T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA SİSTEMLERİNDE YALITIM TESPİT SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

SEYHAN KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA SİSTEMLERİNDE YALITIM TESPİT SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

SEYHAN KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2022

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF INSULATION DETECTION SYSTEM IN ELECTRIC VEHICLE SYSTEMS

SEYHAN KAYA

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE

2022

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/06/2022 tarih ve 2022/28 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10/06/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Seyhan Kaya'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

ÜYE : PROF. DR. HAKAN HOCAOĞLU

ÜYE : PROF. DR. SERKAN AKSOY

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
…..…/…..…/..…… tarih ve ……/……... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Elektrikli araçlarda güvenlik, hem araç içi devre ve komponentler hem de kullanıcı için büyük önem arz etmektedir. Güvenlik için yapılması gereken en önemli unsur yüksek gerilime sahip birbirine seri bağlı pil paketlerinden oluşan batarya sisteminin izolasyonunu sağlamak ve anlık olarak tespit etmektir. Bu çalışmada da elektrikli araç batarya sistemlerinde gerekli olan yalıtım tespit sistemi için bütün yöntemler incelenmiş ve uygun görülen yöntem geliştirilerek yeni bir devre tasarlanmıştır. Yalıtım tespit için dengeli köprü yöntemi, dengesiz köprü yöntemi, AC sinyal kaynağı enjeksiyon yöntemi ve düşük frekanslı sinyal enjeksiyon yöntemleri vardır. Bu yöntemlerin her biri için avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak dengesiz köprü yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin gerçekleştirilmesi kolay ve maliyeti düşüktür. İzolasyon dirençlerini tespit etmek için dengesiz köprü yöntemi referans devresi geliştirilerek devre tasarımı yapılmıştır. Bu devre ile alınan sonuçları filtrelemek ve böylece gürültüyü azaltmak için kalman filtresi de tasarlanarak devreye eklenmiştir. Dengesiz köprü yöntemi ile elde edilen devre LTspice simülasyon programında çizilmiş ve devrenin doğru çalışıp çalışmadığı tespit edilmiştir. Alınan sonuçlar dâhilinde devrenin gerekli beklentiyi karşıladığı görülmüştür. Tasarlanan yalıtım tespit sisteminde, dengesiz köprü yöntemi kullanılarak hazırlanan devreden alınan sonuçlar, filtreden geçirilerek analog-dijital dönüştürücü(ADC) yardımıyla mikroişlemciye iletilmektedir. Mikroişlemci ile gerekli hesaplamalar yapılıp izolasyon dirençleri tespit edilmektedir. Yapılan bu devre tasarımı aşamaları, simülasyonlar ve sonuçlar bu çalışmada yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, Batarya Sistemleri, Yalıtım Direnci, Kalman Filtresi, ADC, AC.

SUMMARY

Safety in electric vehicles is of great importance for both in-vehicle circuits and components and for the user. The most important thing to do for safety is to ensure the isolation of the battery system, which consists of series-connected battery packs with high voltage. In this study, all the methods for the insulation detection system required in electric vehicle battery systems have been examined and a new circuit has been designed by developing the method deemed appropriate. There are balanced bridge method, unbalanced bridge method, AC signal source injection method and low frequency signal injection method for insulation detection. There are advantages and disadvantages to each of these methods. Considering these advantages and disadvantages, the unbalanced bridge method was preferred. This method is easy to perform and low cost. In order to detect the insulation resistances, the unbalanced bridge method reference circuit has been developed and the circuit design has been made. In order to filter the results obtained with this circuit and thus reduce the noise, a kalman filter was also designed and added to the circuit. The circuit obtained by the unbalanced bridge method was drawn in the LTspice simulation program and it was determined whether the circuit works correctly. Within the results obtained, it was seen that the circuit met the required expectation. In the designed insulation detection system, the results obtained from the circuit prepared using the unbalanced bridge method are passed through the filter and transmitted to the microprocessor with the help of analog-digital converter (ADC). The necessary calculations are made with the microprocessor and the insulation resistances are determined. These circuit design stages, simulations and results are included in this study.

Keywords: Electric Vehicle, Battery Systems, Insulation Resistance, Kalman Filter, ADC, AC.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Abdulkadir Balıkçı'ya ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Yusuf Kaya'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	3
2.1. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerine Giriş	4
2.1.1. Elektrikli Araç Batarya Özellikleri	5
2.2.Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım	6
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA SİSTEMLERİNDE YALITIM TESPİTİ ve FİLTRE ÇEŞİTLERİ	7
3.1. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım Tespit Yöntemleri	7
3.1.1. Dengeli Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi	7
3.1.2. Dengesiz Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi	8
3.1.3. AC Sinyal Kaynağı Enjeksiyon Yalıtım Algılama Yöntemi	9
3.1.4. Düşük Frekanslı Sinyal Enjeksiyon Yalıtım Algılama Yöntemi	10
3.1.5. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım Tespit Yöntemleri Avantaj ve Dezavantajlar	11
3.2. Kalman Filtreleme Yöntemleri	12
3.2.1. Kalman Filtresi	12
3.2.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi	14
3.2.3. Unscented Kalman Filtresi	15
3.2.4. Tanecik(Partikül) Kalman Filtresi	16

4. KALMAN FİLTRESİNE DAYALI DENGESİZ KÖPRÜ YÖNTEMİ ile YALITIM TESPİT SİSTEMİ 17
4.1. Dengesiz Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi 17
4.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemi 18
4.3. Yöntemlerinin Uygulanması 19
5. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR 22
5.1. Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar 22
5.2. Şematik Modelleme 27
5.3. PCB Modelleme 30
6. SONUÇLAR ve YORUMLAR 33

KAYNAKLAR 35
ÖZGEÇMİŞ 37
EKLER 38

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
AC	:	Alternatif Akım
ADC	:	Analog Dijital Dönüştürücü
BMS	:	Batarya Yönetim Sistemi
DC	:	Doğru Akım
EV	:	Elektrikli Araç
LiFEPO4	:	Lityum Demir Fosfat
Li-ion	:	Lityum iyon
Li-Po	:	Lityum iyon polimer
Li-S	:	Lityum-Sülfür
NiCd	:	Nikel Kadmiyum
NiMH	:	Nikel Metal Hidrat
Pb-Acid	:	Kurşun-Asit
V	:	Volt

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Thomas Davenport tarafından icat edilen ilk elektrikli araç.	3
2.2:	Elektrikli araç yapısı.	4
3.1:	Dengesiz köprü devresi.	8
3.2:	Dengesiz köprü devresi (a) Faz1 eşdeğer devresi (b) Faz2 eşdeğer devresi.	9
3.3:	AC sinyal enjeksiyon yöntemine dayalı yalıtım algılama devresi.	9
3.4:	Düşük frekanslı sinyal enjeksiyon yöntemine dayalı yalıtım algılama devresi.	10
3.5:	Kalman Filtresi blok diyagramı.	12
4.1:	Yalıtım direnci ölçüm devresi.	17
4.2:	Genişletilmiş Kalman Filtresi tahmin ve düzeltme algoritması.	19
4.3:	Tasarlanan yalıtım direnci ölçüm devresi.	20
5.1:	Yalıtım direnci ölçüm devresi simülasyonu.	22
5.2:	Tasarlanan yüksek gerilim ölçüm devresi.	22
5.3:	Yalıtım direnci ölçüm devresi.	24
5.4:	Bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi ve bataryanın negatif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi.	28
5.5:	Tasarlanan referans gerilim devresi.	28
5.6:	İzole edilmiş besleme devresi.	29
5.7:	Yüksek gerilim ölçüm devresi.	39
5.8:	Mikroişlemci şematiği.	30

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		**Sayfa**
2.1:	Elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojileri ve özellikleri.	5
5.1:	Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler.	23
5.2:	Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler.	23
5.3:	Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 30\mathrm{V}$).	25
5.4:	Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 30\mathrm{V}$).	25
5.5:	Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 25\mathrm{V}$).	26
5.6:	Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 25\mathrm{V}$).	26
5.7:	Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 20\mathrm{V}$).	27
5.8:	Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 20\mathrm{V}$).	27
5.9:	Bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm ve bataryanın negatif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi PCB tasarımı aşamaları.	31

1. GİRİŞ

Elektrikli araçların kullanımının ve öneminin arttığı bu günlerde, ülkemizde de yerli elektrikli araç için gerekli girişimlerde bulunmuş ve elektrikli araç seri üretimi için tarih bile verilmiştir. Elektrikli aracın güç kaynağı, 400-800 V aralığında, seri haldeki birden fazla pil grubudur. Yerleşik yüksek gerilim sistemi, batarya grubu ve buna bağlı güç dönüştürücü ve motor gibi yüksek gerilimli ekipmanlardan oluşur.
Yüksek çalışma gerilimi, araç yüksek batarya sistemi ve araç şasisi arasındaki yalıtım performansı için daha yüksek gerekliliklere sahiptir. Elektrikli araçların çalışma koşulları kötüdür, sıcaklık, nem vb. değişimler, batarya ve şasi arasındaki yalıtım performansını etkiler. Bu durum sadece araç içi ekipmanların etkilenmesine değil, yolcu güvenliğine de etki edecektir. Bu nedenle araç batarya sistemi ve araç şasisi arasındaki yalıtımın gerçek zamanlı ve niceliksel tespiti, hem yolcu güvenliği hem de araç içi elektriksel ekipmanların normal çalışması için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada da elektrikli araç için batarya sistemleri için yalıtım tespit sistemi geliştirmektir. Öncelikle elektrikli araçlar ve yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra batarya sistemleri, kullanılan batarya çeşitleri, avantajları, dezavantajları ve batarya sistemlerinde oluşan izolasyon problemleri ele alınmıştır. Bu izolasyon problemi için izolasyon tespit yöntemleri incelenerek en uygun yöntem seçilmiş ve devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Devamında yapılan devre simülasyonu gerçekleştirilerek şematik çizilmiş ve pcb tasarımı aşamasına gelinmiştir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Elektrikli araçlar günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır.
Bu yaygın kullanılma durumu elektrikli araçlardaki problemlerin daha çok göz önünde olmasına neden olmuştur. Elektrikli araçlar için büyük sorunlardan biri yalıtım sistemleridir. Elektrikli araçların çoğu alt sisteminde yalıtım kullanılmıştır. Özellikle yüksek gerilime sahip batarya sisteminde yalıtım büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı batarya sistemi ile araç şasisi arasında bulunan yalıtım performansını gerçek zamanlı ve niceliksel olarak ölçmektir. Araç batarya sistemi ile araç şasisi arasında yalıtım tespit sisteminin oluşturulması, gerek araç içi elektriksel

ekipmanların düzgün çalışması, gerekse yolcunun güvenliği açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada dengesiz köprü yöntemi kullanılarak gerekli devre tasarımı yapılacak ve mevcut sistem geliştirilecektir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araçlar ilk olarak 1830'lu yıllarda çıkmıştır ve 19. Yüzyılın sonlarına doğru ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1830'ların ilk elektrikli araçlarında şarj edilemeyen piller kullanılmıştır. Pillerin ticari elektrikli araçlarda kullanılabilecek kadar gelişmesi 19. Yüzyılın sonlarına kadar sürmüştür. 19. Yüzyılın sonlarına doğru şarj edilebilir pillerin seri üretime geçmesi ile elektrikli araçlar oldukça yaygınlaşmıştır. Şekil 2.1'de 1835 de Thomas Davenport tarafından icat edilen ilk elektrikli araç gösterilmektedir[1].

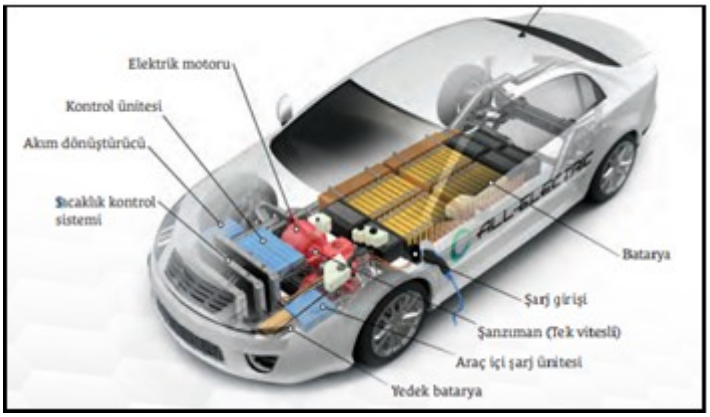
Şekil 2.1: Thomas Davenport tarafından icat edilen ilk elektrikli araç(1835).

