ve dilsel ifadelerine geleneksel mantık sistemlerinden daha çok benzemektedir. Bulanık mantık denetleyici uzman

1. INTRODUCTION

In the last years, the application of fuzzy logic controllers has been extended gradually in process control area and successful results have been taken. They have been applied to many fields (2) as economy, administration, medical science and process control systems since introduced by A. Lütüfî Zadeh in 1965 (1). Fuzzy logic controller is formed in the light of the knowledge and experiences of an expert. Thus, a flexible control method can be developed through the commonly used daily language words as; increase a lot, increase a little, a lot, a little that are known as linguistic determinatives. Fuzzy logic controller was based on such verbal statements and the logical relationships between them (3).

The Fuzzy logic is much closer in spirit to human thinking and natural language than the traditional logic systems. The Fuzzy logic controller does the control process using linguistic expressions based on expert

bilgilerine dayanan dilsel ifadeler kullanarak kontrol işlemini yapmaktadır (1). Bulanık mantık denetleyici geliştirmek matematiksel ifadeler gerekmediği için kolaydır. Bu yüzden bulanık mantık denetleyici modellenemeyen veya doğrusal olmayan karmaşık sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmektedir (4,5). Bulanık mantık denetleyici sayısal bilgileri dilsel ifadelere dönüştürme, karar sistemi için dilsel çıkarım ve sayısal kontrol bilgisi için dilsel sonuçları sayısal sonuçlara dönüştürme olmak üzere üç ana özelliğe sahiptir (6).

Bu çalışmada, bulanık mantık denetleyici korozyonu önlemek için kullanılan katodik koruma sistemindeki trafo-redresör ünitesinin çıkış gerilimini ayarlamak için kullanılmıştır. Korozyon, malzemelerin çevre etkisi ile kademeli olarak aşınması veya kimyasal, elektro-kimyasal reaksiyonlarla bozularak kullanılmaz hale gelmesidir (7). Korozyonu önlemek için korozyona maruz kalan malzemeye dışarıdan harici bir elektrik devresi aracılığıyla gerilim uygulamak yeterli olmaktadır. Böylece korunacak metal, çevresine göre eksi gerilimde (katot) olur ve oksijenle birleşmesi (paslanması) engellenmiş olur.

Günümüzde korozyon kayıplarını en aza indirmek için çok yönlü araştırmalar yapılmakta ve etkin çözümler bulunmaktadır. Katodik koruma korozyonla mücadelede en etkin ve en ucuz yöntemdir. Önceleri katodik koruma sadece boru hatlarına uygulanırken son zamanlarda gemiler, iskeleler, köprü ayakları, tanklar, kimyasal madde taşıyan kaplar ve betonarme demirlerde uygulanmaya başlanmıştır (7).

Katodik koruma ilk olarak 1824 yılında Sir Humphry Davy tarafından Samarang isimli bir harp gemisinde denenmiştir(8). Bu uygulama sonuçları başarısız olarak değerlendirilmiş ve katodik koruma yaklaşık yüzyıl hiçbir alanda uygulanmamıştır. 20.yüzyılın başlarında uzak mesafelere petrol boru hatları döşenmesinden sonra tekrar katodik koruma çalışmaları başlamıştır. Önce boru hatlarına, 1950'li yıllardan sonrada gemiler, tanklar, su depoları, baraj kapakları, iskele ayakları, betonarme demirleri gibi bir çok farklı yapıya uygulanmıştır (8).

2. KATODİK KORUMA

Katodik koruma, korunacak metali bir elektro-kimyasal hücrenin katodu haline getirerek oksitlenmeyi önleme işlemidir. Galvanik anotlu katodik koruma (galvanic anode cathodic protection) ve dış akım kaynaklı katodik koruma (impressed current cathodic protection) olmak üzere iki farklı yöntem bulunmaktadır (7,9).

Galvanik anotlu katodik korumada korunacak metalden daha aktif bir metal ile (magnezyum gibi) elektro-kimyasal hücre yapısı oluşturularak korunacak metal negatif gerilimde tutulur. Oksijen iyonları anot olarak kullanılan (pozitif gerilime sahip olan) aktif metalle birleşir, böylece korunacak metalin yerine paslandığında değiştirilecek metal plakanın oksitlenmesi sağlanır (10).

Dış akım kaynaklı katodik koruma yönteminde ise dışarıdan gerilim uygulanarak korunacak metal negatif potansiyelde, yardımcı anot olarak adlandırılan metal ise pozitif potansiyelde tutularak katotta bulunan metalin oksitlenmesi engellenmiş olur (11).

Yapılan çalışmada katodik koruma için dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemi uygulanmıştır.

knowledge (1). It is easy to develop a fuzzy logic controller, as mathematical expressions are not required. Therefore, the fuzzy logic controller can be applied to the complex systems that are non linear and cannot be modelled (4,5). The fuzzy logic controller has three main qualities as transforming numerical values into linguistic expressions, linguistic outcome for resolution system and transforming linguistic conclusions into numerical conclusions for numerical control information (6).

In this work, the fuzzy logic controller was used to adjust the output voltage of the trafo-redresör unit in the cathodic protection system used to prevent corrosion. Corrosion is the gradual corroding of materials by the effect of environment or corruption of materials through chemical and electro chemical reactions (7). In order to prevent corrosion it is sufficient to apply voltage to the corroded material from an external electric circuit. By this way, the metal to be protected stays at minus voltage (cathode) according to its environment and it is prevented from corroding.

Recently, many research has been done and effective solutions have been found to decrease the loss due to corrosion. Cathodic protection is the cheapest and the most effective way of preventing corrosion. Previously, cathodic protection was only applied to pipelines but recently it has been applied to ships, quays, bridge stands, tanks, vessels carrying chemical substances and reinforced concrete irons (7).

Cathodic protection was first tested on a warship called Samarang by Sir Humphry Davy in 1824 (8). The result of this test was evaluated as a failure and afterwards cathodic protection was not used in any field for about a century. In the early 20th century studies on cathodic protection was started again after the construction of petrol pipelines on faraway distances. It was applied on pipelines first, then after 1950s was applied on many different constructions such as ships, tanks, water depots, floodgates, quay stands and reinforced concrete irons (8).

2. CATHODIC PROTECTION

Cathodic protection is the process of preventing oxidation by transforming the metal to be protected into the cathode of an electro-chemical cell. There are two different methods as galvanic anode cathodic protection and impressed current cathodic protection (7,9).

In galvanic anode cathodic protection, the metal to be protected is kept under negative voltage by forming an electrochemical cell structure with a more active metal (as magnesium). Oxygen ions unites with the active metal used as anode and thus, instead of the metal to be protected the metal plate that can be changed when corroded is provided to be oxidized (10).

In impressed current cathodic protection method, the metal in the cathode is prevented from oxidizing by keeping the metal to be used as secondary anode at positive potential and the metal to be protected by applying external voltage at negative potential (11).

In this work, impressed current cathodic protection method was used for cathodic protection.

2.1. Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Yöntemi

Dış akım kaynaklı katodik koruma yönteminde herhangi bir elektrot anot olarak kullanılabilir. Anot olarak seçilen elektrot bir DC (direct current) gerilim kaynağının (+) ucuna, korunacak metal ise (-) ucuna bağlanır. Bu şekilde bir elektrolitik ortam içerisine iki elektrot yerleştirilmiş olur. Ancak anot üzerinden çekilen akım, bir DC gerilim kaynağı ile sağlandığından anot elektrodu doğrudan reaksiyona girmez ve anot üzerinde bir kütle kaybı oluşmaz (12). Böylece anodu korozyona uğratmadan katodu korumak için gereken yapı oluşturulur.

Bir çelik boru hattını dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemiyle korumak için bir DC gerilim kaynağının (-) ucunu korunacak metale, (+) ucunu da bir yardımcı anoda Şekil 1'deki gibi bağlamak yeterli olmaktadır.

2.1. Impressed Current Cathodic Protection Method

In impressed current cathodic protection method, any electrode can be used as an anode. The electrode chosen as anode is connected to the (+) end of a DC (direct current) voltage supply and the metal to be protected is connected to the (-) end. By this way, two electrodes are placed in one electrolytic environment. However, as the current on the anode is supplied from a DC voltage supply, the anode electrode does not directly come into reaction and does not have a loss in its mass (12). Thus, the required structure is formed to protect the cathode without any corrosion on anode.

