

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK VE RÜZGÂR TÜRBİNİ
İLE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİ
ELEKTROKİMYASAL OLARAK
DEPOLAMA

MUSTAFA TAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2012

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK VE RÜZGÂR TÜRBİNİ
İLE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİ
ELEKTROKİMYASAL OLARAK
DEPOLAMA

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

MUSTAFA TAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2012



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.07.2012 tarih ve 2012/25 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12.09.2012 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mustafa TAŞ'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd.Doç.Dr.Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç.Dr.Abdülkadir BALIKÇI

ÜYE

: Yrd.Doç.Dr.İlyas KANDEMİR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: FOTOVOLTAİK VE RÜZGÂR TÜRBİNİ İLE ÜRETİLEN ELEKTRİK ENERJİSİNİ ELEKTROKİMYASAL OLARAK DEPOLAMA

YAZAR ADI: MUSTAFA TAŞ

Bu tez, rüzgâr ve güneş gücü sistemleri için elektrokimyasal enerji depolama teknolojilerini anlatmaktadır. Bu çalışma literatür ve simülasyon kaynaklıdır. Bir yenilenebilir hibrit enerji sisteminde, çeşitli uygulamalar için elektrik üretmek amacıyla farklı güç kaynakları birleştirilir. Enerjinin bulunabilirliği, yılın mevsimlerine göre, gündüz ve gece sırasında ve günden güne hava koşullarıyla değişmektedir. Yüklerin ve enerji üretiminin farklı zaman düzenlerini dengelemek için, enerji depolama yenilenebilir enerji sistemlerinde içermelidir. Her bataryanın temel elemanı elektrokimyasal hücredir. Bir pozitif ve negatif elektrot, bir elektrolite daldırılmıştır. Reaktif maddeler (aktif materyaller) elektrotta depolanır. Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrot reaksiyonları, her iki elektrotta meydana gelir. Elektrotlar elektronları serbest bırakır veya alır.

Elektrokimyasal akümülatörler, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürürler. Enerji, kimyasal bileşim içinde bağ enerjisi olarak depolanır. Bu proses tersinirdir. Deşarj sırasında, kimyasal enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür. Bir hücrede depolanabilen enerji miktarı, şarj ve deşarj durumlarında var olan kimyasal maddelerin değişik enerji içeriğiyle belirlenir. Toplamda, bu reaksiyonlar batarya sistemini karakterize eden hücre reaksiyonlarıdır.

Bu çalışma ayrıca, fotovoltaik ve rüzgâr yenilenebilir hibrit enerji sistemlerinin batarya simülasyonlarını anlatmaktadır. Simülasyon için Hybrid2 seçilmiştir. Simülasyon iki aşamayı içermektedir. Birincisi karşılanmayan yükün olmadığı sistem, ikincisi karşılanmayan yükün olduğu sistemdir. Kullanılan veri 2 gün süreyle alınmıştır. Simülasyonun zaman aralığı 1 saattir. Sonuçların analizi sistemin teknik performansını vermektedir.

SUMMARY

**TITLE: ELECTROCHEMICAL STORAGE OF ELECTRIC ENERGY
GENERATED BY PHOTOVOLTAIC AND WIND TURBINE SYSTEMS.**

AUTHOR: MUSTAFA TAŞ

This thesis describes electrochemical energy storage technologies for wind and solar power systems. This study is based on literature and simulation. In a renewable energy hybrid system, different power sources are combined to generate electricity for various applications. The availability of energy varies within the seasons of the year, during day and night and day to day due to weather conditions. To balance the differing time patterns of loads and energy production, energy storage must be included in renewable energy systems. The basic element of each battery is the electrochemical cell. A positive and a negative electrode are immersed in an electrolyte. The reactive substances (the active materials) are stored in the electrodes. Chemical and electrochemical reactions, the electrode reactions, occur at both electrodes, which release or absorb electrons.

Electrochemical accumulators convert electrical energy into chemical energy. The energy is stored in a chemical compound. This process is reversible. During discharging, the chemical energy is converted back into electrical energy. The amount of energy that can be stored in a cell is determined by the different energy content of chemical substances that represent the charged and discharged states. In total, these reactions result in the cell reactions that characterise the battery system.

This study also describes battery simulations of photovoltaic and wind hybrid renewable energy systems. Hybrid2 is chosen as the simulation environment. The simulation involves two steps. First, a system containing no unmet load. Second, a system containing unmet load. The data used were taken in a time period of 2 days. The time step of the simulation is one hour. An analysis of the results gives the technical performance of the system.

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Salih Özen Ünverdi'ye çalışmamın hazırlanması süresince bana sunduğu destekleri ve yol gösterici katkıları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ DEPOLAMA VE TEKNİK TERİMLER	4
2.1. Deşarj Kapasitesi	10
2.1.1. Kendiliğinden Deşarj ve Tampon Şarj	10
2.1.2. Derin-Deşarj	11
2.2. Kapasite ve Şarj Durumunun Tanımı	12
2.2.1. Batarya Kapasitesi ve Voltaj	13
2.2.2. Batarya Kapasitesi Modellemesi	14
2.2.3. Batarya Voltaj Modellemesi	15
3. ENERJİ DEPOLAMA VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	17
4. KURŞUN-ASİT BATARYALARLA ENERJİ DEPOLAMA	22
4.1. Kurşun-Asit Bataryanın Elektrokimyasal Sistemi	27
4.2. Kurşun-Asit Bataryaların Performansı	30
4.2.1. Çalışma Modu	30
4.2.2. Kendiliğinden Deşarj	31
4.3. Kurşun-Asit Bataryalar ve Diğer Bataryalar	32

5. VRLA BATARYALAR	34
5.1. VRLA Teknolojisinin Özellikleri	36
5.2. VRLA-Jel Bataryalarda Tekrar-Birleşme	44
5.3. VRLA Ömrünü Belirleyen Faktörler	46
5.4. VRLA-Jel Bataryalarda Tasarım ve Malzemeler	46
5.4.1. VRLA-Jel Bataryalarda Plaka Konstrüksiyonu ve Alaşımlar	47
5.4.2. Hücre/Tek Gövdeli Mahfazalar	48
5.4.3. VRLA-Jel Bataryalarda Valfler	48
5.5. VRLA-Jel Bataryalarda Depolama Koşulları	49
5.6. VRLA-Jel Bataryalarda Depolama Süresi	49
5.7. VRLA Şarj Koşulları	51
5.8. Sıcaklığın Etkisi	54
5.9. Yeni bir seperatör materyali geliştirilmesi	55
5.10 .VRLA Bataryalı Sistemler	56
6. AKIŞ BATARYALARI	67
6.1. Redoks Akış Bataryaları	67
6.2. Vanadyum Redoks Bataryaları	68
7. JEL BATARYALAR	71
7.1. Jel Kimyası	72
7.2. Jel Bataryalı Büyük Sistemler	76
8. AGM BATARYALAR VE SULU BATARYALAR	85
8.1. AGM ve VRLA Sistem Karşılaştırması	89
8.2. Sulu Bataryalar	92
9. BÜYÜK BATARYALAR	95
10. SİSTEM KARAKTERİSTİKLERİ	103
10.1. Şarj	103

10.1.1. Özel Şarj Ediciler İçin Karakteristikler	104
10.1.2. Bataryaların Kullanım ve Hızlı Şarjı	105
10.1.3. Kullanım Voltajı ve Kullanım Akımı	106
10.2. Güç Performansının Geliştirilmesi	106
10.2.1. Asit Katmanlaşması	107
10.2.2. Sülfatlaşma	109
10.2.3. Korozyon	109
10.2.4. Isı Yayılımı ve Dağıtımı	110
10.3. Batarya Davranışı Tahmini Modeli	110
10.3.1. Batarya Şarj Durumu Modeli	110
10.3.2. Batarya Denge Şarjı Voltaj Modeli	112
10.3.3. Simülasyon ve Tekrar-Kalibrasyon Yöntemleri	116
10.4. Hibrit Güneş-Rüzgâr Gücü Üretimi Projesi	117
10.4.1. Batarya Kontrol Stratejileri	119
10.4.2. Batarya Verimlilik Analizi	121
10.5. Performans Modelleri	122
10.5.1. FV Dizi Performans Modeli	122
10.5.2. Rüzgâr Türbini Performans Modeli	123
10.5.3. Batarya Şarj Durumu (SOC)	123
10.5.4. Batarya Denge Şarjı Voltajı	124
10.5.5. Akım-Voltaj Karakteristikleri	124
11. BATARYA SİMÜLASYONU	126
12. SONUÇLAR	144
KAYNAKLAR	146
ÖZGEÇMİŞ	149