Elektrikli araçlar yakıt tasarrufu yapan, petrol tüketmeyen, sessiz ve yüksek verimlilikle çalışan motora sahip olarak tasarlanmıştır. Elektrikli araçlar bir rotor vasıtasıyla hareket eder. Elektrik motorunun içinde yer alan ve dönerek hareket halinde olan rotor adlı parça sayesinde elektrikli araç çalışır. Rotor döndükçe elektrik akımı iletilir, elektrik enerjisi hareket enerjisine dönüşür.

Benzinli araçların aksine elektrikli araçtaki tork gücünün hissedilebilmesi için motorun belirli bir devire ulaşmasına ihtiyaç duyulmaz. Motora ek olarak sahip olunan batarya sayesinde elektrikli araç kullanılır.

Elektrikli araçların yapısı fosil yakıtlı araçların yapısına göre oldukça basittir. Elektrikli araçlarda daha az hareketli parça mevcuttur. Elektrikli araçlar pil, elektrik motoru, motor sürücü devresi ve akım-voltaj dönüştürücülerden oluşur.

Elektrikli araç yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir[2].



Şekil 2.2: Elektrikli araç yapısı.

Elektrikli araçlarda motor AC(alternatif akım) ve ya DC(doğru akım) olabilir. Ancak piller her zaman DC elektrik sağlar. Gerekli durumlarda kısa süre için yüksek enerjiyle beslenerek yüksek güç elde edilebilir. Kısa süreli hızlanmalar için bu özellik oldukça avantaj sağlar. AC motorlara göre basit ve ucuzdur fakat ısınmaya daha çok yatkındır. AC motorlarda ise seçenek daha fazladır. Genellikle 3 fazla çalışan AC motorlar kullanılır. Frenleme esnasında enerji geri kazanımı sağlar. Elektrikli araçlarda DC pillerden AC motorları beslemek için dönüştürücü gerekmektedir. Dolayısıyla iki tip motor da elektrikli araçlarda tercih edilmektedir[3].

Pil teknolojisi, bir elektrikli araç için en önemli parçadır. Çoğu elektrikli araçta lityum iyon piller kullanılmaktadır.

2.1. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerine Giriş

Bir elektrikli aracın temel parçası pildir. Bir elektrikli araç bataryası, araç için gerekli gerilim ve kapasiteyi elde etmek için seri bağlı birçok pilden oluşur. Bataryalar bir elektrikli aracın verimliliği, performansı, güvenilirliği ve günlük kullanılabilirliği için en önemli unsurdur. Batarya hücrelerinin seri bağlanıp bir güç kaynağı olarak kullanılabilmesi için batarya yönetim sistemine(BMS) ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya yönetim sistemleri, elektrikli araçlarda bataryada depolanan gücü yönetir ve diğer alt sistemlere gerekli olan gücü sağlar. Batarya yönetim

sistemlerinin ana işlevleri hücre sağlığı, hücre dengeleme, şarj ve deşarj izleme ve güvenliktir.

2.1.1. Elektrikli Araç Batarya Özellikleri

Günümüzde farklı anma gerilimi ve enerji yoğunluğuna sahip çeşitli batarya teknolojileri bulunmakta ve geliştirilmektedir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan ve bazıları henüz araştırma aşamasında olan batarya teknolojileri ve özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir [4],[5].

Tablo 2.1: Elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojileri ve özellikleri.

Pil Çeşitleri	Nominal voltaj(v)	Enerji Yoğunluğu(Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı©
Pb-acid	2	35	1000	Yok	(-15),(+50)
NiCd	1.2	50-80	2000	Var	(-20),(+50)
NiMH	1.2	70-95	<3000	Nadir	(-20),(+60)
Li-ion	3.6	118-250	2000	Yok	(-20),(+60)
LiPo	3.7	130-225	>1200	Yok	(-20),(+60)
LiFePO4	3.2	120	>2000	Yok	(-45),(+70)
Li-S	2.5	350-650	300	Yok	(-60),(+60)

- Kurşun-Asit (Pb-Acid) Bataryalar:

Kurşun-asit bataryalar birçok uygulamada yer almaktadır. Yüksek deşarj akımı, düşük özboşalım, hafıza etkisinin bulunmaması ve ucuz olması gibi avantajlara sahiptir. Fakat düşük nominal gerilim ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Aynı zamanda kullanılmadıkları süre zarfında batarya ömürleri düşmektedir [4].

- Nikel Kadmiyum (NiCd) Bataryalar:

Nikel kadmiyum bataryalar güvenli ve ucuz bir teknolojidir. Bu bataryalar yüksek deşarj akımı sağlar fakat zayıf şarj/deşarj verimi, yüksek özboşalım ve hafıza etkisi gibi dezavantajları mevcuttur [4].

- Nikel Metal Hidrat (NiMH) Bataryalar:

Nikel metal hidrat batarya teknolojisi nikel kadmiyum bataryaların dezavantajlarına alternatif olarak geliştirilmiştir [4].

- Lityum İyon (Li-ion) Bataryalar:

Lityum iyon batarya teknolojisi nikel tabanlı bataryalardan farklı özelliklere sahiptir. Nikel tabanlı batarya gruplarına göre daha yüksek nominal gerilim ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir [4].

- Lityum İyon Polimer (LiPo) Bataryalar:

Lityum iyon bataryalarla hemen hemen aynı özelliklere sahiptirler [4].

- Lityum Demir Fosfat (LiFePO4) Bataryalar:

Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim oranı ve daha güvenilir kullanım gibi avantajlara sahiptir. Ancak lityum iyon bataryalarla karşılaştırıldığında performansı daha düşüktür [4].

- Lityum Sülfür (Li-S) Bataryalar:

Yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek şarj verimine, düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrüne sahip bataryalardır [4].

2.2. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçların güç aktarma organları, çekiş tahrikleri, jeneratörler, piller, süper kapasitörler, güç dönüştürücüler ve fren dirençleri gibi birçok bileşen oluşur. Tüm bu bileşenler, araç gövdesi boyunca dağılan, yüksek gerilimli bir dc veri yolu kullanılarak bağlanır. Bu elektronik bileşenler ile şasi topraklaması arasındaki yalıtımın kalitesi, aracın güvenilir çalışmasını etkilemektedir.

Sıcaklık, nem, korozyon ve titreşim gibi koşullardaki değişim elektrikli aracın yalıtım performansını etkiler. Geleneksel bir yalıtım izleme yöntemi, şasi topraklamasına ve nötr noktaya bağlı bir voltaj bölücüden gelen voltajın ölçülmesine dayanır [6]. Güç aktarma sisteminin herhangi bir elektrikli parçasında yalıtım hatası varsa, nötr noktanın potansiyeli değiştirilir. Bu voltaj, bir yalıtım arızasını tespit etmek ve gerekli arıza giderme ile ilgili bir alarm ve bilgi sağlamak için ölçülebilir ve işlenebilir. Bu yöntem, güç aktarma organlarının içinde bir yerde meydana gelen yalıtım arızasını tespit edebilir ancak tam arıza yerini sağlayamaz [6],[7].

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA SİSTEMLERİNDE YALITIM TESPİTİ ve FİLTRE ÇEŞİTLERİ

Elektrikli araçlarda güç kaynağı birbirine seri bağlı birçok pil grubundan oluşmaktadır. Bu batarya paketinin gerilim değeri genellikle 400V- 800V aralığındadır. Bu yerleşik yüksek gerilim sistemi, batarya grubu, güç dönüştürücü ve motor gibi yüksek gerilimli ekipmanlardan oluşur. Kullanılan yüksek gerilim sistemi batarya paketi ve araç şasisi arasındaki yalıtım sistemi için yüksek gerekliliklere sebep olmaktadır. Otomobillerin çalışma şartları zorludur. Olası nem ve sıcaklık değişimleri yalıtım sistemini etkiler. Bu durum hem yolcuların güvenliğini tehlikeye atar hem de yalıtım sisteminde kullanılan diğer ekipmanların düzgün çalışmasını engeller. Bu nedenle, batarya paketi ve araç şasisi arasındaki yalıtımın gerçek zamanlı ve niceliksel tespiti büyük önem arz etmektedir.

3.1. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım Tespit Yöntemleri

Elektrikli araçlarda yalıtımı izlemek için birkaç metot bulunmaktadır. Her bir metodun kendi içinde avantajları ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada mevcut metotlar incelenerek en uygun metot seçilmiş ve yalıtım tespit sistemi geliştirilmiştir.

3.1.1. Dengeli Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi

Dengeli köprü devresi, topraklanmamış DC güç kaynağı sistemlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir metottur. Dengeli köprü yöntemi basit bir ölçüm devresine sahiptir ve maliyeti de oldukça düşüktür. Bu avantajlar dengeli köprü yönteminin elektrikli araçlarda en çok kullanılan yalıtım direnci ölçüm devresi olmasını sağlar.

Dengeli köprü devresi batarya paketi ve şasi topraklaması arasındaki sızıntıyı tespit edemez. Buna ek olarak ölçüm sırasında devreye referans direncin eklenmesi sistemin yalıtım performansını düşürür. Bu durumda köprü dengesi bozulur ve uyarı sinyali oluşturur. Bu yöntem yalnızca DC güç sistemlerinde oluşan arızaların

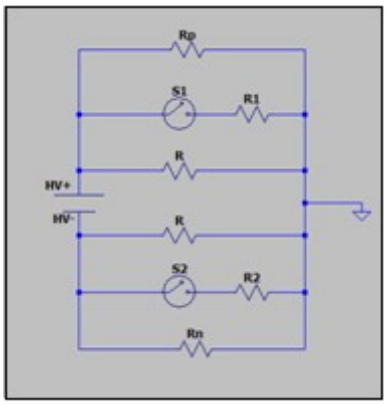
varlığını tespit edebilir. Arıza tespit sırasında etkilenen devreyi belirlemek için her bir döngüde yalıtım kontrolü yapılır. Bu nedenle, dengeli köprü yöntemi gerçek zamanlı ve çevrimiçi toprak arızası uyarısı sağlayamaz[8].

3.1.2. Dengesiz Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi

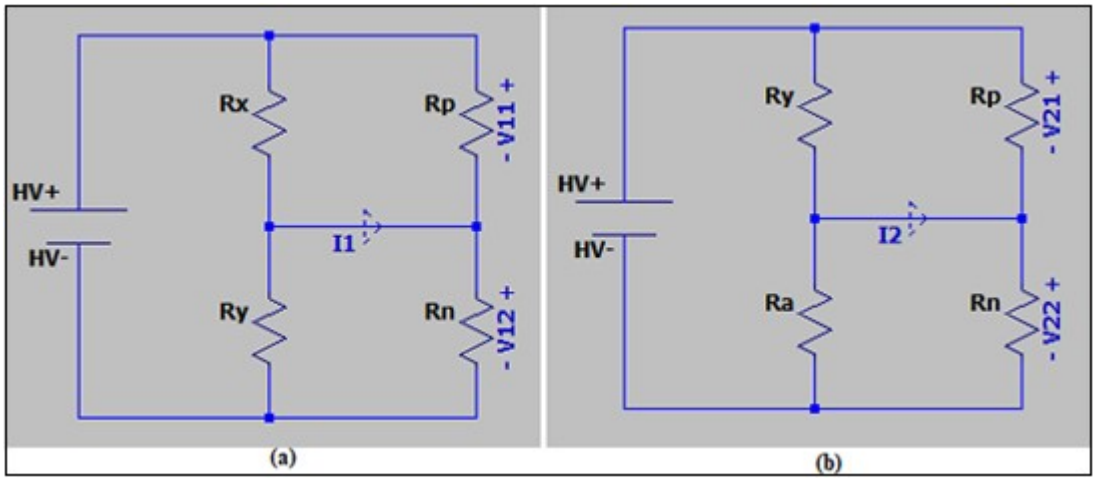
Dengesiz köprü metodu, dengeli köprü metodunda bulunan eksikleri gidermesine rağmen yalıtım direncini azaltan dirençlere ihtiyaç duyar. Bu metot pozitif ve negatif izolasyon dirençlerini senkron olarak izleyebilir. Bu yöntemin avantajı gerçekleştirilmesinin kolay ve maliyetinin düşük olmasıdır. Bu özellikler sayesinde elektrikli araçlarda kullanımı oldukça yaygındır.

