



## Neutrosophic Fuzzy Logic Controller Based Speed Control of PMSM fed by Bidirectional Battery Charger with Buck-Boost MPPT

Erdal SEHİRLİ<sup>1</sup>  Yücel ÇETİNCEVİZ<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 37150, Merkez/KASTAMONU

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 14.02.2022

Revision: 19.03.2022

Accepted: 9.04.2022

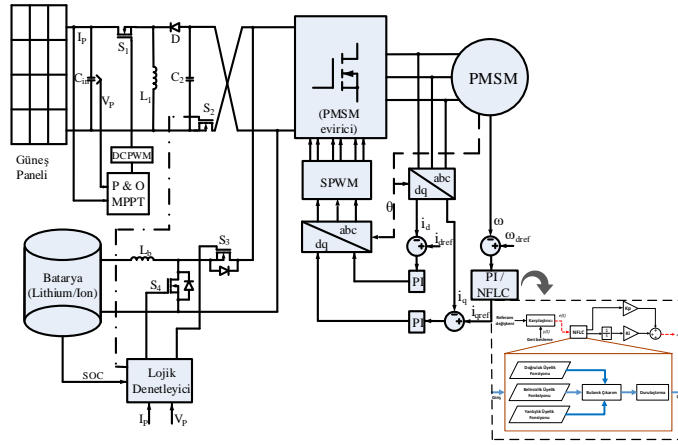
#### Highlights

- Satate Of Charge.
- Neutrosophic Fuzzy Logic Control.
- Bidirectional Battery Charger.
- FOC.

#### Keywords

Neutrosophy  
Permanent Magnet SM  
MPPT  
Battery charger

In this study, neutrosophic fuzzy logic controller based field oriented vector control of permanent magnet synchronous motor fed by photovoltaic panel and lithium battery through bidirectional battery charger is presented.



**Figure A.** Overall system block diagram with neutrosophic fuzzy logic speed controller

**Purpose:** The purpose of this study is to design neutrosophic fuzzy logic controller based on field oriented control in order to control the speed of PMSM fed by photovoltaic panel and lithium-ion batteries. While realizing the purpose, charge and discharge of the lithium-ion batteries are conducted by bidirectional battery charger.

**Theory and Methods:** In the presented system, neutrosophic fuzzy logic controller having fuzzy inference process for both error and change of error comparing to fuzzy logic, is added to traditional field-oriented speed control of PMSM in order to design neutrosophic fuzzy logic based speed controller. Furthermore, PMSM is fed by photovoltaic panel and lithium-ion battery. Also, photovoltaic energy is transferred by using buck boost converter based MPPT having perturb and observe algorithm. In addition, by using bidirectional converter controlled via logic controller operated with respect to state of charge of battery and solar irradiation, charge and discharge of lithium-ion battery is realized. Presented system is implemented by using simulation study. Moreover, neutrosophic based speed controller is compared by traditional PI speed controller to show the differences.

**Results:** By means of the simulation study as a result, neutrosophic fuzzy logic based speed controller of the PMSM has maximum 0.00785s settling time,  $\pm 0.18$ rad/s steady state error. In addition, PI based speed controller has maximum 0.072s settling time,  $\pm 0.34$ rad/s steady state error. Moreover, fast transition of the bidirectional battery charger is provided in order to charge or discharge the lithium-ion battery.

**Conclusion:** In this paper, neutrosophic fuzzy logic based field oriented speed control of PMSM is realized. Also, PMSM is fed by photovoltaic panel and lithium-ion battery. Photovoltaic panel has buck boost converter based MPPT using perturb and observe algorithm and lithium-ion battery has bidirectional battery charger. It is shown that seamless operation of the system is provided. Besides, it is concluded that neutrosophic speed controller designed in the study gives better characteristics than traditional PI controller. Also, fast transition between charge and discharge operation of the bidirectional battery charger is obtained.



## Neutrosophic Fuzzy Logic Controller Based Speed Control of PMSM fed by Bidirectional Battery Charger with Buck-Boost MPPT

Erdal SEHİRLİ<sup>1</sup> Yücel ÇETİNCEVİZ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 37150, Merkez/KASTAMONU

### Abstract

In this paper, neutrosophic fuzzy logic is employed for vector control-based speed control of permanent magnet synchronous machine fed by photovoltaic panel and lithium battery. Maximum power transfer from photovoltaic panel to synchronous machine and battery is achieved by maximum power point tracker based on buck-boost converter with perturb&observe control. Battery is charged and discharged by bidirectional battery charger. Proportional-integral controller is preferred for the control of voltage and current at charging duration and voltage at discharging duration. Operation of bidirectional battery charger is carried out by logic controller depends on state of charge of battery and irradiation level of photovoltaic energy. Thanks to the simulations, speed of permanent magnet synchronous motor under reference and load change, photovoltaic and battery power under irradiation level and ambient temperature change are measured and shown. As a result, overall system operates perfectly. It constitutes a good alternative for water pumping, electrical and naval applications.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 14.02.2022  
Düzeltilme: 19.03.2022  
Kabul: 9.04.2022

### Keywords

*Neutrosophy*  
*Permanent Magnet SM*  
*MPPT*  
*Battery charger*

### Anahtar Kelimeler

*Nötrosofi*  
*Kalıcı Mıknatıslı SM*  
*MPPT*  
*Batarya Şarj*

### Düşürücü-Yükseltici MPPT ve İki Yönlü Batarya Şarj Cihazı Kullanan Nötrosofik Bulanık Mantık Kontrol Tabanlı PMSM Hız Kontrolü

### Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik panel ve lithium batarya beslemeli vektör kontrol tabanlı sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolü için nötrosofik bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Fotovoltaik panelden sabit mıknatıslı senkron motor ve bataryaya maksimum güç aktarımı, değiştir&gözle kontrollü düşürücü-yükseltici dönüştürücü tabanlı maksimum güç noktası takip edici ile gerçekleştirilmiştir. Batarya, iki yönlü batarya şarj edici üzerinden şarj ve deşarj edilmiştir. Şarj esnasında akımın ve gerilimin, deşarj esnasında gerilimin kontrol için oransal-integral kontrol edici tercih edilmiştir. İki yönlü batarya şarj edicinin çalışması, bataryanın şarj durumu ve güneş enerjisi aydınlanma şiddetine bağlı olan lojik denetleyici üzerinden gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sayesinde, referans ve yük değişimi altında sabit mıknatıslı senkron motorun hızı, aydınlanma şiddeti ve ortam sıcaklığı değişimi altında fotovoltaik ve batarya gücü, ölçülmüş ve gösterilmiştir. Sonuç olarak, sistemin tamamı mükemmel şekilde çalışmaktadır. Su pompalama, elektrikli ve deniz araçları uygulamaları için iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı, karbon tabanlı kaynakların çevreye olumsuz etkileri ve azalmaları sebebiyle oldukça cazip hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi önemli yer tutar. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü nispeten rüzgâr enerjisine göre daha kolaydır. Bu dönüşüm, güneş panelleri kullanarak gerçekleştirilir ve dönüşüm sonucunda doğru akım (DA) enerjisi elde edilir. Ancak gerek güneş gerekse rüzgâr enerjisi doğrudan güneş ve rüzgâra bağlı oldukları için anlık olarak değişebilmektedirler. Günün her saati sürekli aynı seviyede bir enerji dönüşümü sağlanamaz ve bu durumdan bağlı olan yük olumsuz şekilde etkilenir. Bu nedenle, bir enerji depolama birimine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji depolama birimi genellikle bataryalar üzerinden gerçekleştirilir ve son yıllarda en yüksek verimi lityum tabanlı bataryaların sağladığı belirtilmektedir.