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kilo	: K
Milli	: M
SMES	: Süper iletken manyetik enerji depolama
a,b,c,d	: Batarya akımının fonksiyonları
C	: Gerçek ve mevcut kapasite, Ah
C'	: Nominal veya anma kapasitesi, Ah
I	: Akım, A
P	: Güç, W
Q	: Şarj edilen veya deşarj edilen amper saat değeri, Ah
SOC	: Şarj durumu
Maks.	: Maksimum
T	: Sıcaklık, K
t	: Zaman, saat
V	: Sıcaklık kalibre edilmiş voltaj, V
V'	: Voltaj, sıcaklık etkisi yok, V
δ	: Sıcaklık katsayısı
η	: Verimlilik
σ	: Batarya kendiliğinden deşarj oranı, %/gün
ζ	: Toplam enerji verimliliği, %
bat	: Batarya
0	: Başlangıç noktası
G	: Güneş ışınlımı, W/m ²
q	: Elektron şarjının büyüklüğü
v	: Hız, m/s

α, β, γ	: FV modül için sabit parametreler
k	: Boltzmann sabiti, 1.38×10^{-23} J/K
n	: İdeallik faktörü, $1 < n < 2$
sc	: Kısa-devre
oc	: Açık-devre
α	: Nonlineer etkilerin faktörü
β	: Spesifik-bağılantılı boyutsuz katsayı
γ	: Nonlineer sıcaklık-voltaj etkileri faktörü
o	: Standart koşullardaki parametreler
A	: Amper
L	: Litre
Kg	: Kilogram
s	: Saniye
E	: Enerji
V	: Volt
I	: Akım, A
V	: Voltaj, V
R	: Direnç, ohm
W	: Watt
h	: Saat
V_{OC}	: Açık devre voltajı
Ah	: Amper saat
ηAh	: Amper-saat verimliliği
ηwh	: Enerji verimliliği
kW	: Kilo watt
MW	: Mega watt

MWh	: Mega watt saat
kW _p	: Kilo watt zirve gücü
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
AGM	: Seperatörlerine emdirilmiş elyaf
VRLA	: Valf kontrollü kurşun-asit
DOD	: Deşarj derinliği
SOC	: Şarj durumu
OCV	: Açık-devre voltajı
VPC	: Hücre başına voltaj
PSOC	: Kısmi şarj durumu
FULL _p	: Pratik tam şarj durumu
SOC _p	: Pratik şarj durumu
FV	: Fotovoltaik
FULL	: Tam şarj durumu
SOC _r	: Nisbi şarj durumu
UPCS	: Birleşik güç iyileştirme sistemi
PLD	: Programlanabilir lojik cihaz
CSM	: Bakır gerilme metal
IGBT	: İki kutuplu giriş transistörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 : Enerji depolama sistemlerinin diyagramı.	4
2.2 : Batarya kapasitesinin değişik tanımlarının bir karşılaştırması ve şarj durumu tanımları.	12
2.3 : Batarya kapasitesi ve deşarj oranı eğrisi.	13
2.4 : Tipik batarya voltajı ve kapasite eğrisi.	14
2.5 : Batarya eşdeğer devresi.	15
3.1 : Batarya ve FV dizi.	18
3.2 : Geleneksel FV batarya sisteminin blok diyagramı.	18
3.3 : Geleneksel FV rüzgâr batarya sisteminin blok diyagramı.	19
3.4 : Yardımcı güç kaynağıyla hibrit sistem.	19
3.5 : Sappora Japonya'da 32 MW rüzgâr çiftliği. Yapı, bir Vanadyum Redoks batarya kullanmaktadır.	21
4.1 : Hücre Voltajı U şarj derecesi p 'ye göre.	23
4.2 : Geleneksel bataryanın karakteristiği, kullanılabilir kapasite.	24
4.3 : Genelleştirilmiş bataryanın şeması.	24
4.4 : Kurşun-asit hücrenin şematik konstrüksiyonu.	26
5.1 : Sabit uygulamalar için ön erişim kutuplarıyla Valf düzenli kurşun-asit (VRLA) batarya (12 V, 105 Ah).	41
5.2 : Siklon hücre.	42
5.3 : Jel Valf Düzenli Kurşun-Asit hücrenin tasarımı.	46
5.4 : Boru şeklinde bir plakanın dizaynı.	48
5.5 : Kendiliğinden deşarj ve sıcaklık grafiği.	50

5.6	: Kendiliğindendeşarj ve sıcaklık.	50
5.7	: 2.25 V _{pc} 'de tekrar şarj, I ₁₀ .	51
5.8	: Çevrim sayısı DOD grafiğı.	53
5.9	: Şarj modu ve sıcaklığa bağılı olarak jel güneş batarya şarjı.	53
5.10	: Standart (doldurmasız) ve değıştirilmiş (doldurmalı) seperatör malzemesinin SEM (elektron mikroskobu taraması) fotoğrafı.	55
5.11	: Düz pozitif plakalarla ve dört kısmi sistemle, bir yedekleme sistemiyle güneş istasyonunun 192 V, 155 Ah bataryalı güç sisteminin şeması.	58
5.12	: Kapasite test çevrimi sırasında bir güneş şarjıyla tipik akım ve voltaj profili.	61
5.13	: Freiburg güneş istasyonunda sistem 2 (jel, düz plaka) 10-saat oran kapasitesinin geliştirilmesi.	62
5.14	: Her biri düz pozitif plakalı 24 V batarya içeren, 16 küçük güneş güç sisteminden dördünün şeması.	63
5.15	: Küçük bir sistemin yaklaşık 380,000 dakika (264 gün) sürede SoC şarj durumu (operasyon stratejisi 3, jel batarya).	65
6.1	: Regenesys redoks akış bataryası modülü.	68
6.2	: Vanadyum Redoks Bataryanın şematik gösterimi.	69
7.1	: Tüp şeklinde jel sabit hücre (2V, 1000Ah).	72
7.2	: Sabit Jel bataryanın (OpzV, A600 tipi) dengeleyici çalışmada değışik sıcaklıklar için ömrü.	74
7.3	: Jel bataryanın hücre başına 2.22 V dengeleyici voltajla 40 °C'de hızlandırılmış ömür süresi testi (A400 tipi).	74
7.4	: Kuru bataryanın şarj süresi (A500 tipi).	75
7.5	: 12 V 100 Ah jel bataryanın oda sıcaklığında kendiliğindendeşarjı.	76

7.6	: Tüp plakalı ve dört kısmi sistemle bir besleme sistemiyle jel tasarımının 48 V 300 Ah bataryalı güneş güç sistemi şeması.	77
7.7	: Alpler'deki tüp şeklinde plakalı jel tasarım, 162 V 600 Ah bataryalı hibrit güç sisteminin şeması.	80
7.8	: Şiddetli şarjdan önce ve sonra, şarj dengeleyici kullanılan dizinin 10 saat için kapasite gelişimi.	81
7.9	: Güneş güç istasyonu şeması.	83
7.10	: Batarya odasının fotoğrafı. İki dizide 216 V jel batarya, her biri 1100 Ah.	83
8.1	: AGM bataryalarda elektrolit doymasının enerji yoğunlu ve oksijen tekrar-birleşmesine etkisi.	85
8.2	: AGM seperatörlü, büyük 48 V'luk sabit batarya hücreleri.	86
8.3	: 30 A'de 12 V, 60 Ah AGM bataryanın değişik sıcaklıklarda deşarj eğrileri.	87
8.4	: 14.40 V'da, akımı 100 A'le sınırlanmış 12 V AGM bataryanın hızlı şarj karakteristiği.	88
8.5	: Valf kontrollü batarya sistemlerinde oksijen tekrar-birleşme yüzdesinin şarj akımıyla değişimi.	90
8.6	: Bakım gerektirmeyen değişik teknolojilerde, kurşun-asit bataryaların çevrimi sırasında asit katmanlaşması.	92
9.1	: Frekans düzenlemesi sırasında bir batarya dizisinin tipik akım dağılımı.	96
9.2	: 1.2 MWh'lık çok fonksiyonlu kurşun-asit bataryanın şeması.	98
10.1	: Değişik şarj rejimlerinin şeması.	103
10.2	: Değişik akımlarda batarya şarj prosesi.	114
10.3	: Değişik akımlarda batarya deşarj prosesi.	114