In order to protect a steel pipeline with impressed current cathodic protection method, it is sufficient to connect the (-) end of a DC voltage supply to the metal to be protected and the (+) end with a secondary anode as in Figure 1.

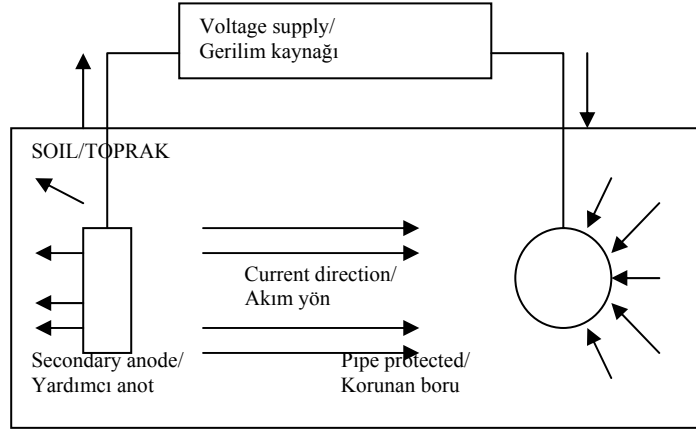


Figure 1. Impressed current cathodic protection method
Şekil 1. Dış akım kaynaklı katodik koruma yöntemi

3. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİNİN SİSTEME UYGULANMASI

Katodik koruma için sayısal DC gerilim kaynağı kullanılmış ve çıkış gerilimi PWM (Pulse Width Modulation) sinyalinin görev süresi (duty cycle) değiştirilerek ayarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyici, mikrodenetleyici çıkışından alınan PWM sinyalinin görev süresini ayarlamak için kullanılmıştır. PWM sinyalinin görev süresi ayarı referans elektrot kullanılarak topraktan ölçülen gerçek referans gerilim değeriyle DC gerilim kaynağı için önceden belirlenen referans gerilim değeri karşılaştırılarak yapılmaktadır. Referans elektrot ile gerilim kaynağının negatif ucu arasındaki gerilim farkının 0,85-1,2 arasında olması gerekmektedir (7). İstenilen referans gerilim değerini referans elektrot üzerinden elde edebilmek için DC gerilim kaynağının çıkış gerilim değeri değiştirilmektedir. Uygulanan gerilim değeri uygulama alanının oluşturacağı yük değerine (toprak direncine) bağlı olarak değişmekte veya farklı alanlarda farklı çıkış gerilimi gerekmektedir. Uygulama alanının toprak özellikleri korunacak metal üzerinde farklı potansiyelle sebep olmaktadır (13). Örneğin nemli bir bölge ile kuru bir bölge arasında veya mevsimlere göre değişen özelliklere sahip bir bölgede toprak direnci değişebilmekte

3. APPLICATION OF FUZZY LOGIC CONTROLLER INTO THE SYSTEM

Numerical DC (direct current) voltage supply was used for cathodic protection and output voltage was adjusted by changing the duty cycle of PWM (Pulse Width Modulation). The fuzzy logic controller was used to adjust the duty cycle of PWM signal received from microcontroller output. The adjustment of the PWM signal duty cycle was done by comparing the real reference voltage value measured on earth using the reference electrode and the reference voltage value formerly determined for DC voltage supply. The voltage difference between the reference electrode and the negative end of voltage supply must be between 0.85-1.2 (7). The output voltage of DC voltage supply is changed in order to obtain the demanded reference voltage value on the reference electrode. The applied voltage value changes depending on the change value (resistance of earth) formed in the application field or different output voltage on different fields is required. The characteristics of the earth in the application field results in different potential on the metal to be protected (13). For example, the earth resistance between a humid region and a dry region or in a region having different characteristics according to seasons can change and as a

buna bağlı olarak uygulanan gerilimin ayarlanması gerekmektedir. Korozyon özellikleri açısından 50'den fazla değişik toprak türü bulunmaktadır ve her bir toprak türünün farklı direnci vardır (14).

Günümüzde uygulanan katodik korumada DC gerilim kaynağının çıkış gerilimi uygulanan alanın özelliklerine göre kurulum sırasında ayarlanmakta ve periyodik olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada gerçekleştirilen DC gerilim kaynağı uygulama alanının özelliklerine bağlı olarak çıkış gerilimini ayarlayabilmektedir. Şekil 2'de DC gerilim kaynağının çıkış gerilimini ayarlamak için kullanılan bulanık mantık denetleyici görülmektedir.

result, the applied voltage needs to be adjusted. More than 50 different kinds of soil exists in terms of corrosion characteristics and each kind has different resistances (14).

In the cathodic protection used recently, the output voltage of DC voltage supply is adjusted during the setting, according to the characteristics of the application field and it needs to be controlled periodically. In this work, adjusting the output voltage according to the characteristics of the application field of DC voltage supply was accomplished. The fuzzy logic controller used to adjust the output voltage of DC voltage source is shown in Figure 2.

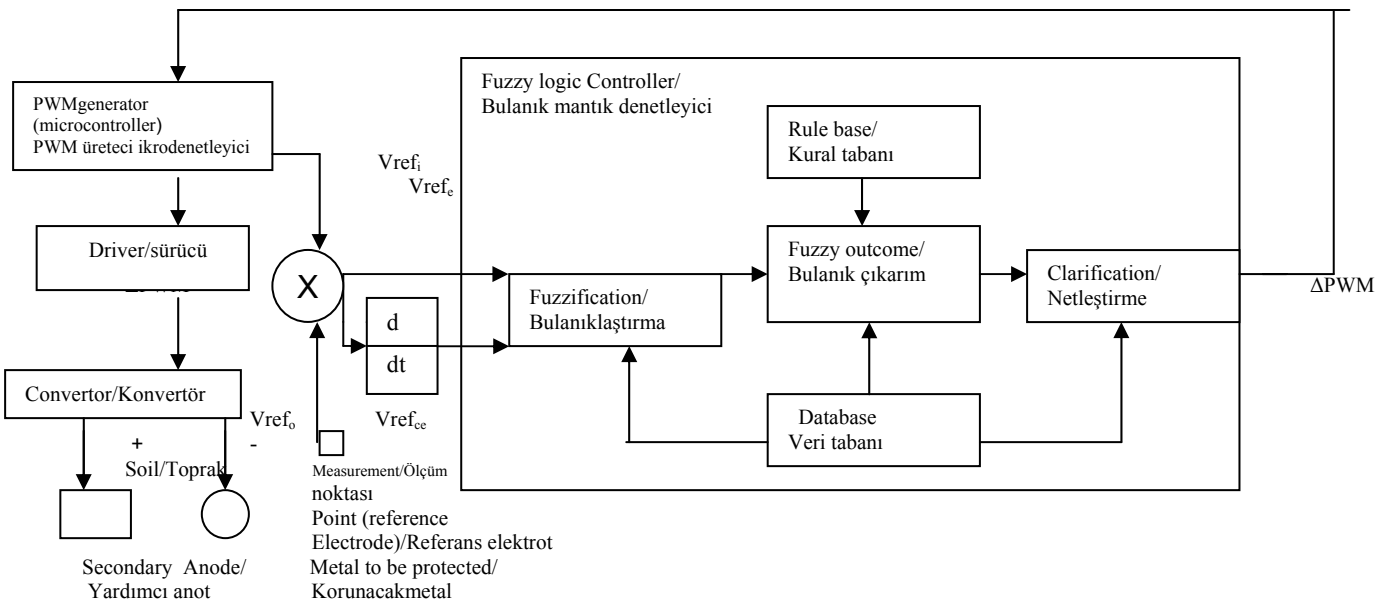


Figure 2. Block diagram of the used fuzzy logic controller
Şekil 2. Kullanılan bulanık mantık denetleyicinin blok şeması

Bulanık mantık denetleyicinin giriş değişkenleri olarak referans gerilim hatası (V_{ref_e}) ve referans gerilim hata değişimi ($V_{ref_{ce}}$) değerleri alınmıştır. Referans gerilim hatası,

$$V_{ref_e} = V_{ref_i} - V_{ref_o}$$

olarak alınmıştır. Burada V_{ref_i} gerilim kaynağının istenen referans gerilim değerini, V_{ref_o} referans elektrot kullanılarak topraktan ölçülen gerilim değerini ifade etmektedir. Referans gerilimin hata değişim değeri son hesaplanan hata değerinden bir önceki hata değerinin çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Referans gerilimin hata değişim değeri için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$V_{ref_{ce}} = V_{ref_e} - V_{ref_{e0}}$$

Burada V_{ref_e} son hata değerini, $V_{ref_{e0}}$ ise bir önceki hata değerini ifade etmektedir. Bulanık mantık denetleyicinin çıkış değişkeni ise PWM sinyalinin görev süresi değişimi (ΔPWM) değeridir. Bulanık mantık denetleyicinin sisteme uygulanması Şekil 3'te görülmektedir.