Dengesiz köprü yönteminin dezavantajı ise devrenin hangi dalında toprak arızası olduğunu belirleyememesidir.

Dengesiz köprü devresi Şekil 3.1'de gösterilmiştir[9]. Bu devre 2 fazda çalışmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi devrede S_1 ve S_2 olmak üzere iki tane anahtar bulunmaktadır. Devre S_1 açık, S_2 kapalı durumda iken 1.faz ve S_1 kapalı, S_2 açık durumda iken 2.faz da çalışmaktadır. Bu devrede R_p, pozitif yalıtım direncini, R_n ise negatif yalıtım direncini ifade eder. $R_x = R$ ve $R_y = R\|(R_1 = R_2)$ köprü dirençleridir. Faz1'de pozitif yarım köprü direnci R_x ve negatif yarım köprü direnci R_y dir. Faz 2'de ise tam tersidir. Faz1 ve faz2 devreleri Şekil 3.2(a) ve 3.2(b)'de gösterilmiştir[9].



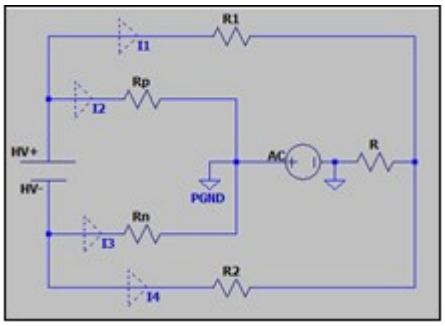
Şekil 3.1: Dengesiz köprü devresi.



Şekil 3.2: Dengesiz köprü devresi (a) Faz1 eşdeğer devresi (b) Faz2 eşdeğer devresi.

3.1.3. AC Sinyal Enjeksiyon Yalıtım Algılama Yöntemi

AC sinyal enjeksiyon yönteminin temel prensibi, DC bağlantı veri yoluna düşük frekanslı AC sinyal kaynağı yerleştirilmesidir. Devreye yerleştirilen bu AC sinyali takip etmek için AC akım sensörü kullanılır. Bu AC akım sensöründen elde edilen akım değeri ve akımın faz değeri ile toprak direnci hesaplanır. Hesaplanan direnç değeri, ayarlanan hesap değerinin altına düştüğü zaman topraklama hatası meydana gelir. Son zamanlarda geçici voltaj dengeleyici olarak, çok sayıda parazit önleyici kapasitör kullanan mikroelektromekanik cihazlar nedeniyle, DC güç kaynağı sistemindeki kapasitans artar ve daha büyük kapasitans akımı ile sonuçlanır[6]. Bu sebeple toprak arıza noktasını tespit etmek için AC sinyal enjeksiyon yöntemi etkisizdir. Şekil 3.3'de AC sinyal enjeksiyon yalıtım algılama yöntem devresi gösterilmiştir[10].



Şekil 3.3: AC sinyal enjeksiyon yöntemine dayalı yalıtım algılama devresi.

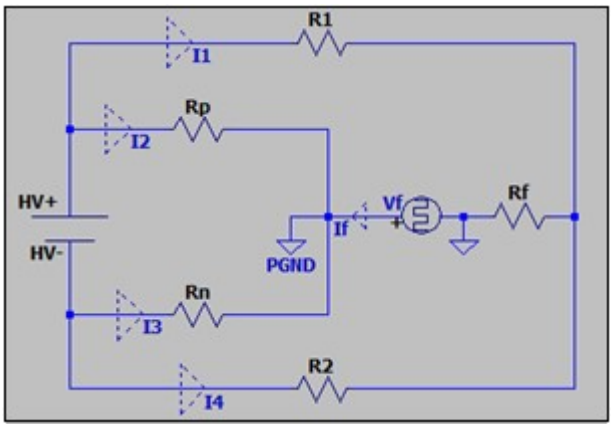
3.1.4. Düşük Frekanslı Sinyal Enjeksiyon Yalıtım Algılama Yöntemi

Düşük frekanslı sinyal enjeksiyon metodu yüksek güvenilirlik ve düşük maliyeti sayesinde yalıtım direnci tespit sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Bu metot yüksek gerilim sistemine düşük frekanslı kare dalga uygulayarak, sinyal ve toprak arasındaki voltajı ve akımı çevrimiçi izleyerek yalıtımı gerçek zamanlı olarak tespit edebilir.

Şekil 3.4'de düşük frekanslı sinyal enjeksiyon metoduna dayalı yalıtım tespit devresi görülmektedir[10]. Burada HV batarya gerilimini, V_f darbe sinyal üretecini, R_p pozitif yalıtım direncini, R_n ise negatif yalıtım direncini ifade eder.

Ayrıca R_1 , R_2 köprü dirençleri ve R_f'de örnekleme direncidir[10].



Şekil 3.4: Düşük frekanslı sinyal enjeksiyon yöntemine dayalı yalıtım algılama devresi.

Darbe sinyali üreteci tarafından pozitif ve negatif döngülerde üretilen gerilimler, ayarlanmış gerilim değerleridir. Güç pil voltajı HV, yüksek voltaj ölçüm devresi ile ölçülebilir ve örnekleme direnci üzerindeki voltajlar, pozitif ve negatif döngülerde örnekleme devresi tarafından ölçülmektedir. Elde edilen bu gerilim değerleri ile yalıtım dirençleri R_p ve R_n hesaplanmaktadır.

3.1.5. Elektrikli Araç Batarya Sistemlerinde Yalıtım Tespit Yöntemleri Avantaj ve Dezavantajlar

Dengeli köprü izolasyon algılama yöntemi, topraklanmamış DC güç kaynağı sistemlerinin yalıtım hatasını algılamanın geleneksel bir yoludur. Bu yöntem basit bir ölçüm devresine sahiptir ve maliyeti oldukça düşüktür. Dengeli köprü yöntemi batarya paketi ile araç şasi topraklaması arasındaki sızıntıyı tespit edemez. Ayrıca, ölçüm sırasında referans direncin eklenmesi sistemin yalıtım performansını düşürür. Bu nedenle, dengeli köprü yöntemi gerçek zamanlı ve çevrimiçi toprak arızası uyarısı sağlayamaz.

Dengesiz köprü yalıtım algılama yöntemi, dengeli köprü yalıtım algılama modelini geliştirmesine rağmen yalıtım direncini azaltan dirençlere ihtiyaç duyar. Bu metot pozitif ve negatif izolasyon dirençlerini senkron olarak izleyebilir. Bu yöntemin avantajı gerçekleştirilmesinin kolay ve maliyetinin düşük olmasıdır. Bu özellikler sayesinde elektrikli araçlarda kullanımı oldukça yaygındır.

AC sinyal enjeksiyon yalıtım algılama yönteminin temel prensibi, DC bağlantı veri yoluna düşük frekanslı AC sinyal kaynağı yerleştirilmesidir. AC voltaj sinyal enjeksiyon yöntemi bir aracın elektromanyetik sinyallerinin izleme devresine karışmasını azaltsa da, yüksek voltajlı sinyallerin sık sık enjeksiyonu pil paketlerinin güvenli çalışmasını etkiler. Son zamanlarda geçici voltaj dengeleyici olarak, çok sayıda parazit önleyici kapasitör kullanan cihazlar nedeniyle, DC güç kaynağı sistemindeki kapasitans artar ve daha büyük kapasitans akımı ile sonuçlanır[11]. Bu sebeple toprak arıza noktasını tespit etmek için AC sinyal enjeksiyon yöntemi etkisizdir.

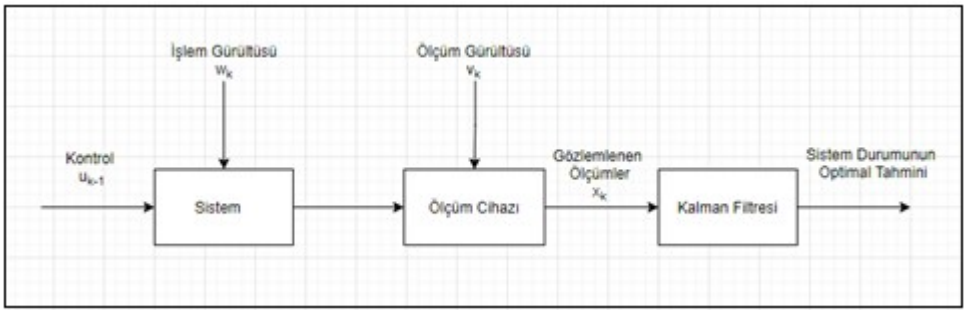
Düşük frekanslı sinyal enjeksiyon yöntemi, batarya paketi içindeki sızıntıyı tespit edebilmesine rağmen, voltaj yükselmeleri sırasında yanlış ölçümler meydana gelebilir. Maliyeti yüksektir.

Sonuç olarak bu çalışmada hem güvenilirlik, hem basit devre yapısı, hem de düşük maliyet avantajı ile dengesiz köprü yalıtım algılama yöntemi geliştirilerek kullanılmıştır. Ayrıca bu devre ile alınan sonuçları filtrelemek ve böylece gürültüyü azaltmak için kalman filtresi de tasarlanarak devreye eklenmiştir.

3.2. Kalman Filtreleme Yöntemleri

Elektrikli araçlarda gerçek çalışma koşulları sağlandığında toplam gerilim değerlerinde ani değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişikliklerin sebebi sert hızlanma ve rejeneratif frenleme süreçleridir. Bu sistem, gerilim dalgalanmasının etkilerini azaltmak için bir filtreye ihtiyaç duyar.

Kalman filtresi doğrusal sistemler için optimal tahmin algoritmasıdır. Bu filtre sistemin önceki durumları ele alınarak sonraki durumları tahmin etmek için kullanılan bir algoritmaya sahiptir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için matematiksel model oluşturulur. Kalman filtresi sadece doğrusal sistemler için kullanılır. Doğrusal olmayan sistemler için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Şekil 3.5'de Kalman filtresi blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Kalman Filtresi blok diyagramı

3.2.1. Kalman Filtresi

Kalman filtresi, pek çok farklı alanda, sistemin durumunu ve ya değerlerini tahmin etmek için tasarlanmış bir yöntemdir. Matematiksel olarak doğrusal sistemlerin durumlarını tahmin eder. Pratikte çok faydalı bir filtredir. Ayrıca teorik yönü de güçlüdür. Çünkü mevcut filtreler içinde kestirim hatasını (tahmini) minimize eden (gittikçe azaltan) tek filtredir[12].

Kalman filtresinin tanımları ve denklemlerinin tüm yönleriyle başlangıçta anlaşılması zordur. Kalman filtresinin durum(3.1) ve gözlem(3.2) olmak üzerek iki denklemi bulunur. Bu denklemler:

$$x_k = A.x_{k-1} + B.u_{k-1} + w_k \tag{3.1}$$

$$y_k = H.x_k + v_k \tag{3.2}$$

Burada w_k işlem gürültüsü, u_{k-1} kontrol sinyali, x_{k-1} önceki durum ve x_k ise durum vektörüdür. Aynı şekilde v_k, ölçüm gürültüsü, y_k ise gözlem vektörüdür. A durum geçiş matrisi, B girdi matrisi ve H da gözlem matrisidir. Sırasıyla $w_k$ve v_k ile temsil edilen işlem ve ölçüm gürültü vektörlerinin (3.3) normal dağıldığı ve pozitif tanımlı olduğu varsayılır:

$$q(w) \sim N(0, Q), \mathrm{q}(v) \sim N(0, R) \tag{3.3}$$

Tahmin sırasında $k-1$ ve k anlarında elde edilen durumlar, önceki durum tahmini $\hat{x}_k^-$ ve son durum tahmini x_k olarak adlandırılır [13]. Bu önceki ve sonraki durumlara dayanarak, önceki ve sonraki tahmin hataları (3.4) ve kovaryans denklemleri (3.5) türetilir.

