

Elektrikli Araçlarda Enerji Verimliliği Artırımı

Deniz KAPTAN, İbrahim ŞENER, Galip CANSEVER

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Yıldız Teknik Üniversitesi

denizkaptan1989@gmail.com, isener@yildiz.edu.tr, cansever@yildiz.edu.tr

Özet

Elektrikli araçları (EA) araştırma ve geliştirme konusu; çevreyi koruma ve ulaşımında enerji verimli araçların kullanımı için yıllardır devam etmektedir. Elektrik sisteminin, EA'nın çekiş sistemini direkt etkilemesi nedeniyle; hem mekanik hem de elektrik sistemleri ihtiva eden entegre modelleme gereklidir. Bu bildiride; Li-Ion batarya ve sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) seçilerek, EA'nın elektrik ve mekanik alt sistemlerini içeren bir Matlab modeli geliştirilmiştir. PI Kontrolörü ve Bulanık Mantık Kontrolörleriyle (BMK) sistem kontrol edilerek EA'nın batarya şarj durumu (BŞD) ve hız tepkisi gibi performans parametreleri, belirlenen benzetim çalışması senaryosuna göre karşılaştırılmış ve enerji verimliliği artırımı amaçlanmıştır.

Abstract

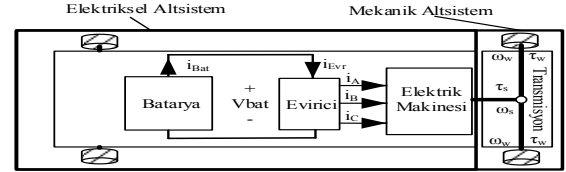
Research and development procees of electric vehicles (EVs) has continued for many years for protecting environment and for usage of energy efficient vehicles at the transportation. Since the electrical systems directly affect the traction of an EV, integrated modeling considering both the mechanical and electrical systems is necessary. In this announcement, a Matlab model of the EV containing the electrical and mechanical subsystem is developed by choosing Li-Ion battery and permanent magnet synchronous motor. Performance parameters such as SOC of the battery and the speed response of the EV are compared by controlling the system using PI and FLC controllers in accordance with the specified simulation scenerio and energy efficiency increase is aimed.

1. Giriş

Günümüzde de, EA'ların yaygın kullanımını sınırlayıcı faktörler; uzun şarj süresi ve araçların kısa menzile mesafeleridir [1]. Bu sınırlayıcı faktörler ve EA'ların karmaşık kontrol yapıları nedeniyle, verimliliği artırmak ve bu karmaşık yapıyla başa çıkmak için genellikle akıllı kontrol veya bulanık mantık kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [1].

2. Bir Elektrikli Aracın Mekanik ve Elektriksel Sistemlerinin Entegre Modeli

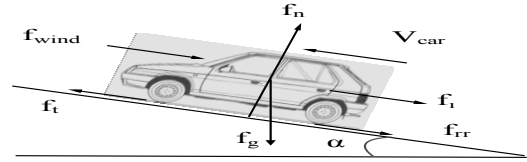
Bu bildiride, yapılan hesaplamalar ve benzetim çalışmalarının odak noktası olarak invertör-motor-transmisyonlu oluşan basitleştirilmiş yapı ele alınmıştır. Bu nedenle diğer elemanlar ihmal edilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi invertör girişi yalnızca batarya olarak düşünülmüştür. Normalde, EA'nın bataryası invertöre doğrudan bağlanamaz. Burada; doğrultucu, boost (yükseltgen) dönüştürücü gibi elemanlar ihmal edildiği için invertöre, batarya doğrudan bağlanarak sistemin enerji tüketiminin gözlemlenebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 1 Basitleştirilmiş EA modeli

2.1 Mekanik Altsistem

Araç elektrik motorunun üstesinden gelmesi gereken kuvvetler; yerçekimi, rüzgar, dönme direnci ve eylemsizlik etkisi kuvvetleridir (Şekil 2) [2].