The values of voltage reference error (V_{ref_e}) and change error of voltage reference ($V_{ref_{ce}}$) are used as the input variables of the fuzzy logic controller. Reference voltage error is shown as

$$V_{ref_e} = V_{ref_i} - V_{ref_o}$$

Here, V_{ref_i} indicates the demanded reference voltage value of the voltage supply and V_{ref_o} indicates the voltage value measured on earth using the reference electrode. The changing error value of reference voltage is found by subtracting the final error value from the former error value. The following equation is used to indicate the changing error value of reference voltage.

$$V_{ref_{ce}} = V_{ref_e} - V_{ref_{e0}}$$

Here, V_{ref_e} indicates the final error value and $V_{ref_{e0}}$ indicates the former error value. The output variable of the fuzzy logic controller is the change value of duty cycle (ΔPWM) of PWM signal. See Figure 3 for the application of the fuzzy logic controller into the system.

Δ PWM görev süresinin değiştirilmesi işlemi adımlar halinde aşağıda verilmiştir.

- 1- İstenen referans gerilim girişi ve referans elektrot kullanılarak zeminden ölçülen referans gerilim değerlerinin elde edilmesi
 - 2- Gerilim kaynağı ile zeminden ölçülen referans gerilimleri karşılaştırarak referans gerilim hatası ve hata değişiminin hesaplanması
 - 3- Referans gerilim hatası ve hata değişimi için bulanık kümelerin ve üyelik fonksiyonların belirlenmesi
 - 4- Belirlenen bulanık ifadelerle uygulanacak bulanık kural ve kontrol değerinin belirlenmesi
 - 5- Ağırlık ortalaması metodu kullanılarak Δ PWM değerinin hesaplanması
- Δ PWM değeri kullanılarak yeni PWM görev süresinin hesaplanıp sisteme uygulanması

The process of changing PWM duty cycle is as follows.

- 1- To get the reference voltage values measured on earth by using reference electrode and demanded reference voltage input.
- 2- To calculate reference voltage error and error change by comparing the reference voltage measured on earth and the voltage supply.
- 3- To determine membership functions and fuzzy sets for error change and reference voltage error.
- 4- To determine fuzzy rule and control values applied with determined fuzzy expressions.
- 5- To calculate Δ PWM values using average weight method.
- 6- To calculate the new PWM duty cycle by using Δ PWM value and apply it to the system.

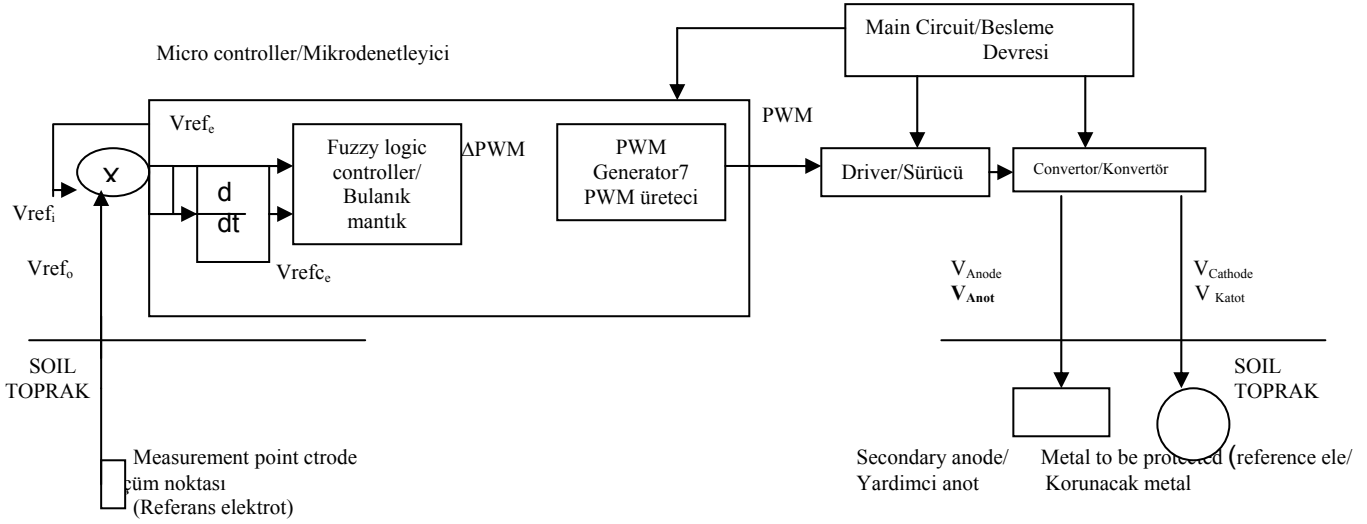


Figure 3. Application of the fuzzy logic controller into the system.
Şekil 3. Bulanık mantık denetleyicinin sisteme uygulanması

3.1. Kural Tablosunun Oluşturulması

Bulanık mantık denetleyicinin girişleri ve çıkışı arasındaki bulanık kurallar sistemin dinamik davranışı incelenerek elde edilmiştir. Şekil 4'te istenen referans gerilim ve topraktan ölçülen referans gerilim değişim eğrileri görülmektedir.

Şekil 4'te C_x istenen referans gerilime göre geçiş noktalarını, m_x ölçülen gerilimin maksimum ve minimum uç noktalarını ve A_x ise gerilim değişim aralıklarını göstermektedir. Şekil 4'deki geçiş ve uç noktaları için referans gerilim hatası ve hata değişimi özelliklerinden Çizelge 1'deki ifadeler elde edilmiştir.

Geçiş ve uç noktadaki bulanık kontrol kuralları ise Çizelge 2'deki gibi elde edilebilir. Burada her bir geçiş ve uç noktadaki durum dilsel ifadeye dönüştürülerek bulanık kurallar elde edilmiştir.

Çizelge 2'deki 1.kuralın dilsel ifade edilişi "Eğer $V_{ref_e} = \text{sıfır}$ ve $V_{ref_{ce}} = \text{negatif büyük}$ ise Δ PWM değerini negatif büyük yap" şeklindedir. Çizelge

3.1. Forming Rule Chart

The fuzzy rules between the input and output of the fuzzy logic controller were obtained examining the dynamic course of the system. Figure 4 shows the variation curves of the demanded reference voltage and reference voltage measured on earth.

In Figure 4, c_x indicates the transfer points in terms of demanded reference voltage, m_x indicates the maximum and minimum ends of the measured voltage and A_x indicates voltage change intervals. The expressions in Table 1 were obtained from the reference voltage error and error change characteristics for the transfer and ends in Figure 4.

The rules of fuzzy control on transfer and ends can be obtained as in Table 2. Here, fuzzy rules were obtained by converting the state on each transfer and end into linguistic expressions.

The linguistic expression of rule 1 on Table 2 is as "If $V_{ref_e} = 0$ and $V_{ref_{ce}} = \text{negative high}$, make Δ PWM value negative high". The expressions stated on Table 1 and Table 2 were arranged as shown in Table 3 according to

1'de ve Çizelge 2'de verilen ifadeler referans gerilim hatası ve referans gerilim hata değişimine göre Çizelge 3'de görüldüğü gibi düzenlenmiştir.

reference voltage error and error change in reference voltage.