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \ , e_k = x_k - \hat{x}_k \tag{3.4}$$

$$P_k^- = E[e_k^-.e_k^{-T}] \ , P_k = E[e_k.e_k^T] \tag{3.5}$$

Kalman Filtre denklemleri, son durum tahmininin öncelikli tahminlere, gerçek ve tahmini ölçüm değerleri arasındaki ağırlıklı farklara dayalı olarak hesaplanabilmesi için x_k gerektirir, bu da güncelleme ve tahmin denklemlerine ihtiyaç duyulmasına neden olur. Bu nedenle formüle edilmiş tahmin denklemleri (3.6) ve (3.7) ile verilmiştir:

$$\hat{x}_k^- = A.\hat{x}_{k-1}^- + B.u_{k-1} \tag{3.6}$$

$$P_k^- = A.P_{k-1}.A^T + Q \tag{3.7}$$

Güncelleme denklemleri:

$$K_k = \frac{P_k^- . H^T}{H . P_k^- . H^T + R'} \tag{3.8}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H . \hat{x}_k^-) \tag{3.9}$$

$$P_k = (I - K_k . H) P_k^- \tag{3.10}$$

K_k kalman kazanç matrisidir. x_k durum filtre vektörü, P_k işlem kovaryans matrisi ve I ise birim matristir. Kalman filtresi sadece doğrusal sistemlerde kullanılır. Gerçek zamanlı sistemlerin çoğu doğrusal değildir. Bu durum kalman filtresi kullanımını sınırlamaktadır[13].

3.2.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi

Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılması oldukça basit bir doğrusal olmayan filtre yöntemidir. Bu filtrede doğrusal Taylor açılımı kullanılır, gözlem ve durum denklemleri sürekli ve doğrusal hale geldiğinde, tahmin edilen değer gerçek değere yakınsar [15]. Performans, işlem ve ölçüm gürültü matrislerine dayanır, bu matrisler yeterince doğru tahmin edilmezse filtre tahmininde sapmaya neden olabilir [16].
Doğrusal olmayan bir sistem:

$$x_k = f(x_{k-1}, w_{k-1}) \tag{3.11}$$

$$y_k = h(x_k, v_k) \tag{3.12}$$

Burada x_k, n'inci boyutun bir durum vektörüdür ve y_k, m boyutların bir gözlem vektörüdür. Durum geçişi ve gözlem fonksiyonları f ve h'nin doğrusal olmadığı bulunmuştur. Formüle edilmiş tahmin denklemleri (3.13) ve (3.14) ile verilmiştir:

$$A = \frac{df}{dx} = \hat{x}_{k-1} \ , \ x_k^- = f(\hat{x}_{k-1}) \tag{3.13}$$

$$P_k = (I - K_k . H) P_k^- \tag{3.14}$$

A durum matrisidir. Benzer şekilde, güncelleme denklemleri:

$$H = \frac{dh}{dx} = \hat{x}_{k-1}^{-} \tag{3.15}$$

$$K_k = \frac{P_k^{-}.H^T}{H.P_k^{-}.H^T + R'} \tag{3.16}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^{-} + K_k(y_k - h(\hat{x}_k^{-})) \tag{3.17}$$

Burada H ölçüm denklemi, K_k Kalman kazanç matrisidir ve P_k işlem kovaryans matrisidir. Genişletilmiş Kalman Filtresi, sistem sürecini ve ölçüm gürültüsünü doğada Gauss dışı olarak değerlendirdiği için bir çelişki durumu ortaya çıkabilir. Bu durum, birinci dereceden Taylor serisi genişlemesi yaşayan işlem gürültüsünde ve ölçüm gürültüsünde bir değişikliğe yol açabilir. Bu filtrenin bir başka dezavantajı, karmaşık ve zaman alıcı bir genişletilmiş kalman filtre işlemine yol açabilecek her operasyonel noktada Jacobian matrislerini yeniden hesaplamak zorunda olmasıdır.

3.2.3. Unscented Kalman Filtresi

Unscented Kalman Filtresi genellikle daha iyi performansa sahiptir ve örnekleme stratejisi nedeniyle karmaşıklığı azaltır ve genişletilmiş kalman filtresi durumunda bulunan hataların sapmasını önler.

Doğrusal olmayan fonksiyonun ağırlıklı yoğunluk dağılımına yaklaşır ve Jacobian matrislerinin [13] hesaplanmasını gerektirmeden toplamsal olmayan gürültüyü ele alır, böylece doğrusal olmayan bir problem için daha fazla doğruluk ve daha hızlı yakınsama sağlar. Unscented Kalman filtresindeki örnekleme noktalarına sigma noktaları denir ve genellikle sayıca daha küçüktür. Unscented Kalman Filtresi aşağıdaki işleme adımlarından oluşur:

- Durum hatası kovaryans matrisinin yanı sıra durum vektörünün başlatılması;
- Durum vektörü ve hata kovaryans matrisine dayalı olarak k - 1 anında sigma örnekleme noktalarının seçilmesi ve ağırlıklı değerlerin hesaplanması;

- Seçilen örnekleme noktaları aracılığıyla zamanın güncellenmesi ve durum denklemi aracılığıyla kovaryans ve ortalamanın yayılması;
- Doğrusal olmayan bir gözlem denklemi aracılığıyla seçilen örnekleme noktalarına göre ölçümlerin güncellenmesi;
- Kalman Filtre katsayılarının güncellenmesi.

3.2.4. Parçacık(Partikül) Kalman Filtresi

Parçacık Kalman Filtresi, süreçler ve sistemler Gauss olmadığında, belirsizliği temsil etmek ve yönetmek ve sürecin stokastikliğini hesaba katmak için çok verimli bir tahmin aracıdır. Parçacık Kalman Filtresi, bilgilerin mantıksal olarak kaynaştırılmış çoklu ölçüm kaynaklarından işlenmesine izin verir. Ancak dezavantajı da mevcuttur. Parçacık Kalman Filtresindeki tahmin sonuçları büyük ölçüde parçacıkların veya numunelerin sayısına bağlıdır. Ayrıca, parçacık(partikül) filtreleri Kalman filtrelerine göre çoğunlukla daha karmaşık hesaplamalar içermesinden dolayı bu tip filtrelerin gerçek zamanlı düzeneklerde kullanılması oldukça güçtür.

Bu çalışmada Geliştirilmiş Kalman Filtresi, Unscented Kalman Filtresi ve Parçacık Filtre seçenekleri arasından Unscented Kalman Filtre ve Parçacık Filtre tekniklerinin işlemciye çok fazla işlem yükü bindirmesinden ve kullandıkları verilerin çokluğu sebebiyle döngüde bir gecikmeye sebep olmalarından dolayı Genişletilmiş Kalman Filtresi tercih edilmiştir.

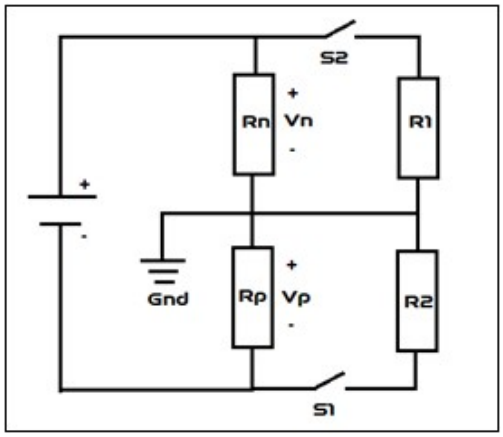
4. GENİŞLETİLMİŞ KALMAN FİLTRESİNE DAYALI DENGESİZ KÖPRÜ YÖNTEMİ ile YALITIM TESPİT SİSTEMİ

Elektrikli araçlarda yolcu güvenliği ve elektrikle çalışan ekipman arızasını önlemek için araç bataryası ve araç şasisi arasında izolasyon yapılması gerekmektedir. Buna göre, izolasyon kaçağı ölçümü, devreleri ve yolcuları korumak için zorunlu bir ihtiyaçtır. Kaçak akım, çekiş bataryasından şasi toprağına giden bütün AC akımların toplamıdır. Bu şekilde, yalıtım direnci, çekiş bataryası yüksek voltajlı DC kaynağı olarak kabul edildiğinden kaçak akımın büyüklüğünü temsil eder. Bu arada, bazı güvenlik standartları, kaçak akım yerine bir yalıtım direnci ölçümü gerektirir.

Bu çalışmada dengesiz köprü yöntemi geliştirilerek Genişletilmiş Kalman Filtresine dayalı yalıtım tespit sistemi tasarlanmıştır.

4.1. Dengesiz Köprü Yalıtım Algılama Yöntemi

Elektrikli araçlarda batarya paketi ile şasi arasındaki yalıtım direncini ölçmek için değişken bir empedans ağı kullanılmaktadır. Batarya paketinin pozitif ve negatif barası ile şasi arasındaki yalıtım dirençlerinin R_n ve R_p olduğunu varsayalım. Gerekli ölçüm devresi Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'deki R_1 ve R_2 dirençleri ölçüm için kullanılan standart değerli dirençlerdir.



Şekil 4.1: Yalıtım direnci ölçüm devresi.

Anahtar S_1 ve S_2 açık iken, thevenin teoremine göre, pozitif, negatif bara ve araç şasisi arasındaki gerilim değerlerleri sırasıyla V_{n1} ve V_{p1} 'dir:

$$\frac{V_{p1}}{R_p} = \frac{V_{n1}}{R_n} \tag{4.1}$$

Anahtar S_1 kapalı ve S_2 açık iken, standart öngerilim direnci R_1 pozitif bara ile şasi arasındadır. Pozitif ve negatif baralar ile şasi arasındaki gerilim V_{p2} ve V_{n2} 'dir:

$$\frac{V_{p2}}{R_p} + \frac{V_{p2}}{R_1} = \frac{V_{n2}}{R_n} \tag{4.2}$$

Denklemler (4.1) ve (4.2) birleştirilerek, yalıtım direnci ifadesi aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$R_n = R_1 * \frac{V_{p1} * V_{n2} - V_{n1} * V_{P2}}{V_{P1} * V_{P2}} \tag{4.3}$$

Aynı şekilde, yalıtım direnci ifadesi iki farklı durumda elde edilebilir:

- S_1 ve S_2 açık ve ya S_1 açık, S_2 kapalı.
- S_1 kapalı, S_2 açık ve S_1 açık, S_2 kapalı.

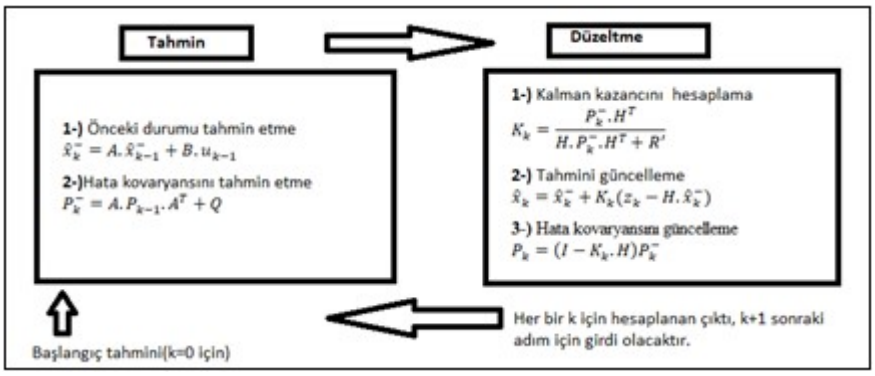
Bu devre şeması, elektrikli araçlarda yalıtım direnci tespiti için yararlıdır fakat eksiklikler de mevcuttur. Bu tasarım, pozitif güç kaynağı ile toprak, negatif güç kaynağı ve toprak arasındaki direnci tespit ederek, otomobilin yalıtım performansının gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını belirler. Tasarlanan izolasyon direnci ölçüm devresi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

4.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemi

Elektrikli araçlarda, batarya paketi ile araç şasisi arasındaki yalıtım direnci ölçümü sonuçların gürültüden kurtulması ve düşük hata oranına sahip olması için genişletilmiş kalman filtresi tasarlanmıştır. Bu filtrenin amacı, batarya

sistemlerindeki gerilim dalgalanmalarının etkisini en aza indirgemek ve alınan sonuçların doğruluğunu yükseltmektir. Genişletilmiş Kalman filtresi tasarımı için gerekli denklemler 3.2.2 bölümünde verilmiştir.

Genişletilmiş Kalman filtresi tahmin ve düzeltme olmak üzere iki aşamada devreye uygulanır. Tahmin aşamasında önceki durum ve önceki hata kovaryansı tahmini hesaplanır. Düzeltme aşamasında ise şimdiki kalman kazancı, sinyal tahmini ve hata kovaryansı tahmini hesaplanır. Bu aşamalar Şekil 4.2'de gösterilmiştir[12].



Şekil 4.2: Genişletilmiş Kalman Filtresi tahmin ve düzeltme algoritması.