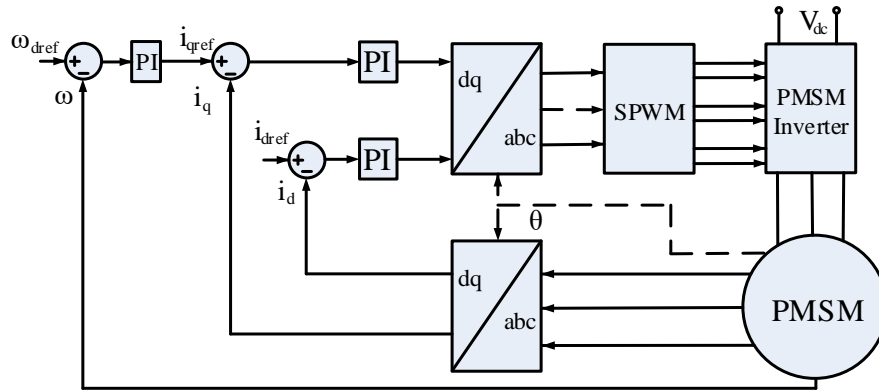
Bataryalar sayesinde, güneş enerjisi mevcut olduğunda batarya şarj edilir, aynı zamanda da batarya üzerinden yük beslenir. Güneş enerjisi yeteri kadar bulunmadığı durumlarda, batarya yükü beslemeye devam eder. Böyle bir çalışmanın sağlanabilmesi için bir güç elektroniği dönüştürücüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dönüştürücü iki yönlü güç akışını gerçekleştirebilecek yapıda olmalıdır. Güneş enerjisinin maksimum seviyede dönüştürülebilmesini sağlamak amacıyla bir maksimum güç takibi (MPPT) yöntemi herhangi bir DA dönüştürücü üzerinden gerçekleştirilir. DA dönüştürücüler, anahtarlanan yarı iletkenleri içeren, gerilimi düşüren veya yükselten elektronik devrelerdir [1]. Diğer yandan, elektrik enerjisi mekanik enerjiye elektrik motorları vasıtasıyla dönüştürülür. Şebekeden uzak, kırsal yerlerde ya da hava, deniz ve elektrikli araçlarda mekanik enerji sağlanabilmesi için motorlara ihtiyaç duyulur. Elektrikli motorların verimleri, benzinli ve dizel motorlardan yüksek olduğu için son yıllarda bu tip uygulamalarda daha çok tercih edilmektedirler. Ek olarak, düşük atalet momenti, yüksek moment-akım oranı ve yüksek güç yoğunluğu gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle kalıcı mıknatıslı senkron motor (Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)) elektrik motoru diğer motorlara göre daha çok tercih edilmektedirler.

Literatürde bu konu ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar; [2-4]'de PMSM'nin yapısı, çalışması ve denetimi detaylı olarak incelenmiştir. PMSM'nin güneş enerjili ve MPPT'li sistemde su pompalama amacıyla kullanılmasını içeren uygulama sensörlü olarak [5-8] de, sensörsüz olarak [9] de, soğutma ünitesi olarak kullanıldığı uygulama [10] da gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda MPPT dönüştürücüsü olarak yükseltici veya yarı-rezonans dönüştürücü, değiştir&gözle (perturb&observe(P&O)) veya artırılmış iletkenlik MPPT yöntemi ile kullanılmıştır. [11-13] de ise, güneş enerjili MPPT'li PMSM su pompalama sistemi ile şebeke bağlantısı olan uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Benzer sistemler şebeke bağlantısı olmaksızın, [14] de asenkron motor ile [15-16] de anahtarlamalı relüktans motorla ve [17] da fırçasız DC motor ile birlikte uygulanmıştır. MPPT dönüştürücüsü olarak, ZETA ve SEPIC dönüştürücülerinin de kullanıldığı benzer uygulamalar [18-19] de gerçekleştirilmiştir. [20-22] de güneş enerjisi ve MPPT yapılarının bulunmadığı, elektrikli araçlar için, lityum (Li)/ iyon (Ion) bataryaların ve [23] de hidrojen enerjinin de PMSM ile birlikte kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Batarya şarj edici yapıları genel olarak [24] de ve iki yönlü dönüştürücü kullanan batarya şarj edici uygulamaları şebeke etkileşimli olarak [25] de ve güneş enerjisi ile birlikte [26] de gerçekleştirilmiştir. [27] PMSM'nin oransal-integral-türevsel (Proportional Integral Derivative (PID)) bulanık mantık hız denetimini, [28] vektör kontrolünü gerçekleştirir. PMSM kayıcı kipli hız denetimi [29]' de yapılmıştır.

Bu çalışmada, güneş enerjisi ile beslenen PMSM motorunun hız kontrolü, nötrosofik bulanık denetim içeren vektör kontrol yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi, P&O algoritmasına sahip düşürücü-yükseltici MPPT ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Depolama birimi olarak da Li/Ion batarya sistemi kullanılmıştır. Batarya, sisteme iki yönlü güç batarya şarj cihazı üzerinden bağlanmıştır. İki yönlü batarya şarj cihazı, şarj durumunda hem akım hem de gerilim denetleyicilerinden, deşarj durumunda sadece gerilim denetleyicisinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, bir lojik denetleyici iki yönlü batarya şarj cihazının çalışma moduna karar verir. Bu lojik denetleyici bataryanın bataryanın şarj durumu (Satate Of Charge (SOC)) değerine ve aydınlanma şiddeti değerine göre karar verir. Uygulama Matlab/Simulink programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları yapılırken, PMSM referans hızı, yükü ve güneş panellerinin aydınlanma şiddeti, ortam sıcaklık değerleri değiştirilmiştir. Benzetimler üzerinden, PMSM hızı, güneş panelleri ve batarya üzerinden sisteme aktarılan enerji seviyeleri gösterilmiştir. Benzetimler ile bu çalışmada önerilen yapının mükemmel şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Önerilen yapı, kırsal alanlarda su pompalama sistemlerin de elektrikli hava, kara ve deniz taşıtlarında kullanılabileceği öngörülmektedir.

## 2. PMSM HIZ KONTROLÜ (PMSM SPEED CONTROL)

Son yıllarda, yüksek verim, düşük atalet momenti, yüksek moment-akım oranı ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları nedeniyle PMSM kullanımı cazip hale gelmiştir. PMSM'nin hız kontrolünde genellikle doğrudan moment kontrolü (DMC) ya da alan uyarlamalı kontrol (AUK) yöntemleri tercih edilmektedir. DMC yönteminde akı ve momentin tahmin edilmesi gerekliliğinden dolayı nispeten daha karmaşıktır. Bu nedenle, bu çalışmada AUK yöntemi tercih edilmiştir. AUK'ya ait prensip şeması Şekil 1 de verilmiştir [2-4, 28].



Şekil 1. PMSM'nin AUK kontrolü

Şekil 1'den de görüleceği gibi, AUK yönteminde, hız referansı motor hızı ile karşılaştırılır. Elde edilen hata sinyali ve oransal-integral (Proportional Integral (PI)) denetleyici kullanılarak referans q eksen akımı  $i_{qref}$  elde edilir. PMSM'nin çektiği üç fazlı akımlar, dq-abc dönüşümü üzerinden, dq eksenine dönüştürülür. Elde edilen q eksen akımı,  $i_{qref}$  ile karşılaştırılır. Diğer yandan, elde edilen d eksen akımı  $i_d$ , referans d eksen akımı ( $i_{dref}$ ) ile karşılaştırılır. Elde edilen sonuçlar PI denetleyiciler kullanılmak suretiyle, referans d-q büyüklükleri elde edilir ve abc eksenine dönüştürülür. Daha sonra, SPWM yöntemi kullanılarak, PMSM eviricisinde bulunan altı adet güç anahtarı için gerekli olan PWM sinyalleri elde edilir. Eksen dönüşümleri, abc-dq ve dq-abc için gerekli olan  $\theta$  açısı, PMSM hızının türevi ya da rotor pozisyonu üzerinden elde edilir. PMSM'nin rotor referans düzleminde dq eksen stator gerilim ve moment eşitlikleri akı bağı (1-3) ile ifade edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak, hız denetleme yapısı elde edilir [2-4, 28].

$$V_{qs}^r = \frac{R_s}{L_s} \lambda_{qs}^r + p \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (1)$$

$$V_{ds}^r = \frac{R_s}{L_s} (\lambda_{ds}^r - \lambda_{af}) + p \lambda_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r] \quad (3)$$

Burada, r indisi rotor referans düzlemini,  $V_{qs}^r$ ,  $V_{ds}^r$ ,  $i_{qs}^r$ ,  $i_{ds}^r$ ,  $\lambda_{qs}^r$ ,  $\lambda_{ds}^r$ ,  $\lambda_{af}$  sırasıyla stator gerilimlerini, stator akımlarını, stator akılarını ve rotor kalıcı mıknatıs akısını ifade eder.  $R_s$  stator sargısı direncini,  $L_s$  stator kaçak endüktansını,  $p$  çift kutup sayısını,  $\omega_r$  rotorun elektriksel açısal hızını ve  $T_e$  elektromanyetik momenti ifade eder.