Şekil 2 Kuvvet Modeli

Araçın çekiş kuvveti, aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$f_T = \frac{M_{car} \dot{V}_{car}}{f_i} + \frac{M_{car} g \sin(\alpha)}{f_g} + \text{sign}(V_{car}) \frac{M_{car} g \cos(\alpha) C_{rr}}{f_{rr}} + \text{sign}(V_{car} + V_{wind}) \frac{1}{2} \frac{\rho_{air} C_{drag} A_{front} (V_{car} + V_{wind})^2}{f_{wind}} \quad (1)$$

Kuvvet denkleminin parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1 Kuvvet Modeli Parametreleri

Sembol	Parametre	Birim
f_T	Araçın çekiş kuvveti	[N]
f_i	Araçın eylemsizlik kuvveti	[N]
f_{rr}	Araçın dönme direnci kuvveti	[N]
f_g	Araçın yerçekimi kuvveti	[N]
f_n	Araçın dikey (tepki) kuvveti	[N]
f_{wind}	Rüzgar direncine bağlı kuvvet	[N]
α	Sürüş açısı	[deg]
M_{car}	Araçın kütlesi	[kg]
V_{car}	Araçın hızı	[m/s]
$\dot{V}_{car}$	Araçın ivmesi	[m/s ²]
g	Yerçekimi ivmesi	[m/s ²]
ρ_{air}	20°C'de kuru hava yoğunluğu	[kg/m ³]

C_{rr}	Tekerlerlek dönme direnç katsayısı	[-]
C_{drag}	Aerodinamik sürtünme katsayısı	[-]
A_{front}	Aracın ön yüzey alanı	[m ²]
V_{wind}	Karşıdan esen rüzgar hızı	[m/s]

Araç aktarma milindeki ve tekerleklerdeki tork (Çizelge 2) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir [2].

$$\tau_T = f_T r_w \quad (2)$$

$$P_T = f_T V_{car} \quad (3)$$

$$\tau_w = \frac{\tau_T}{2} \quad (4)$$

$$w_w = \frac{V_{car}}{r_w} \quad (5)$$

Çizelge 2 Mekanik altsistem parametreleri

Sembol	Parametre	Birim
τ_T	Çekiş torku	[Nm]
τ_w	Tekerlek torku	[Nm]
r_w	Tekerlek yarıçapı	[m]
τ_s	Elektrik makinası milindeki tork	[Nm]
w_s	Elektrik makinası şaftının dönel hızı	[rad/s]
w_w	Tekerleklerin dönel hızı	[rad/s]
P_T	Çekiş kuvveti	[W]
P_s	Elektrik makinasının milindeki güç	[W]
G_{total}	Toplam dişli oranı (vites kutusu ve diferansiyel dahil)	[-]

Aynı şekilde, elektrik motoru milindeki tork veya diğer bir ifadeyle motora binen yük torku (τ_L), aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir:

$$\tau_s = \begin{cases} \eta_{\tau_s} \frac{\tau_T}{G_{total}}, & P_T < 0 \\ \frac{\tau_T}{\eta_{\tau_s} G_{total}}, & P_T > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$w_s = G_{total} w_w = G_{total} \frac{V_{car}}{r_w} \quad (7)$$

$\eta_{\tau_s} = \%100$ ve $P_T > 0$ olduğu varsayılırsa

$$\tau_s = \frac{\tau_T}{G_{total}} = \frac{f_T r_w}{G_{total}} = f_T \cdot \frac{r_w}{G_{total}} \quad (8)$$

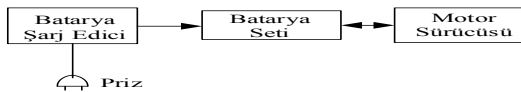
$$P_s = \tau_s w_s = \tau_s G_{total} \frac{V_{car}}{r_w} \quad (9)$$

Bu eşitlikler incelendiğinde, mekanik altsistem ve elektrik motoru birleşimi Eşitlik (10)'daki gibi basitçe ifade edilebilir.

$$\tau_L = f_T \cdot \frac{r_w}{G_{total}} \quad (10)$$

2.2 Elektriksel Altsistem

Elektrikli aracın elektriksel altsistemi genellikle enerji depolama sistemi ve motor sürücü sisteminden oluşmaktadır. Şekil 3 bir elektrikli aracın elektriksel altsisteminin genel bir konfigürasyonunu göstermektedir [3].