10.4 : Hibrit güneş-rüzgâr üretim sisteminin blok diyagramı.	118
10.5 : Ölçülen batarya akım verisi.	120
10.6 : Yıllık ortalama enerji dengesi.	121
11.1 : Akış şeması.	127
11.2 : Akış şeması.	128
11.3 : Akış şeması.	129
11.4 : Exide E120-9 tübiler derin çevrim bataryası voltaj eğrisi.	130
11.5 : Exide E120-9 tübiler derin çevrim bataryası ömrü.	130
11.6 : Exide E120-9 tübiler derin çevrim bataryası kapasitesi.	131
11.7 : Rüzgar-güç grafiği.	131
11.8 : FV modül I-V eğrisi.	131
11.9 : Rüzgar hızı profili.	132
11.10 : Güneş ışıınımı profili.	132
11.11 : Güneş ışıınımı zaman serisi.	132
11.12 : Sıcaklık zaman serisi.	133
11.13 : Sıcaklık profili.	133
11.14 : Yük profili.	133
11.15 : Yük zaman serisi.	134
11.16 : Ortalama AC birincil yüküdür. Yüke sağlanan gücü temsil etmemektedir.	134
11.17 : Kayıpları içermeyen FV dizinin ürettiği toplam güç ve sistemdeki tüm AC rüzgâr türbinleriyle üretilen güç.	135
11.18 : Bataryaya verilen enerji ve bataryadan alınan enerji.	136
11.19 : Güç dönüşümü ve batarya depolaması nedeniyle tüm sistem kayıpları.	136

11.20 : Batarya modülünün kapasitesi.	137
11.21 : İlk türbinin merkezinde rüzgâr hızı.	138
11.22 : Batarya voltajı.	138
11.23 : Yeni yük profili.	139
11.24 : Ortalama AC birincil yükü.	140
11.25 : Batarya modülüne verilen enerji ve batarya modülünden alınan enerji.	140
11.26 : Tüm sistem kayıpları ve sistem tarafından karşılanmayan AC ve DC yükleri.	141
11.27 : Batarya modülünün kapasitesi.	142
11.28 : Batarya voltajı.	142

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 : Akümülatörlerin özellikleri.	33
5.1 : Freiburg güneş hibrit sistemlerinde şarj/deşarj stratejisindeki değişiklikler.	59
5.2 : Şarj/deşarj stratejisinde küçük sistemlerde değişiklikler.	64
7.1 : Talhof güneş hibrit sistemlerinde şarj/deşarj stratejisinde değişimler.	79
10.1 : Hibrit güneş-rüzgâr güç üretim projesinin parametreleri.	119
10.2 : Hibrit güneş-rüzgâr güç üretiminde yük kontrol stratejileri.	120

1. GİRİŞ

Güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin bir elektrik şebekesine bağlı olmaksızın uzak alanlardan elektrik enerjisi tedariki için kullanılmasında artış vardır. Bazı ülkelerde, temel şebekeler kurulmasında bile güç tedariki güvenilirmez ve düşük kalitelidir. Bu tür alanlarda elektrik enerjisi, toplum konutlarını ve servisleri içeren, ışıklandırma, telekomünikasyon sistemleri, acil ışıklandırmalar, su pompalama, soğutucular, televizyon/radyo ve daha birçok geniş çeşitlilikte uygulamalarda gereklidir. Özellikle gelişmiş ülkelerde güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinden elektrik enerjisi talebi bulunmaktadır. Avrupada, örnek olarak Alpler, elektrik şebekesine bağlı olunmadığında rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisinin kullanıldığı tipik alanlardan biridir.

Genel olarak, güneş ve rüzgâr enerjisi sistemleri bu tür bağımsız elektrik enerjisi tedarikinde kullanılır. Bu zaman periyotlarında, enerji talebi güneş ve rüzgâr enerjisi jeneratörlerinde üretilenden daha çok olduğunda ek bir enerji kaynağı gereksinimi vardır. Aslında jeneratör tarafından üretilen enerji, nadiren tüketicinin enerji gereksinimine eşittir. Bu, özellikle güneş enerjisinin önemli ölçüde yaz ve kış mevsiminde farklı olduğunda geçerlidir. Üretilen enerjiden fazlası, depolama sistemi olmadığında kaybolacak aşırı elektrik enerjisi olur. Bir elektrik depolama sistemi veya dizel/gaz jeneratörü gereklidir. Çoğu durumda, depolama sistemi kurşun-asit bataryadır. Daha az sıklıkta nikel-kadmiyum ya da nikel-demir gibi diğer sistemler kullanılmaktadır. Bu nedenle, güneş ve rüzgâr bağımsız sistemlerinde kurşun-asit bataryalar odaktadır. Kurşun-asit sistemlerin kullanılmasındaki sebep, telekomünikasyon ve UPS sistemleriyle aynıdır. Kurşun-asit bataryalar ömür, maliyet, güç ve güvenilirlikte iyidirler. Özellikle, daha düşük maliyet kurşun-asit bataryaları çekici kılmaktadır. Göreceli olarak kurşunun yüksek ağırlığı sabit sistemler için çok önemli değildir. Volümetrik enerji yoğunluğu daha önceliklidir. Batarya, gündüz/akşam değişimlerini ve kötü hava periyotlarını karşılamak içindir. Genel olarak, bu sistemlerden yeterli enerji tedariki garanti değildir. Büyük bataryalarla bile, temel konsept %100 enerji tedariki garantisi veremez. 25 kWh/kWp oranından daha düşük orandaki sistemler, genellikle bir küçük dizel veya benzin motorunu ek güç kaynağı olarak daha uzun periyotlarda veya olağan dışı yüksek

enerji taleplerinde ekstrem durumlar için kullanırlar. Böyle bir dizel veya benzin motoru, her durumda sistemin güvenilirliğini artırır ve maliyet düşürür. Çünkü önemli ölçüde batarya boyutlarını azaltır. Fotovoltaik sistemin çoğu elemanı 25 yıla kadar oldukça uzun ömür beklentisine sahiptir. Bataryanın ömrü oldukça kısa olduğundan, bu elemanın değiştirilmesi 25 yıllık periyotta maliyetin hesaplanmasında düşünülmelidir. Bu nedenle, bataryanın ömrünün artırılması fotovoltaik sistemin tüm maliyetini azaltmada önemli bir faktördür. Bu, sadece batarya tasarımının iyileştirilmesi değil aynı zamanda uygun şarj/deşarj stratejisini uygulamada önemli etkidir. Bataryanın derindeşarjının (DoD) etkisi ve şarj için voltaj limiti önemlidir. Bakımın doğru yapılması maliyetler doğurur, fakat yapılmaması daha pahalı sonuçlara neden olur. Çünkü bakım eksikliği bataryanın servis ömründe önemli ölçüde negatif etki yaratır. Bakım gerektirmeyen bataryalar diye de anılan valf kontrollü kurşun-asit bataryaların (VRLA) kullanımı, bu sorundan kurtulmanın bir yoludur. Bağımsız güneş ve rüzgâr gücü uygulamaları iki gruba ayrılabilir. İlk kısmı oldukça küçük sistemlerdir. Güneş jeneratörü tek enerji kaynağıdır. Tüketicie elektrik enerjisi doğrudan d.c. akımı, ya da bir konvertör vasıtasıyla a.c. akımı olarak sağlanır. Günlük enerji gereksinimi 0.25 kWh civarındadır. Batarya yükü, nispeten düşük akımlardadeşarj periyodundadır ve oldukça sık çevrim vardır. Bataryanın şarj durumu (SoC) genellikle yılın zamanına bağlıdır. SoC, yaz mevsiminde %100'e yakındır ve kış zamanında oldukça düşüktür. Bataryanın en düşük şarj durumu bağımsız bir sistem tarafından kontrol edilir ve bataryanın belli bir en düşükdeşarj voltajında bağlantısını keser. Eğer yapılmazsa, batarya tümüyledeşarj olabilir. Bataryayı sağlıklı koşulda tutmak için bu durumdan kaçınılır. Böyle bir bağımsız bağlantı kesme sistemi yaklaşık aynıdeşarj akımı olduğu sürece komplike değildir. Eğerdeşarj akımı geniş oranda çeşitleniyorsa, yüksek akımlarda kutuplaşma nedeniyle ek voltaj düşmesi göz önüne alınmalıdır. Batarya, bu tür küçük sistemlerde kullanıldığında geniş sıcaklık seviyeleri olmaktadır. Çoğu uygulamada sıcaklık -10 °C ile +45 °C arasındadır. Bazı özel durumlarda daha aşırı sıcaklıklar vardır. Sıcaklık çoğu parametreyi etkiler. Bu yüzden bataryanın sıcaklığına, oda sıcaklığından önemli ölçüde farklı olduğunda dikkat edilmelidir.