### 3. NÖTROSOFİK BULANIK MANTIK KONTROL (NEUTROSOPHIC FUZZY LOGIC CONTROL)

Nötrosofi, insan zihnine daha yakındır, çünkü insan zihni gibi, çeşitli gözlemcilerden aldığı bilgilerin belirsizliğini veya dilsel yanlışlığını yakalar. Belirsizlik, eksik bilgi, edinme hataları veya rastgelelikten kaynaklanabilir. Bu bölümde bulanık mantığın işleyemeyeceği belirsizliği ve insan beynine daha yakın yorumları sunan nötrosodik mantık tanıtılmıştır. Aşağıda nötrosodik mantığın temelini oluşturan kümenin tanımı verilmiştir.

Tanım 3.1 [28]:  $X$ , bir evrensel küme olsun.  $x$ ,  $X$  de bir elemandır.  $A$ ,  $X$ 'in bir nötrosodik alt kümesidir.  $A = \{ \langle x, \tau_A(x), \beta_A(x), \varphi_A(x) \rangle : x \in X \}$ 'nin üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

- $\tau_A(x): X \rightarrow ]0^-, 1^+[$  (Doğruluk-üyelik fonksiyonu),
- $\beta_A(x): X \rightarrow ]0^-, 1^+[$  (Belirsizlik-üyelik fonksiyonu),
- $\varphi_A(x): X \rightarrow ]0^-, 1^+[$  (Yanlışlık-üyelik fonksiyonu),

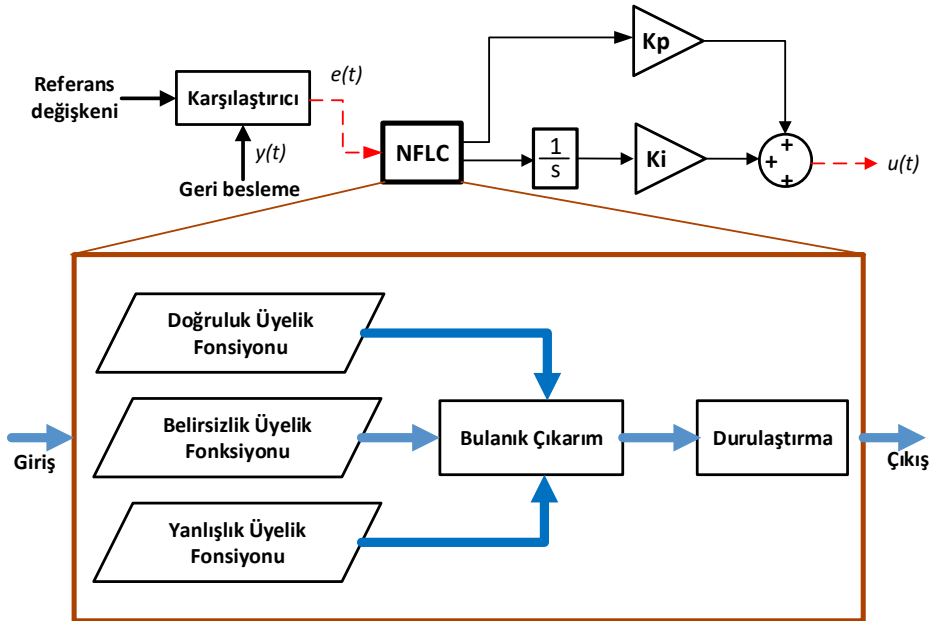
Üyelik fonksiyonlarının toplamında herhangi bir kısıtlama yoktur, bu yüzden

$$0^- \leq \sup \tau_A(x) + \sup \beta_A(x) + \sup \varphi_A(x) \leq 3^+$$

dir.

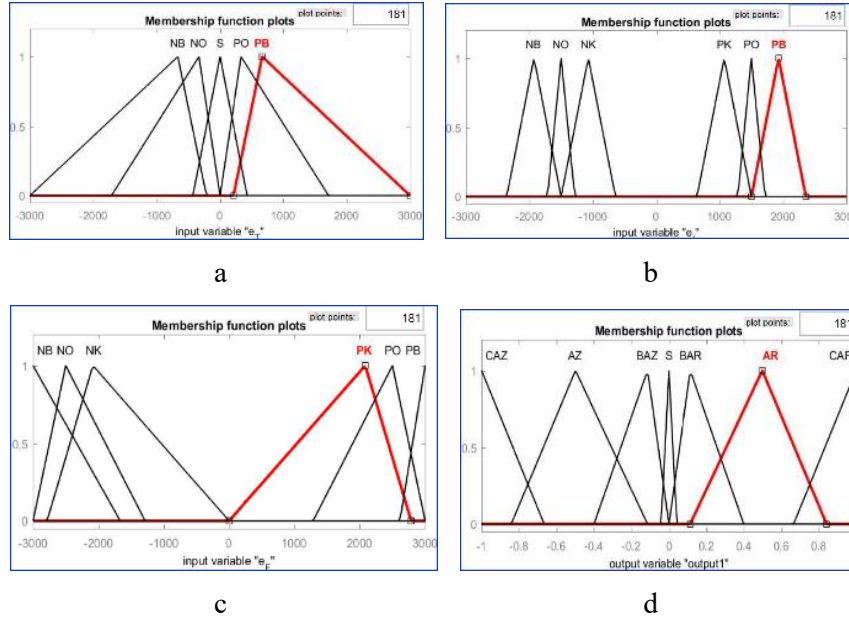
Nötrosofik sınıflandırıcı: sınıflandırma için nötrosofik mantık ilkelerini ve nötrosofik kümeleri kullanan bir sınıflandırıcıdır. Bu çalışmada nötrosofik sınıflandırıcı, Matlab kullanılarak tasarlanmıştır. Nötrosofik sınıflandırıcı, matematiksel olarak bulanık sınıflandırıcıya benzer bir sistemi modellemeye çalışmak yerine problemi çözmek için “if x ve y then z” gibi nötrosofik kural tabanlı bir yaklaşım içerir. Oluşturulan sonuçta doğruluk, yanlışlık ve belirsizlik oranının bulunduğu uygulamalar için nötrosofik mantık kullanarak kodlamanın gerekli olduğu kavramının anlaşılmasına göre düzenlenmiştir. Bulanık metodoloji kullanılarak nötrosofik sınıflandırma çıkarım sisteminin tasarımı Mamdani bulanık çıkarım yönteminin ilkelerine dayanmaktadır. Günümüzde mevcut durumda nötrosofi mantığını destekleyen herhangi bir yazılım mevcut değildir, bu nedenle önerilen çalışma Matlab'ın bulanık mantık araç kutusu üzerinde uygulanmıştır.

Kullanılan bulanık sınıflandırıcılar ile üyelik fonksiyonlarının doğası, kural sayısı ve üretilen sonuçlardaki belirsizlik gibi parametreler üzerinden karşılaştırılır. Nötrosofik sınıflandırıcı, bahsi geçen parametreleri bulanık eş değeri ile karşılaştırarak optimize eder. Şekil 2, Matlab'ın bulanık mantık araç kutusunu kullanan bir nötrosofik sınıflandırma sisteminin blok diyagram temsilini verir. NFLC yönteminde hata ve hatadaki değişim iki ayrı bulanık çıkarım biriminde ele alınmıştır. Önerilen yöntem, bulanık-PI kontrolü ve nötrosofik küme yaklaşımı ile değerlendirilerek oluşturulmuştur. İki ayrı bulanık çıkarım sisteminde (FIS) 'e' ve 'ce'yi değerlendirmek için nötrosofik üyeler kullanılarak daha ayrıntılı bir hata değerlendirmesi sağlanmıştır.