Burada $\hat{x}_k^-$ sinyal tahmini, z_k ölçülen değer, P_k hata kovaryansı, K_k kalman kazancı, $\hat{x}_{k-1}^-$ sinyalin önceki durum tahmini, P_k^- önceki hata kovaryansını ifade eder.

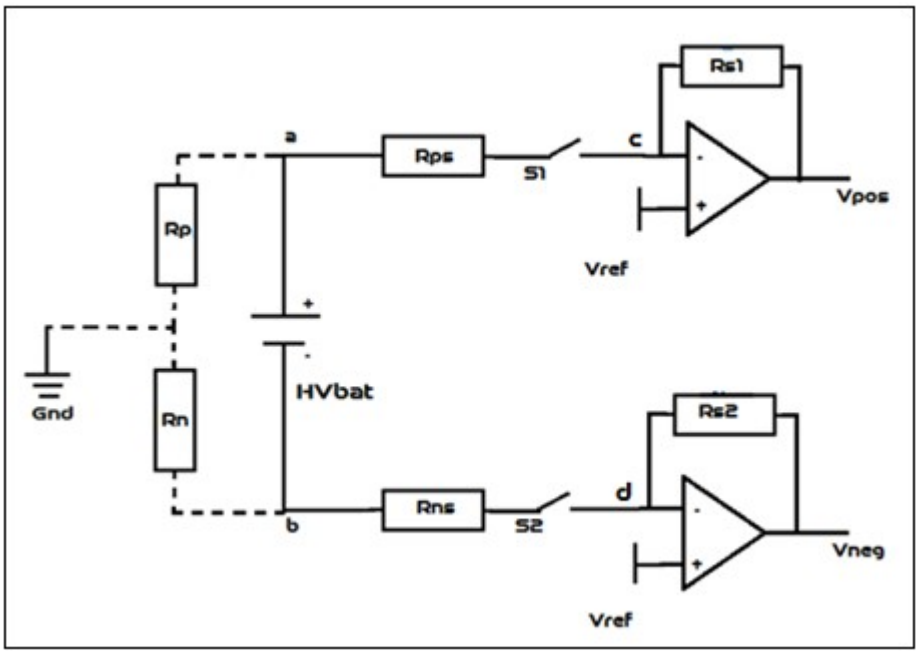
Bu algoritma ile devre için gerekli genişletilmiş kalman filtresi tasarımı yapılmış ve Ek A bölümüne kullanılması amaçlanan yazılım eklenmiştir.

4.3. Yöntemlerin Uygulanması

Bu çalışmada, bir önceki bölümde verilen standart devrede (Şekil 4.1) gerekli iyileştirmeler yapılarak yeni bir devre şeması elde edilmiştir. Tasarlanan yalıtım direnci ölçüm devresi Şekil 4.3'de verilmiştir[17].

Yüksek gerilimli bir batarya paketini hem pozitif hem de negatif terminallerinde izolasyon sızıntısı hataları meydana gelir (devre şeması Şekil 4.3). Burada R_p, bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki parazit yalıtım direncini temsil eder. Aynı şekilde, R_n, bataryanın negatif

terminali ile şasi topraklaması arasındaki parazit yalıtım direncini temsil eder. R_{ps} ve R_{ns} pozitif terminal ve negatif terminaldeki seri dirençlerdir. R_{s1} ve R_{s2}, op-amp boyunca örnekleme dirençleridir. V_{pos} ve V_{neg}, sinyal işleme için analog dijital dönüştürücü ile ölçülmesi gereken gerilim değerleridir.



Şekil 4.3: Tasarlanan yalıtım direnci ölçüm devresi.

Yalnızca S_1 kapalı iken, batarya için iki kaçak akım yolu oluşur. Birinci kaçak akım yolu, bataryanın pozitif terminalinden şasi toprağına akar ve R_p'ye bağlıdır. İkinci kaçak akım yolu ise, bataryanın negatif terminalinden şasi toprağına akar ve R_n'ye bağlıdır. Kirchhoff'un Akım Yasasına göre, aynı kavşaktan giren ve çıkan akımların toplamı her zaman sıfırdır. Buna göre a ve c düğümlerindeki denklemler:

$$\frac{V_a - HV_{ba}}{R_n} + \frac{V_a}{R_p} + \frac{V_a - V_{ref}}{R_{ps}} = 0 \tag{4.4}$$

$$\frac{V_a - V_{ref}}{R_{ps}} + \frac{V_{pos} - V_{ref}}{R_{s1}} = 0 \tag{4.5}$$

Burada, HV_{bat1} yalnız S_1 kapalı iken adc ile ölçülen batarya gerilimidir. V_a , a düğüm noktasındaki gerilimdir. Denklem (4.2)'den yola çıkarak V_a gerilimi elde edilir:

$$V_a = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_{ps}}{R_{s1}}\right) - \frac{R_{ps}}{R_{s1}} * V_{pos} \tag{4.6}$$

Yalnızca S_2 kapalı iken, batarya için iki kaçak akım yolu oluşur. Birinci kaçak akım yolu, bataryanın pozitif terminalinden şasi toprağına akar ve R_p'ye bağlıdır. İkinci kaçak akım yolu ise, bataryanın negatif terminalinden şasi toprağına akar ve R_n'ye bağlıdır.

Aynı şekilde, b ve d düğümlerindeki denklemler:

$$\frac{V_b - HV_{bat2}}{R_p} + \frac{V_b}{R_n} + \frac{V_a - V_{ref}}{R_{ns}} = 0 \tag{4.7}$$

$$\frac{V_b - V_{ref}}{R_{ns}} + \frac{V_{neg} - V_{ref}}{R_{s2}} = 0 \tag{4.8}$$

Burada, HV_{bat2} yalnız S_2 kapalı iken adc ile ölçülen batarya gerilimidir. V_b , b düğüm noktasındaki gerilimdir. Denklem (4.3)'den yola çıkarak V_b gerilimi elde edilir:

$$V_b = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_{ns}}{R_{s2}}\right) - \frac{R_{ns}}{R_{s2}} * V_{neg} \tag{4.9}$$

Bütün bu denklemler yardımıyla elde etmek istediğimiz R_p ve R_n değerleri bulunur:

$$R_p = \frac{HV_{bat1} * HV_{bat2} * R_{ps} + HV_{bat1} * R_{ps} * V_b - HV_{bat2} * R_{ps} * V_a}{HV_{bat1} * V_{ref} - HV_{bat1} * V_b + V_{ref} * V_b - V_{ref} * V_a} \tag{4.10}$$

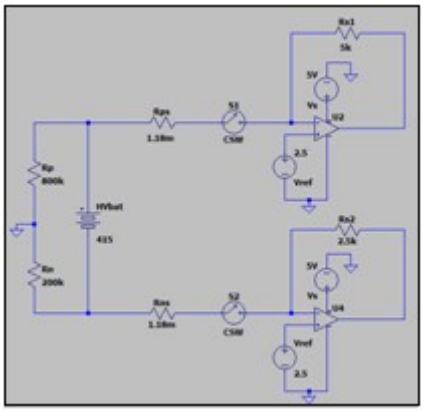
$$R_n = -\frac{HV_{bat1} * HV_{bat2} * R_{ps} + HV_{bat1} * R_{ps} * V_b - HV_{bat2} * R_{ps} * V_a}{HV_{bat2} * V_{ref} - HV_{bat2} * V_a + V_{ref} * V_b - V_{ref} * V_a} \tag{4.11}$$

Tasarlanan bu yalıtım tespit devresi, yalıtım direnci ölçümünü sağlar. Alınan sonuçların gürültüden kurtulması ve düşük hata oranına sahip olması için genişletilmiş kalman filtresi devreye eklenmiştir.

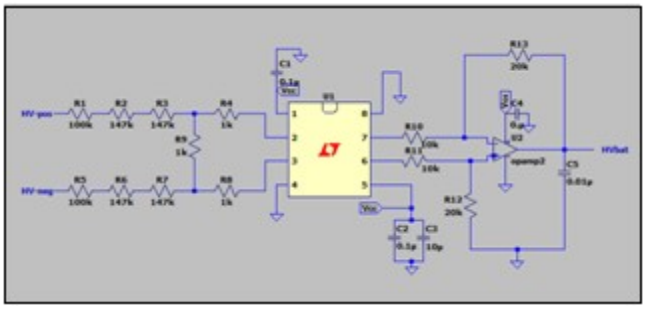
5. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR

5.1. Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar

R_p ve R_n değerleri ve elde edilen denklemlerin doğruluğunu tespit etmek için simülasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada simülasyon programı olarak LTspice kullanılmıştır. Bu simülasyonda, $R_{ps}, R_{ns} = 1{,}18\ M\Omega$, $R_{s1}, R_{s2} = 5\ k\Omega$ ve $R_p = 800\ k\Omega$, $R_n = 200\ k\Omega$ seçilmiştir. Simülasyon programında çizilen devre Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Ayrıca hesaplamalar sırasında kullanılan batarya paketi gerilim değerinin de anlık olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için de yüksek gerilim ölçüm devresi tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir(Şekil 5.2).



Şekil 5.1: Yalıtım direnci ölçüm devresi simülasyonu.



Şekil 5.2: Tasarlanan yüksek gerilim ölçüm devresi.

Yalnız S_1 kapalı, V=400 V iken ölçülen değer: $V_{pos} = 1{,}31653\ V$

Yalnız S_2 kapalı, V=415 V iken ölçülen değer: $V_{neg} = 2{,}81948\ V$

Denklem (4.6)'ya göre: $V_a = 281{,}799\ V$,

Denklem (4.9)'a göre: $V_b = -72{,}8963$'ye eşittir.

Denklem (4.10) ve (4.11)'e göre:

$$R_p = 802\ k\Omega\ ,$$

$$R_n = 201\ k\Omega$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu devrede yapılan simülasyon sonucu hesaplanan yalıtım direnci değerleri ile bilenen değerler birbirlerine yakındır. Ölçülen değerler ve hesaplanan sonuçlar Tablo 5.1 ve Tablo 5.2' de gösterilmiştir.

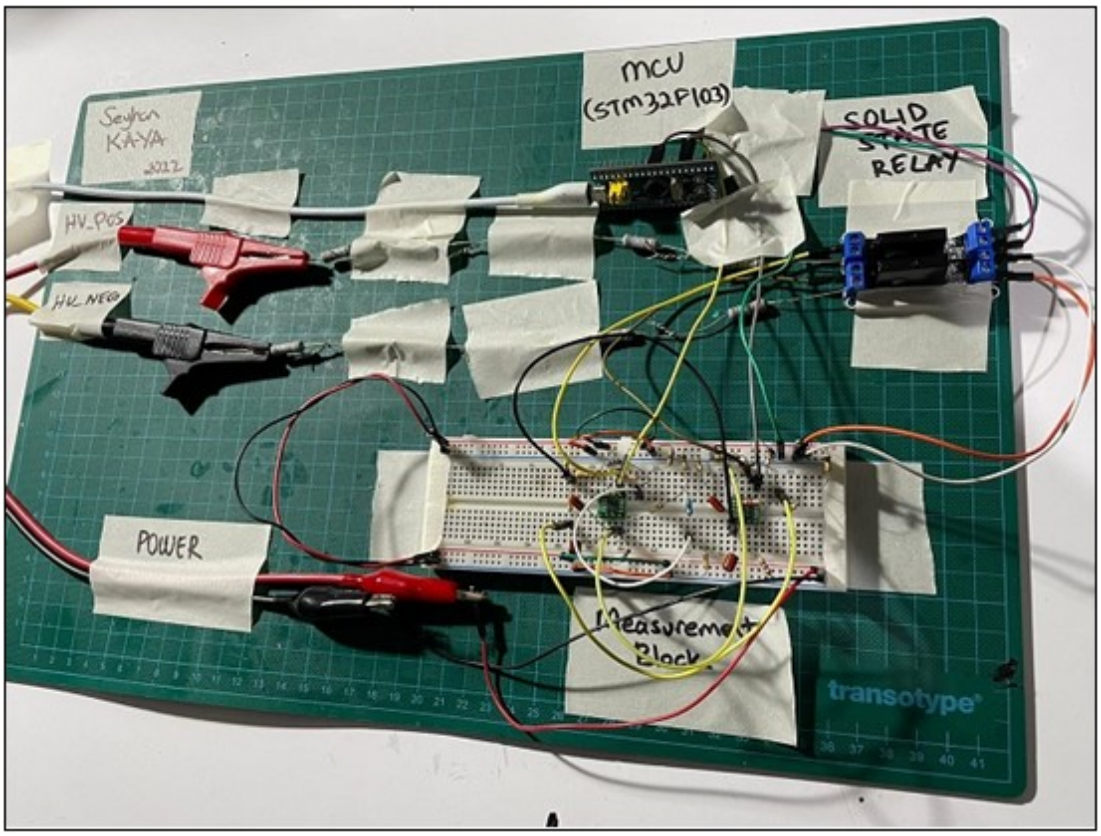
Tablo 5.1: Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler.