Uygulamaların ikinci kısmı büyük sistemlerden oluşmaktadır. Güneş jeneratörün yanı sıra, diğer enerji kaynakları (rüzgâr jeneratörleri, dizel veya gaz

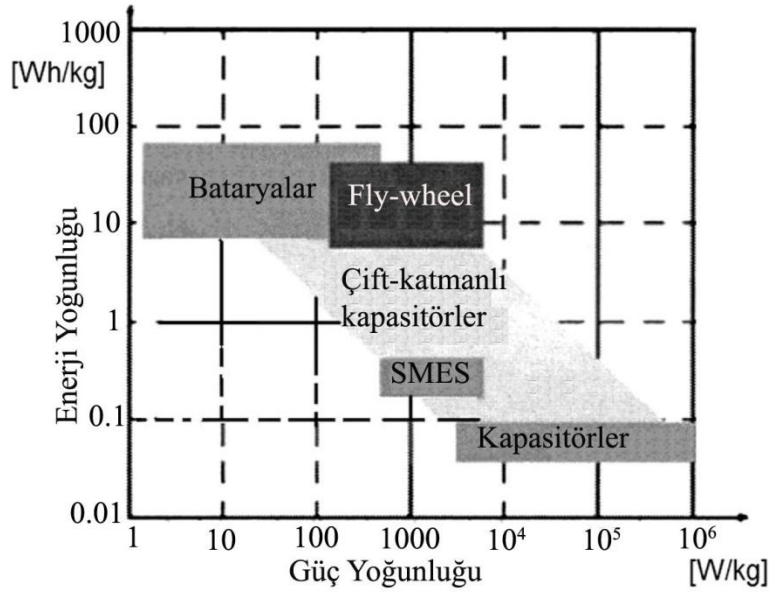
motorları) kullanılmaktadır. Bu tarz hibrit sistemler genellikle 1-100 kWh oranında günlük devire sahiptirler. Genel olarak, hibrit sistemler günde 24 saat bir veya üç evre a.c. akımla güvenilir enerji sağlamalıdır. Bu, bazen oldukça yüksek zirve talepleri içermektedir. Uygulamaların bu çeşitlerinde, batarya oldukça yoğun kullanılmaktadır. Ortalama olarak enerjinin 2/3'ü batarya vasıtasıyla transfer edilmektedir. Bu, yaklaşık 100 tam devir veya yıllık enerji devri anlamındadır. Önemli bir yüküdür ve iyi çevrim performansında bataryalar gerektirir, aksi halde yetersiz servis ömrü olmaktadır. Telekomünikasyon veya Ups gibi diğer sabit uygulamalara kıyasla güneş ve rüzgâr güç sistemleri, bataryalardan daha fazla çevrim performansına gerek duyarlar. Daha kesin olarak, bataryanın operasyonu bakımından hibrit sistemler grubu üç alt gruba ayrılabilir. Bir grup, oldukça düşük deşarj akımlarında fakat değişik şarj durumlarında (SOC) yüksek sayıda kısmi çevrimleri içerir. Sıcaklık seviyesi genellikle +5 °C ile +30 °C arasındadır. İkinci grup, orta deşarj akımları ve yüksek sayıda kısmi çevrimleri gerektirir ancak şarj durumu (SOC) %100'e yakındır ve normal olarak bataryanın derin deşarj olmaması anlamına gelir. Bu bataryalar genellikle ev bodrumlarında kurulurlar ve +5 °C ile +20 °C sıcaklık aralığında çalışırlar. Üçüncü alt grup oldukça yüksek deşarj akımları ve çok derin deşarj çevrimleri gerektirirler, bazen %20 şarj durumu seviyelerinde ve hatta daha aşağısındadırlar. Bu tür bataryalar, sabit veya orta sıcaklıkta +15 °C ile +25 °C arasında çalışırlar.

Tüm sistemin verimliliği, güneş ve rüzgâr güç uygulamalarında önemlidir. Kurşun-asit bataryanın verimliliği oldukça yüksektir. Uygulamaya bağlı olmakla birlikte birçok durumda Ah verimliliği %95'in üzerindedir, tipik olarak %97'dir ve Wh verimliliği %90'ın üzerindedir, tipik olarak %91'dir. Diğer batarya sistemleriyle karşılaştırıldığında örneğin NiC ~%90 Ah verimliliğine ve ~%80 Wh verimliliğine sahiptir.

Özel kurşun-asit bataryalar güneş ve rüzgâr güç uygulamaları için geliştirilmiş olsada, bazen standart başlangıç bataryası 50-150 Ah kapasite seviyesinde kullanılmaktadır. Başlangıç bataryaları, güneş ve rüzgâr güç uygulamalarının özel gereksinimleri için olmadıklarından, böyle bataryalar genellikle erken başarısızlığa uğrarlar ve sıklıkla değiştirilmesi gerekir.

2. ENERJİ DEPOLAMA VE TEKNİK TERİMLER

Değişik teknik alanlarda elektrik enerjisi depolama önemli bir konudur. Değişik teknolojiler kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Listelemek gerekirse: Su pompalama, Bataryalar, Sıkıştırılmış hava, Termal enerji, Flywheel, Superiletken manyetik enerji, Hidrojen enerjisi. Depolama metodları elektrokimyasal, elektriksel ve mekaniktir. Bu teknolojiler dönüşümleri her iki yönde yapmaya imkân verirler. Özellikleri, kısa dönem ve uzun dönem enerji depolama için uygun olmaktadır. Enerji depolama kapasitesi ve güç kabiliyetinde olduğu gibi enerji yoğunluğunun spesifik değeri ve güç yoğunluğu da, değişik teknolojilerin karşılaştırılması ve uygulaması için karakteristiklerdir. Değişik depolama teknolojilerinin enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu kabiliyetlerinin karşılaştırılması diyagramda gösterilmektedir [Stiebler, 2008].



Şekil 2.1. Enerji depolama sistemlerinin diyagramı [Stiebler, 2008].

Bataryalar, küçük hibrit güç sistemlerinde olduğu gibi büyük elektrik şebekelerinde de yaygın enerji depolama teknolojisidir. Bataryalar uygunluk ve maliyetlerinden ötürü popüler enerji depolama ortamıdır. Kurşun-asit bataryalar en yaygını olmakla birlikte nikel-kadmiyum bataryalar da bazen kullanılmaktadır.

Bataryalar doğal olarak DC araçlardır. Bu nedenle AC sistemlerdeki enerji depolaması, güç konvertörü gerektirir [Manwell et al., 2009].

Bataryalar üç temel kısımdan oluşurlar: negatif elektrot, pozitif elektrot ve elektrolit. Negatif elektrot elektronları dış bir yüke verir ve pozitif elektrot yükteki elektronları alır. Elektrolit, iki elektrot arasında şarj transferi için yol sağlar. Kimyasal reaksiyonun oluşmasındaki hız, iç dirence bağlıdır. Bu, bataryaların şarj ve deşarj edilebileceği maksimum gücü belirler [Goswami et. al., 2008].

Bir batarya iki ya da daha fazla elektrokimyasal hücrenin seri şekilde bağlanmasıyla meydana gelir. Birincil ve ikincil elektrokimyasal hücreler olarak ikiye ayrılırlar. Akümülatör diye de anılan ikincil bataryalar tersinir reaksiyona sahiptirler ve tekrar şarj edilebilirler. Aktif materyalin her şarj ve deşarj kombinasyonu spesifik elektrokimyasal potansiyele sahiptir.

Pozitif ve negatif elektrot arasındaki potansiyel farka, *hücre potansiyeli* veya *hücre voltajı* denir. Bir hücrenin *denge voltajı*, elektrolit konsantrasyonunun ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. *Açık devre voltajı*, harici akım akışı batarya içinde yoksa ölçülebilir. Açık devre voltajı (OCV) herhangi bir devreden bağlantısı kesildiğinde iki kutup arasındaki elektrik potansiyel farkıdır. Harici yük bağlanmamıştır. Harici elektrik akımı akışı kutuplar arasında yoktur.