Şekil 2. NFLC nin blok diyagramı

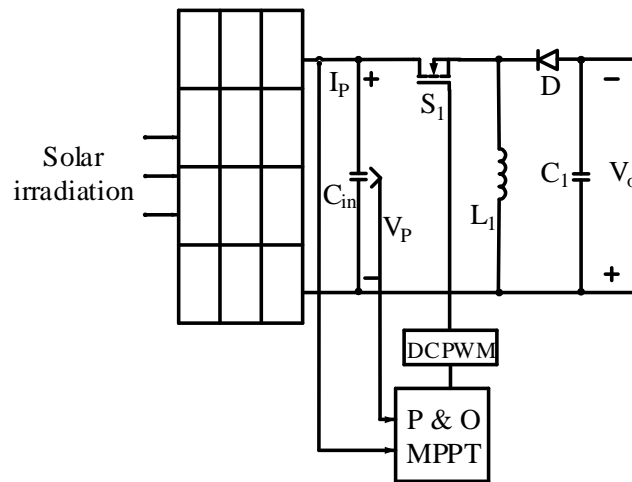
$\tau$ ,  $\beta$  ve  $\varphi$  nötrosofik bileşenlerinin değerleri birbirinden bağımsızdır. Böylece Matlab'ın bulanık mantık araç kutusu kullanılarak üç bulanık çıkarım sistemi (FIS) tasarlanmıştır: biri nötrosofik doğruluk bileşeni için, ikincisi nötrosofik belirsizlik bileşeni için ve üçüncüsü nötrosofik yanlışlık bileşeni içindir, Şekil 3 de gösterilmiştir. Bu bileşenlerin çalışması birbirinden bağımsız olmasına rağmen, girdi ve çıktının doğruluğunu, belirsizliğini ve yanlışlığını yakalamak için nötrosofik  $\tau$ ,  $\beta$  ve  $\varphi$  bileşenlerinin üyelik fonksiyonları arasında bir korelasyon elde edilir.



Şekil 3. NFLC de kullanılan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları: (a)  $\tau$  MF, (b)  $\beta$  MF, (c)  $\varphi$  MF, (d) çıkış MFs

#### 4. DÜŞÜRÜCÜ-YÜKSELTİCİ MPPT (BUCK-BOOST MPPT)

Güneş panellerinden maksimum gücün çekilebilmesi için, herhangi bir MPPT yönteminin kullanılması gereklidir. MPPT bir DA-DA dönüştürücü vasıtasıyla uygulanabilmektedir. Literatürde genellikle dönüştürücü olarak yükseltici tip dönüştürücü kullanılmaktadır [31]. Ancak, yükseltici dönüştürücü de çıkış gerilimi sadece giriş geriliminden yüksek olarak elde edilmektedir. Bununla birlikte, düşürücü-yükseltici dönüştürücü vasıtasıyla çıkış gerilimi giriş geriliminden daha düşük ya da daha yüksek olarak elde edilebilmektedir. Şekil 4 de güneş panellerine bağlanmış olan düşürücü-yükseltici dönüştürücü gösterilmektedir. Görüleceği gibi, bu dönüştürücü bir adet bobin ve kondansatör, güç anahtarı ve diyottan oluşmaktadır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüde bir dezavantaj olarak nitelendirilen durum, çıkış gerilimi polaritesinin giriş gerilimi polaritesine göre ters oluşudur [32].



Şekil 4. Düşürücü-yükseltici MPPT

Düşürücü-yükseltici dönüştürücünü pasif elemanları olan endüktans  $L$  ve filtre kapasitansı  $C$ 'nin değerleri (4-5) ile tespit edilir[29]. Burada  $R$  direnci,  $D$  görev döngüsünü (duty cycle),  $f_{sw}$  anahtarlama frekansını,  $V_o$  çıkış gerilimini,  $\Delta V_c$  kontrol gerilimindeki dalgalanmayı ifade eder.

$$L_1 = \frac{R(1-D)^2}{2f_{sw}} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{DV_o}{f_{sw}R\Delta V_c} \quad (5)$$

Şekil 4. de görüleceği gibi, düşürücü-yükseltici dönüştürücünün güç anahtarı  $S_1$  e uygulanacak PWM sinyali, P&O tabanlı MPPT üzerinden DCPWM tekniği kullanılarak elde edilmiştir. P&O yöntemini uygulamak için, güneş paneli akımı ( $I_p$ ) ve gerilimi ( $V_p$ ) nin ölçülmesi gereklidir. P&O yapısı ile DCPWM bloğuna uygulanacak olan kontrol gerilimi ( $V_c$ ) ayarlanmaktadır,  $V_c$ ' nin nasıl ayarlandığı ise (6-9) ile verilmiştir [11, 16, 19].

$$dP \ \& \ dV > 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi arttır} \ (6)$$

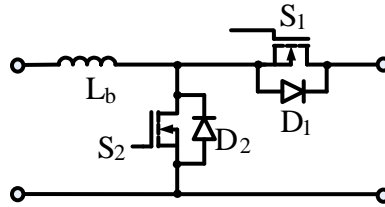
$$dP > \& \ dV < 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi azalt} \ (7)$$

$$dP < 0, \ dV < 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi azalt} \ (8)$$

$$dP < 0, \ dV > 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi arttır} \ (9)$$

## 5. İKİ YÖNLÜ BATARYA ŞARJ EDİCİ (TWO-WAY BATTERY CHARGER)

Güneş enerjisi ışınım şiddetine bağlı olarak değiştiği için, enerji güvenilirliği sağlanması ve PMSM'nin sürekli olarak enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla batarya gibi bir depolama elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılacak olan batarya elemanı, ışınım şiddeti yüksek olduğunda şarj, düşük olduğunda deşarjı sağlaması gerekmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için bir güç elektroniği dönüştürücüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dönüştürücü enerjiyi iki yönlü aktarabilme özelliğine sahip olmalıdır. Şekil 5'te bu çalışmada kullanılan iki yönlü batarya şarj edici yapısı gösterilmektedir [19, 24-26].

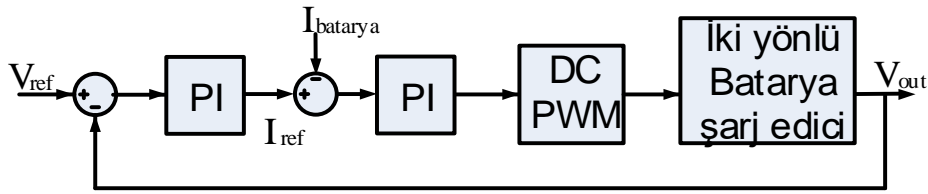


Şekil 5. İki yönlü batarya şarj edici

Şekil 5'ten görüleceği gibi, iki yönlü batarya şarj edici iki adet güç anahtarı ( $S_1$ ,  $S_2$ ) ve bunlara paralel iki adet diyot ( $D_1$ ,  $D_2$ ), bir adet bobinden ( $L_b$ ) oluşmaktadır. Bataryanın şarj edilebilmesi için, iki yönlü şarj edicinin düşürücü modunda çalıştırılması gereklidir. Bu mod için,  $S_1$  anahtarı iletimde iken,  $S_2$  anahtarı kesimde tutulur ve paralel bağlı  $D_2$  diyotu iletime geçer. Bataryanın deşarj edilip, PMSM'nin beslenmesi için, iki yönlü batarya şarj edici yükseltici modunda çalıştırılır. Bu modda,  $S_2$  anahtarı iletime geçirilip,  $S_1$  anahtarı kesimde tutulmaktadır ve  $S_1$  anahtarı yerine paralel bağlı  $D_1$  diyotu iletimde olmaktadır. İki yönlü şarj edicinin  $L_b$  bobini değeri (10) ile bulunur.