Şekil 3 Elektriksel altsistem

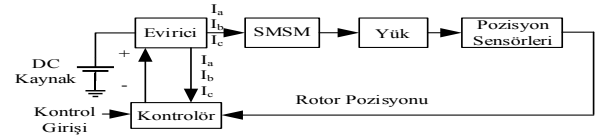
Sistem, Şekil 1'deki model baz alınarak düşünüldüğü için batarya, invertör ve elektrik motoru çeşitlerinden sistemin verimliliğine katkı sağlayıcı olanlar literatür incelendiğinde Li-ion batarya, gerilim kaynaklı invertör (GKİ) ve sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak belirlenmiştir.

3. SMSM Sürücü Sistemi

Motor sürücüsü; sabit mıknatıslı (SM) motor, invertör, kontrolör ve pozisyon sensörü olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin birbirleriyle bağlantısı Şekil 4'deki gibidir [4].

Literatür incelendiğinde SMSM kontrol algoritmalarından en etkin olanı, Vektör Kontrolü veya Alan Dayalı Kontrol (Field Oriented Control, FOC)'dür.

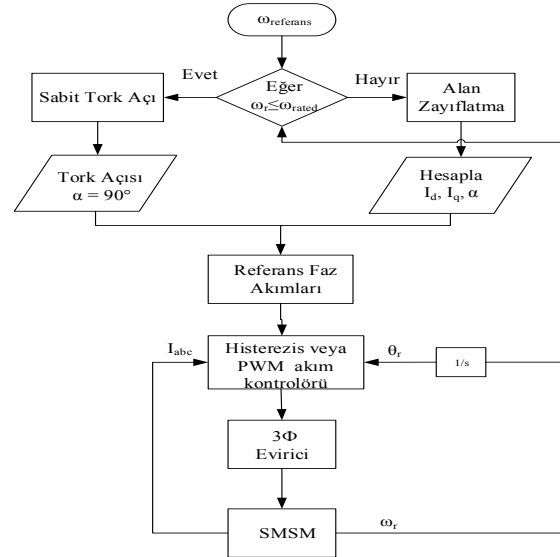
Vektör kontrolü, stator akımlarının bir vektörle ifade edilerek kontrol edilmesidir. Bu kontrol, üç fazlı zaman ve hız bağımlı bir sistemin, iki fazlı (d ve q eksenleri) zamandan bağımsız bir sisteme dönüşmesine dayalıdır (Park Dönüşümü). Bu dönüşüm, DC makinanın kontrolüne benzer bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 4 PMSM Sürücü Sistemi [4]

Alan dayalı kontrol edilen makine girişi olarak iki sabite ihtiyaç duymaktadır: tork bileşeni (q eksen yönünde) ve akı bileşeni (d eksen yönünde) [5].

Genel olarak SMSM'nin vektörel kontrolünde, iki kontrol yapısı birbirini tamamlamaktadır. Nominal hızın altında motorun, "Akım Başına Maksimum Tork, $i_d = 0$ Kontrol" yöntemiyle; bu hızın üzerine çıktığında ise "Akı Zayıflatma (Flux Weakening)" yöntemiyle kontrol edilmesi gerekmektedir. Şekil 5'deki akış diyagramında yukarıda bahsedilen durumların bir özeti verilmiştir.

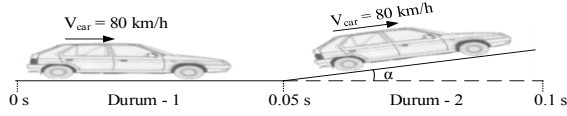


Şekil 5 PMSM Kontrol Akış Diyagramı [4]

Benzetim çalışmasında; rotor hızının nominal hızın altında olduğu varsayılarak yalnızca "Sabit ($\delta = 90^\circ$) Tork-Açı Kontrol yöntemi ($i_d = 0$ Kontrol Yöntemi)" kullanılarak motor torku; PI ve bulanık mantık kontrolörlerle kontrol edilmiştir.