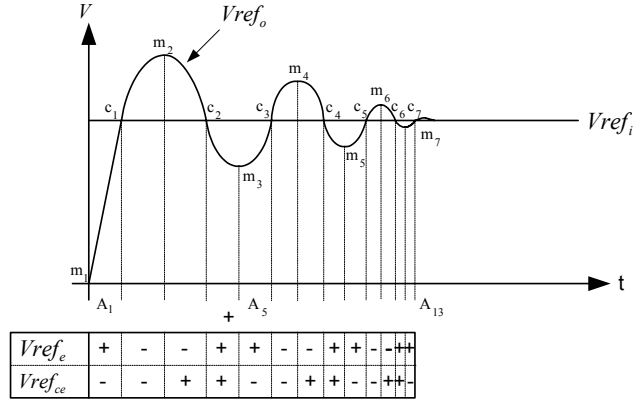


Figure 4. Demanded and measured reference voltage change
Şekil 4. İstenen ve ölçülen referans gerilimlerin değişimi

Çizelge 3'te görüldüğü gibi A_4, A_8, A_{12} aralıklarında $Vref_e$ pozitif artmakta ve $Vref_{ce}$ ise pozitif değerdedir. Hatayı azaltmak için kontrol değişkeni ΔPWM değerinin pozitif verilmesi gerekmektedir. Aynı şekilde A_1, A_5, A_9 aralıklarında $Vref_e$ pozitif artmakta ve $Vref_{ce}$ ise negatif değerdedir. Hata pozitif değerdedir ve azaltılması için kontrol değişkeni ΔPWM değerinin pozitif verilmesi gerekmektedir. Diğer aralıklar içinde aynı değerlendirmeleri yaparak sözel kural tablosuna geçiş yapılmıştır. Çizelge 3'deki ifadeleri sözel kurallar olarak düzenleyerek Çizelge 4'deki kural tablosu elde edilmiştir.

Çizelge 4'te girişler ve çıkış için NB(Negatif Büyük), NO(Negatif Orta), NK(Negatif Küçük), S(Sıfır), PK(Pozitif Küçük), PO(Pozitif Orta) ve PB(Pozitif Büyük) olmak üzere toplam 7 tane dilsel etiket kullanılmıştır. Elde edilen bulanık kural sayısı 49 tanedir. Kural tablosu benzetim programıyla yeniden düzenlenerek kural sayısı 9'a indirilmiştir. Benzetim programıyla yapılan çalışmalarda deneme/yanılma metodu kullanılmıştır. Sisteme uygulanan kural tablosu Çizelge 5'te görülmektedir.

3.2. Bulanık Mantık Denetleyicinin Giriş ve Çıkış Değişkenlerine Değer Atanması

Bulanık mantık denetleyiciye ait üyelik fonksiyonları hazırlanan benzetim programıyla elde edilmiştir. Başlangıçta $Vref_e$ ve $Vref_{ce}$ girişleri ile ΔPWM çıkışı için $[-1, +1]$ aralığında toplam 7 dilsel etiket tanımlanmıştır. Benzetim programı kullanılarak deneme/yanılma metoduyla hem üyelik fonksiyonlarında hem de kural tabanında iyileştirme yapılmıştır. Hazırlanan bulanık mantık denetleyici programının hızlı çalışabilmesi için gerekli olan en önemli noktalar kural sayısı ve üyelik fonksiyonlarının şeklidir. Bu yüzden doğrusal özelliğe sahip olan ve üyelik değerinin en kısa sürede elde edildiği üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Ayrıca her bir giriş ve çıkış için üyelik fonksiyonlarının sayısı en aza

$Vref_e$ increases positively and $Vref_{ce}$ has positive value on $A_4, A_8,$ and A_{12} intervals as shown in Table 3. In order to decrease error, the control variable ΔPWM value must be positive. Likewise, $Vref_e$ increases positively and $Vref_{ce}$ has negative value on $A_1, A_5,$ and A_9 intervals. Error has positive value and in order to decrease it, control variable ΔPWM must be positive. It was transferred into verbal rule diagram by making the same evaluations for other intervals. Arranging the expressions on Table 3 as verbal rule, the rule table on Table 4 was formed.

Seven linguistic labels used in Table 4 for inputs and outputs are: NH (Negative High), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive medium) and PH (Positive High). 49 fuzzy rules were obtained. The number of rules was reduced to 9 by reorganizing the rule chart with the resemblance programme. Trial and error method was used in the works done with the resemblance program. The rule chart applied to the system is shown in Table 5.

3.2 Assessing value to Input and Output Variables of The Fuzzy Logic Controller

The membership functions of the fuzzy logic controller were obtained through the set resemblance programme. At the beginning, 7 linguistic labels were defined on $[-1, +1]$ interval for $Vref_e$ and $Vref_{ce}$ inputs and ΔPWM output. Improvements both in membership functions and rule base were done through trial and error method using the resemblance program. The most important points to enable the prepared fuzzy logic controller programme to work fast are the number of rules and the shape of membership functions. Therefore, triangle membership function, in which membership value is obtained in the shortest time and which has a linear characteristic, was chosen. Moreover, the number of membership functions for each

indirilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının sayısının azaltılması ile toplam kural sayısı da azaltılmıştır. V_{ref_e} girişi için $[-1, +1]$ aralığı kullanılarak elde edilen değerlerde sapma olduğu için farklı aralıklar denenmiş ve en uygun aralık olarak $[-3, +3]$ belirlenmiştir. Bulanık mantık denetleyicinin giriş değişkenleri V_{ref_e} ve $V_{ref_{ce}}$ için değişim aralıkları,

$$-3 \leq V_{ref_e} \leq +3$$

$$-1 \leq V_{ref_{ce}} \leq +1$$

olarak alınmıştır. V_{ref_e} ve $V_{ref_{ce}}$ girişleri için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 5'te görülmektedir.

input and output was decreased to minimum. Decreasing the number of membership functions also reduced the total number of rules. Since there was deviation in the values obtained using $[-1, +1]$ interval for V_{ref_e} input, different intervals were tried and $[-3, +3]$ interval was determined to be the most suitable one. The variation intervals for the input variables V_{ref_e} and $V_{ref_{ce}}$ of fuzzy logic controller were taken as

$$-3 \leq V_{ref_e} \leq +3$$

$$-1 \leq V_{ref_{ce}} \leq +1$$

The membership functions formed for V_{ref_e} and $V_{ref_{ce}}$ inputs are shown in Figure 5.

Table 1. The reference voltage error and error change characteristic on transfer and end points.

Çizelge 1. Geçiş ve uç noktadaki referans gerilim hatası ve hata değişimi özellikleri

| Point/ Nokta | Before/ Önce | After/ Sonra | Explanation/ Açıklama |
|-----------------|------------------|-----------------------|--|
| c1 | $V_{ref_e} > 0$ | $V_{ref_e} < 0$ | Error change negative high/Hata değişimi negatif büyük |
| c2 | $V_{ref_e} < 0$ | $V_{ref_e} > 0$ | Error change positive high/Hata değişimi pozitif büyük |
| c3 | $V_{ref_e} > 0$ | $V_{ref_e} < 0$ | Error change negative medium/Hata değişimi negatif orta |
| c4 | $V_{ref_e} < 0$ | $V_{ref_e} > 0$ | Error change positive medium/Hata değişimi pozitif orta |
| c5 | $V_{ref_e} > 0$ | $V_{ref_e} < 0$ | Error change negative small/Hata değişimi negatif küçük |
| c6 | $V_{ref_e} < 0$ | $V_{ref_e} > 0$ | Error change positive small/Hata değişimi pozitif küçük |
| c7 | $V_{ref_e} > 0$ | $V_{ref_e} < 0$ | Error change approximately zero/Hata değişimi yaklaşık sıfır |
| m1 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \geq 0$ | Error positive high/Hata pozitif büyük |
| m2 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \leq 0$ | Error negative high/Hata negatif büyük |
| m3 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \geq 0$ | Error positive medium/Hata pozitif orta |
| m4 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \leq 0$ | Error negative medium/Hata negatif orta |
| m5 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \geq 0$ | Error positive small/Hata pozitif küçük |
| m6 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \leq 0$ | Error negative small/Hata negatif küçük |
| m7 | $V_{ref_{ce}}=0$ | $V_{ref_{ce}} \geq 0$ | Error positive small/Hata pozitif küçük |