Yalnız S_1 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	400 V
V_{pos}	1,31653 V
V_{neg}	2,5 V
R_p	802 $k\Omega$

Tablo 5.2: Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler.

Yalnız S_2 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	415 V
V_{pos}	2,5 V
V_{neg}	2,81948 V
R_n	201 $k\Omega$

Yapılan simülasyonlar devamında devrenin incelenmesi laboratuar ortamında gerçekleştirilmiştir. Kurulan izolasyon direnci ölçüm devresi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Bu devrede gerekli ölçümler alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5.3: Yalıtım direnci ölçüm devresi.

Yalnız S_1 kapalı, V=30 V iken ölçülen değer: $V_{pos} = 2{,}41967\ V$

Yalnız S_2 kapalı, V=30 V iken ölçülen değer: $V_{neg} = 2{,}53167\ V$

Denklem (4.6)'ya göre: $V_a = 21{,}4583\ V$,

Denklem (4.9)'a göre: $V_b = -4{,}97299\ V$'ye eşittir.

Denklem (4.10) ve (4.11)'e göre:

$$R_p = 799\ k\Omega\ ,$$

$$R_n = 199\ k\Omega$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu devrede yapılan ölçümler sonucu hesaplanan yalıtım direnci değerleri ile bilenen değerler birbirlerine yakındır. Ölçülen değerler ve hesaplanan sonuçlar Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 30\mathrm{V}$).

Yalnız S_1 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	30 V
V_{pos}	2,41967 V
V_{neg}	2,5 V
R_p	799 $k\Omega$

Tablo 5.4: Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 30\mathrm{V}$).

Yalnız S_2 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	30 V
V_{pos}	2,5 V
V_{neg}	2,53167 V
R_n	199 $k\Omega$

Yalnız S_1 kapalı, V=25 V iken ölçülen değer: $V_{pos} = 2{,}43477\ V$

Yalnız S_2 kapalı, V=25 V iken ölçülen değer: $V_{neg} = 2{,}52801\ V$

Denklem (4.6)'ya göre: $V_a = 17{,}8934\ V$,

Denklem (4.9)'a göre: $V_b - 4{,}10971\ V$'ye eşittir.

Denklem (4.10) ve (4.11)'e göre:

$$R_p = 802\ k\Omega\ ,$$

$$R_n = 201\ k\Omega$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu devrede yapılan ölçümler sonucu hesaplanan yalıtım direnci değerleri ile bilenen değerler birbirlerine yakındır. Ölçülen değerler ve hesaplanan sonuçlar Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 25\mathrm{V}$).

Yalnız S_1 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	25 V
V_{pos}	2, 43477 V
V_{neg}	2,5 V
R_p	802 $k\Omega$

Tablo 5.6: Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 25\mathrm{V}$).

Yalnız S_2 kapalı	Beklenen Değer
HV_{bat}	25 V
V_{pos}	2,5 V
V_{neg}	2, 52801 V
R_n	201 $k\Omega$

Yalnız S_1 kapalı, V=20 V iken ölçülen değer: $V_{pos} = 2.44974\ V$

Yalnız S_2 kapalı, V=20 V iken ölçülen değer: $V_{neg} = 2.52433\ V$

Denklem (4.6)'ya göre: $V_a = 14.362\ V$,

Denklem (4.9)'a göre: $V_b = -3.24264\ V$'ye eşittir.

Denklem (4.10) ve (4.11)'e göre:

$$R_p = 798\ k\Omega\ ,$$

$$R_n = 197\ k\Omega$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu devrede yapılan ölçümler sonucu hesaplanan yalıtım direnci değerleri ile bilenen değerler birbirlerine yakındır. Ölçülen değerler ve hesaplanan sonuçlar Tablo 5.7 ve Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.7: Yalnız S_1 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 20\mathrm{V}$).

Yalnız S_1 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	20 V
V_{pos}	2,44974 V
V_{neg}	2,5 V
R_p	798 $k\Omega$

Tablo 5.8: Yalnız S_2 kapalı iken ölçülen ve hesaplanan değerler($\mathrm{HV_{bat}} = 20\mathrm{V}$).

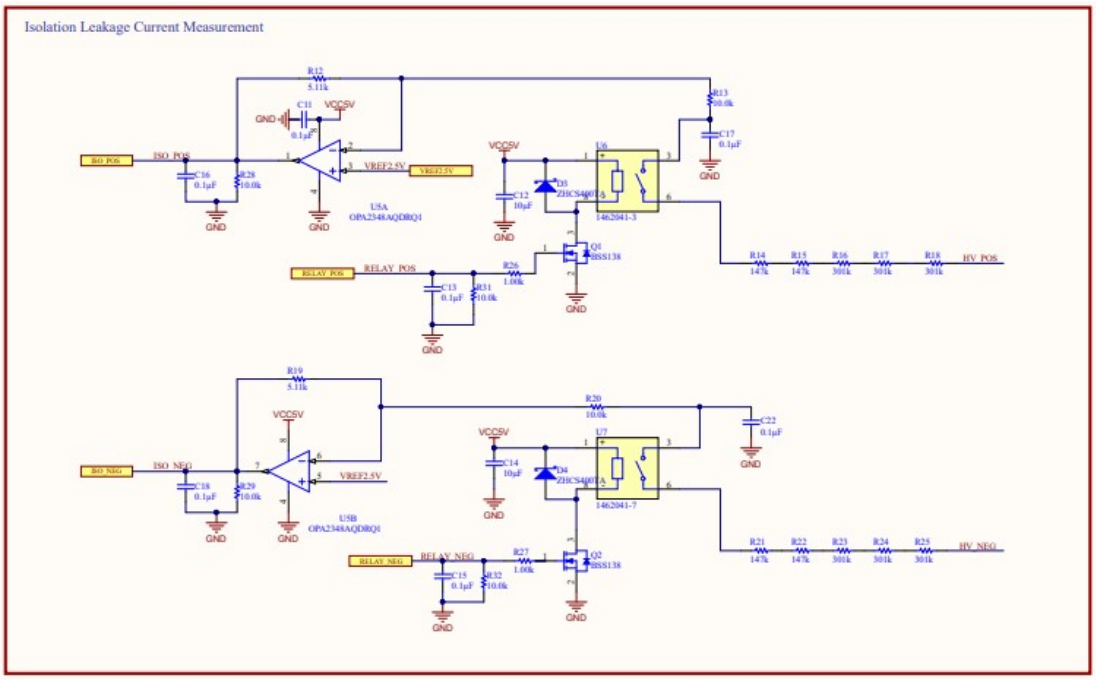
Yalnız S_2 kapalı	Bulunan Değer
HV_{bat}	20 V
V_{pos}	2,5 V
V_{neg}	2,52433 V
R_n	197 $k\Omega$

Bu devre pozitif ve negatif yalıtım dirençlerini hesaplamak için tasarlanmıştır. Tasarlanan devreden alınan ölçümler ve yapılan hesaplamalar sonucunda devrenin istenilen sonucu karşılayabildiği gözlemlenmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalar ve deneysel hesaplamalar sonucunda devre %1 ile %3 arasında bir hata ile çalışmaktadır. Devrenin devamında eklenecek olan genişletilmiş kalman filtresinin sonuçları daha iyi hale getirerek hatayı indirmesi beklenmektedir.

5.2. Şematik Modelleme

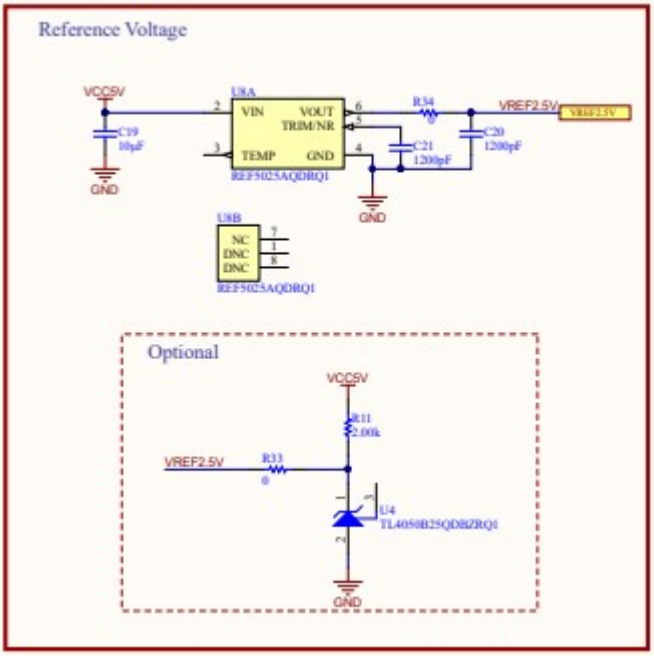
Elektrikli araçlar da araç şasisi ve batarya paketi arasındaki yalıtım direnci tespit sistemi için devre tasarlanmış ve her bir bölüm için ayrı ayrı şematik çizilmiştir.

Şekil 5.4'de bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi ve bataryanın negatif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi verilmiştir. Bu devrenin amacı bataryanın pozitif ve negatif terminaline bağlı izolasyon dirençlerini hesaplamak için gerekli alan ölçümleri almaktır. Ölçülen ISO_POS ve ISO_NEG gerilim değerleri Denklem (4.6), Denklem (4.7), Denklem (4.8) ve Denklem (4.9)'da kullanılarak pozitif ve negatif yalıtım direnci hesaplamaları yapılmıştır.



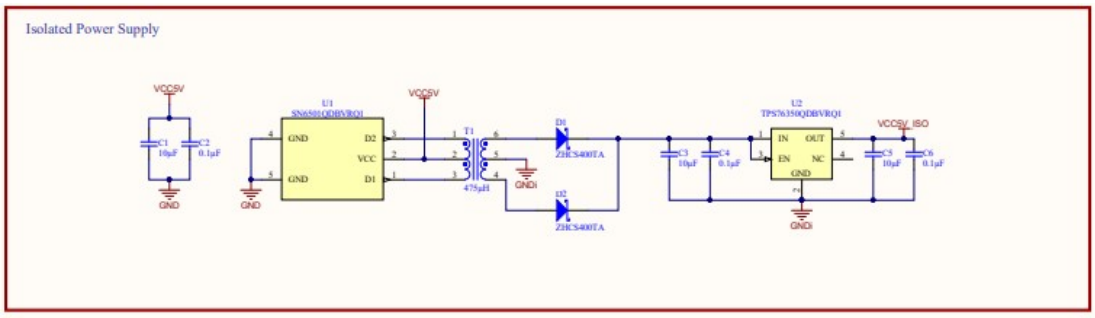
Şekil 5.4: Bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi ve bataryanın negatif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi.

Şekil 5.5'de tasarlanan referans gerilim devresi verilmiştir.



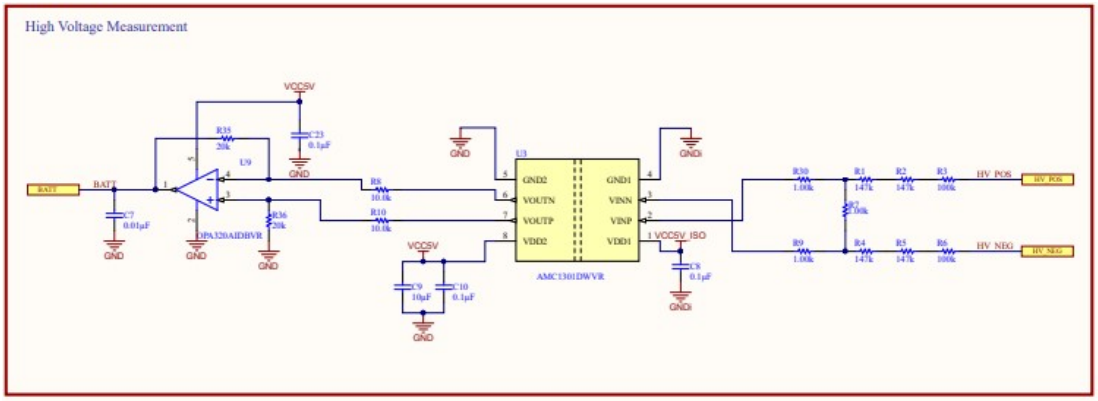
Şekil 5.5: Tasarlanan referans gerilim devresi.