4. Mekanik-Elektriksel Sistem Birleşiminin Benzetim Çalışması

EA'nın MATLAB'ta benzetim çalışmasını yapmak üzere oluşturulan senaryo şöyledir: Aracın hızı sabit ($V_{car} = 80 \text{ km/h}$) ve rüzgar hızı sıfır ($V_{wind} = 0 \text{ km/h}$) olup, araç düz bir yolda ($\alpha = 0^\circ$) 0.05s ve $\alpha = 15^\circ$ lik bir eğimli yolda 0.05s olmak üzere toplamda 0.1s hareket etmektedir (Şekil 6). Benzetim zamanı 0.1s seçilmiştir; çünkü daha büyük bir benzetim zamanı (örneğin 5s) için bilgisayarın sonuç vermesi çok uzun sürmektedir.



Şekil 6 EA'nın farklı hareket durumları

4.1 Mekanik Altsistem Parametreleri ve Benzetim Modeli

Mekanik altsisteme ait parametreler Çizelge 3'de özetlenmiştir.

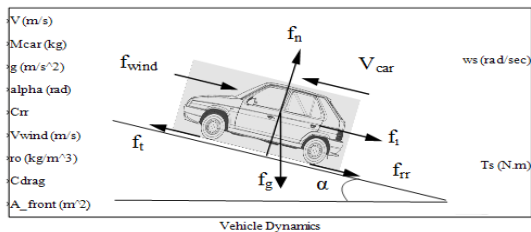
Çizelge 3 Mekanik parametreler [6]

Sembol	Parametre	Miktar ve Birim
M_{car}	Aracın kütlesi	1200 kg
A_{front}	Aracın ön yüzey alanı	2.5 m ²
r_w	Tekerlek yarıçapı	0.43 m
C_{drag}	Aerodinamik sürtünme katsayısı	0.25
ρ_{air}	20°C'de kuru hava yoğunluğu	1.204 kg/m ³
C_{rr}	Tekerlekler dönme direnç katsayısı	0.017
η_{ts}	Power transmission efficiency	100%
J_{total}	Toplam eylemsizlik	5.209 kg.m ²
G_{total}	Toplam dişli oranı (vites kutusu ve diferansiyel dahil)	8.75

İlk olarak, aracın hızını m/s olarak hesaplayalım:

$$V_{car} = 80 \text{ km/h} \left\{ \frac{80 \text{ km}}{h} \cdot \frac{h}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right\} \cong 20 \text{ m/s}$$

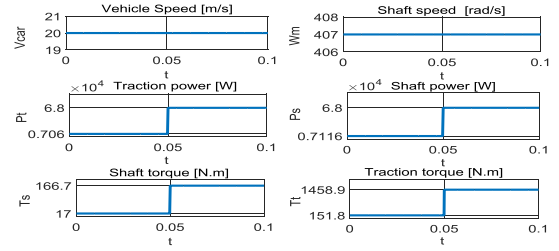
Sistemin benzetim modeli için Bölüm 2'deki (1), (2),..., (10) eşitlikleri kullanılmıştır. Bu eşitliklerden hareketle, dokuz girişli iki çıkışlı bir altsistem tasarlanmıştır (Şekil 7). Mekanik altsistemin w_s ve τ_s çıkışları, elektriksel altsistemde SMSM'nin iki referans girdisi olacaktır (Rotorun referans mekanik hızı w_{mref} ve yük torku T_L).