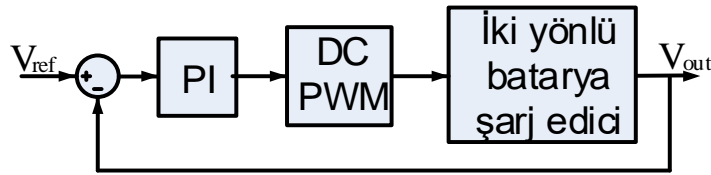
$$L_b = \frac{D(V_i - V_o)}{2\Delta I_{L_b} f_{sw}} \quad (10)$$

İki yönlü şarj edicinin denetimi, düşürücü ve yükseltici çalışma durumlarına göre farklı iki yapıda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 da, düşürücü durumu denetimi için blok diyagramı gösterilmiştir. Bu denetimde hem akım hem de gerilim kontrol döngüleri bulunmaktadır. Denetimde öncelikle referans gerilim ( $V_{ref}$ ) ile batarya gerilimi ( $V_{out}$ ) karşılaştırılır ve PI denetleyici üzerinden referans akım ( $I_{ref}$ ) elde edilir.  $I_{ref}$ , batarya akımı ( $I_{batarya}$ ) ile karşılaştırılır ve ikinci bir PI denetleyici kullanılarak DCPWM için kontrol gerilimi elde edilir. DCPWM bloğu ile PWM sinyali üretilerek, iki yönlü batarya şarj edicinin  $S_1$  anahtarına uygulanır.



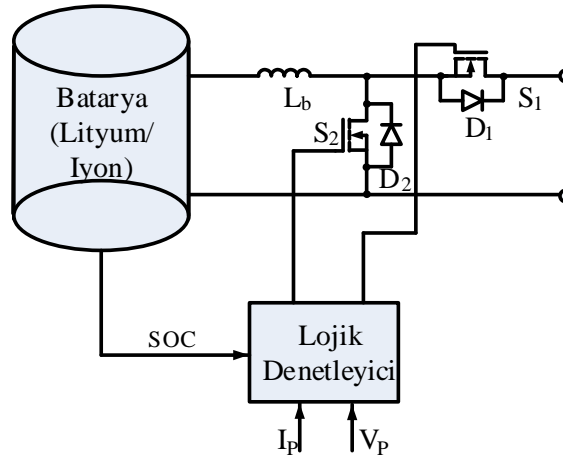
Şekil 6. İki yönlü batarya şarj edici düşürücü mod denetimi

Şekil 7 de, iki yönlü batarya şarj edicinin yükseltici çalışma durumu için gerekli olan denetim yapısı gösterilmektedir. Bu denetimde sadece gerilim kontrol döngüsü bulunmaktadır. Denetimde, referans gerilim ( $V_{ref}$ ) ile çıkış gerilimi ( $V_{out}$ ) karşılaştırılır ve PI denetleyici üzerinden kontrol gerilimi elde edilir, kontrol gerilimi DCPWM bloğuna uygulanarak, iki yönlü batarya şarj edicinin  $S_1$  anahtarına uygulanacak olan PWM sinyali üretilir [19, 24-26].



Şekil 7. İki yönlü batarya şarj edici yükseltici mod denetimi

Ayrıca, iki yönlü batarya şarj edicinin hangi modda çalışacağı, bataryanın, SOC değeri ve güneş panelinin aydınlanma şiddeti değerine göre, lojik denetleyici üzerinden belirlenmektedir. Şekil 8 de Li/Ion bataryanın sisteme bağlantısı gösterilmektedir.

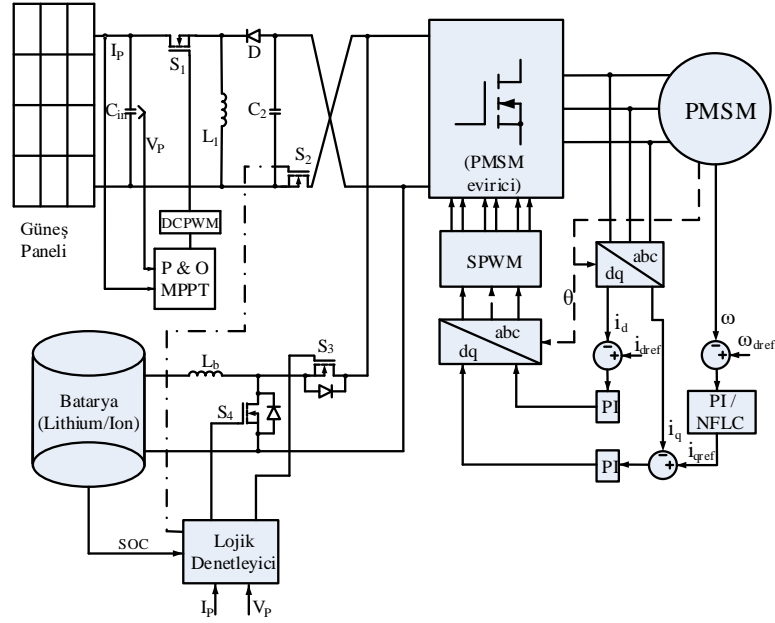


Şekil 8. Li/Ion bataryanın sisteme bağlantısı

## 6. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

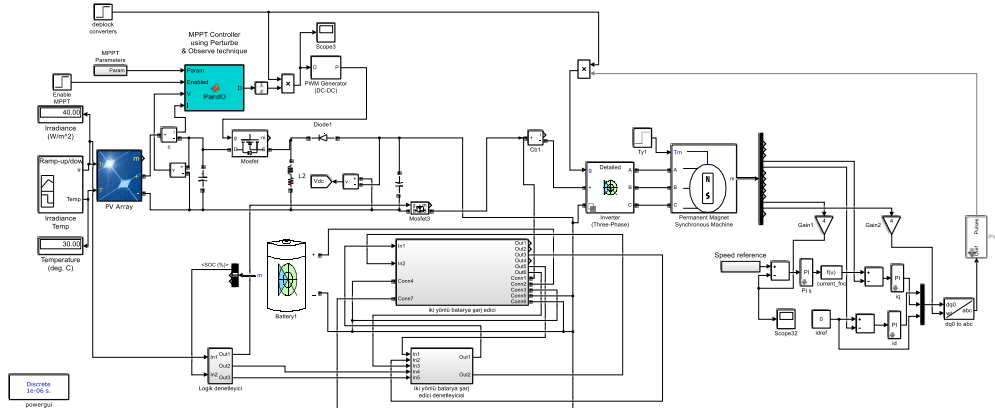
Bu çalışma Matlab/Simulink üzerinden benzetim olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 da benzetim blok diyagramı gösterilmektedir. Güneş paneli sisteme düşürücü-yükseltici MPPT üzerinden bağlanmıştır. Li/Ion batarya iki yönlü batarya şarj cihazı üzerinden, düşürücü-yükseltici dönüştürücü çıkışına ve PMSM eviricisine bağlanmıştır. Ek olarak, düşürücü-yükseltici dönüştürücü çıkışına  $S_2$  anahtarı yerleştirilerek, güneş enerjisi olmadığı durumlarda bataryanın enerjisinin, güneş paneli tarafından çekilme olasılığı engellenmiştir.  $S_2$  anahtarı da lojik denetleyici üzerinden denetlenmektedir. Lojik denetleyici, yeterli güneş enerjisi olduğunda ve bataryanın SOC değeri %80'in altında olduğunda, iki yönlü batarya şarj ediciyi şarj modunda çalışmasını sağlar. Benzer şekilde, yeterli güneş enerjisi olmadığı ve bataryanın SOC değeri %10 olana kadar, iki yönlü batarya şarj ediciyi deşarj modunda çalıştırır. İlaveten, PMSM hız denetimi için nütrosöfy bulanık denetleyici ve PI denetleyici tabanlı vektör denetim ayrı ayrı kullanılmış ve karşılaştırılmıştır.





Şekil 9. Benzetimin blok diyagramı

Benzetimin blok diyagramına ait simülasyon şeması Şekil 10 da verildiği gibidir.