Table 2. Linguistic expressions on transfer and end points

Çizelge 2. Geçiş ve uç noktadaki dilsel ifadeler

| Kural | V_{ref_e} | $V_{ref_{ce}}$ | ΔPWM | Nokta |
|-------|-------------|----------------|--------------|----------------|
| 1 | S | NB | NB | c ₁ |
| 2 | S | NO | NO | c ₃ |
| 3 | S | NK | NK | c ₅ |
| 4 | NB | S | NB | m ₂ |
| 5 | NO | S | NO | m ₄ |
| 6 | NK | S | NK | m ₆ |
| 7 | S | PB | PB | c ₂ |
| 8 | S | PO | PO | c ₄ |
| 9 | S | PK | PK | c ₆ |
| 10 | PB | S | PB | m ₁ |
| 11 | PO | S | PO | m ₃ |
| 12 | PK | S | PK | m ₅ |
| 13 | S | S | S | Kararlı |

Table 3. Expressing transfer and ends according to Vrefe and Vrefce inputs.**Çizelge 3.** Geçiş ve uç noktaların Vref_e ve Vref_{ce} girişlerine göre ifade edilmesi

| $V_{ref_e} \backslash V_{ref_{ce}}$ | NB | NO | NK | S | PK | PO | PB |
|-------------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| NB | A_2 | A_2 | A_6 | c_1 | A_5 | A_1 | A_1 |
| NO | A_2 | A_6 | A_{10} | c_3 | A_9 | A_5 | A_1 |
| NK | A_6 | A_{10} | A_{10} | c_5 | A_9 | A_9 | A_5 |
| S | m_2 | m_4 | m_6 | S | m_5 | m_3 | m_1 |
| PK | A_7 | A_{11} | A_{11} | c_6 | A_{12} | A_{12} | A_8 |
| PO | A_3 | A_7 | A_{11} | c_4 | A_{12} | A_8 | A_4 |
| PB | A_3 | A_3 | A_7 | c_2 | A_8 | A_4 | A_4 |

Table 4. Rule table of Vrefe and Vrefce inputs.**Çizelge 4.** Vref_e ve Vref_{ce} girişlerine göre kural tablosu

| $V_{ref_e} \backslash V_{ref_{ce}}$ | NB | NO | NK | S | PK | PO | PB |
|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NO | NB | PO | PB | PB |
| NO | NB | NO | NK | NO | PK | PO | PB |
| NK | NO | NK | NK | NK | PK | PK | PO |
| S | NB | NO | NK | S | PK | PO | PB |
| PK | NO | NK | NK | PK | PK | PK | PO |
| PO | NB | NO | NK | PO | PK | PO | PB |
| PB | NB | NB | NO | PB | PO | PB | PB |

Table 5. Rule Table**Çizelge 5.** Kural tablosu

| $V_{ref_e} \backslash V_{ref_{ce}}$ | N | S | P |
|-------------------------------------|----|----|----|
| N | NB | PK | PB |
| S | NK | S | PK |
| P | NB | NK | PB |

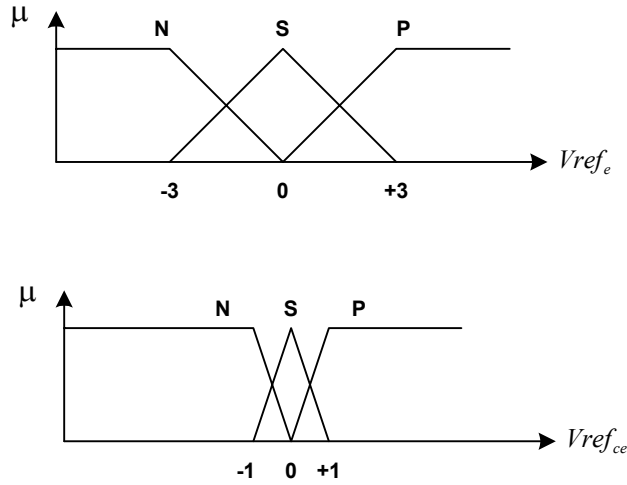


Figure 5. Membership functions of $Vref_e$ and $Vref_{ce}$ inputs

Şekil 5. $Vref_e$ ve $Vref_{ce}$ girişlerine ait üyelik fonksiyonları

Her iki değişken için N(Negatif), S(Sıfır), P(Pozitif) olmak üzere 3 dilsel etiket kullanılmıştır. Sistemin kontrol değişkeni ΔPWM için değişim aralığı $-1 \leq \Delta PWM \leq +1$ olarak alınmıştır. Kontrol değişkenine ait üyelik fonksiyonu Şekil 6'da görülmektedir.

Three linguistic labels as N (Negative), Z (Zero), P (Positive) were used for both variables. The variation interval for the system control variable ΔPWM was taken as $-1 \leq \Delta PWM \leq +1$. The membership function of the control variable is shown in Figure 6.

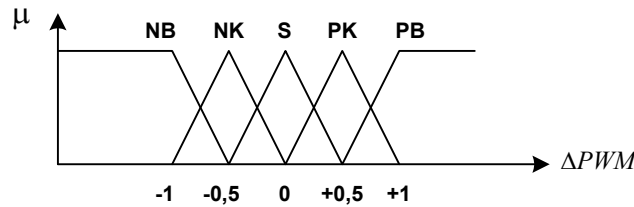


Figure 6 . Membership function of ΔPWM output

Şekil 6. ΔPWM çıkışına ait üyelik fonksiyonu

ΔPWM kontrol değişkeni için NB(Negatif Büyük), NK(Negatif Küçük), S(Sıfır), PK(Pozitif Küçük) ve PB(Pozitif Büyük) olmak üzere toplam 5 dilsel etiket kullanılmıştır. Sisteme uygulanacak ΔPWM değeri ağırlık ortalaması metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Ağırlık ortalaması metodu aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\Delta PWM = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)}$$

Burada ΔPWM görev süresi değişimini, u_i bulanık mantık denetleyiciye uygulanan girişi, $\mu(u_i)$ girişe ait üyelik değerlerini ifade etmektedir. Çıkış geriliminin görev süresi değişimi ise,
 $PWM = PWM + \Delta PWM$

Five linguistic labels used for ΔPWM control variable are NH (Negative High), NL (Negative Low), Z (Zero), PL (Positive Low) and PH (Positive High). The ΔPWM value that will be applied to the system was calculated using the average weight method. The average weight method is shown by the following equation.

$$\Delta PWM = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)}$$

Here, ΔPWM is the duty cycle variation, u_i is the input applied to the fuzzy logic controller and $\mu(u_i)$ is the membership values of the input. The duty cycle variation of the output voltage is shown as

$$PWM = PWM + \Delta PWM$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bulanık mantık denetleyicinin çıkışından alınan Δ PWM sayısal değeri önceki görev süresine eklenerek sisteme uygulanacak yeni görev süresi hesaplanmaktadır.

4. UYGULAMA DEVRESİ

Bu çalışmada, bulanık mantık denetleyici ile TR ünitesi çıkış gerilimi ayarlanmıştır. Anahtarlama elemanı olarak IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve denetleyici olarak PIC16F877 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bulanık mantık denetleyici programı bilgisayarda hazırlanarak paralel port ile mikrodenetleyiciye aktarılmıştır. Program C diliyle hazırlanmıştır. Programın akış şeması Şekil 7'de görülmektedir.

The new duty cycle is calculated by adding the Δ PWM numerical value of the fuzzy logic controller output to the previous duty cycle.

4. APPLICATION CIRCUIT

In this work, the output voltage of TR unit was adjusted with the fuzzy logic controller. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) was used as the switching component and PIC16F877 micro-controller as the controller. The fuzzy logic controller programme was prepared by computer and transferred into the micro-controller through the parallel port. The programme was prepared in C language. The current diagram of the programme is shown in Figure 7.