Şekil 7 Aracın Mekanik Kısımının Benzetim Modeli

Benzetim Çalışması Sonuçları:

Benzetim çalışması sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8 Mekanik Altsistem Benzetim Çalışması Sonuçları

Grafiklere göre, benzetim senaryosunda istenildiği üzere aracın hızı (V_{car}) her iki durum için 20m/s olduğunda; rotorun mekanik referans hızı (w_s veya w_{mref}) da her iki durumda sabit olup 407 rad/s olarak hesaplanır. Aracın çekiş torku (τ_T) ve çekiş gücü (P_T) ilk durumda 151.8 Nm ve 7060 W iken; araç rampadayken 1458.9 Nm ve 68 kW olur. Elektrik motoruna binen yük torku (motorun shaft torku, τ_s veya τ_L) ve motorun shaft gücü (P_s) araç düz yoldayken 17 Nm ve 7116 W iken, araç rampadayken 166.7 Nm ve 68 kW olur. Görüleceği üzere, aracın çekişi için 151.8 Nm ve 1458.9 Nm'lik tork değerleri gerekirken, bu tork değerleri aracın aktarma organı sayesinde elektrik motoruna 17 Nm ve 166.7 Nm'lik torklar olarak yansıtılır.

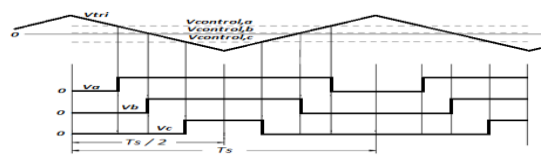
4.2 Elektriksel Altsistem Parametreleri ve Benzetim Modeli

Bu bölümde önemli olan nokta SMSM, GKİ ve bataryanın mekanik yükü çekebilmeleri için büyüklüklerinin belirlenmesidir. Bir önceki bölümde çekiş kuvvetinin maksimum değeri 68 kW olarak bulunmuştu. Bu değerden yola çıkılarak 100 kW'lık bir motor seçilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4 100 kW'lık bir PMSM'nin parametreleri [6]

Sembol	Parametre	Miktar ve Birim
L_d	d-ekseni indüktansı	0.17 mH
L_q	q-ekseni indüktansı	0.29 mH
λ_{PM} or λ_f	Akı	0.071 Wb
R_s	Stator-sarım direnci	0.0083 Ohm
P	Kutup sayısı	8 [-]
J_m	Eylemsizlik momenti katsayısı	0.089 kg.m ²
B_m	Viskoz sürtünme katsayısı	0.005 $\cong 0 \text{ Nm/rad/s}$

Motorun çalışması için gerekli olan v_a , v_b ve v_c sinüs gerilimleri, Şekil 9'da gösterildiği üzere V_{tri} sinyalinin $v_{control}$ sinyalleriyle karşılaştırılıp invertör anahtarlama sinyallerinin oluşturulmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 9 İnvörtör anahtarlama

$v_{control}$ kontrol gerilimleri; $\hat{V}_{tri}$ (sabit anahtarlama frekanslı üçgen sinyalinin büyüklüğü) sinyaliyle orantılı şekilde, faz gerilimlerinden aşağıdaki şekilde ifade edilir [7]:

$$\begin{aligned}\frac{v_{control,a}}{\hat{V}_{tri}} &= \frac{v_a - v_k}{V_{dc}/2} \\ \frac{v_{control,b}}{\hat{V}_{tri}} &= \frac{v_b - v_k}{V_{dc}/2} \\ \frac{v_{control,c}}{\hat{V}_{tri}} &= \frac{v_c - v_k}{V_{dc}/2}\end{aligned}\quad (11)$$

burada

$$v_k = \frac{\max(v_a, v_b, v_c) + \min(v_a, v_b, v_c)}{2} \text{ dir.}$$

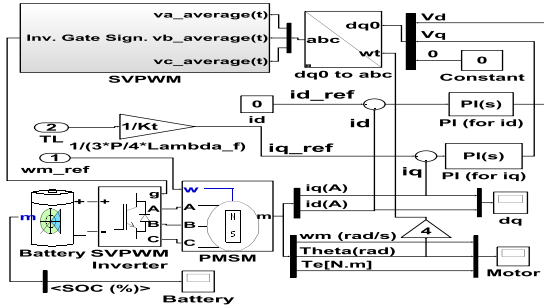
Benzetim modeli için eşitlik (11)'den faydalanılmıştır. Benzetim çalışmasında invertörün giriş gerilimi $V_{dc} = 600$ V ve üçgen sinyalinin büyüklüğü $\hat{V}_{tri} = 5$ olarak seçilmiştir. Buna göre bataryanın büyüklüğü de 600 V olur. Ayrıca batarya BŞD değeri ilk durumda % 80 olarak varsayılmıştır.