Bir hücrenin kapasitesi tipik olarak amper-saat (Ah) ölçüsündedir. Kapasite, deşarj sonu voltajına sabit akım deşarjıyla tesbit edilir. Kapasite, önemli ölçüde deşarj akımına ve sıcaklığa bağlıdır. Batarya kullanıcıları deşarj akımını ve deşarj sonu voltajını kendileri belirleyebilir. Değişik ürünlerin kapasitelerini karşılaştırırken üretici tarafından belirlenen referans koşullarını kontrol etmek çok önemlidir. Tipik olarak nominal hücre voltajı seviyesi 1.2 V ve 3.6 V arasındadır. Bu nedenle, birkaç hücre genellikle seri şekilde bağlanarak daha yüksek nominal voltaj dizisi meydana getirirler. Bir bataryanın nominal voltajı, seri şekilde bağlanmış hücrelerin sayısının tek bir hücrenin nominal hücre voltajıyla çarpımıdır. Bataryalar genellikle blok yada modül şeklinde satılırlar. Taşıtlar için olan başlatma, ışıklandırma, ateşleme bataryası seri bağlı 6 hücrelidir ve 12 V blok halinde satılır.

Bir hücrenin kapasitesini arttırmak için, genellikle birkaç dizi pozitif ve negatif elektrot tek bir hücrede paralel bağlanır. Kapasiteyi daha da arttırmak için, iki ya da daha fazla dizi paralel bağlanabilir. Bir bataryanın *nominal enerji* içeriği (Wh veya kWh), nominal batarya voltajıyla nominal batarya amper-saat kapasitesinin çarpımıyla tanımlanır.

Şarj durumu (SoC), belli bir zamanda bir bataryadan deşarj edilebilen kapasiteyi verir. Yüzde yüz şarj durumu demek tam şarjlı batarya demektir. %0 SoC nominal kapasite deşarj olmuş demektir. Genellikle SoC yerine *deşarj derinliği* (DOD) literatürde kullanılır. DOD batarya tam şarjlı olduğunda %0 olmaktadır ve nominal kapasite bataryadan deşarj olduğunda %100 olmaktadır ($DOD = \%100 - SoC$).

Tipik olarak, pozitif batarya akımı bataryanın SoC değerini artırır ve negatif akım SoC değerini düşürür ancak bazı kaynaklar ters tanımı kullanmaktadır.

Bir çevrim, deşarjı takip eden şarjı temsil eder. Bir bataryanın çevrim ömrü DOD fonksiyonu olarak çevrim sayıları ile verilir. Bununla birlikte, otonom güç sağlamada sistem çevrimleri belirtildiği gibi oluşmaz. Bir makro çevrimde (iki tam şarj durumu arasındaki zaman) birçok *kısmi çevrim* oluşur. Burada kısmi çevrim, batarya akımının doğrultusundaki değişim zamanında şarj transferi olarak tanımlanır. Otonom güç sağlama sistemlerinde şarj transferi *kapasite çıktısı* diye tanımlanır. Bataryadan deşarj edilen biriktirilmiş amper saatin nominal kapasiteye bölünmesi olarak verilir. Sonuç sayısı, batarya ömrü boyunca iletilen %100 DOD çevrimleri sayısına eşittir. Bu normalize edilmiş sayı, burada kapasite çıktısı diye alınmaktadır.

Verimlilik güneş ve rüzgâr uygulamaları bataryalarında %100 değildir. Batarya kayıpları akıllı kontrol operasyonu ile minimize edilir ancak çoğu kayıplar deşarj ve şarj sırasındaki farklar nedeniyle ve batarya operasyonunun doğasında vardır. Batarya verimliliğinin iki ölçütü vardır. Coulomb verimliliği, deşarj sırasında bataryadan iletilen şarjın bataryaya verilen şarja bir tam şarj-deşarj çevrimdeki oranıdır. Tipik Coulomb verimliliği %90 olmaktadır. Coulomb verimliliği, düşük şarj akımlarında ve azaltılmış gazlaşmada daha yüksektir. İkinci verimlilik ölçütü enerjik verimliliktir. Enerjik verimlilik genellikle çalışma koşullarına bağlı olarak %60 ile %90 arasındadır.

Amper-saat verimliliği ηAh belli bir zamanda bataryadan deşarj edilen amper-saatin bataryayı şarj eden amper-saate bölünmesi oranıyla tanımlanır (tipik olarak bir ay veya bir sene ya da iki tam şarj prosesi arasındaki periyotta). Genelde, amper-saat verimliliği yerine *şarj faktörü* kullanılmaktadır, $1/\eta Ah$ olarak tanımlanır. Batarya operasyonu için şarj faktörünün birden büyük olması gereklidir.

Enerji verimliliği η_{wh} belli bir zamanda bataryadan deşarj edilen enerjinin bataryayı şarj eden enerjiye oranıdır.

Bir bataryanın boyutu, tam şarjlı durumda nominal enerji içeriğiyle verilir. Otonom güç sağlama sistemlerinde bataryanın bağıl boyutunu ifade etmek için *otonomi günleri* terimi kullanılır. “Otonomi günleri” bataryanın nominal enerji içeriğinin (kWh) günlük ortalama enerji tüketimine (kWh/gün) oranı olarak tanımlanır (bazen pratik kapasite nominal kapasitenin yerine kullanılır). Bu nedenle birim “günler” olmaktadır ve tam şarjlı bataryadan bir sistemin ne kadar süre beslenebileceğini ifade eder.

Batarya akımı, genelde batarya boyutuna bağlı olarak verilir. Bunun sebebi, gerilim ve akıma-bağlı elektriksel özelliklerin, elektrotlarda kullanılan aktif maddeye göre değişen özgül akım yüklerine bağlı olmasıdır. Paralel bağlı elektrotlardan, hücrelerden veya daha büyük elektrotlardan oluşmuş büyük kapasiteler için akımın kapasiteye normalizasyonu uygun ölçümdür. Bu nedenle batarya akımı, amper-saat kapasitenin veya deşarj akımını tanımlayan kapasitenin katı olarak ifade edilir. $C = 100$ Ah kapasiteli bir batarya için, 10 A akım $0.1 \times C$ olarak tanımlanır. I_{10} tam şarjlı bataryayı 10 saat içinde tanımlanan deşarj sonu voltajına deşarj eden akımdır. Kapasite için tipik terminoloji C_x dir. Şarj voltajı sonu, bir üst voltaj limiti tanımlar. Bataryanın şarjı, şarj voltajı sonuna erişene dek durdurulmaz. Şarj akımı ise şarj voltajı sonuna göre zamanla azaltılır.

Bataryaların ömrü sonludur. Batarya ömrü, şarj-deşarj çevrimlerinin derinliği ve sayısının bir fonksiyonudur ve ayrıca batarya dizaynıyla ilgilidir. Bir bataryanın ömrü, çalışma koşullarına ve kontrol stratejisine çok bağlıdır. Üreticiler genelde iki tip ömür tanımlarlar: denge ömrü (takvim ömrü) sabit şarj koşulları altında çevrim olmayan ömrü verir (tipik uygulamaları kesintisiz güç sağlama) ve sürekli çevrim

için ömür (tipik uygulaması forklift kamyonlar). Bazen öz *ömrü* verilir. Bu, bataryanın kullanımdan önce ne kadar süre depolanabileceğini tanımlar. Diğer depolama ortamlarına benzemeyerek, batarya kapasitesi kullanımla birlikte düşer. Bataryalar, tipik olarak kapasiteleri anma kapasitelerin %60'ına düştüğünde tükenmiş düşünülür. Genellikle, verilen bir batarya için, daha derin çevrimde derin deşarj, bataryanın ömrünü kısaltır. Çevrim ömrü ayrıca bataryanın konstrüksiyonuna bağlıdır. Uzun çevrim ömürlü bataryalar 1500-2000 derin deşarj çevrimlerinde sonlanırlar. Oysa otomobil bataryaları sadece 20 kez derin deşarj olabilirler. Batarya ömrü, bazen malzeme yorgunluğu için geliştirilmiş tekniklerden sonra modellenir.

Kendiliğinden deşarj, kapasitenin açık-devre durumlarında kaybını tanımlar. Sıcaklığa çok bağlıdır.