Şekil 5.6’da izole edilmiş besleme devresi verilmiştir.



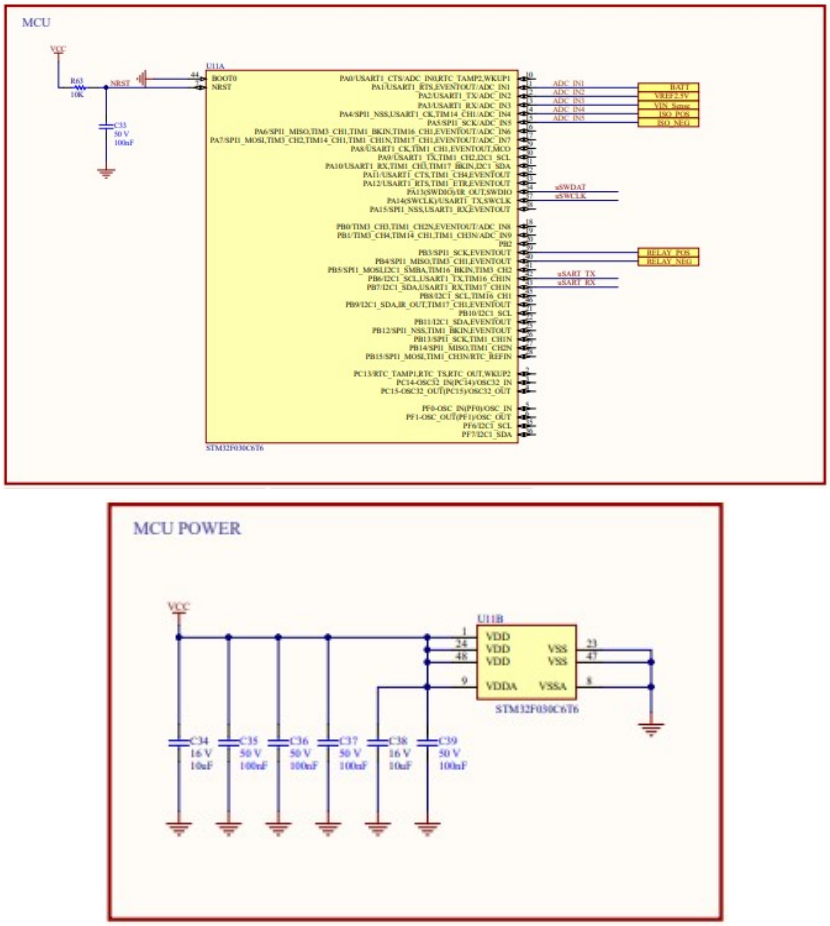
Şekil 5.6: İzole edilmiş besleme devresi.

Şekil 5.7’de ise yüksek gerilim ölçüm devresi verilmiştir. Bu devre bataryanın pozitif ve negatif terminallerine düşen gerilimi anlık olarak ölçmek için tasarlanmıştır. İzolasyon dirençlerini hesaplamak için kullanılan denklemlerde bu gerilim değerlerine ihtiyaç vardır.



Şekil 5.7: Yüksek gerilim ölçüm devresi.

Şekil 5.8’de pozitif ve negatif yalıtım direncinin hesaplanmasında kullanılan mikroişlemci şematiği verilmiştir.



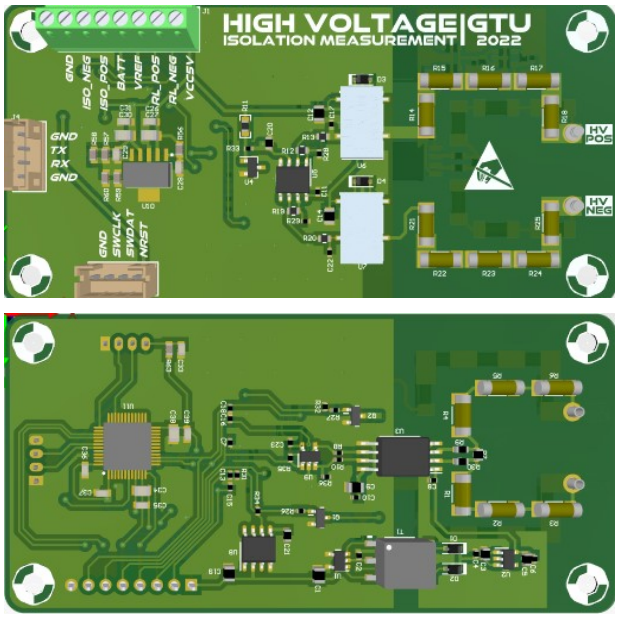
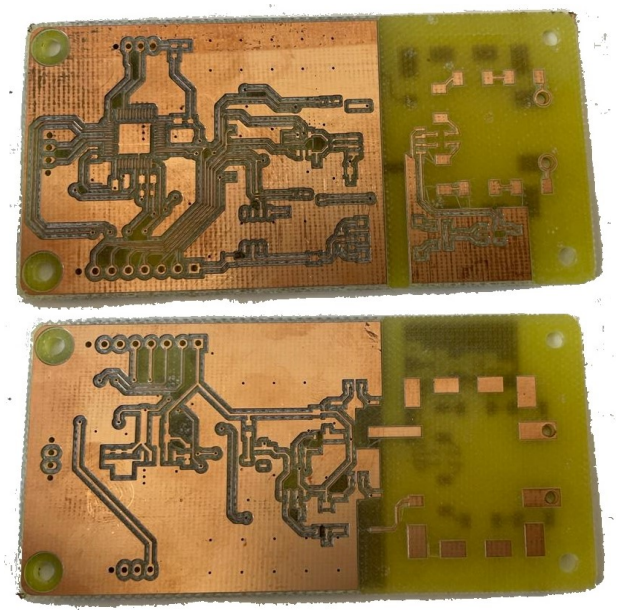
Şekil 5.8: Mikroişlemci şematiği.

Bu projede amaç, ölçüm devresinden alınan gerilim değerlerinin adc yardımıyla alınarak mikroişlemci tarafından gerekli hesaplamaların yapılması ve gürültüden temizlenerek, pozitif ve negatif yalıtım dirençlerinin tespit edilmesidir.

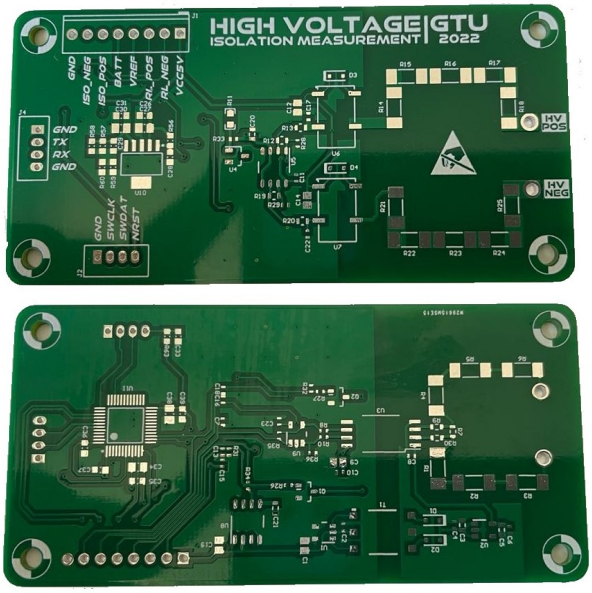
5.3. PCB Modelleme

Elektrikli araçlar da araç şasisi ve batarya paketi arasındaki yalıtım direnci tespit sistemi için devre tasarlanmış ve her bir bölüm için 5.2 şematik modelleme kısmında şematik çizilmiştir. Çizilen bu şematik için devre gerçeklemesi amacıyla PCB tasarımı yapılmış ve bu tasarım aşamalarına ait görseller Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9: Bataryanın pozitif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm ve bataryanın negatif terminali ile şasi topraklaması arasındaki yalıtım direnci ölçüm devresi PCB tasarımı aşamaları.

PCB Tasarım Aşamaları	
Altium PCB Tasarım Aşamasında iken PCB 3D Görüntüsü	
Prototip PCB Üretimi	

Tablo 5.9: Devam.

Fabrikasyon PCB Üretimi	

6. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Elektrikli araçlar için büyük önem taşıyan yolcu ve cihaz güvenliği konusunda yapılan bu çalışmada, yalıtım direnci tespit edilmesi amacıyla bir devre tasarlanmış ve bu devrenin deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım, pozitif ve negatif yalıtım dirençlerini hesaplamak için ölçüm devresi, bu devreden alınan sonuçların gürültüden temizlenmesi ve yüksek doğruluk için genişletilmiş kalman filtresi ve alınan ve hesaplanan sonuçları online izlemek için tasarlanan mikroişlemci devresinden oluşmaktadır. Ayrıca bataryanın pozitif ve negatif terminalinde bulunan yüksek gerilimin gerçek zamanlı tespiti için yüksek gerilim ölçüm devresi tasarlanmıştır.

Öncelikle pozitif ve negatif yalıtım direncini tespit etmek için kullanılan yöntemler incelenmiş ve bu yöntemler içinden bu çalışmaya en uygunu seçilmiştir. Dengesiz köprü yalıtım algılama yöntemi kullanılarak devre tasarımı yapılmış ve yalıtım dirençlerini hesaplamak için gerekli ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler Ltspice programında çizilen devreden de elde edilmiştir. Ancak yapılacak hesaplamalar için batarya paketi üzerindeki yüksek gerilimin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla yüksek gerilim ölçüm devresi tasarımı yapılmıştır. Bu devre ile batarya paketi üzerindeki yüksek gerilim anlık olarak ölçülmektedir. Ölçülen bu değerler yalıtım direnci tespit hesaplamalarında kullanılmaktadır. Alınan ölçümlerle yapılan hesaplamalar doğrultusunda devre tasarımı tamamlanmıştır.

İkinci olarak, tasarlanan yalıtım tespit devresinden alınan sonuçların doğruluğu ve gürültülerden kurtulması adına filtre çeşitleri incelenmiş ve genişletilmiş kalman filtresi uygun görülmüştür. Bu filtre için matematiksel model oluşturulmuştur.

Son olarak, yapılan ölçümler aracılığıyla elde edilen değerlerin, analog-dijital dönüştürücü ile mikroişlemciye aktarılması ve gerekli hesaplamaların yapılarak pozitif ve negatif yalıtım dirençlerinin elde edilmesi için mikroişlemci şematiği oluşturulmuştur. Bu şematikte amaç, adc ile alınan ölçümün mikroişlemci ile hesaplanarak pozitif ve negatif direnç değerlerinin anlık tespitidir.

Elektrikli araçlar için pozitif ve negatif yalıtım dirençlerindeki anlık değişimleri takip etmek büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, elektrikli araçlarda araç şasisi ile yüksek gerilime sahip batarya paketi arasında bulunan pozitif ve negatif yalıtım dirençlerini gerçek zamanlı olarak tespit etmektir. Yapılan deneyler ve simülasyonlar sonucunda hesaplanan anlık pozitif ve negatif direnç değerleri için %1 ile 12 arasında bir hata mevcuttur. Devre gerçeklemesi sırasında eklenecek olan genişletilmiş kalman filtresi ile mevcut hatada iyileşme beklenmektedir.

Bu çalışmada hedeflenen amaç elde edilmiş, pozitif ve negatif yalıtım dirençleri tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Web 1, (2021), https://www.pusholder.com/tarihte-ilk-elektrikli-otomobil-hikayesi, (Erişim Tarihi: 14/08/2021).

[2] Web 2, (2021), https://yenielektrikliaraba.com/elektrikli-araba-calisma-prensibi, (Erişim Tarihi: 25/08/2021).

[3] Web 3, (2021), https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/system/files/makale/28_elektrikli.pdf, (Erişim Tarihi: 25/08/2021).

[4] Web 4, (2021), https://avesis.istanbul.edu.tr/yayin/a7ab3019-52d7-4ded-bf41-2868ec838c9e/elektrikli-araclar-icin-batarya-paketi-ve-batarya-yonetim-sisteminin-gerceklenmesi, (Erişim Tarihi: 15/10/2021).

[5] Yong J. Y., (2015), "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 365-385.

[6] Potdevin H., (2009), "Insulation monitoring in high voltage systems for hybrid and electric vehicles", Hardware High Voltage Safety, ATZelektronik worldwide, 4, 6, 28-31.

[7] Liu Y. C., Lin C. Y., (2012), "Insulation fault detection circuit for ungrounded dc power supply systems" , in Proc. IEEE Sensors, 1-4, Taipei, ROC, Oct. 28-31.

[8] Li Q., Li R., Ji K., Dai W., (2015), "Kalman filter and its application", In Proceedings of the 2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), 74–77, Tianjin, China, Nov 1–3.

[9] Jifei D., Trillion Q. Z., Yian Y., Hongyan Z., Yangbin Z., Hong L., (2019), "Insulation Monitoring Method for DC Systems with Ground Capacitance in Electric Vehicles", Applied Sciences, 9, 2607, 1-16.

[10] Zhenbin C., Weiya C., Xiangyu C., Huimin Q., Hao L., Na Q., (2021), "New Method of Insulation Detection on Electric Vehicles Based on a Variable Forgetting Factor Recursive Least Squares Algorithm", IEEE Access, 73590-73607.

[11] Luo Z. J., Ren X. D., Yang H., Cai G. L., Qing C., Luo Y. L., (2015), "Research on the insulation monitoring devices for DC power system based on the detection technology of DC bus to grounding capacitance", *2nd International Forum on Electrical Engineering and Automation*, 117-120, Guangzhou, China, Dec. 26-27.

[12] İbrahim Ç., (2012), “Kalman Filtresi ve Programlama” , Fen ve Teknoloji BilgiPaylaşımı, 2012-1, 1-6.

[13] Chuanxue S., Yulong S., Shixin S., Silun P., Fang Z., Cheng C., Da W., (2017), “Insulation Resistance Monitoring Algorithm for Battery Pack in Electric Vehicle Based on Extended Kalman Filtering” Energies 2017, 10, 714, 1-13.

[14] Taku N., Hisaichi S., Ryoji T., (2019), “Extended-Kalman-filter-based dynamic modedecomposition for simultaneous systemidentification and denoising”,Plos one 14, 2, 14–22.

[15] Ko N. Y., Kim T. G., (2012), “Comparison of Kalman filter and particle filter used for localization of an underwater vehicle” In Proceedings of the IEEE 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 350–352, Daejeon, Korea, Nov. 26–28.

[16] Julier S. J., Uhlmann J. K., (1997), “New extension of the Kalman filter to nonlinear systems”, In Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition VI; International Society for Optics and Photonics, 182–193, Washington, DC, USA.

[17] Web 5, (2022), https://www.ti.com/lit/an/tida035/tida035.pdf?ts=1619353698927&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-01513, (Erişim Tarihi: 09/01/2022).

ÖZGEÇMİŞ

Seyhan Kaya 2012 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2017 yılında bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı.

EKLER

Ek A: Genişletilmiş Kalman Filtresi Yazılımı

```
#include "FastKalmanFilter.h"

// PIN Mapping
int HIGH_VOLTAGE_MEAS = A1;
int VREF = A2;
int ISO_NEG = A3;
int ISO_POS = A4;
int RELAY_POS = 3;
int RELAY_NEG = 4;

// Fast Kalman Filter Parameters
double Qparameter = 0.1;      // Covariance Process Noise Coefficient
double Rparameter = 10;       // Covariance Measurement Noise Coefficient
double samplingPeriod = 0.01; // Fixed Sampling time of System
double PNStd = 0.04;          // Initial Process Noise Deviation
double MNstd = 0.04;          // Initial Measurement Noise Deviation
double initialValue = 25;     // Known or estimated Initial Value

// Other Parameters
long tSeconds = 0;
double temp = 0;
int iso_pos_analog_value = 0;
int iso_neg_analog_value = 0;
int iso_pos_filtered_value = 0;
int iso_neg_filtered_value = 0;
int high_voltage_measurement_at_pos_analog_value = 0;
int high_voltage_measurement_at_neg_analog_value = 0;

int vref_analog_value = 0;
int Iso_Resistor_Rps = 1180000;
int Iso_Resistor_Rns = 1180000;
int Iso_Resistor_Rs1 = 5000;
int Iso_Resistor_Rs2 = 5000;
int Iso_Resistor_Va = 0;
int Iso_Resistor_Vb = 0;
int Iso_Resistor_Rp = 0;
int Iso_Resistor_Rn = 0;

FastKalmanFilter SensorFilter1(Qparameter, Rparameter, samplingPeriod, PNStd, MNstd, initialValue);
```

Şekil A1.1: Main.cpp Dosyası.

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(ISO_POS, INPUT);
  pinMode(ISO_NEG, INPUT);
  pinMode(HIGH_VOLTAGE_MEAS, INPUT);
  pinMode(RELAY_POS, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_NEG, OUTPUT);
  pinMode(VREF, INPUT);

  digitalWrite(RELAY_POS, LOW);
  digitalWrite(RELAY_NEG, LOW);
}

void loop()
{
  Iso_Resistor_Va = 0;
  Iso_Resistor_Vb = 0;
  Iso_Resistor_Rp = 0;
  Iso_Resistor_Rn = 0;
  iso_pos_analog_value = 0;
  iso_neg_analog_value = 0;
  iso_pos_filtered_value = 0;
  iso_neg_filtered_value = 0;
  high_voltage_measurement_at_pos_analog_value = 0;
  high_voltage_measurement_at_neg_analog_value = 0;

  // HIGH VOLTAGE Meas at POS Relay
  digitalWrite(RELAY_POS, HIGH);
  high_voltage_measurement_at_pos_analog_value = analogRead(HIGH_VOLTAGE_MEAS);
  temp = (double)high_voltage_measurement_at_pos_analog_value / 1024;
  temp = temp * 5;
  Serial.println("HIGH VOLTAGE MEASUREMENT at POS RELAY: " + String(temp));
  digitalWrite(RELAY_POS, LOW);
```

Şekil A1.1: Devam.

```
delay(100);

// HIGH VOLTAGE Meas at NEG Relay
digitalWrite(RELAY_NEG, HIGH);
high_voltage_measurement_at_neg_analog_value = analogRead(HIGH_VOLTAGE_MEAS);
temp = (double)high_voltage_measurement_at_neg_analog_value / 1024;
temp = temp * 5;
Serial.println("HIGH VOLTAGE MEASUREMENT at NEG RELAY: " + String(temp));
digitalWrite(RELAY_NEG, LOW);

delay(100);

// VREF Meas
vref_analog_value = analogRead(VREF);
temp = (double)vref_analog_value / 1024;
temp = temp * 5;
Serial.println("VREF: " +  String(temp));

delay(100);

// ISO POS Meas
tSeconds = millis();
digitalWrite(RELAY_POS, HIGH);
iso_pos_analog_value = analogRead(ISO_POS);
temp = (double)iso_pos_analog_value / 1024;
temp = temp * 5;
temp = temp - 0.5;
temp = temp * 100;
iso_pos_filtered_value = SensorFilter1.GetEstimation(temp, 0.0);
Serial.println("ISO POS: " + String(tSeconds) + " " + String(temp) + " "
  + String(iso_pos_filtered_value));
digitalWrite(RELAY_POS, LOW);

delay(100);
```

Şekil A1.1: Devam.

```
  // ISO NEG Meas
  tSeconds = millis();
  digitalWrite(RELAY_NEG, HIGH);
  iso_neg_analog_value = analogRead(ISO_NEG);
  temp = (double)iso_neg_analog_value / 1024;
  temp = temp * 5;
  temp = temp - 0.5;
  temp = temp * 100;
  iso_neg_filtered_value = SensorFilter1.GetEstimation(temp, 0.0);
  Serial.println("ISO NEG: " + String(tSeconds) + " " + String(temp) + " "
    + String(iso_neg_filtered_value));
  digitalWrite(RELAY_NEG, LOW);

  delay(100);

  Iso_Resistor_Va = VREF * (1 + Iso_Resistor_Rps / Iso_Resistor_Rs1) - ISO_POS
  * Iso_Resistor_Rps / Iso_Resistor_Rs1;

  Iso_Resistor_Vb = VREF * (1 + Iso_Resistor_Rns / Iso_Resistor_Rs2) - ISO_NEG
  * Iso_Resistor_Rns / Iso_Resistor_Rs2;

  Iso_Resistor_Rp = (high_voltage_measurement_at_pos_analog_value
  * high_voltage_measurement_at_neg_analog_value * Iso_Resistor_Rps
  + high_voltage_measurement_at_pos_analog_value * Iso_Resistor_Rps
  * Iso_Resistor_Vb - high_voltage_measurement_at_neg_analog_value
  * Iso_Resistor_Rps * Iso_Resistor_Va) / (high_voltage_measurement_at_pos_analog_value
  * VREF - high_voltage_measurement_at_pos_analog_value * Iso_Resistor_Vb + VREF
  * Iso_Resistor_Vb - VREF * Iso_Resistor_Va);

  Iso_Resistor_Rn = -(high_voltage_measurement_at_pos_analog_value
  * high_voltage_measurement_at_neg_analog_value * Iso_Resistor_Rps
  + high_voltage_measurement_at_pos_analog_value * Iso_Resistor_Rps
  * Iso_Resistor_Vb - high_voltage_measurement_at_neg_analog_value
  * Iso_Resistor_Rps * Iso_Resistor_Va) / (high_voltage_measurement_at_neg_analog_value
  * VREF - high_voltage_measurement_at_neg_analog_value * Iso_Resistor_Va + VREF
  * Iso_Resistor_Vb - VREF * Iso_Resistor_Va);

  Serial.println("POS ISOLATION RESISTOR: " + String(Iso_Resistor_Rp));
  Serial.println("NEG ISOLATION RESISTOR: " + String(Iso_Resistor_Rn));

  delay(100);
}
```

Şekil A1.1: Devam.

```
#include "FastKalmanFilter.h"

FastKalmanFilter::FastKalmanFilter()
{
    this->Bparam = 0.001;
    this->Fparam = 1;
    this->Qparam = 0.0001;
    this->Hparam = 1;
    this->Rparam = 0.1;
}

FastKalmanFilter::FastKalmanFilter(double Qparam, double Rparam,
  double samplingPeriod, double PNStd, double MNstd, double initialValue)
{
    this->Fparam = 1;
    this->Hparam = 1;
    this->Y = 0.0;
    this->Bparam = samplingPeriod;
    this->Qparam = Qparam * PNStd * PNStd;
    this->Rparam = Rparam * MNstd * MNstd;
    double PPresent = MNstd * MNstd;
    // system dynamic parameters
    this->XHatPresent = initialValue;
    this->SPresent = MNstd * MNstd;
}

double FastKalmanFilter::GetEstimation(double measuredData, double FinputValue)
{
    // state
    this->XHatForward = this->Fparam * this->XHatPresent + this->Bparam * FinputValue;

    // state uncertainty
    this->PForward = this->Fparam * this->PPresent * this->Fparam + this->Qparam;

    // update
    this->Y = measuredData - this->Hparam * this->XHatForward;

    // innovation
    this->SForward = this->Hparam * this->PForward * this->Hparam + this->Rparam;

    // coefficient
    this->Kparam = this->PForward * this->Hparam * 1.0 / this->SForward;
    this->XHatForward = this->XHatForward + this->Kparam * this->Y;
    this->PForward = (1.0 - this->Kparam * this->Hparam) * this->PForward;

    // update previous values
    this->PPresent = this->PForward;
    this->XHatPresent = this->XHatForward;
    this->SPresent = this->SForward;

    return this->XHatForward;
}
```

Şekil A1.2: FastKalmanFilter.cpp Dosyası.

```
#ifndef FastKalmanFilter_h
#define FastKalmanFilter_h

class FastKalmanFilter
{
private:

    // system parameters
    double Bparam;
    double Fparam;
    double Qparam;
    double Hparam;
    double Rparam;
    double Kparam;

    // system dynamic parameters
    double XHatPresent;
    double XHatForward;
    double SPresent;
    double SForward;
    double PPresent;
    double PForward;
    double Y;

public:
    FastKalmanFilter();
    FastKalmanFilter(double Qparam, double Rparam, double samplingPeriod, double PNStd,
      double MNstd, double initialValue);

    double GetEstimation(double measuredData, double FinputValue);
};
#endif
```

Şekil A1.3: FastKalmanFilter.h Dosyası.