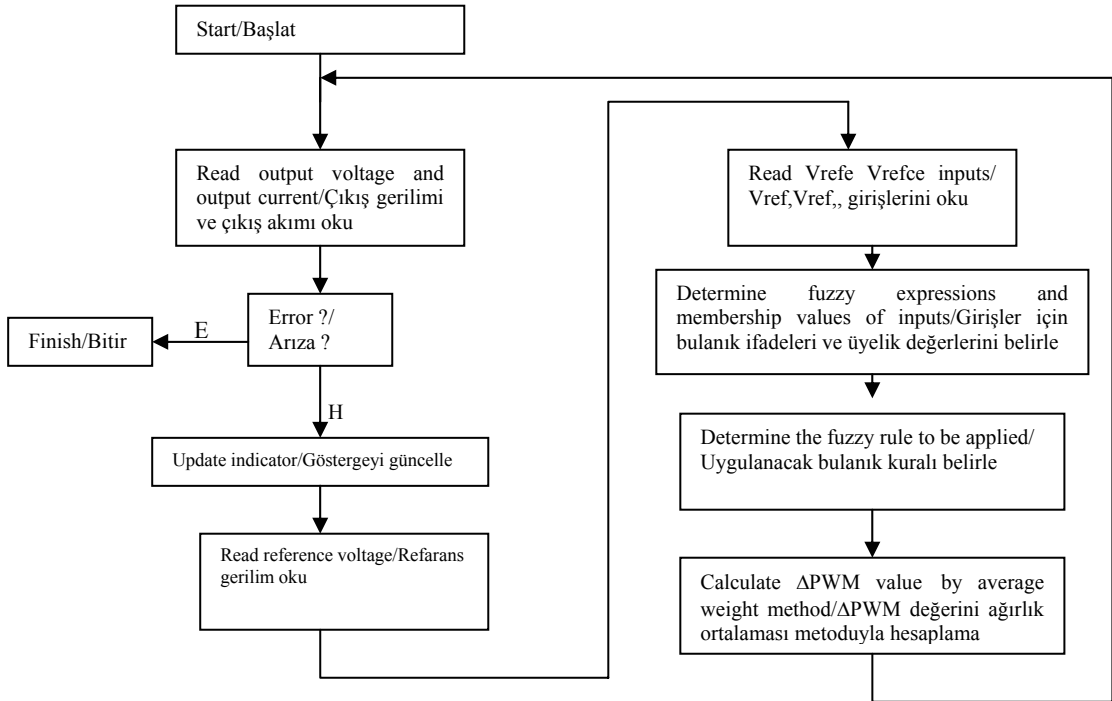


Figure 7. The current diagram of the programme
Şekil 7. Hazırlanan programın akış şeması

Katodik koruma için tasarlanan gerilim kaynağının komple şeması Şekil 8'de verilmiştir.

The complete diagram of the voltage supply planned for cathodic protection is shown in Figure 8.

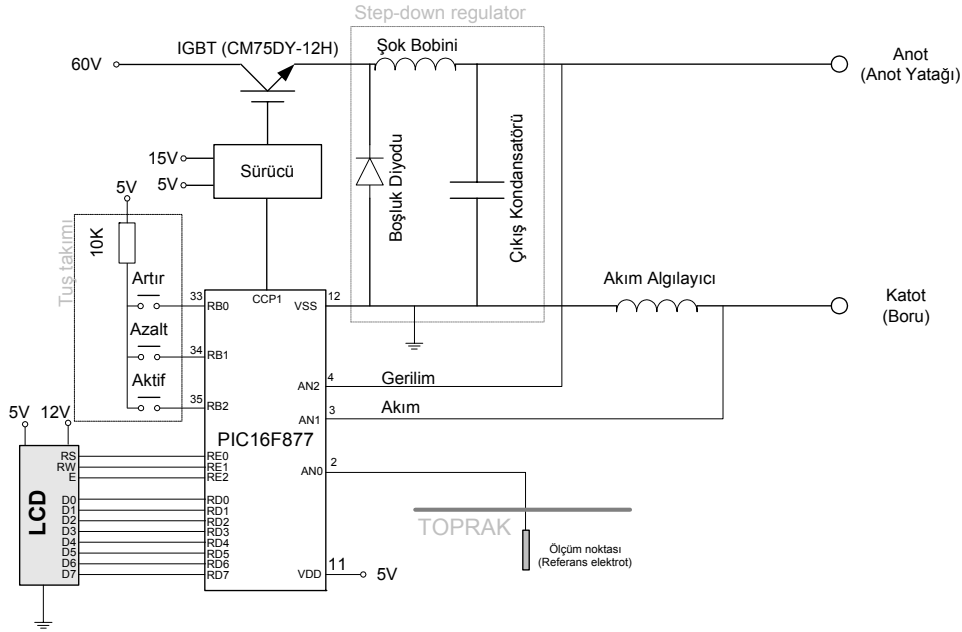


Figure 8. Detailed diagram of the planned voltage supply
Şekil 8. Tasarlanan gerilim kaynağının açık şeması

Gerilim kaynağına geri besleme olarak çıkış gerilimi, çıkış akımı ve zeminden ölçülen referans gerilim değeri alınmıştır. Gerilim ve akım geri besleme değerleri, LCD göstergeye yazdırmak ve herhangi bir açık devre veya kısa devre durumunda PWM çıkışını kapatmak için kullanılmaktadır. Çıkış gerilim değeri ayarını yapmak için kullanılan referans gerilim değeri mikrodenetleyicinin AN0 analog girişine uygulanmıştır. Gerilim kaynağı, besleme devresi, denetleyici devresi, step-down regülatör, tuş takımı ve LCD (Liquid Crystal Display) gösterge birimlerinden oluşmaktadır.

Besleme devresi

Besleme devresi, mikrodenetleyici, IGBT ve IGBT sürme devrelerinin gerilimlerini sağlamaktadır. AC gerilimi köprü diyotlarla ve kondansatör ile DC gerilime dönüştürmektedir. IGBT kollektör ucuna 60V, IGBT sürme devresine 5V ve 15V, mikrodenetleyici devresine 12V ve 5V ile göstergelere 5V besleme devresinden elde edilmektedir. Şekil 9'da besleme devresine ait açık şema görülmektedir.

Output voltage, output current and reference voltage value measured on ground were taken as the feedback for voltage supply. The voltage and current feedback values are used to write on the LCD indicator and to close the PWM output in case of any open circuit or short circuit situation. The reference voltage value used to adjust output voltage value was applied to the AN0 analogue input of the micro controller. The voltage supply consists of the main circuit, the controller circuit, the step-down regulator, the key set and the LCD (Liquid Crystal Display) indicator units.

Main Circuit

The Main Circuit provides the voltage of micro-controller, IGBT and IGBT drive circuits. It converts AC voltage into DC voltage by bridge diodes and condenser. 60V on IGBT collector end, 5V and 15V on IGBT drive circuit, 12 and 5V on micro-controller circuit and 5V on indicators are provided from the main circuit. The detailed diagram of the main circuit is shown in Figure 9.

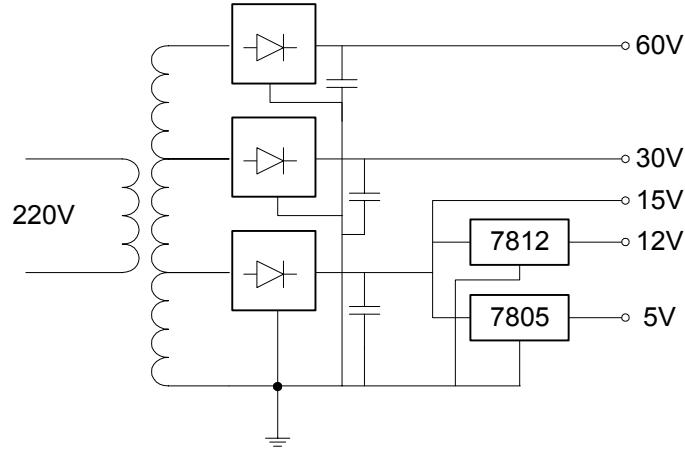


Figure 9. Input and output signals of the controller circuit
Şekil 9. Besleme devresi

Denetleyici devresi

Denetleyici devresinin temel elemanı PIC16F877 mikrodenetleyicidir. PIC16F877 okunan referans gerilim ile istenen referans gerilimi karşılaştırarak uygun denetim işaretini üretir. Bu denetim işareti çıkış gerilimini artırmak veya azaltmak şeklinde olmaktadır. PIC16F877 herhangi bir arıza durumunda sistemi kapatarak LCD display üzerinde hata mesajı oluşturmaktadır. PIC16F877 mikrodenetleyici, PWM işaretinin görev zamanını değiştirerek IGBT sürücü devresine aktarır. IGBT sürücü devresi bir sonraki periyot için IGBT'yi yeni belirlenen süre kadar açık ve kapalı tutar (15). Böylece Şekil 10'daki giriş ve çıkış sinyalleri elde edilir.