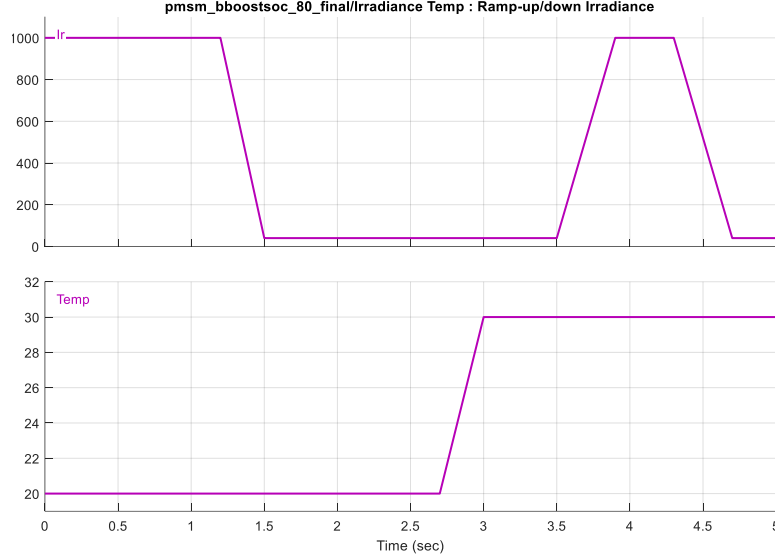
Şekil 10. Benzetim devresi

Benzetim çalışmalarında kullanılan elemanların değerleri Tablo 1 de verilmektedir.

Tablo 1. Benzetim çalışmalarında kullanılan eleman değerleri

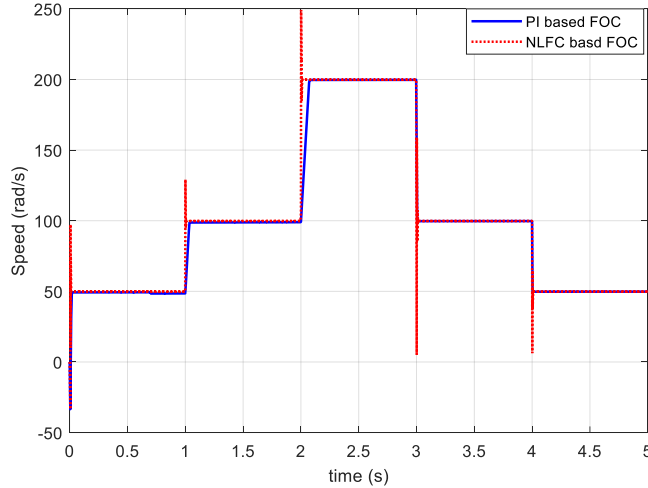
| Benzetimde Kullanılan Eleman Değerleri |               |         |          |                              |          |            |         |              |             |       |
|--|---------------|---------|----------|------------------------------|----------|------------|---------|--------------|-------------|-------|
| PMSM                                   |               | PV      |          | İki Yönlü Batarya Şarj Edici |          |            |         |              |             |       |
| PI Hız                                 |               | PI Akım |          | Güç                          | Gerilim  | L          |         | C            |             |       |
| $K_p$                                  | $K_I$         | $K_p$   | $K_I$    | 305.2W                       | 64.2V    | 5mH        |         | 1000 $\mu$ F |             |       |
| 5                                      | 1             | 6       | 1        | Seri                         | Paralel  | PI Deşarj. |         | PI Şarj.     |             |       |
| Sargı direnci ( $\Omega$ )             | Endüktans (H) |         | 1        | 40                           | $K_p$    | $K_p$      | Gerilim | Akım         |             |       |
| 0.0485                                 | 0.000395      |         | MPPT     |                              | 0.005    | 0.001      | $K_p$   | $K_p$        | $K_p$ $K_p$ |       |
| Akı (V.s)                              | Kutup Sayısı  |         | L        | C                            |          |            | 1.5     | 0.001        | 0.0065      | 0.001 |
| 0.1194                                 | 4             |         | 5mH      | 1000 $\mu$ F                 | $f_{sw}$ | 50kHz      |         |              |             |       |
| An. Frek.                              | 5kHz          |         | $f_{sw}$ | 120kHz                       |          |            |         |              |             |       |

Benzetimler aydınlanma şiddeti ve panelin ortam sıcaklığı değişimleri altında gerçekleştirilmiştir. Bu değişimler, Şekil 11'de gösterildiği gibidir.  $t=0-1.2s$  arasında, aydınlanma şiddeti  $100W/m^2$  dir,  $t=1.5-3.5s$  arasında ise  $40 w/m^2$  ye düşmüştür.  $t=3.9-4.3s$  arasında tekrar  $100W/m^2$  ve  $t=4.7-5s$  arasında da  $40 w/m^2$  dir. Benzer şekilde ortam sıcaklığı da  $t=0-2.6s$  arasında,  $20^{\circ}C$ ,  $t=3-5s$  arasında ise  $30^{\circ}C$  yükselmiştir.



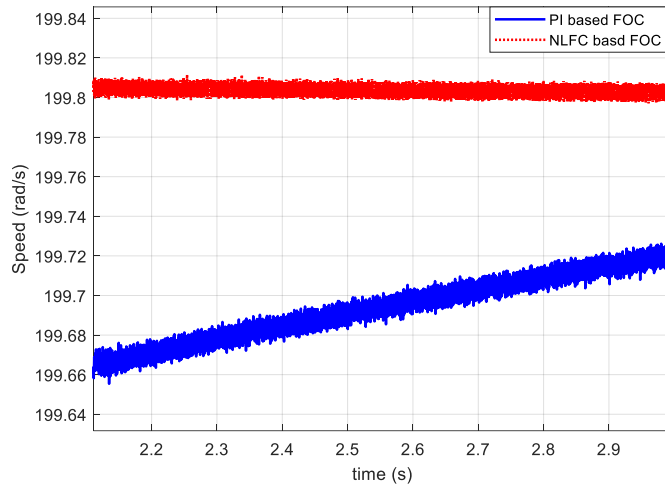
Şekil 11. Panel aydınlanma şiddeti ve ortam sıcaklığı değişimi

Li/Ion bataryanın farklı SOC değeri için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Burada, SOC değeri %80'ne yakın durum için yapılan benzetimlere yer verilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda, PMSM hızı, referans değişimleri altında Şekil 12 de ki gibi gösterilmektedir. Görüleceği gibi, hız  $t=0$  da  $50rad/sn$ ,  $t=1$  de  $100 rad/sn$ ,  $t=2$  de  $200rad/s$ ,  $t=3$  de  $100rad/sn$ ,  $t=4$  de  $50rad/sn$  şeklinde değiştirilmiş ve istenilen hız değeri denetleyici sayesinde sağlanabilmiştir. Ek olarak, motor momentini,  $t=0.75sn$  de,  $4.5Nm$  den  $9Nm$  ye arttırılmıştır. Ayrıca oturma zamanı maksimum  $0.072sn$  dir.



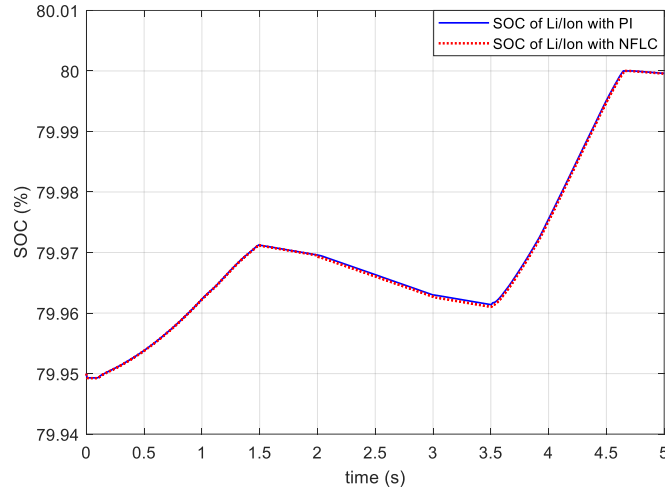
Şekil 12. PMSM Hızı

Şekil 13 de, hızın kararlı durum hatasını tespit edebilmek için, Şekil 12 nin yakınlaştırılmış hali gösterilmiştir. Kararlı durum hatası, görüleceği gibi  $200 rad/s$  hız için PI denetimde  $-0.34$  olarak, NLFC için  $-0.18$  olarak gerçekleşmiştir.