5. Elektrikli Araç Sistemleri için Önerilen Kontrolör Yapıları ve Bu Çalışmadaki Örnek Sistemin Benzetim Çalışması

Yapılan benzetim çalışmalarında, SMSM'li bir EA sisteminin motor hızı yerine torku kontrol edildiğinde daha iyi sonuçlar elde edildiği görüldüğü bu çalışmada yalnızca tork kontrolü ele alınmış ve iki değişik tork kontrolörü tasarlanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kontrolör tasarımı ve sistemin benzetim çalışması; MATLAB Simpowersystem ve Powerlib kütüphanelerindeki batarya, motor, invertör blokları kullanılarak yapılmıştır.

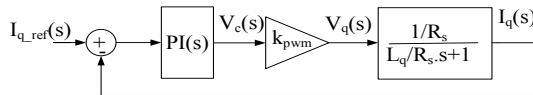
5.1 PI Tork Kontrolörü

$i_d = 0$ Kontrol Yöntemi'ne göre, PI tork kontrolörlü elektriksel alt sistemin benzetim modeli Şekil 10'daki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 10 PI Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsistem Benzetim Modeli

Bu modeldeki PI kontrolör K_p ve K_i sabitlerini hesaplamak üzere Şekil 11'deki kapalı döngü kontrolör yapısı oluşturulmuştur. Şekil 11'deki kontrolör yapısı q döngüsü akımına yöneliktir; ancak L_q değeri L_d ile değiştirilince d döngüsü K_p ve K_i değerleri de aynı şekilde hesaplanabilir.



Şekil 11 Kapalı döngü kontrolör yapısı

Bu döngünün açık döngü transfer fonksiyonu:

$$G_{I,OL}(s) = \left[k_{PI} + \frac{k_{il}}{s} \right] \frac{k_{PWM}}{inv.} \frac{1/R_s}{1 + \tau_e s} \quad (12)$$

şeklindedir. Burada

$$k_{PWM} = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} \text{ ve } \tau_e \text{ is } \frac{L_q}{R_s} \text{ 'dir.}$$

Frekans bölgesi kontrol yönteminde PI sabitleri aşağıdaki iki kriter kullanılarak bulunur.

$$|G_{I,OL}(s)|_{s=j\omega_{ci}} = 1 \quad \omega_{ci}: \text{köşe frekansı} \quad (13)$$

$$\angle G_{I,OL}(s)|_{s=j\omega_{ci}} = -180^\circ + \phi_{pm} \quad (\phi_{pm}: \text{faz marjı}) \quad (14)$$

Bu iki kriter eşitlik (12)'ye uygulanınca q döngüsü sabitleri

$$k_{PI} = \frac{k_{il}}{\omega_{ci}} \tan \left(-180^\circ + \phi_{pm} + \tan^{-1} \left(\frac{R_s}{-L_q \omega_{ci}} \right) \right) \quad (15)$$

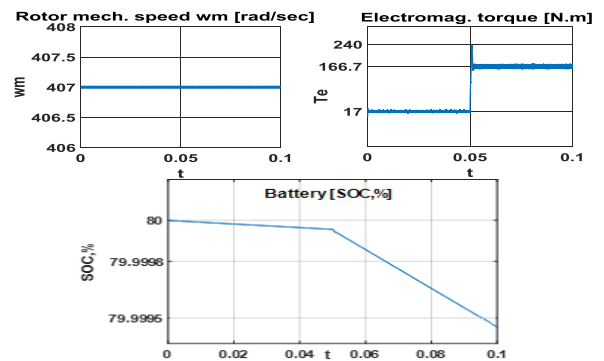
$$k_{il} = \omega_{ci} \frac{\sqrt{L_q^2 \omega_{ci}^2 + R_s^2}}{1 + \left(\tan \left(-180^\circ + \phi_{pm} + \tan^{-1} \left(\frac{R_s}{-L_q \omega_{ci}} \right) \right) \right)^2} \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Bahsedildiği üzere bu iki eşitlikteki L_q değeri L_d ile değiştirildiğinde d döngüsü sabitleri de aynı şekilde hesaplanır. Bu hesaplamalar için oluşturulan Matlab m-dosyasının bir bölümü Çizelge 5 verilmiştir.