Controller Circuit

The main component of the controller circuit is the PIC16F877 micro-controller. PIC16F877 compares the recited reference voltage and the demanded reference voltage and produces the suitable control signal. This control signal appears as increasing or decreasing the output voltage. In case of failure, PIC16F877 turns off the system and shows an error message on the LCD display. PIC16F877 micro-controller changes the duty cycle of the PWM signal and transfers it into the IGBT drive circuit. For the next period, the IGBT drive circuit holds the IGBT on and off during the newly determined period (15). As a result, input and output signals in Figure 10 are obtained.

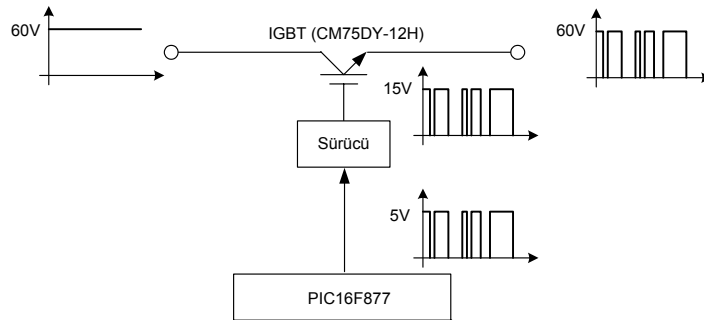


Figure 10. Input and output signals of the controller circuit
Şekil 10. Denetleyici devresi giriş ve çıkış sinyalleri

Bu çalışmada PWM frekansı 20 KHz olarak alınmıştır. Sürücü devre herhangi bir hata durumunda kendisini koruyarak hata çıkışı üretir (15). Kullanılan IGBT sürücü devresi Şekil 11'de görülmektedir.

In this work, PWM frequency is 20 KHz. In case of error, the drive circuit protects itself and produces an error output (15). The IGBT drive circuit that was used is shown in Figure 11.

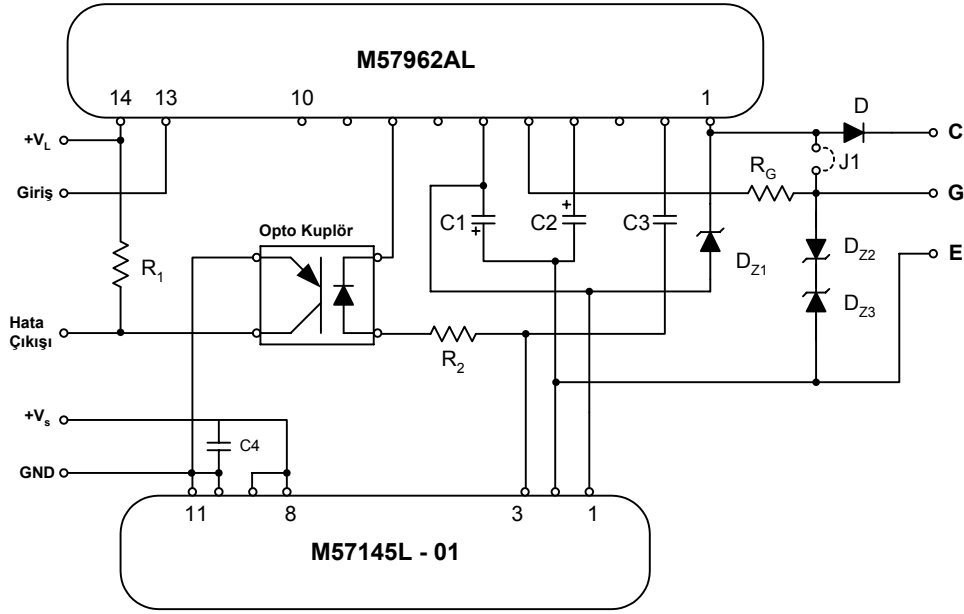


Figure 11. IGBT drive circuit
Şekil 11. IGBT sürücü devresi

Step-Down Regülâtör Devresi

Denetleyici devre tarafından 20KHz'de kıyılarak oluşturulan *PWM* sinyalinin kullanılabilmesi için analog sinyale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için step-down regülâtör kullanılmıştır. Bu regülâtör bir şok bobini, bir kondansatör ve bunların deşarjı için gereken ters besleme diyodundan oluşmaktadır. Step-down regülâtör, denetleme devresi çıkışındaki *PWM* sinyalini DC gerilimine çevirerek anot-katot devresine uygulanacak hale getirir (16, 17). Şekil 12'de step-down regülâtör devresi görülmektedir.

Step-down Regulator Circuit

The PWM signal, which was obtained by the controller circuit at 20KHz, must be converted into analogue signal in order to be used. The step-down regulator was used for this process. This regulator consists of a shock coil, a condenser and a reverse base diode for their discharge. The step-down regulator converts the PWM signal on the control circuit output into DC voltage and makes it ready for the application on anode-cathode circuit (16,17). The Step-down regulator is shown in Figure 12.

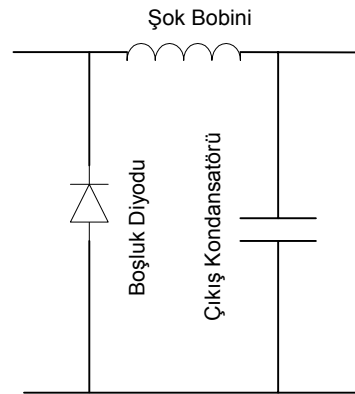


Figure 12. Step-down regulator circuit
Şekil 12. Step-down regülâtör devresi

Tuş takımı ve LCD gösterge

TR ünitesinin referans gerilim girişi bir tuş takımı kullanılarak belirlenmektedir. Tuş takımı artırma, azaltma ve girilen değeri aktif hale getirmek için kullanılan üç tuşa sahiptir. LCD gösterge ise mikrodenetleyici tarafından herhangi bir arıza durumunda oluşturulan hata mesajını görüntülemek için kullanılır. LCD göstergede, hata olmadığı zaman referans elektrot tarafından okunup mikrodenetleyiciye girilen referans gerilim değeri görüntülenmektedir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel sonuçlar 6Ω sabit yük kullanılarak elde edilmiştir. TR ünitesi besleme giriş gerilimi 60V olarak alınmıştır. 6Ω sabit yük altında iken mikrodenetleyici referans gerilimi istenen 1,2V seviyesinde tutmuştur. Şekil 13'te çıkış gerilimi, referans gerilime bağlı olarak 0 V ile başlamış 45 V değerine ulaşmıştır. Referans gerilim değeri başlangıçta 0 V olarak alınmış ve 3sn sonra 1,2 V seviyesine yükseltilmiştir. Çıkış gerilimi de 3sn sonra 45 V değerine yükselmiştir.

Key set and LCD Indicator

The reference voltage input of the TR unit is determined using a key set. A key set has three keys used to increase, decrease and activate the input value. The LCD indicator is used to project the error message formed by the micro-controller in case of failure. When there is no error, the reference voltage value transferred to the micro-controller by reference electrode is shown on the LCD indicator.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

Experimental results were obtained using 6Ω as constant load. TR unit main input voltage was taken as 60V. Under 6Ω constant load, the micro-controller held the reference voltage at 1.2 level as demanded. In figure 13, output voltage started with 0 V depending to reference voltage and reached to a value of 45 V. Reference voltage value was taken as 0 V at the beginning and after 3 seconds it was increased to 1.2V level. Output value was increased to 45 V value after 3 seconds.