Sağlık durumu, esas ölçülen kapasitenin, anma veya nominal kapasiteye oranı olarak tanımlanır. Sağlık durumu, bataryanın işlevini hangi derecede yapabildiğini gösterir. Normlara göre, kurşun-asit bataryalar sağlık durumları %80'in altındaysa ömürlerinin sonundadır. Buna rağmen bataryalar önemli ölçüde uzun çalışırlar ancak bu sistemler doğru şekilde enerji ihtiyaçlarını tam yerine getirmeyebilir. Sağlık durumu %50 olan bataryalar özellikle hibrit sistemlerde sıkça bulunurlar.

Derin deşarj, bir bataryanın tam şarj kapasitesinin %20 veya daha azına deşarj edilmesidir. Derin deşarj, bir bataryadan ne kadar enerji çekildiğinin ölçüsüdür, tam kapasitenin yüzdesi olarak ifade edilir. Derin deşarj, şarj durumunun (SoC) tersidir.

Her biri 2 Volt olan 6 hücre içeren 12 V bataryayı 2.3 VPC de şarj etmek için, batarya kutupları arasına 13.8 V uygulamak gerekir. I_{10} = Bataryayı 10 saatte deşarj edebilecek akımdır. $C = 40\text{Ah}$ ise, 10 saat temel alınarak $I_{10} = 40/10 = 4\text{A}$ bulunur ve 10 A akım $2.5 I_{10}$ olarak yazılabilir.

Tampon şarjı, düşük bir oranda sürekli şarj anlamındadır. Yaklaşık olarak bataryanın iç kayıplarına eşittir ve çok düşük bir şarj akımı ile bataryaların fazla şarj olmasına sebep olmadan sürekli tam dolu tutulmasını sağlar. IU-şarj (denge şarjı) veya limitli akımla birlikte I-şarj (sabit akım) vasıtasıyla gerçekleştirilebilir.

Ah: miliAmper-saat (mAh) ve miliAmper saniye (mAs) alt birimlerinde elektrik şarjının bir birimidir. Bir Amper-saat 3600 Coulomb eşdeğeridir (Amper-saniye), bir saat için bir Amper sabit akımında transfer edilen elektrik şarjıdır.

Anma Voltajı (Nominal voltaj), tam şarjlı bir akü hücresinin kutupları arasında ölçülen voltaj değeridir. Aküler bu voltaj değeri ile anılırlar. Satılırken, alınırken ve üzerlerindeki etiketlerde, bu voltaj değeri ile tanımlanırlar. Kurşun-asit türü bir akü hücresinin anma voltajı 2 Volt olmaktadır.

Anma Kapasitesi, bir akünün 10 saat süreyle, nominal akımla ve hücre gerilimi 1.8 volta düşünceye kadar yapılan deşarj sonundaki kapasiteye denir. Bu kapasite değeri "nominal kapasite" olarak ifade edilir. Formüllerde çoğunlukla (C10) sembolüyle gösterilir. Akülerin üzerindeki etikette yazılı değer, anma kapasitesidir. Nominal deşarj akımı, anma kapasitesinin 10 saate bölümünden elde edilen akım değeridir. C10 bataryanın 10 saat deşarjındaki kapasitesidir. C20 ise 20 saattedir. Böylece batarya ne kadar çabuk boşaltılırsa o kadar az kapasite elde edilir. Kapasite birimi olan Amper-saat, deşarj akımı ile deşarj süresinin çarpımıdır. Nominal akımdan daha yüksek akımla yapılan deşarjlar için geçerli değildir. *SOC (şarj durumu)*, bataryada kalan kullanılabilir kapasitedir.

Batarya kapasitesi ve ömrü, sıcaklığın fonksiyonudur. Kullanılabilir batarya kapasitesi sıcaklık düştükçe düşer. Tipik olarak, 0 °C'de batarya kapasitesi oda sıcaklığındakinin sadece yarısı kadardır. Oda sıcaklığının üzerinde batarya kapasitesi bir miktar artar, ancak batarya ömrü dramatik olarak düşer.

Denge akımı (Float current), DC akımın bataryayı şarjlı halde tutmasıdır. Denge voltajına da benzer. Bu akım, açık devre kayıplarını karşılar.

Bekleme Bataryası, kritik sistemlere güç kaybı durumunda elektrik gücü temin eder. Bekleme bataryaları, elektrik üretim sistemlerindeki dalgalanmaları düzelteren voltaj stabilizatörleridir. Yüksek kapasiteli jel bataryalar normal olarak tübüler plakalıdır. Bu türden bataryalar için kapasite seviyesi 200 ve 3000 Ah arasındadır. Bu bataryalar yüksek güvenilirlik ve uzun servis ömrüne sahiptirler. Gerçek servis ömrünün 20 °C civarında, 15 ile 18 yıl arasında olduğu görülmektedir.

2.1. Deşarj Kapasitesi

Kurşun-asit bataryaların kapasitesi, deşarj koşullarına çok bağlıdır. Ölçülen veya pratik kapasite, deşarj akımı düştükçe artar. Eğer bir batarya, anma akımından daha düşük akımda deşarj edilirse anma kapasitesinden daha yüksek bir kapasite alınabilir. Elektriksel özellikler bakımından sıcaklık, iç direnci etkiler (elektrolit iletkenliği artan sıcaklıkla artar). Bu nedenle, kurşun-asit bataryaların kapasiteleri sıcaklığa çok bağlıdır. Kapasite, sıcaklık artışıyla yaklaşık $0.6/K$ ile lineer olarak artar. Aynı şekilde kapasite düşen sıcaklıklarla düşer. Batarya teknolojisine bağlı olarak sıcaklık katsayısı $1.0/K$ büyüklüğünde olabilir [Luque et. al., 2003].

2.1.1. Kendiliğinden Deşarj ve Tampon Şarj

Tam dolu şarjı sağlamak için, kendiliğinden deşarj oranına karşı, sürekli tampon şarj uygulanır. Genellikle oran çoğu elektrokimya uygulamaları için normal çalışma koşullarında günde %1'den daha azdır. Batarya tam şarj olduktan sonra, şarj verimliliği sıfıra düşer. Fazladan her şarj, ısıya dönüşecektir. Eğer geniş periyotta kendiliğinden deşarj oranından daha fazla oranlarda aşırı şarj edilirse batarya aşırı ısınır ve potansiyel patlama tehlikesi oluşur. Bu nedenle batarya şarjı, batarya tam şarj edildiğinde şarj oranını tampon şarja çeviren bir düzenleyiciye sahip olmalıdır. Herhangi bir aşırı şarj, aşırı gazlaşma üretir ve elektrotları yıpratarak ömrü kısaltır. Tampon şarj, kontrollü miktarda iç gazlaşmaya neden olur. Batarya elektrolitinin karışmasını sağlar ve tam şarj iletmesine hazırlar [Patel, 1999].

2.1.2. Derin-Deşarj

Jel-bataryalar, derin-deşarja karşı dayanıklıdırlar. Bu, bataryanın en az 2.I₂₀ deşarj akımına eşit bir yük direncine bağlı olduğu ve bu halde 30 gün tutulduğu anlamına gelir. Bataryanın yük bağlantısı kesildikten sonra ve 48 saatten fazla tekrar şarj edildiğinde, en az kapasitenin %75'ine ulaşılmalıdır. Jel bataryalar, derin deşarjlara AGM bataryalardan elektrolit fazlalığı ve mikro-gözenek ayırıcısı kullanımı nedeniyle daha dayanıklıdırlar. Bacalı hücreler veya monobloklar en fazla miktarda elektrolite sahiptirler. Jel ve AGM durumları karşılaştırılırsa; jel bataryalarda 1.5 ile 1.7 arası daha fazla elektrolit, jel bloklarda 1.4 ile 1.8 arası daha fazla elektrolit vardır.

Bir deşarj sırasında özellikle bir derin-deşarj sırasında şunlar olmaktadır;

Sülfürik asitin kurşun sülfata dönüşümüyle konsantrasyon düşer. Su oluşur. Devam eden deşarjla asit yoğunluğu suyun yoğunluğuna yaklaşır.

Artan derin deşarj, asit konsantrasyonunda düşmeye ve artan sülfatlaşmayla sülfat çözünürlüğünün artmasına sebep olur. Mekanik gerilme artar çünkü aktif materyalin spesifik hacminde uzun batarya dizilerinde değişmeler olur. Bu nedenlerle normal operasyonda maksimum derin deşarj limitlenmelidir [Luque et al., 2003].