Çizelge 5 Matlab m-dosyası

```
% PMSM Parameters
Rs=0.0083; Lq=0.00029; Ld=0.00017; Jeq=0.089;
P=8;
Lambda_f=0.071; B=0;
ke=Lambda_f/(sqrt(2)) % Motor Voltage Constant
kt=3/2*P/2*Lambda_f % Motor Torque Constant
% PI in iq current
Wci=10000 %crossover freq. of iq loop in rad/s
(It is 1/10 of inverter loop)
PMi=60 %phase margin
kii=Wci*sqrt((Rs)^2+(Lq*Wci)^2)/sqrt((tan(-pi+PMi+atan(-Rs/(Lq*Wci))))^2+1)
kpi=(kii/Wci)*tan(-pi+PMi+atan(-Rs/(Wci*Lq)))
```

Benzetim çalışması kesikli (discrete) zamanda $T_s = 5 \times 10^{-6}$ sn'lik örnekleme zamanıyla gerçekleştirilince Şekil 12'deki sonuçlar elde edilmiştir.

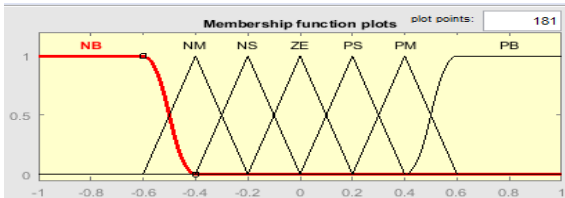


Şekil 12 PI Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsistemin Benzetim Çalışması Sonuçları

Benzetim çalışması sonucuna göre, rotor mekanik hızı, referans değer 407 rad/s'yi herhangi bir sapma veya dalgalanma olmadan takip etmektedir. Elektromanyetik tork değerinde ise geçiş anında büyük bir sapma meydana gelmektedir. Batarya SOC değeri ise % 79.9995'in altına düşmektedir.

5.2 Mamdani Tipinde Bulanık Mantık Tork Kontrolörü

Bu kontrol yönteminde, giriş değişkenleri; tork hatası (e) ve tork hatasındaki değişim (ce)'in değer evreni [-1 1] Nm aralığı olarak belirlenmiştir. Çıkış değişkeni i_{qref} 'nin değer evreni ise [-1, 1] Amper aralığıdır. Her değer evreni, yedi tane üyelik fonksiyonuna bölünmüş ve 49 tane kural oluşturulmuştur: Negative Big (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Medium (PM) ve Positive Big (PL) [8] (Şekil 13 ve Çizelge 6).