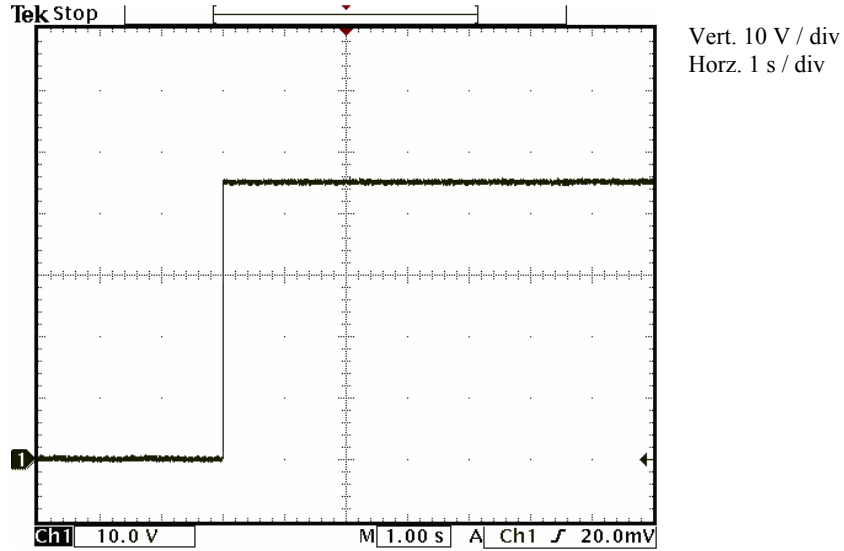


Figure 13. Output voltage
Şekil 13. Çıkış gerilimi

Şekil 14'te ise çıkış akımının referans gerilimde yapılan değişikliğe göre aldığı değer görülmektedir. Çıkış akımı başlangıçta 0A iken 3sn sonra referans gerilimdeki değişime göre 7,5A değerine ulaşmıştır.

In Figure 14, the value of output current according to the change done on reference voltage is shown. At the beginning, the output current was 0A and after 3 seconds, it reached to 7.5A according to the change on reference voltage.

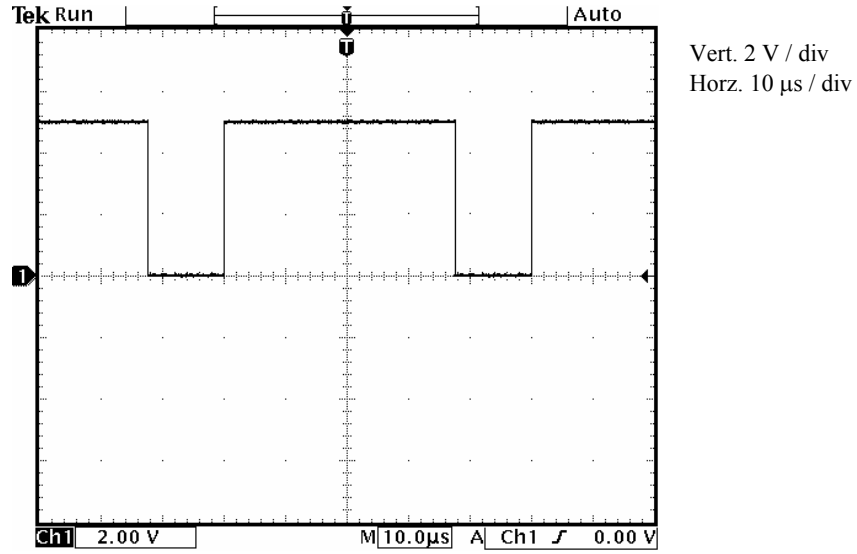


Figure 16. Reference voltage input
Şekil 16. IGBT sürücü devre giriş sinyali

Çıkış geriliminin 45V olması için PWM görev süresinin %75 oranında olduğu Şekil 16'da görülmektedir. Şekil 16'daki 0V ile 5V arasındaki değişimler çıkış gerilimi üzerinde yapılan değişikliği göstermektedir

PWM duty cycle must be %75 to have a 45V input voltage as in Figure 16. The variations between 0V and 5V in Figure 16 shows the variations made on the output voltage.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada bulanık mantık denetimli katodik koruma trafo-redresör ünitesi tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bulanık mantık denetleyicinin üyelik fonksiyonları ve kural tablosu hazırlanan benzetim programı kullanılarak deneme/yanılma metoduyla elde edilmiştir. Bulanık mantık denetleyici programı C diliyle yazılmış ve mikrodenetleyiciye aktarılmıştır.

PWM sürücü sinyali mikrodenetleyici kullanılarak elde edilmiş ve kontrol işareti 20KHz frekansla yenilenmiştir. Bulanık mantık denetleyici kullanılarak yapılan çıkış gerilimi ayarı istenen referans gerilim girişine göre sapma olmadan yapılmış ve istenen seviyeye ulaştıktan sonra dalgalanma olmamıştır.

REFERENCES/ KAYNAKLAR

1. Zadeh, L.A., "Fuzzy sets", *Information and Control*, 8(3):338-353 (1965).
2. Kosko, B., *Neural networks and fuzzy systems*, **Prentice Hall**: 1,120-135 (1992).
3. Hellendorn, H., Thomas, C., "Defuzzification in fuzzy controllers", *Intelligent and Fuzzy Systems*, 1:109-123 (1993).
4. Lee, C.C., "Fuzzy logic in control system: fuzzy logic controller, part 1 and part 2", *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, 20(2):404-435 (1990).
5. Mamdani, E.H., "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems", *IEEE Trans.on Comput.* C-26: 1182-1191 (1977).
6. Akcayol, M.A., Cetin, A., Elmas, C., "An educational tool for fuzzy logic controlled BDCM", *IEEE Trans. on Ed.*, 45(1):33-42 (2002).

6. CONCLUSIONS

In this work, the design and application of fuzzy logic controlled cathodic protection trafo-redresör unit was done. The membership functions and the rule table of the developed fuzzy logic controller were formed by trial and error method using the set resemblance programme. The fuzzy logic controller programme was written in C language and transferred into micro-controller.

PWM drive signal was obtained using the micro-controller and the control sign was renewed with a 20KHz frequency. The adjustment of output voltage by the fuzzy logic controller was done according to the demanded reference voltage input without any deviation and no corrugation was seen after reaching the demanded point.

7. Yalçın, H., Koç, T., *Katodik koruma, Palme Yayınları*, 1:100-125 (1999).
8. Koç, T., Yalçın, H., *Korozyon ve katodik koruma, Gazi Üniversitesi*, Ankara, 1:90-110 (1995).
9. Funahashi, M., and Young, W.T., "Development of new sacrificial anode reinforced and prestressed concrete structures", *Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology*, Las Vegas, 1:83-109 (1995).
10. Uhlig, H.H., *Corrosion and corrosion control, John Wiley and Sons*, 1:40-72 (1971).
11. Akcayol, M.A., "Bilgisayar kontrollü katodik koruma trafo-redresör ünitesi tasarımı ve uygulaması", *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16(3):493-502 (2003).
12. Işık, H., Akcayol, M.A., "SCADA tabanlı katodik koruma trafo-redresör terminali tasarımı ve uygulaması", *VIII.Uluslararası Korozyon Sempozyumu*, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 343-352 (2002).
13. Daily, S.F., "Using cathodic protection to control corrosion of reinforced concrete structures in marine environments", *Corpro Companies Inc.*, 83 Pine Mill Circle, Doylestown, Ohio, USA (1998).
14. Andrade, C., Alonso, C., and Sarria, J., "Influence of relative humidity and temperature on the on-site corrosion rebars", *Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Sydney, Australia, 1:105-115 (1997).
15. Motto, E.R., *Hybrid circuits simplify IGBT module gate drive, Powerex Inc.*, Youngwood, Pennsylvania, USA, 1:1-10 (1999).
16. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., *Power electronics converters, applications, and design, John Wiley*, 1:120-125 (1995).
17. Pollock, C., Williams, B.W., "Power converter circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches", *IEE Proc.*, 137(B-6): 373-384 (1990).

Received/ Geliş Tarihi:12.03.2003 Accepted/ Kabul Tarihi:13.11.2003