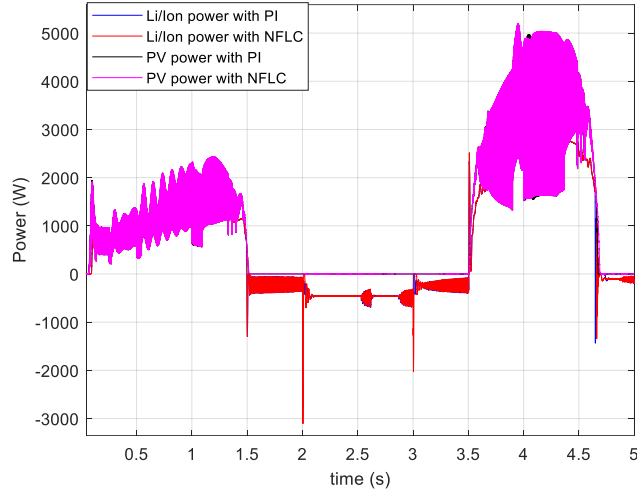
**Şekil 13.** PMSM Hızı kararlı durum hatası

Li/Ion bataryanın SOC değişimi Şekil 14 de gösterilmektedir. Yeterli güneş enerjisi olduğunda, batarya şarj olmaktadır ve SOC değeri 0-1.2s kadar artmıştır. Daha sonra, Şekil 11 de ki aydınlanma şiddetine göre, aydınlanma şiddeti azaldığı için, batarya deşarj olmaya başlamış ve 3.5sn kadar deşarj olmuştur. 3.5 s den itibaren, yeterli güneş enerjisi olduğu için, batarya şarj olmaya başlamıştır. SOC değeri, 4.5sn de, %80'ne ulaştığında, lojik kontrolör bataryanın şarj olmasını engellemiştir. Daha sonra, güneş enerjisi azaldığı için, batarya deşarj olmaya başlamış ve motora güç aktarmaya devam etmiştir.



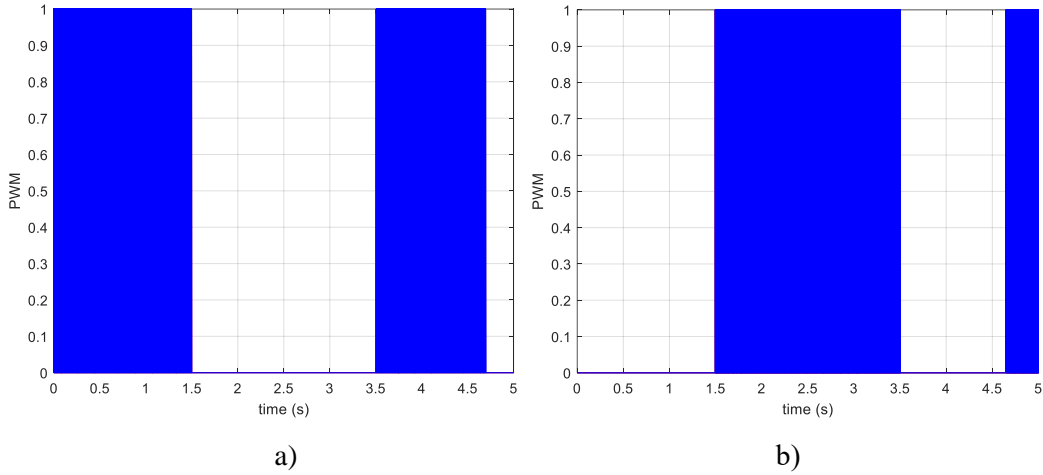
**Şekil 14.** Li/Ion batarya SOC değeri

Sisteme aktarılan güçler, Şekil 15. de gösterildiği gibidir. Görüleceği gibi, 1.5s ye kadar, Li/Ion batarya güneş enerjisi tarafından şarj olmaktadır, aynı zamanda PMSM de, güneş panelleri vasıtasıyla beslenmektedir. 1.5-3.5s arasında yeterli güneş enerjisi yoktur ve Li/Ion batarya deşarj olarak, PMSM'ye enerji sağlamaktadır. 2.5-4.7s arasında, sistem güneş enerjisi vasıtasıyla beslenmektedir ve batarya şarj olmaktadır. 4.7-5s arasında ise, tekrar Li/Ion batarya, PMSM yi çalıştırmaktadır.



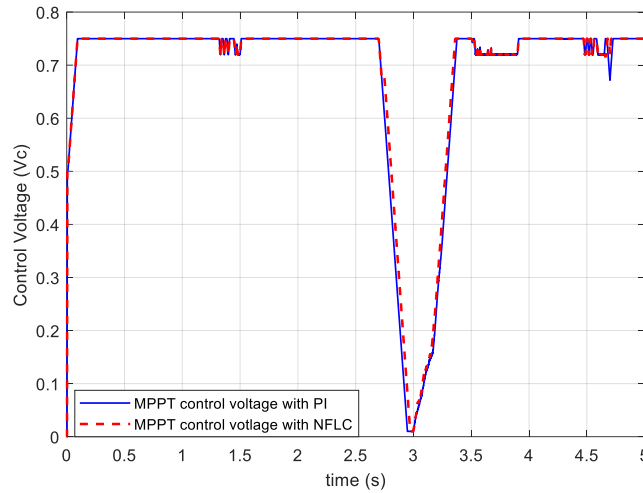
**Şekil 15.** Sisteme aktarılan güçler

İki yönlü batarya şarj edici anahtarlarının, anahtarlama sinyalleri Şekil 16 da gösterildiği gibidir.  $t=0-1.5s$  arasında, yeterli güneş enerjisi olduğu için, lojik denetleyici vasıtasıyla, iki yönlü batarya şarj edici, şarj modunda çalıştırılmıştır ve Li/Ion batarya şarj olmaktadır.  $t=1.5-3.5s$  arasında yeterli güneş enerjisi olmadığı için, lojik denetleyici, iki yönlü batarya şarj ediciyi, deşarj modunda çalıştırmıştır ve Li/Ion batarya deşarj olmuş ve PMSM ye enerji sağlamıştır. Benzer şekilde,  $t=3.5-4.3s$  arasında, şarj modu ve  $4.3-5s$  arasında ise deşarj modu çalışmaları gerçekleşmiştir.



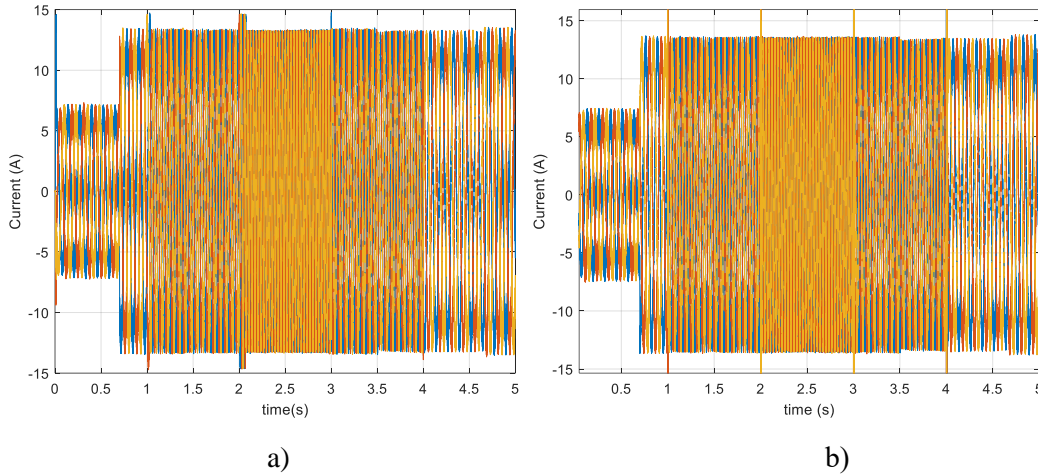
**Şekil 16.** a) Şarj ve b) Deşarj Modu PWM sinyalleri

P&O algoritması ile üretilen, MPPT kontrol sinyali Şekil 17 de gösterilmiştir. Görüleceği gibi, aydınlanma şiddeti değişimlerine karşılık, algoritma ile kontrol gerilimleri değiştirilmiştir. Ayrıca, düşürücü-yükseltici dönüştürücünün çıkış geriliminin aşırı yükselmesini önlemek amacıyla, maksimum kontrol gerilimi, 0.75V olarak ayarlanmıştır.