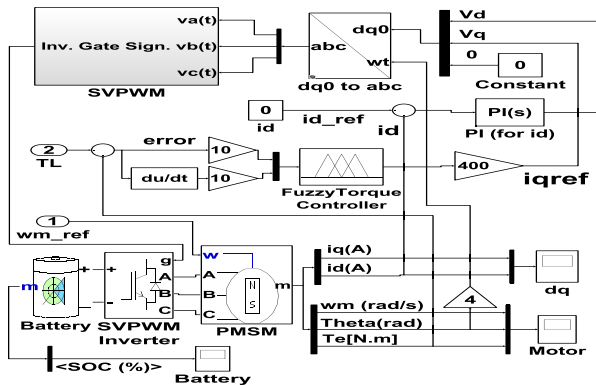


Şekil 13 Bulanık Giriş ve Çıkış Değişkenleri için Üyelik Fonksiyonları

Çizelge 6 Kural Tablosu

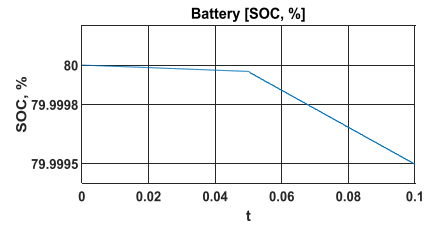
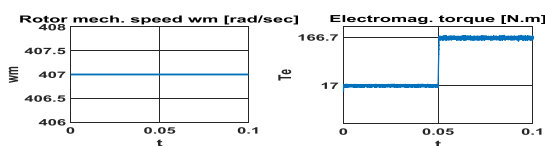
E CE	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL

Ardından bulanık tork kontrolörlü elektriksel altsistem Şekil 14'deki gibi tasarlanmıştır.



**Şekil 14 Bulanık Mantık Tork Kontrolörlü Elektriksel
Altsistem Benzetim Modeli**

Benzetim çalışması kesikli (discrete) zamanda $T_s = 5 \times 10^{-6}$ sn'lik örnekleme zamanıyla gerçekleştirilince Şekil 15'deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 15 Bulanık Mantık Tork Kontrolörlü Elektriksel Altsis-
teminin Benzetim Çalışması Sonuçları

PI tork kontrolör çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da rotor mekanik hızındaki dalgalanma miktarı sıfır olarak elde edilmiştir. Elektromanyetik tork grafiğinde ise önceki çalışmada 0.05. sn’de meydana gelen büyük sapma ortadan kalkmış ve istenilen 17 Nm ve 166.7 Nm referans değerleri daha etkin bir biçimde takip edilmektedir. Bu kontrol yönteminin diğer önemli sonucu ise batarya şarj durumunda elde edilmiştir. PI kontrol yönteminde BSD değeri % 79.9995’ in altına düşmekteyken, bu kontrol yönteminde % 79.9995 değerini göstermekte ve bu da daha az enerji harcandığı anlamına gelmektedir.

6. Sonuçlar

Yapılan benzetim çalışmalarına göre, en iyi performans sonuçları bulanık mantık tork kontrol yapısında elde edilmiştir. Literatürde birçok kaynaktan bulunan 49 kurallı bulanık mantık kontrol yapısı, tork kontrolör döngüsü içerisinde kullanıldığında, SMSM tarafından üretilen elektromanyetik tork eğrisindeki büyük salınım değeri elimine edilmiş ve referans değer daha iyi bir biçimde takip edilmiştir. Ayrıca BŞD değerindeki azalmanın diğer kontrolör yapısına göre daha az olması sağlanmıştır.

7. Kaynaklar

- [1] Huang Q., Li J., and Chen Y., “Control of Electric Vehicle”, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, (2010), 163-192;
- [2] Schaltz E., Edited by: Soylu, S, *Electrical Vehicle Design and Modeling*, Intech, Aalborg University Denmark, Rijeka, CROATIA, (2011).
- [3] Mantravadi S. R. P., *Modeling, Simulation & Implementation of Li-Ion Battery Powered Electric and Plug-In Hybrid Vehicles*, August 2011, a Master Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, Ohio, (2011).
- [4] Shahat A.E., Shewy H.E., “Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System for Mechatronics Applications”, IJRRAS, (2010).
- [5] Prasad E., Suresh B., Raghuveer K. “Field Oriented Control of PMSM Using SVPWM Technique”, *Global Journal of Advanced Engineering Technologies*, Vol1, Issue2, (2012), 39-45.
- [6] Gwangmin P., Seonghun L., Sungho Jin, Sangshin Kwak “Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains”, *Expert Systems with Applications*, (2014), 41:2595–2607.
- [7] Mohan N., *Advanced Electric Drives Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*, Wiley, New Jersey, (2014).
- [8] Chakraborty M., “Comparative Analysis of Speed Control of PMSM using PI-Controller and Fuzzy Controller”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 7, 103-108, (2013).