Kurşun sülfatın çözünürlüğü düşük asit yoğunluğunda artar.

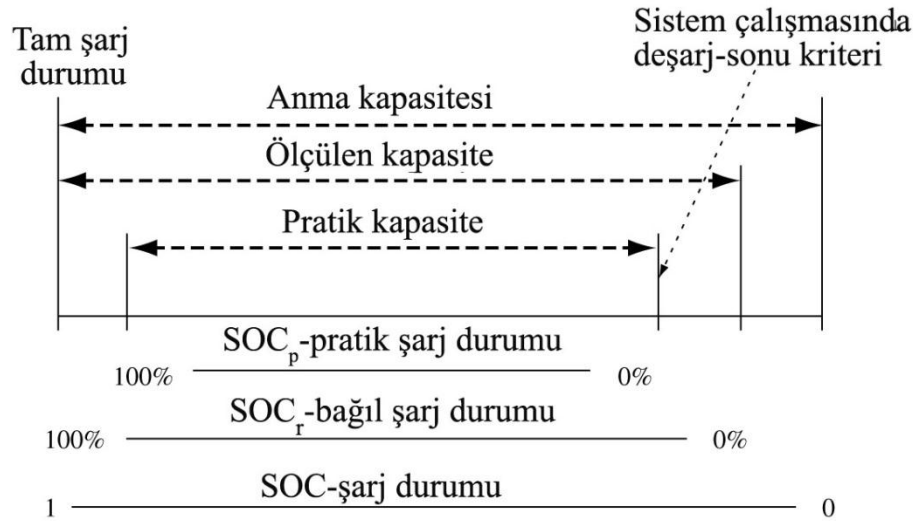
- Suda çözünür.
- Elektrolitte çözünmüş iyonlar.
- Kurşun iyonları takip eden tekrar şarj sırasında saf kurşuna tekrar dönüştürülür.
- Kısa devrelere neden olunabilir.

Jel bataryalarda asit yoğunluğu, bir deşarj sırasında örneğin bir derin deşarjda elektrolit fazlalığı nedeniyle AGM bataryalardaki kadar düşmez. Bu nedenle, jel

bataryalarda kısa devre üretme, AGM bataryalar kadar kuvvetli değildir. Ek olarak, jel bataryalarda kullanılan mikro gözenek ayırıcısı kısa devreleri önler [URL-1].

2.2. Kapasite ve Şarj Durumunun Tanımı

Otonom güç sağlama sistemlerinde çalışma ve enerji yönetimi için, bataryanın kapasitesi ve esas şarj durumu en önemli parametrelerdir. Şarj durumu saptanması, otonom enerji sağlama sistemlerinde yenilenebilir enerjilerle zordur çünkü bataryanın tam şarjının sıkça yapılması geleneksel batarya şarj edicilerle olağan değildir. Eğer şarj durumu gösterilirse, spesifik değerlerin ne olduğu sorusu ortaya çıkar. (Şekil 2.2)'de batarya kapasitesi ve buna karşılık şarj durumu tanımları gösterilmektedir. Bataryanın ölçülen kapasitesi, üretici tarafından verilen anma kapasitesinden daha küçük veya daha yüksek olabilir. Ömür boyunca ölçülen kapasite, yaşlanma etkileriyle zamanla azalır. Pratik kapasite, ölçülen kapasiteden düşüktür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının özel durumları nedeniyle batarya hiçbir zaman tam şarj olmaz (şarj saatleri sayısı limitlidir). Güneş bataryaları için ulaşılan maksimum şarj durumu, normal sistem operasyonunda “güneş-tam-şarj durumu” diye anılır. Sistem, bataryanın derin deşarjından kaçınmak için bir deşarj-sonu belirler.

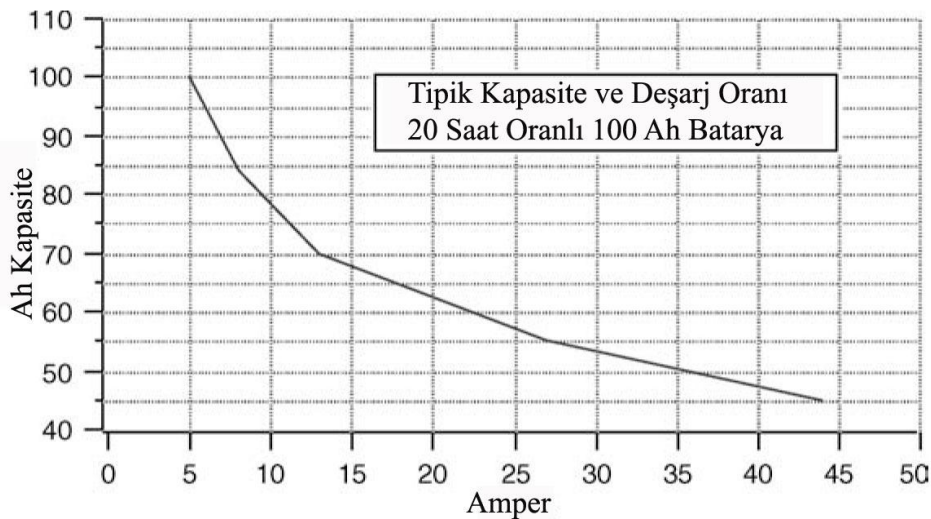


Şekil 2.2. Batarya kapasitesinin değişik tanımlarının bir karşılaştırması ve şarj durumu tanımları [Luque et al., 2003].

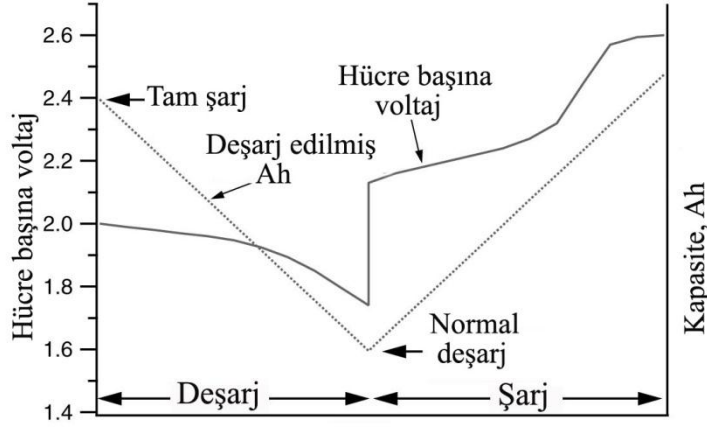
Anma kapasitesi veya nominal kapasite 10-saat deşarj kapasitesi C_{10} ile tanımlanır. Bu SoC saptanması için temeldir. Anma kapasitesi veya nominal kapasite, bataryanın ömrü boyunca değişmez. Oysa ölçülen kapasite zamanla değişir. Ölçülen kapasiteye göre şarj durumu bağıl şarj durumu (SoC_r) diye tanımlanır. Pratik kapasite C_p , ölçülen kapasiteden daima küçüktür. Pratik kapasiteyle ilgili şarj durumu tanımı, pratik şarj durumudur (SoC_p). Güneş bataryaları için SoC_p , güneş-tam-şarj durumu sağlandığında %100 olmaktadır [Luque et al., 2003].

2.2.1. Batarya Kapasitesi ve Voltaj

Toplam batarya kapasitesi, Amper-saat (Ah) şeklinde ifade edilir. Anma batarya kapasitesi, voltaj her hücrede 1.75 V'a (12 V bataryada 10.5 V) düşene dek anma akımında Ah deşarj edilmiş olarak düşünülür. Kullanılabilir batarya kapasitesi, şarj veya deşarj oranına bağlıdır. Yüksek deşarj oranları, bataryanın erken boşalmasına neden olur. Voltaj ileride düşer ve kullanılabilir enerji kalmaz. Düşük deşarj oranlarında, voltaj düşmeden önce, batarya çok daha fazla enerji sağlayabilir. Yüksek şarj oranları, sonradan kısa bir sürede çabuk artan kutup voltajıyla sonuçlanır. Yavaş şarj oranları çok daha fazla şarjın bataryaya geri dönmesiyle sonuçlanır. (Şekil 2.3) kullanılan bir batarya kapasitesi ve deşarj oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir [Manwell et al., 2009].