**Şekil 17.** P&O algoritması ile üretilen kontrol sinyali

Şekil 18 de, PMSM stator akımları PI tabanlı ve nütrosofi tabanlı denetimler üzerinden gösterilmektedir. Referans hız ve yük momenti değişimlerinde PMSM'nin çektiği akımların değiştiği de bu şekil ile görülmektedir.



**Şekil 18.** Stator akımları a) PI, b) NFLC FOC

## 7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, iki yönlü batarya şarj edici kullanan, P&O algoritmali düşürücü-yükseltici MPPT yapısı ile beslenen PMSM'nin AUK hız denetimi nütrosofi bulanık denetleyici üzerinden, değişken yük, değişken ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı altında, benzetim çalışması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Nütrosofi bulanık denetleyici ile klasik PI denetim karşılaştırılması da yapılmıştır. Ayrıca, iki yönlü batarya şarj edici çalışma modu, ışınım şiddeti ve Li/Ion bataryanın SOC değerine göre, şarj ya da deşarj olma üzere lojik denetleyici ile belirlenmektedir. Ek olarak, şarj modu hem gerilim hem de akım denetleyici döngüsüne, deşarj modu ise sadece gerilim denetleyici döngüsüne sahiptir. Düşürücü-yükseltici dönüştürücünün çıkışına eklenen anahtar da lojik denetleyici üzerinden denetlenmektedir. Bu anahtar ile güneş enerjisi olmadığı durumlarda batarya enerjisinin düşürücü-yükseltici dönüştürücüyü beslemesini engellemek amaçlanmıştır.

Yapılan benzetimler sonucu, sunulan sistem istenildiği gibi, gerekli ışınım şiddeti olduğunda, güneş panelleri üzerinden hem PMSM beslenmektedir hem de Li/Ion batarya şarj edilmektedir. Yeterli ışınım şiddeti olmadığında, PMSM Li/Ion batarya üzerinden beslenmektedir. Li/Ion bataryanın şarj ve deşarj

modları arasındaki geçiş süresi bir işlem süresi kadar kısadır ve PMSM hızı bu değişimlerden etkilenmemektedir.

PMSM hız denetimi nütrosofi bulanık mantık denetleyici ile kusursuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Nütrosofi denetleyici ile PMSM hızının istenilen hız değerine oturma süresi maksimum 0.00785s ve kararlı durum hatası  $\pm 0.18$  rad/s olarak elde edilmiştir, PI tabanlı hız denetleyicisi ile de 0.072s ve kararlı durum hatası ise  $\pm 0.34$  rad/s olarak elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TURAN, E., Bülent, D. A. Ğ., TAMYÜREK, B., & AYDEMİR, M. T. Design and Implementation of an Analog Controller Based on K-factor Design Method for a Novel Isolated Z-Source DC-DC Converter with High Voltage Gain. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2), 317-334.
- [2] Krishnan, R. (2017). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC press.
- [3] Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). *Design of brushless permanent-magnet machines* (p. 178). Venice, FL, USA: Motor Design Books.
- [4] Uygun, D., Çetinceviz, Y., (2018). Yüzey yerleştirmeli kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin tutma torkunun azaltılması için stator yapılandırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(3) 605-620.
- [5] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Implementation of PMSM drive for a solar water pumping system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4956-4964.
- [6] Antonello, R., Carraro, M., Costabeber, A., Tinazzi, F., & Zigliotto, M. (2016). Energy-efficient autonomous solar water-pumping system for permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 43-51.
- [7] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Reduced sensor-based PMSM driven autonomous solar water pumping system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(3), 1323-1331.
- [8] Prabhakaran, K. K., Karthikeyan, A., Varsha, S., Perumal, B. V., & Mishra, S. (2020). Standalone single stage PV-Fed reduced switch inverter based PMSM for water pumping application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(6), 6526-6535.
- [9] Murshid, S., & Singh, B. (2018, June). A pv array fed bess supported speed sensor-less pmsm driven water pumping system. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 63-68). IEEE.
- [10] Dubey, M., Sharma, S. K., & Saxena, R. (2018). Solar power based PMSM drive employed in refrigeration plants for isolated areas. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6299-6308.
- [11] Singh, B., & Murshid, S. (2018). A grid-interactive permanent-magnet synchronous motor-driven solar water-pumping system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 5549-5561.
- [12] Murshid, S., & Singh, B. (2019). A Multiobjective GI-Based Control for Effective Operation of PV Pumping System Under Abnormal Grid Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(11), 6880-6891.
- [13] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Utility grid interfaced solar wps using pmsm drive with improved power quality performance for operation under abnormal grid conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1052-1061.

- [14] Jain, S., Thopukara, A. K., Karampuri, R., & Somasekhar, V. T. (2014). A single-stage photovoltaic system for a dual-inverter-fed open-end winding induction motor drive for pumping applications. *IEEE Transactions on power Electronics*, 30(9), 4809-4818.
- [15] Singh, B., Mishra, A. K., & Kumar, R. (2016). Solar powered water pumping system employing switched reluctance motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5), 3949-3957.
- [16] Şehirli, E., Çetinceviz, Y., Current control of SRM fed by SEPIC MPPT based PV array. *European Conference on Renewable Energy Systems*, 7th ECRES, Spain, (2019).
- [17] Kumar, R., & Singh, B. (2017). Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(3), 1377-1385.
- [18] Kumar, R., & Singh, B. (2016). BLDC motor-driven solar PV array-fed water pumping system employing zeta converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2315-2322.
- [19] Şehirli, E., & Çetinceviz, Y. (2020, October). BLDC Speed Control by Bidirectional Battery Charger with SEPIC MPPT. In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Chiranjeevi, M., Kumar, D. A., & Kiranmayi, R. (2017, September). Mathematical analysis & modeling of Li-Ion battery with PMSM based plug-in electric vehicles. In *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)* (pp. 1445-1449). IEEE.
- [21] Oukkacha, I., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2017, April). Electric vehicles energy management using lithium-batteries and ultracapacitors. In *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1-8). IEEE.
- [22] Park, S. H., Lee, J., Lee, Y. I., & Ahmed, A. A. (2016, December). Development of electric vehicle powertrain: Experimental implementation and performance assessment. In *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 932-937). IEEE.
- [23] Gautam, A. K., Singh, S. P., Pandey, J. P., & Shukla, T. N. (2016, March). Performance investigation of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drive supplied from hybrid sources. In *2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES)* (pp. 292-302). IEEE.
- [24] Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
- [25] De Melo, H. N., Trovao, J. P. F., Pereirinha, P. G., Jorge, H. M., & Antunes, C. H. (2017). A controllable bidirectional battery charger for electric vehicles with vehicle-to-grid capability. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 114-123.
- [26] Verma, A., Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2020). An implementation of solar PV array based multifunctional EV charger. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), 4166-4178.
- [27] Choi, H. H., Yun, H. M., & Kim, Y. (2013). Implementation of evolutionary fuzzy PID speed controller for PM synchronous motor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(2), 540-547.
- [28] Erdogan, N. (2019). Elektrikli Sürme Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Döngüde Donanımsal Benzetimi ve Kalıcı miktatsız Bir Senkron Motor Sürücü Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4), 802-817.

- [29] Junejo, A. K., Xu, W., Mu, C., Ismail, M. M., & Liu, Y. (2020). Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 12110-12121.
- [30] Smarandache, F. (2003, September). Definiton of neutrosophic logic-a generalization of the intuitionistic fuzzy logic. In *EUSFLAT Conf.* (pp. 141-146).
- [31] Garip, İ. Güneş Hücresinin Verimini Artırmak İçin Çok Eksenli Takip Sisteminin Tasarımı Ve Uygulaması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(4), 749-759.
- [32] Kazimierczuk, M. K. (2015). *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons.