KURŞUN-ASİT BATARYALARIN AKTİF HÜCRE DENGELENMESİYLE DENİZALTILARIN SNORKEL YAPMADAN SUALTINDA KALIŞ SÜRELERİNİN ARTTIRILMASI

Cihan Atban
201405102
Orcid: 0000-0001-9950-8864

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Doç. Dr. Nevin Taşaltın

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Eylül, 2021



JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Bu belge, Yükseköğretim Kurulu tarafından 19.01.2021 tarihli "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" ile bildirilen 6689 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında gizlenmiştir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

Bu belge, Yükseköğretim Kurulu tarafından 19.01.2021 tarihli "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" ile bildirilen 6689 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında gizlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğum tez çalışmasının her aşamasında güven, yardım ve katkılarıyla bana destek olan tez danışmanım değerli Doç.Dr. Nevin Taşaltın'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, hayatımın her anında yanımda olan ve bana destek veren eşim Dilara Atban ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Cihan Atban
Ağustos, 2021

ÖZ

KURŞUN-ASİT BATARYALARIN AKTİF HÜCRE DENGELENMESİYLE DENİZALTILARIN SUALTINDA KALIŞ SÜRELERİNİN ARTIRILMASI

Cihan Atban
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Doç. Dr. Nevin Taşaltın
Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021

Çağdaş donanmaların en önemli unsurlarından olan denizaltılar nükleer veya konvansiyonel tahrik sistemleri olmak üzere iki farklı tahrik sistemine sahiptir. Nükleer denizaltılarda nükleer reaktör tarafından üretilen güç sonsuz kabul edilir ve gerekli enerji ihtiyacı sürekli karşılanır. Bu durum nükleer denizaltıların çok uzun su üstüne çıkmadan seyir yapmasına imkân sağlar. Nükleer tahrik sistemine sahip olmayan konvansiyonel denizaltıların tahrik sistemleri ise dizel makinalar ve bataryalardan oluşur. Konvansiyonel denizaltılar dizel makinaları ile bataryalarını şarj etmekte olup sualtında kalış süreleri bataryalarının kapasiteleri ile doğrudan bağlantılıdır. Konvansiyonel denizaltılar bataryaların şarj işlemi için dizel jeneratörlerini devreye almak zorunda olduğundan oksijene ihtiyaç duymakta ve bu sebepten dolayı satıha çıkmak zorunda kalmaktadır. Bu durum denizaltıların ana amacı olan gizlilik ilkesiyle çelişmektedir. Her ne kadar yeni teknoloji olan havadan bağımsız tahrik sistemleri ile su altında kalış süreleri eskiye nazaran artırılmış olsa bile bataryalar konvansiyonel denizaltılar için halen kritik öneme sahiptir.

Denizaltılarda maliyet, ömür, verimlilik ve güvenlik hususları doğrultusunda genellikle kurşun asit bataryalar kullanılır. Bu tezde söz konusu batarya hücreleri incelenmiş olup öncelik ile bu bataryaların voltaj, akım ve sıcaklarının eş zamanlı takibi amaçlı batarya yönetim sistemleri araştırılmış ve batarya yönetim sisteminin bir parçası olan dengeleme topolojileri incelenerek 10 seri bağlı adet kurşun asit bataryanın aktif dengeleme metodu yardımıyla kapasitelerinin denizaltıların oksijene ihtiyaç duymadan sualtında daha uzun seyir yapabilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Denizaltı, Batarya, Aktif Dengeleme, Kurşun Asit.

ABSTRACT

ACTİVE BALANCİNG OF LEAD-ACİD CELLS TO İNCREASE SUBMARİNE'S UNDERWATER ENDURANCE

Cihan Atban
Master Thesis
Department of Electrical-Electronical Engineering
Electrical -Electronics Engineering Programme
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nevin Taşaltın
Maltepe University Graduate School, 2021

Submarines, one of the most important elements of modern navies, have two different propulsion systems: nuclear and conventional propulsion systems. In nuclear submarines, the power produced by the nuclear reactor is considered infinite. This allows the submarines to sail for long time without floating above the water.The propulsion system of conventional submarines, which do not have a nuclear propulsion system, consists of diesel engines and batteries. Conventional submarines charge their batteries with diesel engines and their underwater endurance is directly related to the capacity of their batteries. Conventional submarines need oxygen in order to activate their diesel generators for the charging process of the batteries, and for this reason they have to go to the surface. This situation contradicts the principle of secrecy, which is the main purpose of submarines. Although the duration of submersion has been increased with the new technology air-independent propulsion systems, batteries are still of critical importance for conventional submarines.

Lead acid batteries are generally used in submarines due to cost, life, efficiency and safety considerations. In this thesis, the mentioned battery cells were examined, first of all, battery management systems for simultaneous monitoring of the voltage, current and temperature of these batteries were investigated, and the balancing topologies, which are a part of the battery management system, were examined, and the capacity of 10 serially connected lead acid batteries with the help of active balancing method was achieved by submarines without needing oxygen. It is aimed to be able to cruise longer underwater.

Keywords: Submarine, Battery, Active Balancing, Lead Acid.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZ v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ ix
KISALTMALAR x
ÖZGEÇMİŞ xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1.Kurşun Asit Bataryalar 1
1.2.Lityum İyon Bataryalar 4
BÖLÜM 2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ 5
BÖLÜM 3. BATARYA DENGELEME SİSTEMLERİ 9
3.1.Pasif Dengeleme Yöntemleri 10
3.1.1 Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi 10
3.1.2 Şönt Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi 11
3.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri 12
3.2.1 Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme 12
3.2.2 Endüktans Temelli Aktif Dengeleme 13
3.2.3 Dönüştürücü Temelli Aktif Dengeleme 16
BÖLÜM 4. TASARIM 21
BÖLÜM 5. SONUÇLAR 24
KAYNAKÇA 29

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Denizaltılarda Kullanılan Standart Kurşun Asit Bataryaların Kesit Görünümü ...2
Şekil 2. Kurşun Asit Bataryaların Şarj İşlemi Simulink Modellemesi ...3
Şekil 3. Kurşun Asit Bataryaların Deşarj İşlemi Simulink Modellemesi ...3
Şekil 4. Kurşun Asit Bataryaların Şarj ve Deşarj İşlemleri Esnasında Gerilim ve SoC'de Meydana Gelen Değişim ...3
Şekil 5. Denizaltı Batarya Yönetim Sistemi Blok Şeması ...6
Şekil 6. Örnek Denizaltı Batarya Bağlantı Şeması ...7
Şekil 7. 10 Adet Batarya için Batarya Yönetim Sistemi Ekranı Örneği ...8
Şekil 8. Batarya Dengeleme Yöntemleri [5] ...9
Şekil 9. Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi Topolojisi ...10
Şekil 10. Şönt Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi Topolojisi ...11
Şekil 11. Pasif Dengeleme Yöntemi Akış Diyagramı ...11
Şekil 12. Tek Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi ...12
Şekil 13. Çift Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi ...13
Şekil 14. Çoklu Endüktans Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi ...14
Şekil 15. Tek Sarımlı Transformatör Temelli Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi ...15
Şekil 16. Çok Sarımlı Transformatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi ...16
Şekil 17. Tam Köprü Aktif Dengeleme Topolojisi ...17
Şekil 18. CUK Dönüştürücü Aktif Dengeleme Topolojisi ...17
Şekil 19. Düşürücü/Yükseltici Aktif Dengeleme Topolojisi ...18
Şekil 20. Yarı Rezonans Dönüştürücü Aktif Dengeleme Topolojisi ...19
Şekil 21. Matlab Simulink'te Tasarlanan Çok Sarımlı Transformatör Temelli Dönüştürücü ...21
Şekil 22. Tasarımın Akış Şeması ...22
Şekil 23. Dengeleme İşlemi Esnasında Voltaj Yakınsama Eğrileri ...25
Şekil 24. Tablo-2'de Sunulan Analiz Değerlerine Göre Denizaltıların Sualtında Kalış Süresi Oranı ...26
Şekil 25. Tablo-3'te Sunulan Analiz Değerlerine Göre Denizaltıların Sualtında Kalış Süresi Oranı ...27
Şekil 26. 2-20 Volt Arasında Değişen Bataryalar ile 2-3 Volt Arasında Değişen Bataryaların Dengeleme Sürelerinin Karşılaştırılması ...28

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Batarya Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması 20
Tablo 2. 2 ve 20 Volt Arası Dengeleme Öncesi ve Sonrası Özet Tablosu.....24
Tablo 3. 2 ve 3 Volt Arası Dengeleme Öncesi ve Sonrası Özet Tablosu.....24

KISALTMALAR

Ah	: Amper-Saat
mAh	: Mili amper-Saat
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
V	: Voltaj
I	: Akım
SoC	: Batarya Şarj Durumu
SoH	: Batarya Sağlık Durumu
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı
PWM	: Pulse Width Modulation
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
EMI	: Electromagnetic interference

ÖZGEÇMİŞ

Cihan Atban

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eğitim

Derece	*Yıl*	*Üniversite, Enstitü, Anabilim/Anasanat Dalı*
Y.Ls.	2021	Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Ls.	2011	Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği
Lise	2006	İzzet Baysal Anadolu Lisesi

İş/İstihdam

Yıl	*Görev*
2011	Elektronik Mühendisi-Gölcük Tersanesi K.lığı

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerjiyi kimyasal olarak depolayan ve gerektiği zaman bu kimyasal enerjiyi elektrik enerjisini çeviren cihazlara batarya denir. Denizaltılarda genellikle kurşun asit bataryalar kullanılmakla birlikte son yıllarda gelişen batarya teknolojine bağlı olarak Lityum İyon Bataryaların da kullanımına başlanmıştır [1].

Denizaltılar sualtında seyir yapar iken ana güç kaynakları bataryalar olup bu bataryaların sayısı enerji ihtiyacına bağlı olarak denizaltı dizayn safhasında belirlenmektedir. Sonrasında ise belirlenen miktar kadar batarya seri bağlanarak istenen güç sağlanır. Bu seri bağlı bataryalardan azami güç sağlayabilmek için ise bataryalar arasında hücre dengelemesinin yapılması kritik öneme haizdir. Hücre dengelemesi, seri bağlı her hücrenin kapasitesinin yani geriliminin diğer hücreler ile eşit miktara getirilmesidir. Hücre dengelemesinin yapılmadığı durumlarda, şarj işlemi esnasında kapasitesi en yüksek hücre en hızlı şarj olacağından şarj süresini o belirleyecek ve diğer hücrelerin kapasitelerinin tam olarak dolmasına engel olacaktır. Deşarj işlemi esnasında ise kapasitesi en düşük olan hücre en hızlı deşarj olacağından deşarj süresini o belirleyecek ve diğer hücrelerin kapasitelerinin tam olarak boşalmasına izin vermeyecektir.

Bu bölümde öncelikle Kurşun asit ve Lityum-İyon bataryaların yapısı hakkında bilgi verilecek, sonrasında ise Matlab Simulink kullanılarak her iki batarya modeli üzerinden şarj-deşarj grafikleri incelenecektir.

1.1. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryalar yeniden doldurulabilen ve genellikle otomobil, motosiklet, tıbbi cihazlar, yat ve kesintisiz güç kaynakları (UPS) gibi cihazlarda kullanılan bataryalardır. Kurşun asit bataryaların güvenilir ve aynı zamanda maliyetinin uygun olması sebebiyle kullanım alanlarından bir tanesi de denizaltılardır.

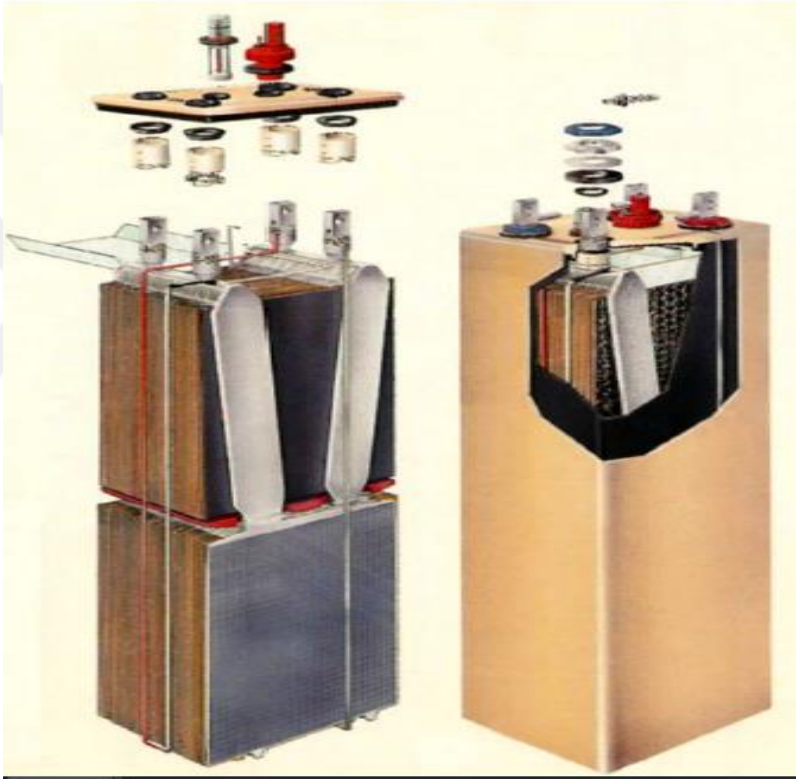
Kurşun asit bataryaların şarj ve deşarj işlemleri esnasında meydana gelen tersinebilir kimyasal reaksiyon aşağıda gösterilmiştir.

Deşarj

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2\,PbSO_4 + 2H_2O$$

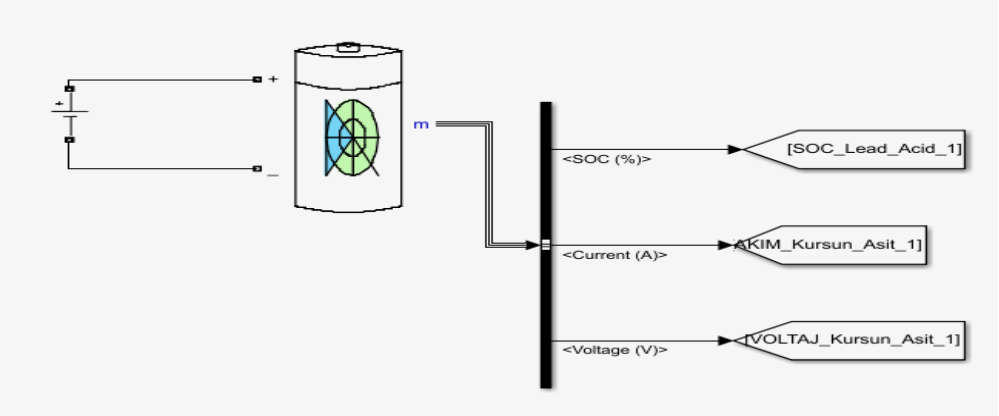
Şarj

Denizaltılarda kullanılan kurşun asit bataryaların kesit görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir.

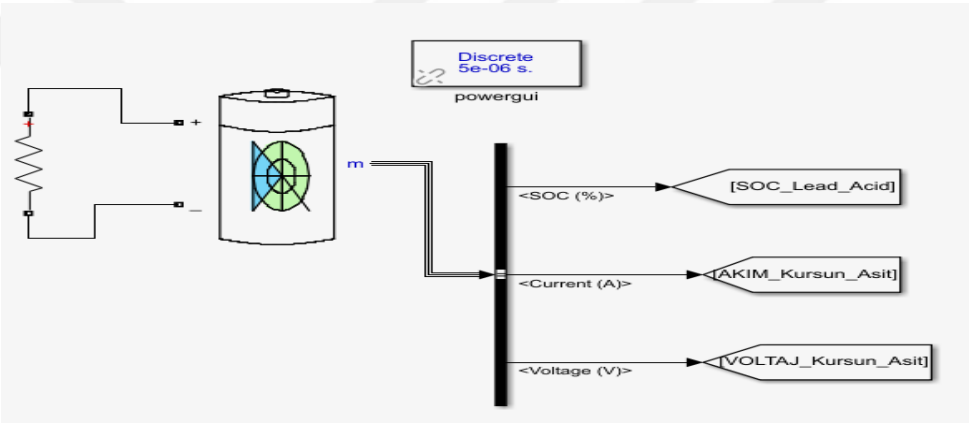


Şekil 1. Denizaltılarda Kullanılan Standart Kurşun Asit Bataryaların Kesit Görünümü

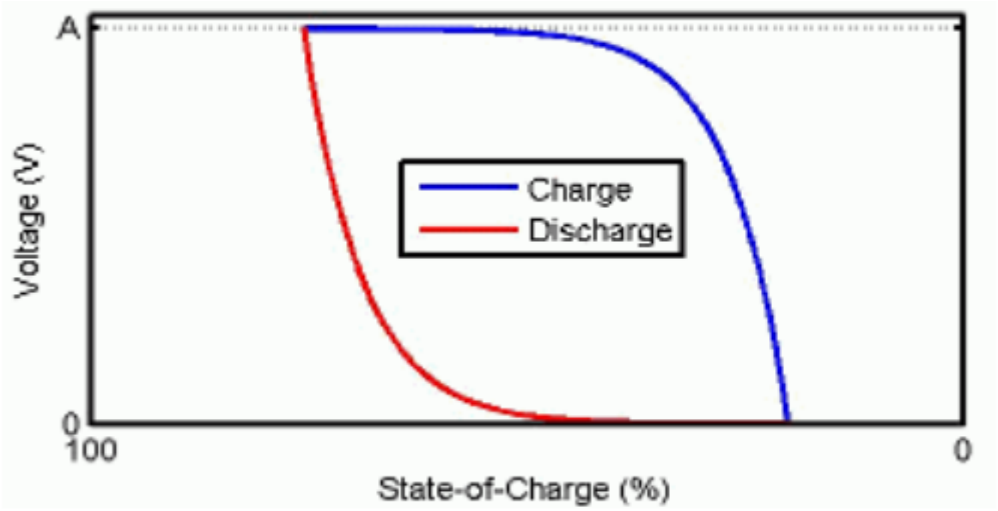
Kurşun asit bataryaların şarj ve deşarj işlemleri esnasında gerilim ve akımlarında meydana gelen değişim Matlab Simulink aracılığıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilen Simulink modelli kullanılarak simüle edilmiş ve kurşun asit bataryaların şarj ve deşarj işlemleri esnasında gerilim ve SoC'de (Batarya Şarj Durumu) meydana gelen değişim Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Kurşun Asit Bataryaların Şarj İşlemi Simulink Modellemesi



Şekil 3. Kurşun Asit Bataryaların Deşarj İşlemi Simulink Modellemesi



Şekil 4. Kurşun Asit Bataryaların Şarj ve Deşarj İşlemleri Esnasında Gerilim ve SoC'de Meydana Gelen Değişim

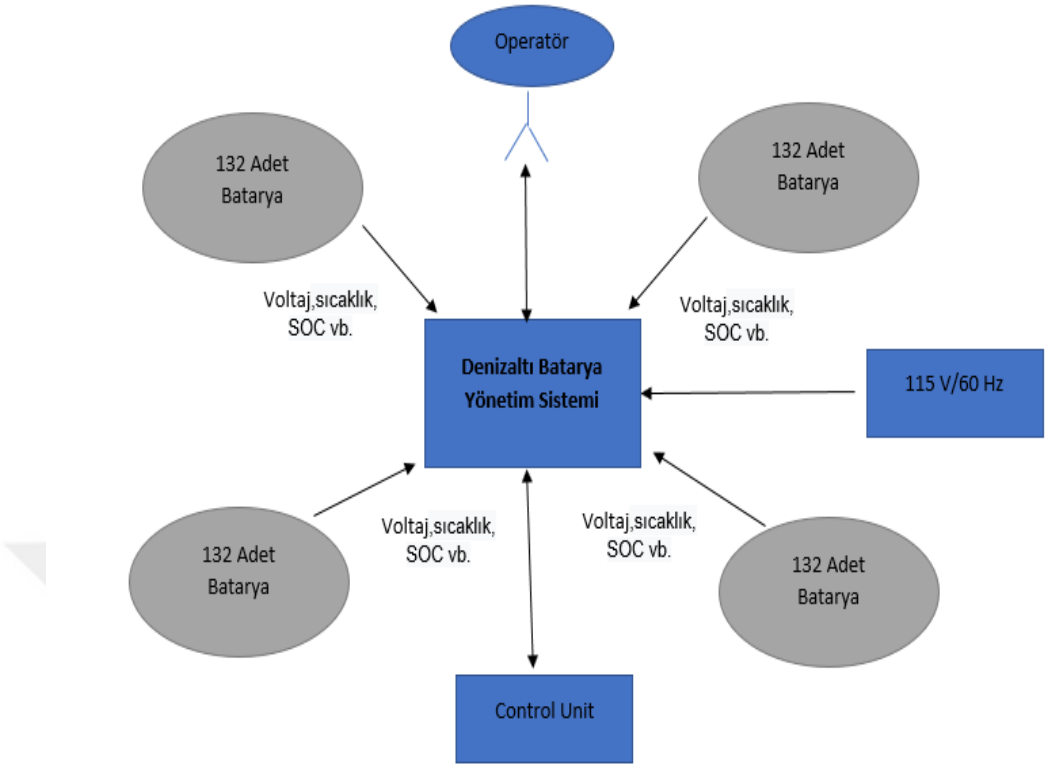
1.2. Lityum İyon Bataryalar

Lityum iyon bataryalar yeniden doldurulabilen ve genellikle elektronik cihazlarda kullanılan bataryalardır. Kapasiteleri Amper-Saat (Ah) ya da Miliamper-saat (mAh) ile gösterilir. Kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldıklarında ağırlık ve hacimsel olarak daha az yer kapladıkları gibi ayrıca enerji ve verimlilikleri daha yüksektir. İlave olarak kurşun asit bataryalara göre bakıma daha az ihtiyaç duyarlar. Tüm bu avantajlarına rağmen lityum iyon pillerin su ile temas etmesi durumunda yangın çıkarma eğilimi ve lityum iyon yangınlarının kolay kolay söndürülememesi gibi sebeplerden dolayı konvansiyonel denizaltılarda günümüze kadar tercih edilmemişlerdir. Ancak Japonların imal ettiği SORYU Sınıfı denizaltılarda kurşun asit bataryalar yerine lityum iyon bataryalar kullanıldığı bilinmekte olup bu güvenlik sorunlarının nasıl aşıldığı ise mevcut kaynaklar ile bilinmemektedir [1].

BÖLÜM 2. BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

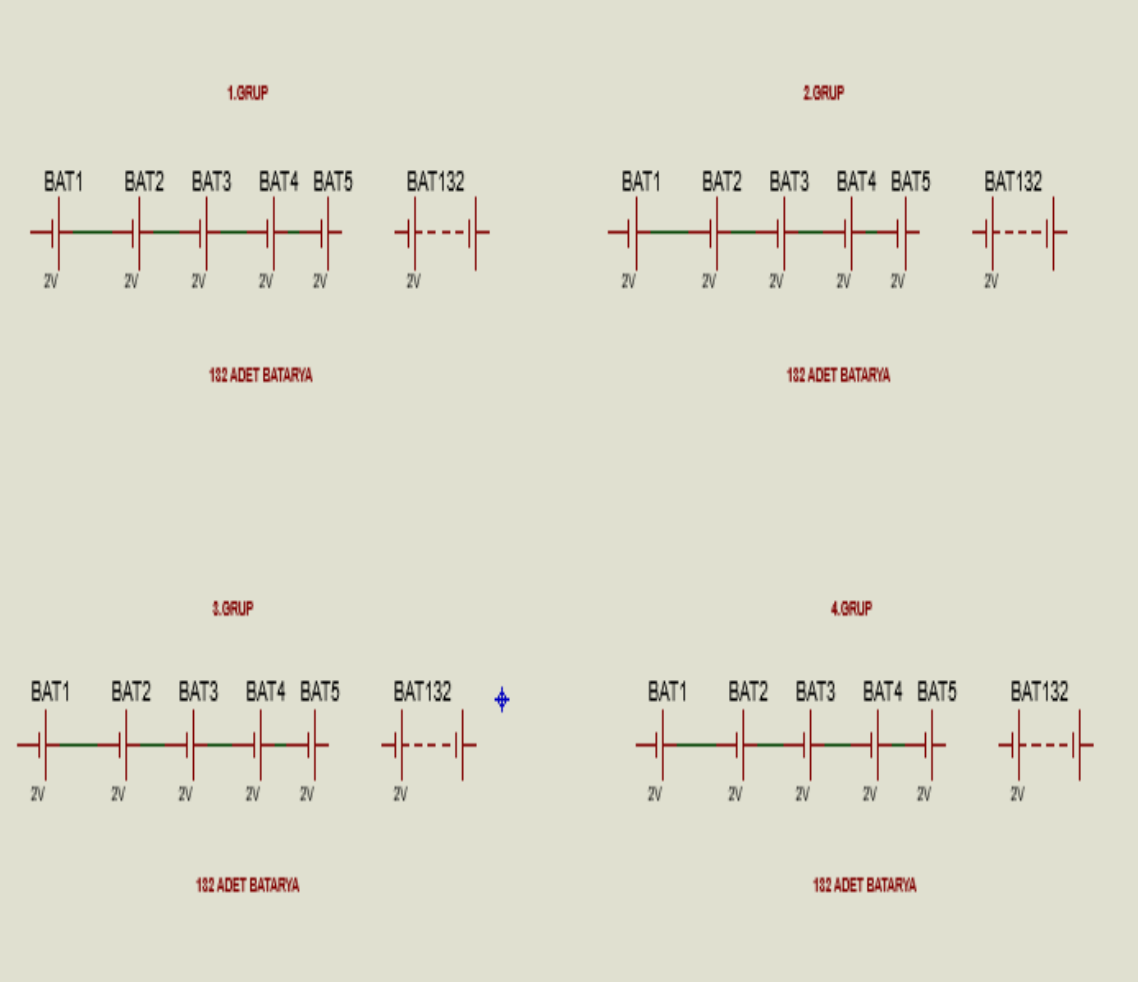
Batarya yönetim sistemi (BYS) bir veya daha fazla bataryadan oluşun batarya paketlerinin şarj veya deşarjları esnasında akım, gerilim, SOH, SOC, sıcaklık vb. kritik değerlerini sürekli ölçerek, anlık olarak operatöre sunan ayrıca bu değerlerin limit değerleri dışına çıktığında operatöre sesli ve yazılı olarak ikaz mesajı vererek otomatik olarak veya operatör tarafından bataryalara müdahale edilmesini sağlayan sistemlerdir. Batarya yönetim sistemleri sayesinde batarya ve diğer modülleri uygun şartlar (uygun sıcaklık ve uygun gerilim) altında çalıştırılarak verim ve ömürleri artırılır.

Ayrıca aşırı şarj kaynaklı fazla ısınmalar neticesinde meydana gelebilecek batarya bozunumları ve diğer güvenlik tehditlerinin de batarya yönetim sistemleri ile rahatlıkla önüne geçilebilir. Batarya yönetim sistemleri kullanım amaçlarına göre dizayn edilmiş bir kontrol devresi ile birlikte kullanıldığında gerekli hesaplamaların yapılmasını sağlar. Örneğin, denizaltılarda anlık olarak kullanılan enerjiyi hesaplayarak denizaltıların mevcut batarya kapasiteleri ile daha ne kadar seyir yapabileceğini hesaplayarak gemi personeline sunar ve bu bilgiler ışığında faaliyetler planlanır. Ayrıca herhangi bir bataryada olası bir fazla ısınma tespit edildiğinde duman veya yangın çıkmadan önce operatöre gerekli uyarıyı vererek denizaltı gibi kapalı ortamlarda kritik öneme sahip olan güvenlik önlemlerinin azami seviyede tutulmasını yardımcı olur. Örnek bir denizaltı yönetim sistemi blok şeması Şekil 5'de gösterilmiştir.



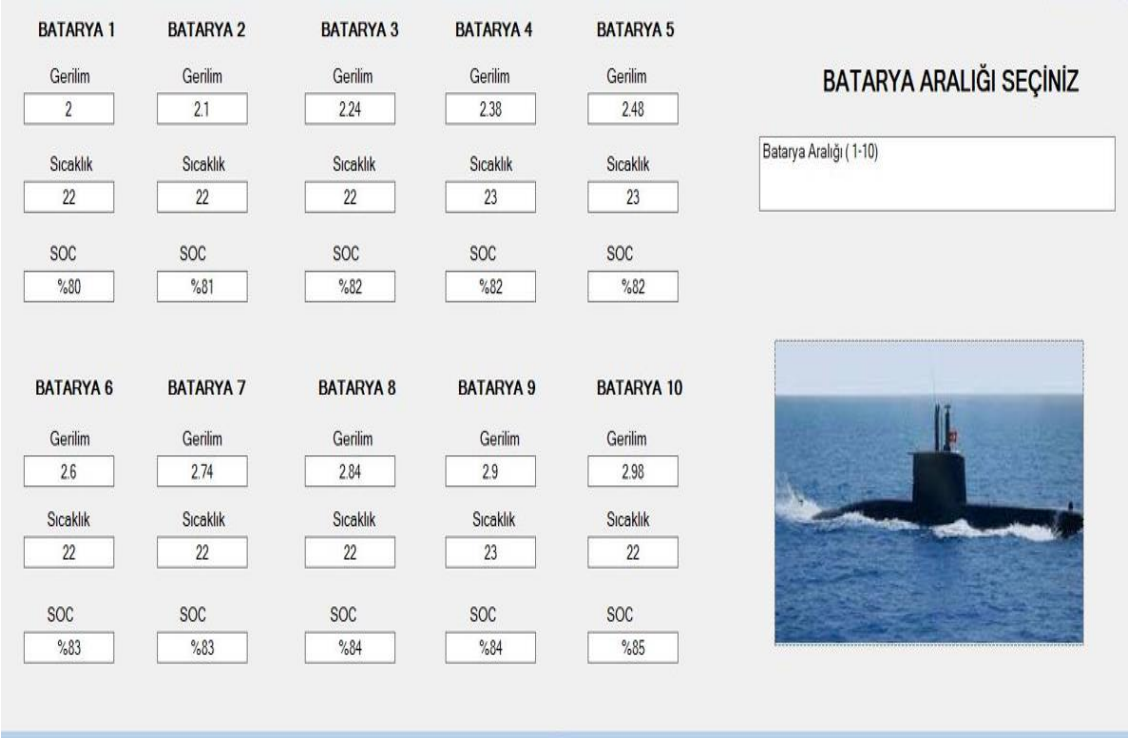
Şekil 5. Denizaltı Batarya Yönetim Sistemi Blok Şeması

Alman tasarımı olan Type-209 sınıfı denizaltıların çoğu modelinde toplamda 480 adet batarya 4'lü paketler halinde 120 adet bataryanın birbirleriyle seri bağlanmasıyla oluşturulurken bazı Type-209 sınıfı denizaltı modellerinde ise 4x132'li paketler halinde toplamda 512 adet batarya bulunmaktadır [2]. Bu bataryalar aracılığıyla denizaltılar su altında enerji ihtiyacını karşılamakta olup, bataryalarının tekrar şarj ihtiyacı olduğunda su üstüne çıkarak dizel jeneratörler aracılığıyla şarj işlemleri yapılır. Ayrıca, su üstünde denizaltıların enerji ihtiyacı da bu dizel jeneratörlerden sağlanır. 4'lü gruplar halinde her grupta 132 batarya olduğu varsayılan bir denizaltının bağlantı şeması Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Örnek Denizaltı Batarya Bağlantı Şeması

Batarya yönetim sistemlerinin bir diğer avantajı ise ile her bir bataryanın gerilimleri takip edilerek gerektiği zaman bataryalar arasında dengeleme yapılmasını imkân tanımasıdır. Bataryaların dengelenmesi her bir bataryanın şarj seviyesinin eşit duruma getirilmesidir. Bu sayede batarya gruplarından maksimum verim sağlanabilir. Bataryaların voltaj ve akımlarının sürekli ölçümlerinin yapılması aynı zamanda her bir batarya için batarya şarj durumu (SOC) ve batarya sağlık durumunun (SOH) tahmin edilmesine olanak sağlar. Batarya yönetim sistemi tarafından operatöre sunulan voltaj, sıcaklık ve SOC değerlerini gösteren örnek bir ekran ara yüzü Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 10 Adet Batarya için Batarya Yönetim Sistemi Ekranı Örneği

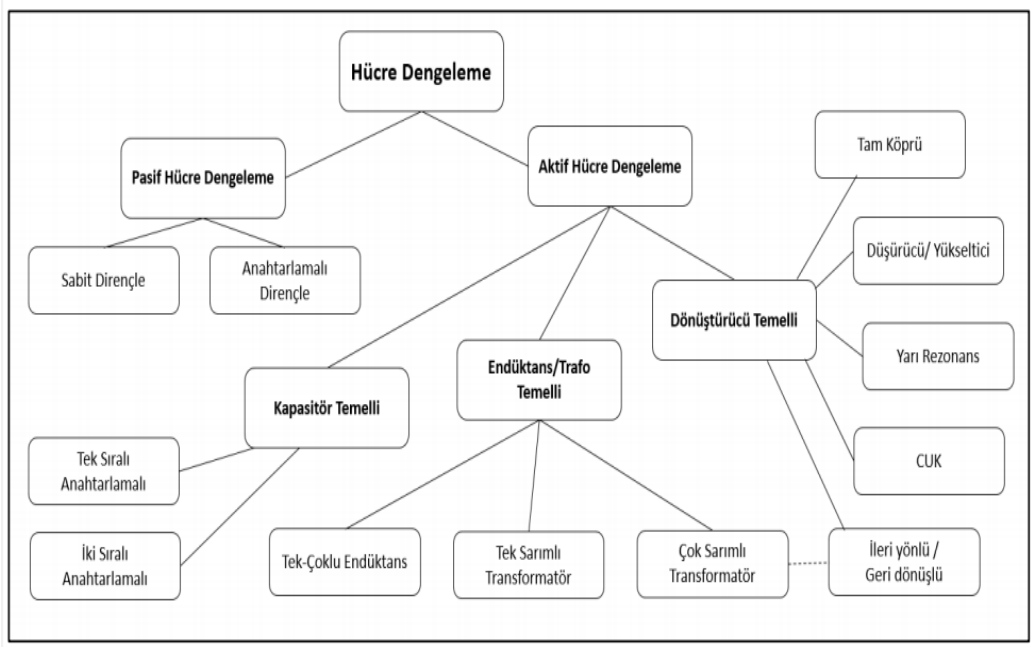
BÖLÜM 3. BATARYA DENGELEME SİSTEMLERİ

Seri veya paralel bağlanmış bataryalar arasında üretim kaynaklı farklılıklardan, hücrelerin dizilişi sebebiyle bazı hücrelerin daha fazla ısınmasından kaynaklı farklılıklardan, hücrelerin empedansları arasındaki farklılıklar ve bataryaların bulunduğu platformlardan kaynaklı titreşim gibi sebeplerden dolayı bataryalar arasında sık sık SoC dengesizlikleri meydana gelmektedir [3].

Bu dengesizliklerden kaynaklı olarak seri bağlı batarya gruplarında deşarj süresini en zayıf batarya belirlemekte olup, diğer taraftan şarj esnasında ise yüksek gerilime sahip olan bataryalar daha az gerilime sahip bataryaların tamamen şarj olmasını engellenmektedir [4].

Bu gibi durumlarda bataryalar arasında oluşan dengesizlikler sebebiyle sağlanan toplam enerji azalmakta ve bataryaların daha fazla şarj ve deşarj olması sebebiyle bataryaların ömürleri azalmaktadır.

Batarya dengeleme sistemleri bataryaların sayılarına bakılmaksızın her bataryanın gerilim seviyesinin birbirleriyle eşitlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede enerjisel olarak batarya paketlerinden en fazla verim alınabilmekte ve bataryaların şarj/deşarj miktarı azaldığı için bataryaların kullanım ömürleri artmaktadır. Batarya dengeleme yöntemleri pasif ve aktif olmak üzere 2 farklı yöntem ile yapılır. Batarya dengeleme yöntemleri Şekil-8'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Batarya Dengeleme Yöntemleri [5]

Pasif dengeleme yöntemlerinde enerjisi daha fazla olan bataryadaki fazla yük harici bir direnç yöntemiyle dışarıya atılır. Aktif dengeleme yöntemlerinde ise herhangi bir bataryada fazla olan enerji farklı yöntemler kullanılarak daha az yüklü bataryalara aktarılır.

Pasif dengeleme yöntemlerinde, direnç üzerinden enerji dışarıya aktarıldığından fazlasıyla enerji kaybı olurken aktif dengeleme ile bu enerji kayıpları en aza indirilmekte ve verim artırılmaktadır. Herhangi bir batarya grubunda kullanılacak dengeleme yöntemi, sistemin yapısı ve maliyeti dikkate alınarak belirlenir [6].

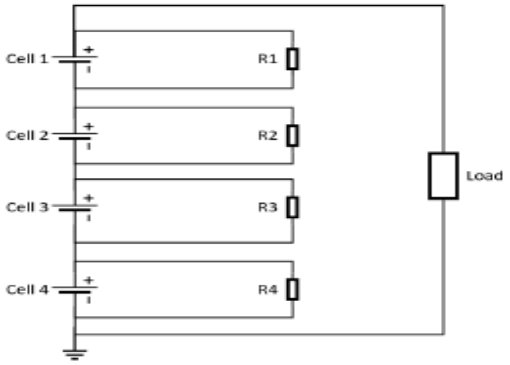
3.1. Pasif Dengeleme Yöntemleri

Kullanılan en basit ve en ucuz hücre dengeleme yöntemleridir. Şarj esnasında her bataryanın tek tek kontrol edilmesiyle tespit edilen fazla yük harici bir direnç yardımıyla ısı enerjisi olarak harcanır. Hücre dengeleme sürelerinin çok uzun olması ve enerji kaybına dayalı bir sistem olması sebebiyle kompleks sistemlerde genellikle tercih edilmemektedir.

Pasif dengeleme sistemleri, sabit direnç ile yapılan pasif dengeleme ve şönt direnç ile yapılan pasif dengeleme olmak üzere 2 farklı şekilde yapılabilir.

3.1.1 Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi

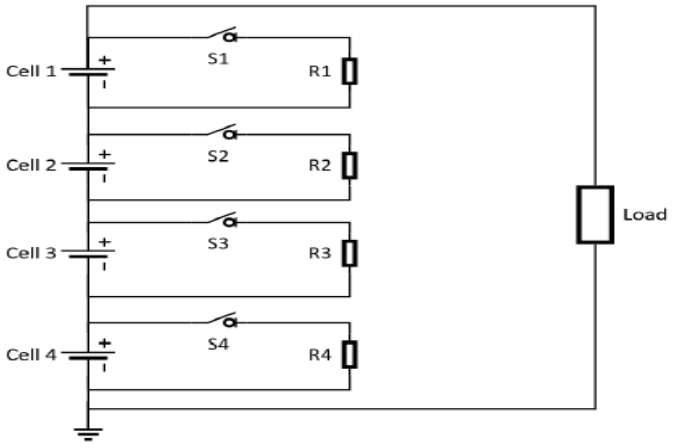
Her bataryaya paralel olarak direnç bağlanarak herhangi bir harici kontrol mekanizmasına gerek duyulmayan en basit dengeleme yöntemidir [7]. Bu dengeleme yönteminde kapasitesinin daha düşük olması sebebiyle diğer bataryalardan daha önce şarj olan batarya üzerinden direnç yardımıyla sürekli akım akıtılarak tüm bataryaların %100 şarj olması sağlanır. Sabit direnç ile yapılan pasif dengeleme yöntemi topolojisi Şekil-9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Sabit Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi Topolojisi

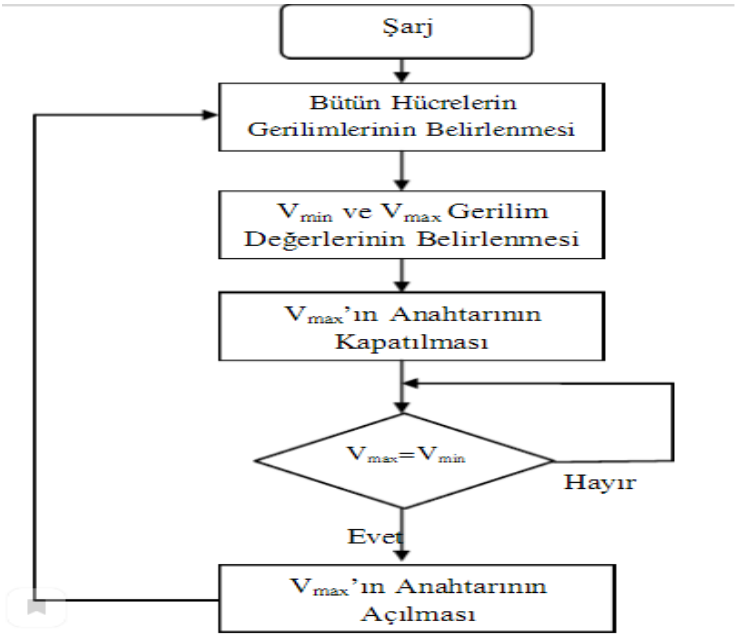
3.1.2 Şönt Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi

Her bataryaya paralel olarak bağlanan direnç ile arasında ilave olarak anahtar bulunan dengeleme yöntemidir. Bu dengeleme yöntemi aynı zamanda bir kontrol algoritması gerektirir. Batarya tamemen şarj olduğunda direnç üzerinden ölçülen akımın değişimi dikkate alınarak aradaki anahtar açılarak enerjinin boşa harcanması engellenmiş olur, ayrıca bataryaların ömürleri artırılır [8]. Şönt direnç ile yapılan pasif dengeleme yönteminin topolojisi Şekil-10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Şönt Dirençli Pasif Dengeleme Yöntemi Topolojisi

Ayrıca, pasif dengeleme yöntemlerinde kullanılan akış diyagramı Şekil-11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Pasif Dengeleme Yöntemi Akış Diyagramı

3.2. Aktif Dengeleme Yöntemleri

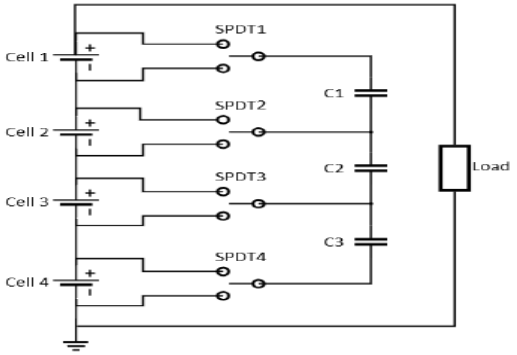
Pasif dengeleme yöntemlerindeki enerji kayıplarını önlemek için birçok aktif dengeleme yöntemi geliştirilmiştir. Aktif dengeleme yöntemlerinde enerjiyi depoloyabilmek için kondansatör, endüktans ve dönüştürücüler gibi enerji depolama elemanları kullanılır. Bu enerji depolama elemanları sayesinde yüksek SoC'a sahip bataryanın yükü daha düşük SoC'a sahip bataryaya en az kayıp ile transfer edilir. Ancak, bu yöntem her zaman daha karışık donanım ve kontrol algoritmalarına ihtiyaç duyar [9] [10].

3.2.1 Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme

Kondansatör temelli aktif dengeleme yöntemleri enerjiyi depolayabilmek için her bir bataryaya paralel bağlanan kondansatörleri kullanır [11]. Tek anahtarlamalı kondansatör temelli dengeleme ilk geliştirilen yöntem olup dengeleme süresi fazla sayıda seri bağlanmış batarya paketlerinde oldukça fazladır. Dengeleme sürelerinin azaltılabilmesi için anahtarlama sayısı 2'li, 3'lü veya daha fazla sayıda olabilmektedir.

3.2.1.1 Tek Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme

Tek anahtarlamalı kondansatör temelli aktif dengeleme sistemleri kondansatör temelli dengeleme sistemlerinin bir türevi olarak değerlendirilir. Bu dengeleme yönteminde n adet hücrenin dengelenmesi için n+5 adet anahtar ve 1 adet kondansatör kullanılır. Bu yöntemde, kondansatör en zayıf bataryadan deşarj olup en yüksek gerilimli hücreden şarj olacağı için nispeten kolay bir yönetim stratejisi vardır. Tek anahtarlamalı kondansatör temelli aktif dengeleme topolojisi Şekil-12'te gösterilmiştir.

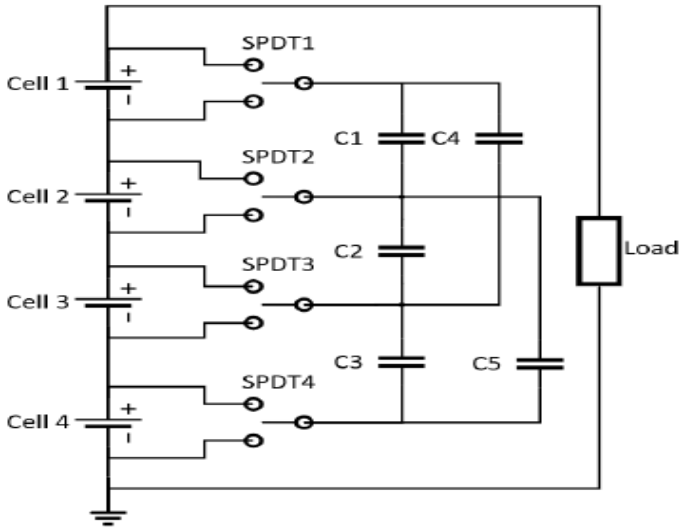


Şekil 12. Tek Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.1.2 Çift Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme

Bu dengeleme yönteminde n tane batarya için 2n tane anahtar ve n tane

kondansatör kullanılır. 2 adet kondansatör kullanılması sebebiyle bataryalar arası dengeleme süresi tek kondansatör kullanılan yönteme nazaran daha kısadır. Dezavantajı ise daha fazla kondansatör kullanılması sebebiyle sistem maliyetinin daha yüksek olmasıdır [12]. Çift anahtarlamalı kondansatör temelli aktif dengeleme topolojisi Şekil-13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Çift Anahtarlamalı Kondansatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi

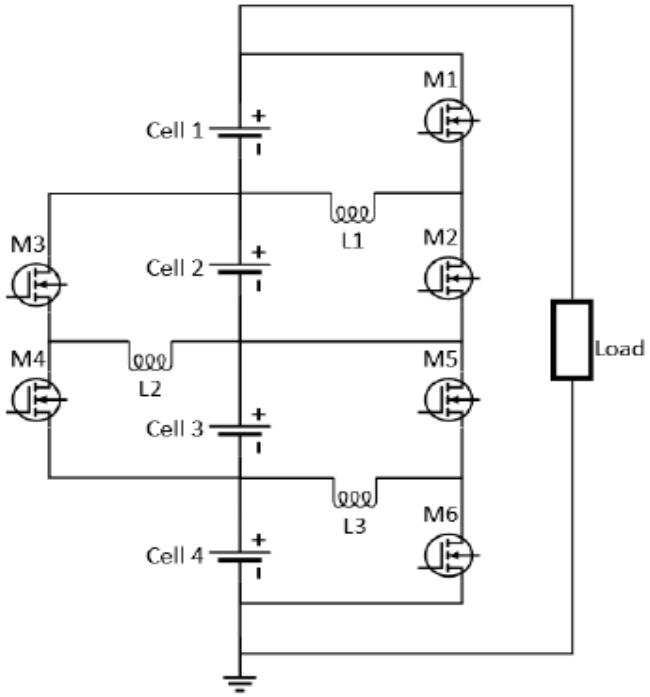
3.2.2 Endüktans Temelli Aktif Dengeleme

Endüktans temelli aktif dengeleme yöntemi akımın bobin üzerinden geçerken oluşturduğu manyetik alan sayesinde enerji depolayabilme özelliği üzerine kurulmuştur. Bobinlerin bu enerji depolayabilme özellikleri sayesinde bataryalar arasında dengeleme yapılabilmektedir. Bu dengeleme yöntemleri, kısa sürede dengeleme sağlanabilmesine rağmen maliyeti yüksek tasarımlar gerektirmektedir [13].

3.2.2.1 Tek/Çoklu Endüktans Temelli Aktif Dengeleme

Tekli endüktans temelli sistemlerde enerjinin bataryalar arasında transferi için 1 adet bobin kullanılırken çoklu endüktans temelli sistemlerde n-1 adet bobin kullanılır [14] [15]. Kontrol sistemi hücrelerin gerilimlerini algılar ve enerji transferi yapılması gereken 2 adet batarya arasında gerekli enerji transferini sağlar. Ancak, bu metod çok fazla sayıda batarya içeren paketlerde sürekli 2 batarya arasında kıyaslama yaptığı için ilk batarya ile son batarya arasında ciddi dengeleme süreleri oluşur. Diğer bir dezavantajı ise karmaşık kontrol devresi gerektirmesi ve kontrol amacıyla fazla eleman

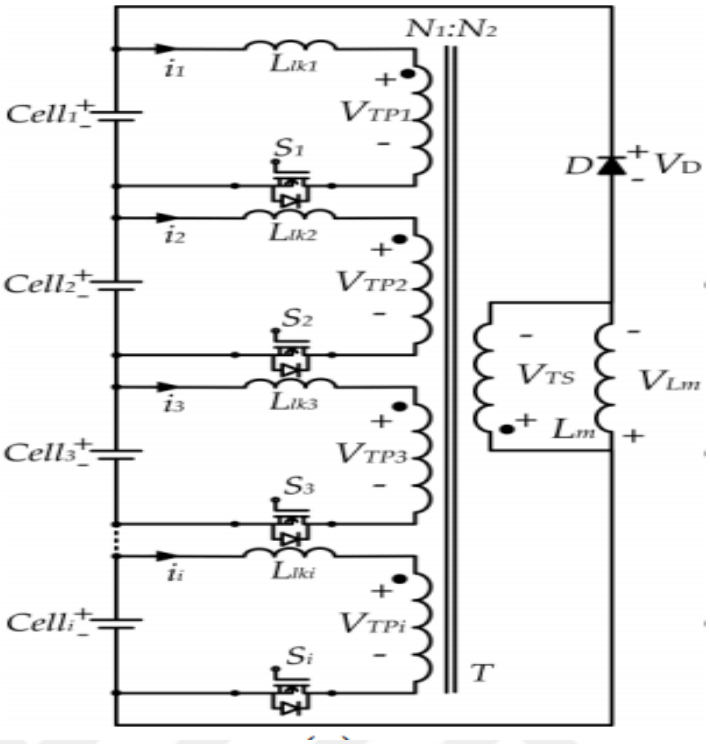
sayısı içermesinden dolayı verimliliği düşüktür [16]. Çoklu endüktans temelli aktif dengeleme topolojisi Şekil-14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Çoklu Endüktans Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.2.2 Tek Sarımlı Transformatör Temelli Aktif Dengeleme

Tek sarımlı transformatörler aynı zamanda anahtarlamalı transformatörler olarak bilinirler [17]. Bu metot dengeleme işlemi için tüm paketten tek bir bataryaya veya tek bir bataryadan tüm pakete enerji transferi olmak üzere iki farklı yöntem içerir. Tüm paketten tek bir bataryaya enerji transferinde tüm enerji ilgili anahtar üzerinden zayıf olan bataryaya aktarılırken tek bir bataryadan tüm hücreye enerji transferinde ise yüksek enerji bataryadan ilgili anahtar üzerinden enerji diğer bataryalara transfer edilir. Tek sarımlı transformatör temelli aktif dengeleme topolojisi Şekil-15'da gösterilmiştir.



Şekil 15. Tek Sarımlı Transformatör Temelli Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi

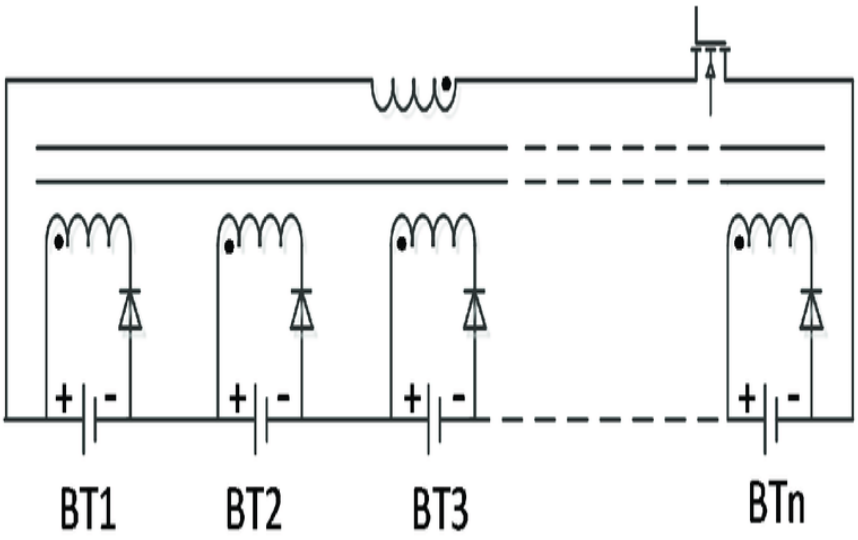
3.2.3.3 Çok Sarımlı Transformatör Temelli Aktif Dengeleme

Çok sarımlı transformatör temelli dönüştürücüler yapıları gereği dönüştürücü temelli tasarlanırlar. Bu dengeleme metodu, paylaşımlı transformatör ve çoklu transformatör olmak üzere 2 farklı metot ile uygulanabilir.

Paylaşımlı transformatör metodunda tek manyetik çekirdek, tek birincil sargı ve birden fazla ikincil sargı kullanılır.

Çoklu transformatör metodunda ise birden fazla transformatör ve her batarya için tek manyetik çekirdek kullanılır.

Çoklu transformatör metodu paylaşımlı transfer metodu ile kıyaslandığında daha modüler bir tasarıma sahip olup sistemde kullanılan bataryaların sayılarının artması durumunda manyetik çekirdek değişimine ihtiyaç duymadıkları için daha kullanışlıdır. Ancak maliyeti daha yüksektir. Çok sarımlı transformatör temelli aktif dengeleme topolojisi (çoklu transformatörlü) Şekil-16'da gösterilmiştir.



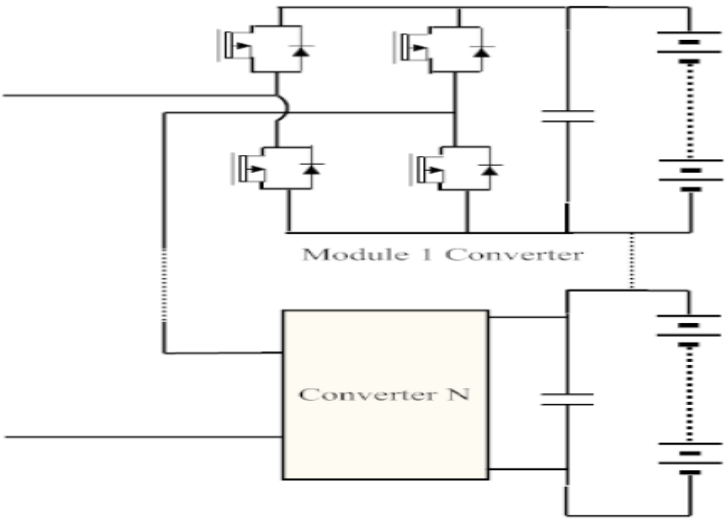
Şekil 16. Çok Sarımlı Transformatör Temelli Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.3 Dönüştürücü Temelli Aktif Dengeleme

Dönüştürücü temelli dengeleme yöntemleri seri bağlı olan bataryaların her birinin üzerine dönüştürücü bağlanması temeline dayanır. Bu sayede tasarlanan sistemlerin verimleri daha yüksek ve dengeleme süreleri daha düşüktür [18]. Bu bölümde tam köprü, CUK dönüştürücü, düşürücü/yükseltici ve yarı rezonans düşürücü dengeleme yöntemleri anlatılacaktır.

3.2.3.1 Tam Köprü Aktif Dengeleme

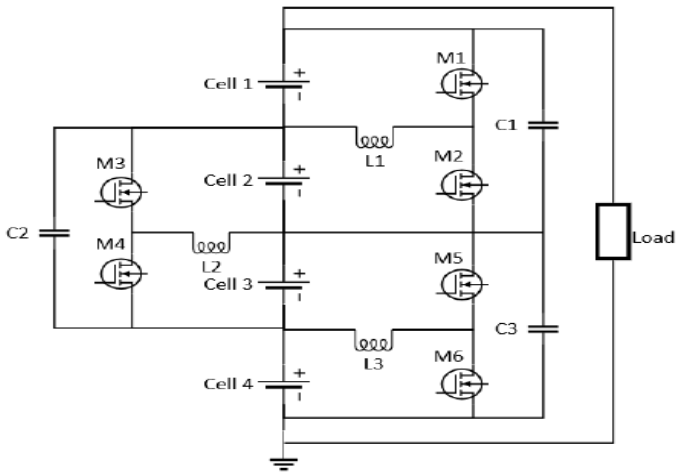
Tam köprü PWM aktif dengeleme aynı zamanda tam kontrollü enerji dönüştürücüler olarak adlandırılır. Özellikle elektrikli araçların şarj işlemleri esnasında AC/DC veya DC/DC dönüştürücü olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar. Modüler yapıda bir dizayn gerektirmekte olup maliyeti ve dizaynı zordur. Tam köprü aktif dengeleme topolojisi Şekil-17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Tam Köprü Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.3.2 CUK Dönüştürücü Aktif Dengeleme

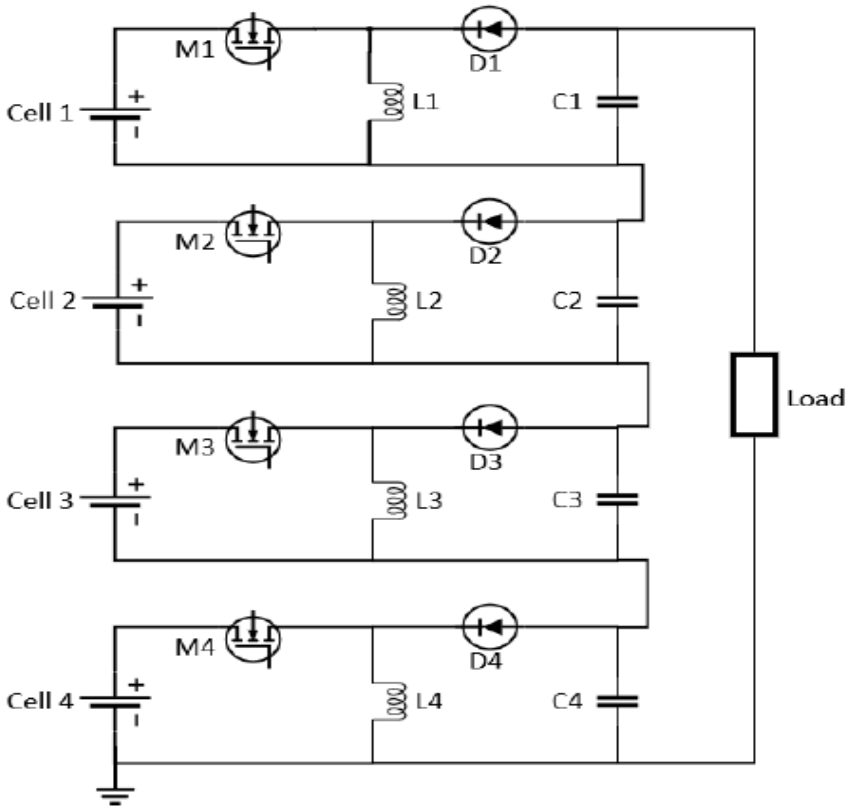
CUK dönüştürücü aktif dengeleme yöntemi birbiri ile seri bağlanmış iki batarya arasına bağlanır ve bu iki batarya arasındaki SoC farkına bağlı olarak bataryalar arasındaki mosfetin açılıp kapanmasını yöneterek gerekli enerji transferini sağlar. Bu dengeleme metodunda n sayıda batarya için n-1 sayıda dönüştürücü kullanılması gerekir ve bu durum denizaltılar gibi yüzlerce batarya içeren platformlar için maliyet ve dizayn olarak uygulanması mümkün değildir [19] [20]. CUK dönüştürücü aktif dengeleme topolojisi Şekil-18'te gösterilmiştir.



Şekil 18. CUK Dönüştürücü Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.3.3 Düşürücü/Yükseltici Aktif Dengeleme

Düşürücü/yükseltici aktif dengeleme metodu adından da anlaşılabileceği gibi bir yüksek ve bir düşük dengeleyiciden oluşur. Yükseltici ile enerjisi fazla olan bataryanın enerjisi geri kalan pakete, düşürücü ile ise enerji paketten enerjisi düşük olan tek bir bataryaya aktarılır. Diğer dönüştürücü tabanlı dengeleme sistemlerinden farklı olarak voltaj dönüşüm oranları 1'den büyük veya 1'den küçük olduğu için kontrol algoritmalarının daha esnek olarak tasarlanabilmesine imkân sağlar ve voltaj sapmalarının en az olduğu yüksek dengeleme akımlarına ihtiyaç duyulan sistemlerde kullanılabilir [21]. Düşürücü/yükseltici aktif dengeleme topolojisi Şekil-19'da gösterilmiştir.

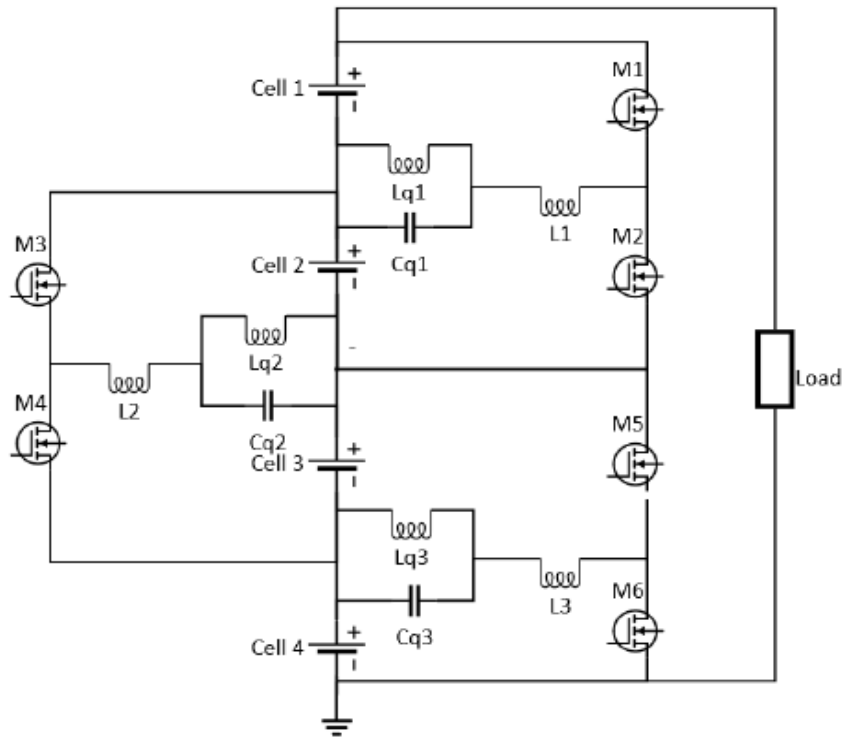


Şekil 19. Düşürücü/Yükseltici Aktif Dengeleme Topolojisi

3.2.3.4 Yarı Rezonans Dönüştürücü Aktif Dengeleme

Yarı rezonans dönüştürücüler bitişik iki batarya arasına bağlanır. Dengeleme işlemi esnasında sistem üzerindeki mosfetler PWM sinyalleri tarafından kontrollü olarak açılıp kapatılarak bataryalar arasında enerji transferi sağlanır.

Bu dengeleme metodunun tasarımından kaynaklı olarak MOSFET'lerin anahtarlama akımı 0 amperdir. Bundan dolayı MOSFET'lerin anahtarlaması esnasında oluşan kayıplar ve EMI emisyonlarının ciddi derecede az olması sebebiyle dengeleme verimleri oldukça yüksektir. Ancak, bitişik olmayan bataryalar arasındaki dengeleme daha yavaş ve verim düşüktür. Bu sebeple verimin artırılması için her iki batarya arasına mutlaka yarı rezonans dönüştürücü eklenmesi gerektiğinden maliyeti ciddi derecede yüksektir [22] [23]. Yarı rezonans dönüştürücü aktif dengeleme topolojisi Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Yarı Rezonans Dönüştürücü Aktif Dengeleme Topolojisi

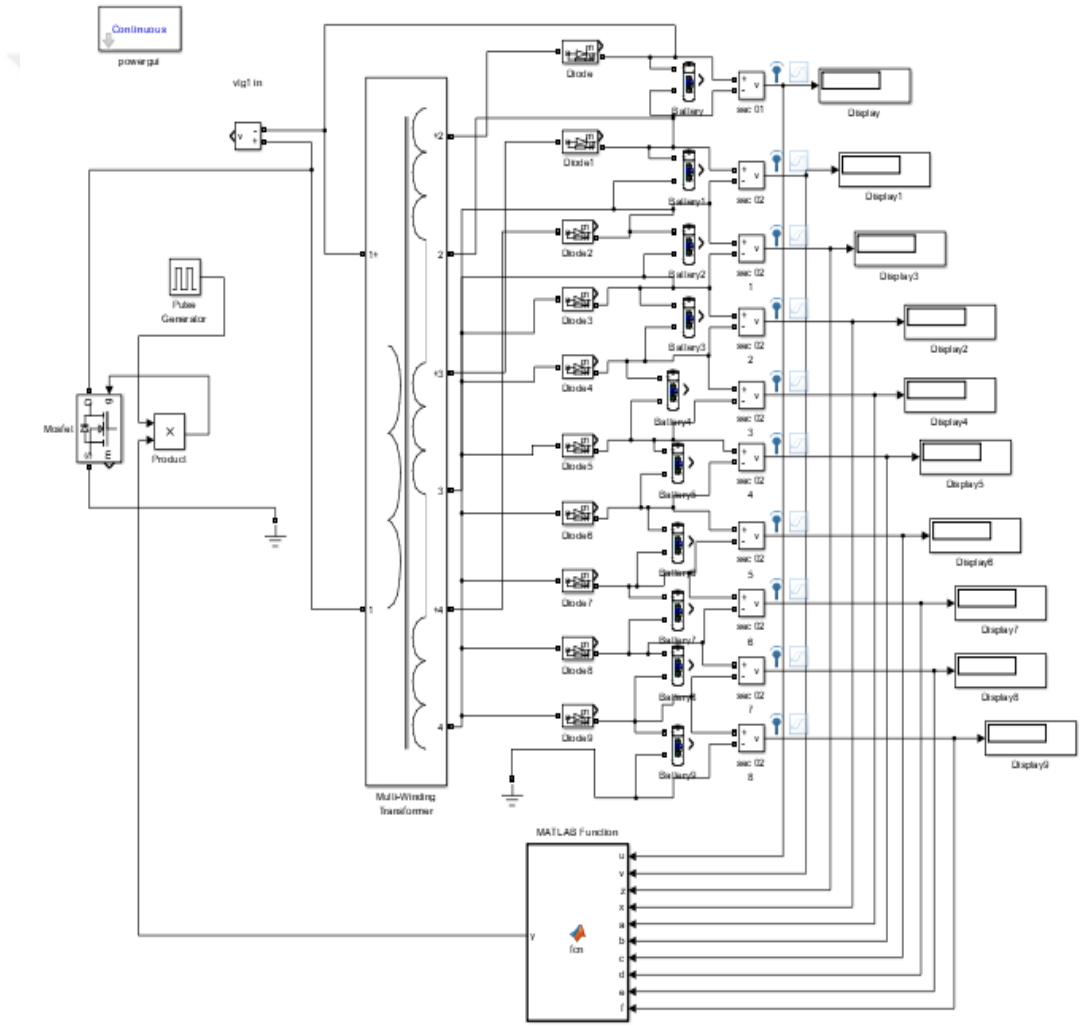
Pasif ve aktif batarya dengeleme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını özetleyen tablo aşağıda gösterilmiştir.

DENGELEME YÖNTEMİ	AVANTAJ	DEZAVANTAJ
Sabit Direnç	Ucuz, küçük bir boyut ile uygulanması kolaydır.	Yüksek enerji kayıpları nedeni ile verimsizdir.
Şönt Direnç	Ucuz, uygulaması basit ve hızlı eşitleme oranı. Şarj etme ve boşaltma, ancak boşaltma için tercih edilmez.	Yüksek enerji kayıpları nedeni ile verimsizdir.
Anahtarlamalı Kapasitör	Basit kontrol. Düşük voltaj stresi, kapalı çevrim kontrolüne gerek yok.	Yüksek kayıp. Yüksek anahtar sayısı.
Tek Anahtarlanmalı Kapasitor	Basit kontrol. Minimum anahtarlı bir kapasitör.	Eşitlemeyi hızlandırmak için akıllı kontrol gereklidir.
Çift Anahtarlanmalı Kapasitör	Dengeleme süresi tek anahtarlamalı kapasitör yöntemine nazaran daha düşüktür.	Yüksek kayıp. Yüksek anahtar sayısı.
Tekli/çoklu endüktör	Hızlı eşitleme hızı. Yüksek verim.	Karmaşık kontrol. Yalnızca şarj modunda uygulanır.
Tek Sargılı Transformatör	Hızlı eşitleme hızı Düşük manyetik kayıplar	Yüksek karmaşık kontrolü. Yüksek maliyet. Bir veya daha fazla batarya eklenmesi durumunda çekirdeğin değişmesi gerekir.
Çok Sargılı Transformatör	Hızla dengeleme. Kapalı döngü kontrolleri gerekli değildir.	Yüksek fiyat. Karmaşık kontrolü.
Çoklu Transformatörler	Hızlı eşitleme hızı. Modüler yapı. Yeni bataryalar kolayca eklenir.	Yüksek fiyat. Karışık kontrol. Manyetik kayıplar nedeniyle yüksek kayıp.
Modülerleştirilmiş Anahtarlama Transformatörü	Hızlı eşitleme hızı. Düşük voltaj ve akım stresi.	Yüksek fiyat. Karmaşık kontrolü
CUK Dönüştürücü	Yüksek verim.	Karmaşık kontrol, doğru voltaj algılama gerekir. Düşük dengeleme hızı.
Düşürücü/Yükseltici Dönüştürücü	Yüksek dengeleme hızı. Kolay tasarım	Yüksek fiyat. Akıllı kontrol gerekli.
Flyback (Geri Dönüşlü) Dönüştürücü	Çok sayıda hücre için kolay uygulanır. Uygun modüler sistem.	Sürekli voltaj algılama ihtiyacı. Orta dengeleme hızı.
Tam-Köprü Dönüştürücü	Hızlı eşitleme hızı.	Yüksek fiyat. Akıllı kontrol gerekli.
Yarı Rezonans Dönüştürücü	Verimliliği artıran düşük anahtarlar akım stresi. Basit uygulama.	Yüksek fiyat. Karmaşık ve akıllı uygulama ihtiyacı.

Tablo 1. Batarya Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

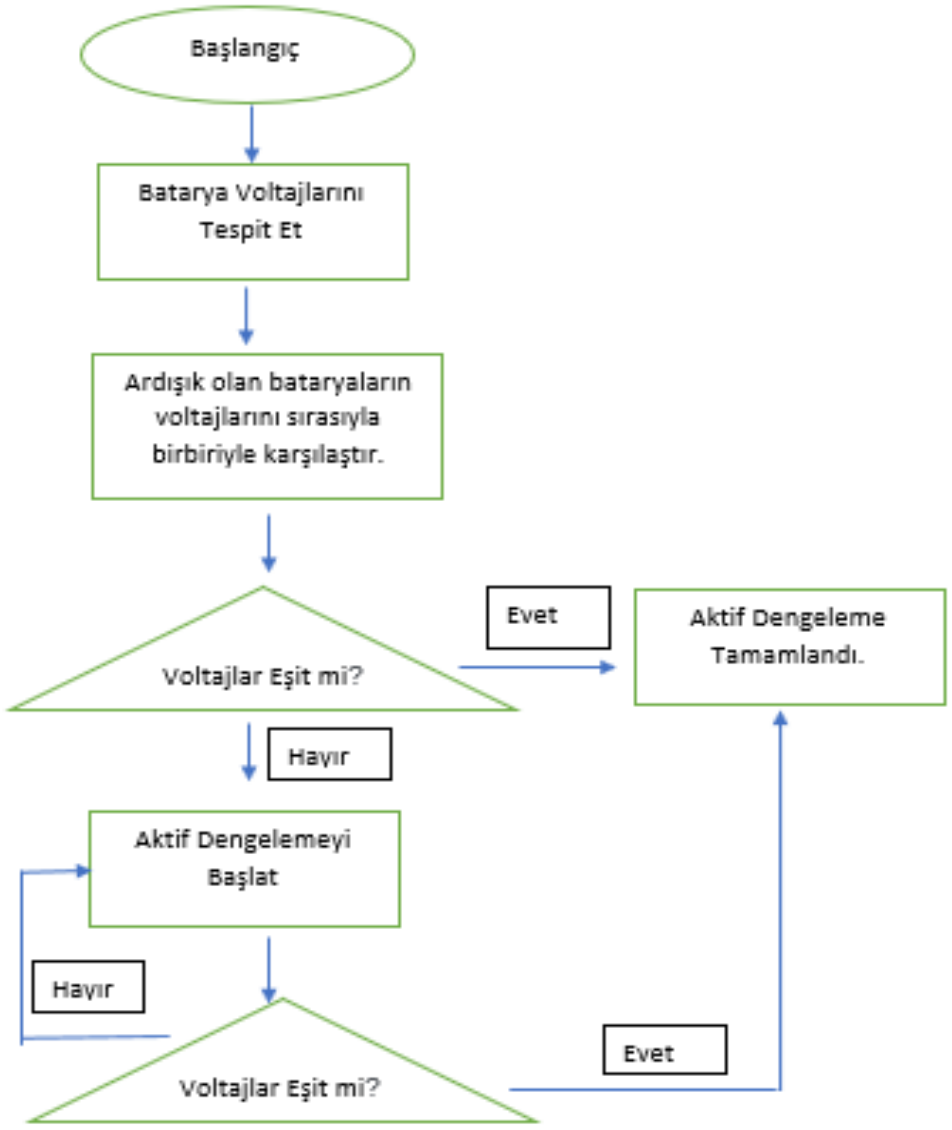
BÖLÜM 4. TASARIM

Bu çalışmada Bölüm 3'te anlatılan yöntemler arasından çok sarımlı transformatör temelli dönüştürücü tercih edilmiş ve Matlab Simulink yardımıyla farklı nominal voltajlara sahip 10 adet batarya için birbirleri arasında dengeleme yapılmaya çalışılmıştır. Bu yöntem aracılığıyla seri bağlanan 10 adet bataryanın enerjileri sürekli birbiriyle mukayese edilmiş ve enerjisi yüksek olan bataryadan düşük olan bataryaya enerji transferi yapılarak dengeleme sağlanmıştır. Çok sarımlı transformatör temelli Matlab Simulink'te oluşturulan tasarım Şekil-21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Matlab Simulink'te Tasarlanan Çok Sarımlı Transformatör Temelli Dönüştürücü

Matlab Simulink'te Tasarlanan Çok Sarımlı Transformatör Temelli Dönüştürücünün işlem basamaklarını gösteren akış şeması Şekil-22'de gösterilmiştir.



Şekil 22. Tasarımın Akış Şeması

Bu çalışmada kontrol devresi olarak kullanılan ve her bataryanın birbiri ile voltaj değerini kontrol ederek dengeleme sürecini sağlayan komutlar aşağıda olduğu gibidir.

```
function y = fcn(u,v,z,x,a,b,c,d,e,f)

u = int16(u);
v = int16(v);
z = int16(z);
x = int16(x);
a = int16(a);
b = int16(b);
c = int16(c);
d = int16(d);
e = int16(e);
f = int16(f);

if (u == v && v == z && z == x && x == a && a
   == b && b == c && c == d && d == e && e == f
   && f == u)
     y=0;
else
     y=1;

end
```

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Konvansiyonel denizaltılar için kritik öneme haiz olan kurşun asit bataryaların dengeleme süreleri incelenmiş ve 528 adet bataryanın simülasyon zorluğu göz önüne alınarak 10 adet kurşun asit batarya seçilerek çok sarımlı transformatör temelli dengeleme yöntemi ile dengelenmesi sağlanmıştır.

Her bataryaya atanan ilk enerji değerleri değiştirilerek dengeleme süreleri ayrıca gözlenmiştir. Her bataryaya farklı voltajlar atanarak yapılan 2 farklı testin sonuçları Tablo-2 ve Tablo-3'te gösterilmiştir.

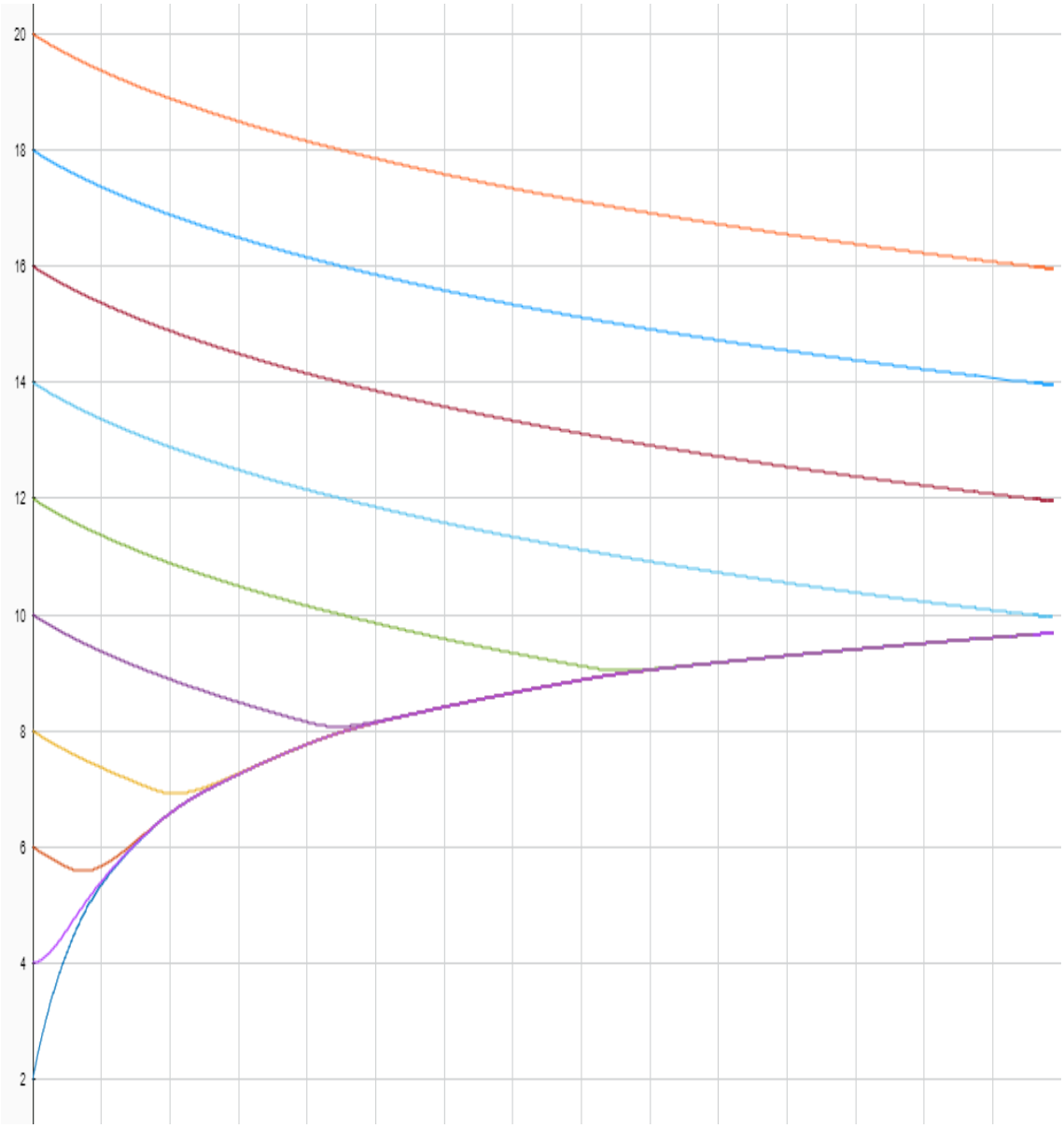
Batarya No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dengeleme Öncesi	2 V	4 V	6 V	8 V	10 V	12 V	14 V	16 V	18 V	20 V
Dengeleme Sonrası	10.79 V									
Dengeleme Süresi	8000 s									

Tablo 2. 2 ve 20 Volt Arası Dengeleme Öncesi ve Sonrası Özet Tablosu

Batarya No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dengeleme Öncesi	2 V	2.1 V	2.24 V	2.38 V	2.48 V	2.6 V	2.74 V	2.84 V	2.9 V	3 V
Dengeleme Sonrası	2.53 V									
Dengeleme Süresi	800 s									

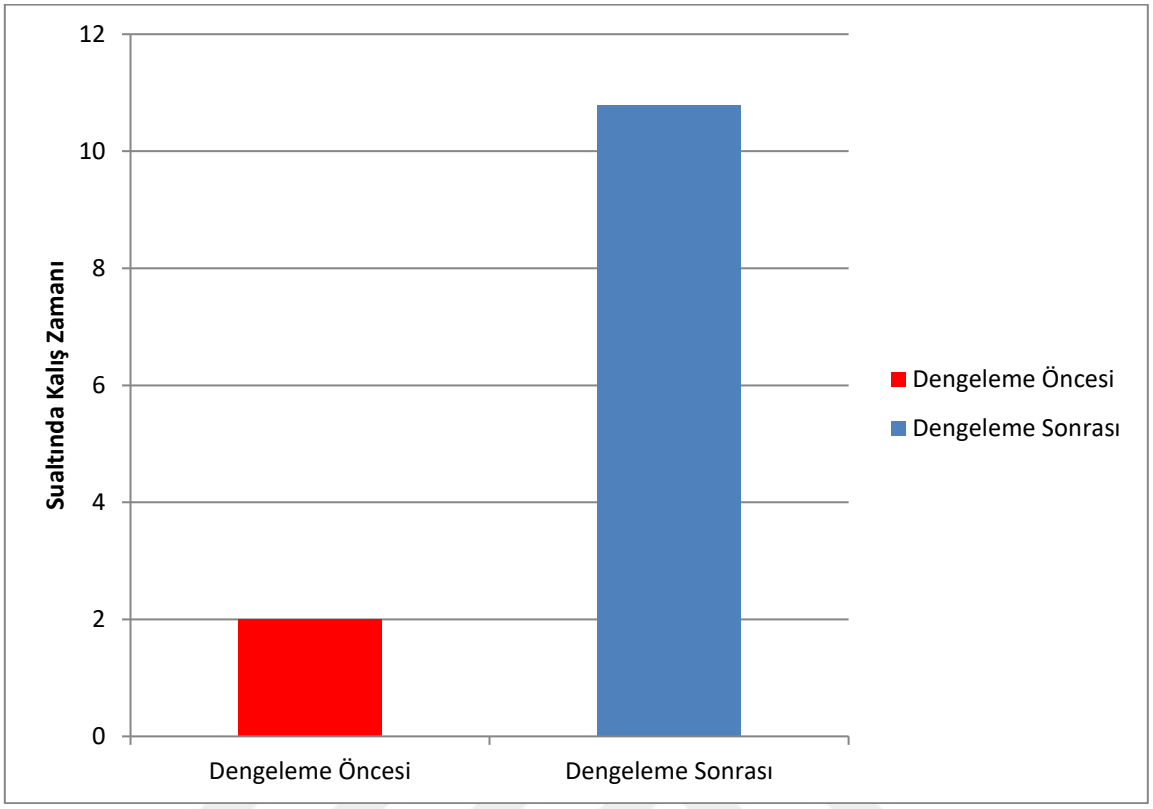
Tablo 3. 2 ve 3 Volt Arası Dengeleme Öncesi ve Sonrası Özet Tablosu

Farklı voltaj değerlerine sahip bataryaların dengeleme işlemleri esnasında bataryalar arasındaki voltaj farkının dengeleme süresine etkileri çok net olarak görülmüş ve dengeleme öncesinde seçilecek dengeleme yönteminin önemi kadar bataryaların sürekli kontrolünün yapılarak diğer bataryalara nazaran voltaj farkı olan bataryaların yenileri ile değiştirilmesinin önemi bir kez daha anlaşılmıştır. Dengeleme işlemi esnasında bataryalar arasındaki voltaj yakınsama eğrileri Şekil-23'te gösterilmiştir.



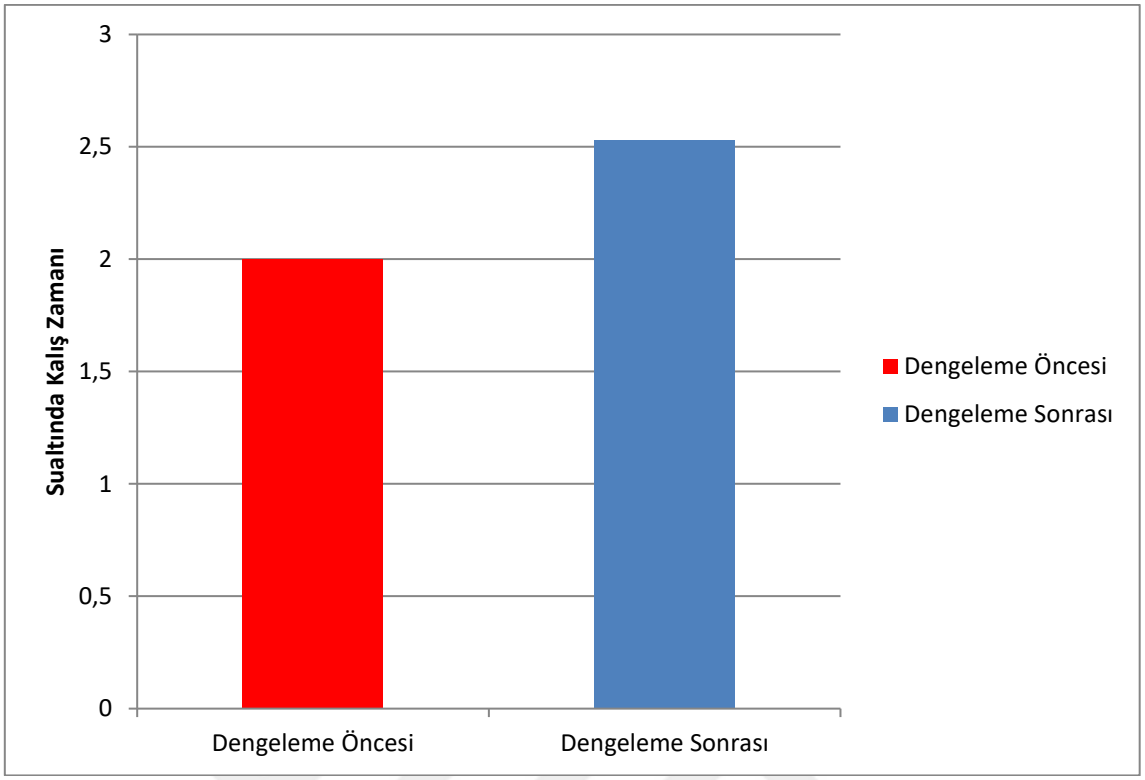
Şekil 23. Dengeleme İşlemi Esnasında Voltaj Yakınsama Eğrileri

Yapılan analizler sonrasında denizaltıların sualtında kalış sürelerinin bataryaların arasındaki kapasite farkına bağlı olarak değiştiği net olarak görülmüştür. Tablo-2 ve Tablo-3'te sunulan değerler karşılaştırıldığında dengeleme sonrası gelinen voltaj değeri ile başlangıçta en zayıf bataryadaki voltaj değeri arasındaki farkın yüksek olması denizaltıların sualtında kalış sürelerini azalttığı net olarak anlaşılmıştır. Şekil 24'te, Tablo-2'de analiz edilen değerlerin denizaltıların sualtında kalış sürelerine etkisi gösterilmiş iken Şekil-25'te ise Tablo-3'te analiz edilen değerlerin denizaltıların sualtında kalış sürelerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 24. Tablo-2'de Sunulan Analiz Değerlerine Göre Denizaltıların Sualtında Kalış Süresi Oranı

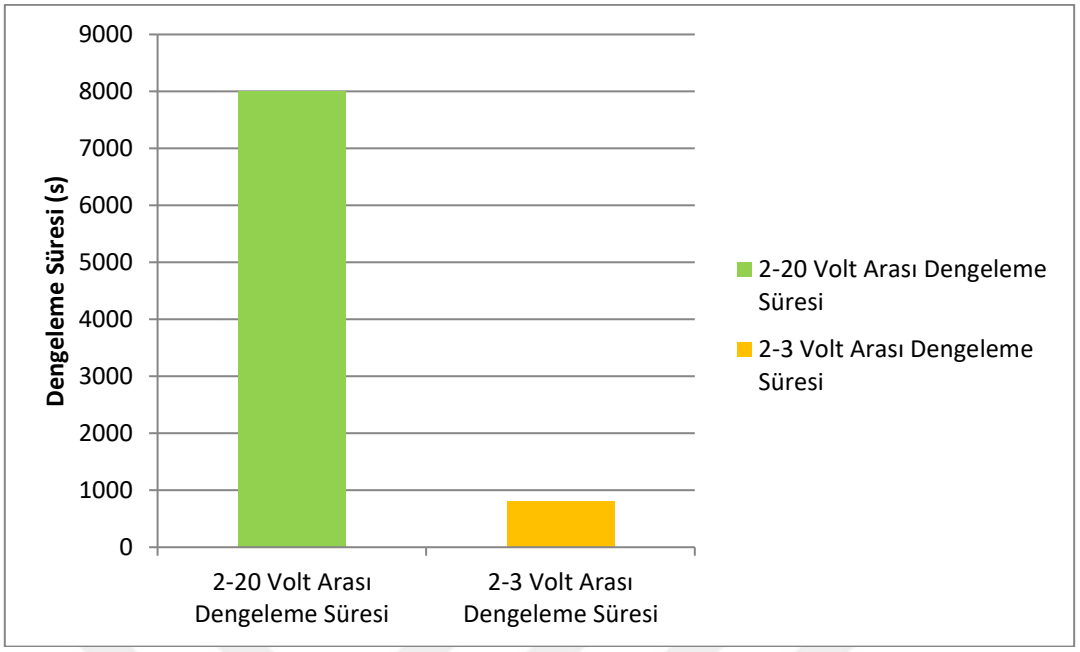
Şekil-24 incelendiğinde bataryalar arasında ciddi kapasite farkları oluşması durumunda dengeleme işlemi sonrasında bataryalardan 5 kat daha fazla verim alınabileceği anlaşılmaktadır. Ancak, her ne kadar teorik olarak bu analiz yapılabilse de gerçek ortamda bataryalar arasında bu derece yüksek kapasite farkları oluşması çok sık görülmemektedir. Çünkü, herhangi bir bataryanın kapasite değeri gerçek kapasite değerinin %80'i altına düştüğünde yenisi ile değiştirilmektedir.



Şekil 25. Tablo-3'te Sunulan Analiz Değerlerine Göre Denizaltıların Sualtında Kalış Süresi Oranı

Şekil 25 incelendiğinde bataryalar arasında daha az kapasite farkları oluştuğunda (2-3 volt arasında) dengeleme işlemi sonrasında bataryalardan yaklaşık 0,25 kat daha fazla verim alındığı görülmektedir. 24 saat sualtında kalabilen bir denizaltının dengeleme sonrasında sualtında kalış süresi bu yöntem ile 30 saate çıkarılabilir.

Dengeleme işlemleri esnasında bir diğer kritik husus ise dengeleme süresi olduğu yapılan analizler sonucunda net olarak anlaşılmıştır. 2-20 Volt arasında değişen bataryaların dengeleme süreleri ile 2-3 volt arasında değişen bataryaların dengeleme sürelerini gösteren grafik Şekil-26'da sunulmuştur. Denizaltılarda dengeleme işleminin satıhta şarj işlemi esnasında yapılabileceği göz önüne alındığında bu sürenin oldukça kısa olması denizaltıların gizlilik ilkesiyle uyumlu olacaktır.



Şekil 26. 2-20 Volt Arasında Değişen Bataryalar ile 2-3 Volt Arasında Değişen Bataryaların Dengeleme Sürelerinin Karşılaştırılması

Ayrıca, dengeleme yöntemi sonrasında tüm bataryaların eşit enerji seviyesinde olmasından dolayı batarya gruplarından sağlanacak enerji artacağından denizaltılar gibi enerjisini bataryalardan sağlayan platformlar için geleceğe yönelik dengeleme yöntemlerinin öneminin daha da artacağı değerlendirilmektedir.

Batarya ve batarya yönetim sistemlerinden daha fazla verim alabilmek için dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Bataryaların üretim kaynaklı hatalarının en aza indirilmesi,
- Batarya yönetim sistemlerine sıcaklık, akım ve voltaj verisi sağlayan sensörlerin hassasiyetlerinin yüksek olması,
- Batarya paketleri içerisindeki bataryaların homojen sıcaklık dağılımı olacak şekilde yerleştirilmesi ve gerekmesi durumunda batarya soğutma sistemleri ile bataryaların soğutulması,
- Performans ve bakım hususlarının iyi analiz edilerek dengeleme süresi en kısa olan batarya dengeleme yönteminin seçilmesi,
- Kontrol algoritmasının iyi kurgulanması ve algoritma kaynaklı gecikmelerin önüne geçilmesi,
- Titreşim ve şok isterlerinin iyi analiz edilerek bataryaların titreşime en az maruz kalacağı şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Rogoway,T. ,2017. "*Diesel Electric submarines may be on the verge of returning to their simpler roots with the help of lithium ion batteries*", War Zone, İssued February 17.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Type_209_submarine (Erişim tarihi:Haziran,04,2021)

[3] T, Bruen, J.M, Hooper, J, Marco, M, Gama, G.H, Chouchelamane, 2016. "*Analysis of a battery management system (BMS) control strategy for vibration aged Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion 18650 battery cells*", Energies. 9.

[4] Barsukov, Y.,2015. "*Battery Cell Balancing: What to Balance and How, Texas Instruments*", Inc. https://www.researchgate.net/ publication/265028955.

[5] Hançar Y., Kaymaz H.,2021. "*Elektrikli Araç Batarya Yönetim Sistemleri İÇİN Hücre Eşitleme Yöntemleri"*,Nisan 28, (Derleme Makale).

[6] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche and J. Van Mierlo, "*Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, in Proc. 2011 Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* ", 2011 IEEE, 1-7.

[7] N. H. Kutkut ve D.M. Divan, 1996 "*Dynamic equalization techniques for series battery stacks*", 514-521.

[8] I.Wei, I.Jie, S. Wenj ve F. Ziping, 2017."*Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string*", 489-498.

[9] J.Qi, ve D.Dah-Chuan Lu, 2014."*Review of battery cell balancing techniques*", 1-6.

[10] J.C.Jonathan Carter,Z.Fan, 2020."*Cell equalisation circuits: A review*", Journal of Power Sources,vol. 448.

[11] M.Caspar, T.Eiler, ve S.Hohmann,2028."*Systematic comparison of active balancing: A model-based quantitative analysis*", IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 67, no. 2, 920-934.

[12] C.Pascual, ve P.T.Krein, 1997."*Switched capacitor system for automatic series battery equalization*", vol. 2, 848-854.

[13] J.Cao N.Schofield ve A.Emadi, 2008."*Battery balancing methods: A comprehensive review*", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-6.

[14] T.H. Phung, J. C. Crebier, A. Chureau, A. Collet ve N. T. Van Nguyen, 2011."*Optimizes Structure for Next to next balancing of Series connected Lithium-Ion Cells*", 26. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1374-1381.

[15] C.S. Moo, Y.C. Hsieh, I.S. Tsai ve J. C. Cheng, 2003."*Dynamic charge equalisation for series connected batteries*", 26. IEEE Proceedings Electric Power

Applications, Vol 150, 501-505.

[16] T.H. Phung, J. Crebier, A. Chureau ve V. Nguyen, 2011."*Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells*", 1374-1381.

[17] D.V. Cadar, M.Dorin ve M.Patarau, 2010."*An energy converter method for battery cell balancing*", IEEE 33. International Spring Seminar on Electronics Technology 290-293.

[18] J. Yan, Z. Cheng, G. Xu, H. Qian ve Y.Xu, 2010,"*Fuzzy Contro for Battery Equalization Based on State of Chargel*", IEEE 72. Vehicular Technology Conference Fall 1-7.

[19] Y.S. Lee, C. Y Duh, G.T. Chen ve S.C. Yang, 2005"*Battery equalization using bi-directional CUK converter in operation*", 765-771.

[20] A.F. Moghaddam ve A.Van den Bossche, 2019, "*A battery equalization technique based on CUK converter balancing for lithium ion batteries*", 1-4.

[21] H. Tsung-Hsi ve Chin-Sien Moo, 2017, "*A battery power bank with series-connected buck boost-type battery power modules*".

[22] Y. Lee, C. Tsai, Y.Ko ve M.Cheng, 2010, "*Charge equalization using quasi-resonant converters in battery string for medical power operated vehicle application*",2722-2728

[23] Y. Lee ve G. Cheng, 2006, "*Quasi-sesonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications*", IEEE Transactions on power electronics, vol. 21, no. 5, 1213-1224.