Şekil 2.3. Batarya kapasitesi ve deşarj oranı eğrisi [Manwell et al., 2009].



Şekil 2.4. Tipik batarya voltajı ve kapasite eğrisi [Manwell et al., 2009].

2.2.2. Batarya Kapasitesi Modellemesi

Şarj ve deşarj sırasında, artan şarj ve deşarj oranıyla batarya kapasitesi düşer. Bu haller, şarjın bir kısmının kullanılabilir ve sınırının olduğu farzedilerek modellenebilir. Sınır şarjı, oran sabiti k 'ya orantılı bir seviyede serbest bırakılabilir. Kinetik batarya modeli bu varsayımı somutlaştırır ve batarya kapasitesiyle voltajını modellemek için kullanılabilir. Bu modelde, toplam şarj “ q ” bataryada herhangi bir zamanda kullanılabilir şarjın ve sınır şarjının toplamıdır. Bu model aslında kurşun-asit bataryalar için geliştirilmiştir, ancak diğer tipteki bataryalarda uygulanabilir. Bu modele göre, maksimum görünen kapasite, $q_{\max}(I)$ akım I 'da şöyle verilir;

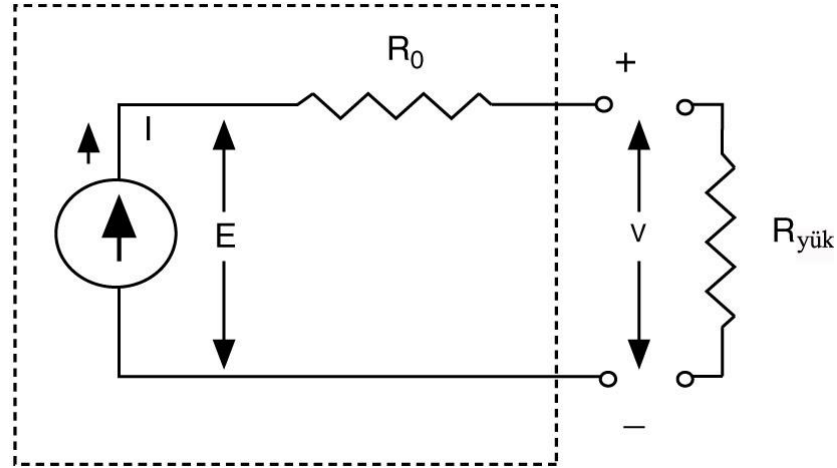
$$q_{\max}(I) = [q_{\max} kct] / [1 - e^{-kt} + c(kt - 1 + e^{-kt})] \quad (2.1)$$

- t = Şarj veya deşarj zamanı, tanımlı olduğu $q_{\max}(I)/I$, saat
- $q_{\max}$ = Maksimum kapasite (çok küçük akımda), Ah
- k = Oran sabiti, saat⁻¹
- c = Kullanılabilir şarj kapasitesinin toplam kapasiteye oranı

Üç sabit, $q_{\max}$, k ve c üreticiden veya test datasından sağlanabilir [Manwell et al., 2009].

2.2.3. Batarya Voltaj Modellemesi

Batarya kutup voltajı, V , şarj durumunun ve akımın bir fonksiyonu olarak eşdeğer devre kullanılarak (Şekil 2.5) modellenebilir.



Şekil 2.5. Batarya eşdeğer devresi [Manwell et al., 2009].

Eşitlik 2.2 Kutup voltajını iç voltaj E_0 ve iç direnç R_0 cinsinde tanımlamaktadır.

Eşitlik 2.3 Bataryanın iç voltajını şarj durumuna ilişkilendirir.

$$V = E - IR \quad (2.2)$$

$$E = E_0 + AX + CX / (DX) \quad (2.3)$$

E_0 , tam şarj edilmiş/deşarj edilmiş iç batarya voltajıdır (herhangi iç süreksizlikten sonra).

A , şarj durumuyla birlikte batarya iç voltajının ilk lineer çeşitliliğini yansıtan parametre. “ A ” tipik olarakdeşarjda negatif sayıdır ve şarjda pozitifdir.

C, batarya voltajının batarya devamlı olarak deşarj/şarj edildiğinde düşüşünü/artışını yansıtan parametredir. C deşarj sırasında daima negatiftir ve şarj sırasında pozitifdir.

D, batarya voltajının batarya devamlı olarak deşarj/şarj edildiğinde düşüşünü/artışını yansıtan parametredir. D pozitifdir ve normal olarak yaklaşık 1.0'a eşittir [Manwell et al., 2009].

X = Verilen akımda normalize edilmiş kapasitedir.

Normalleştirilmiş kapasite X , şarj sırasında bataryadaki şarj cinsinden şu şekilde belirlenir:

$$X = q / q_{\max}(I) \quad (2.4)$$

Sabit akım deşarjı sırasında X , ortadan kaldırılan şarj cinsinden şöyle tanımlanır;

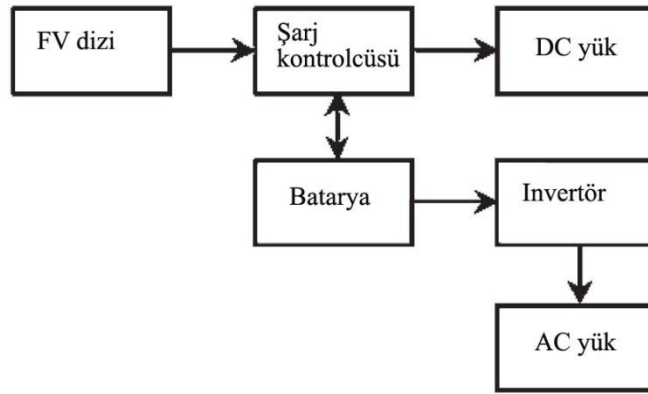
$$X = (q_{\max}(I) - q) / q_{\max}(I) \quad (2.5)$$

3. ENERJİ DEPOLAMA VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

FV (fotovoltaik) sistemler, yeterli güneş ışığı olmadığı periyotları, örneğin gece vaktini veya bulutlu havalardakini karşılamak için enerji depolamaya ihtiyaç duyarlar. Elektrik depolamasını gerektiren tüm durumlarda klasik elektrokimyasal akü bataryaları, FV sistemler için enerji depolamada klasik formdur. Özellikle sağlanan FV enerjinin transformasyonu gerekmedikçe DC (doğru akım) karakteristiği FV jeneratörlerle batarya arasındaki direkt bağlantıya izin verir. Bataryanın ömür beklentisi genelde FV sistem bileşenlerinden daha düşük olması sebebiyle, FV sistemlerde batarya sistemin en zayıf noktası olmaktadır. Şebeke bağlantısız FV sistemlerin ömür maliyetlerinin %30 veya daha fazlası depolamayla ilgilidir.

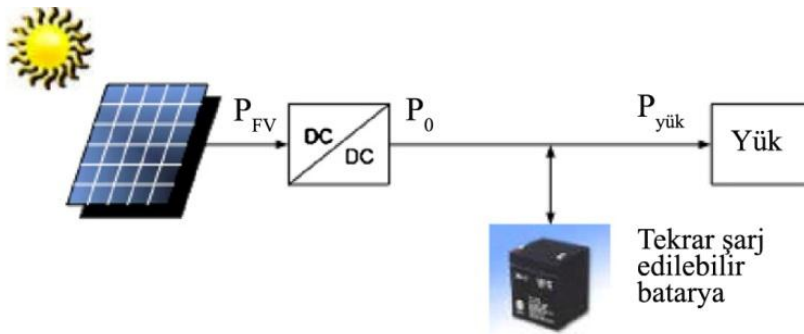
FV jeneratörün boyutlandırılmasında, genellikle tüm enerji talebinin göze alınan yüklerde ortalama ışık koşullarında karşılanabileceği varsayılır. Yaz mevsiminde, herhangi bir FV sistemi daha düşük güneş ışığı koşullarında tasarlandığı için aşırı enerji üretim koşulunda çalışır. Sonuç olarak, batarya maksimum şarj voltajı eşiğine neredeyse her gün ortasında veya öğleden sonra ulaşır ve akşama dek %100 şarj olur. Akşam boyunca batarya deşarj olur ve sabah güneş doğduğunda şarjı en düşük seviyeye iner. Sonraki gün, önceki gün boyunca olduğu gibi aynı şarj çevrimi tekrar eder ve akşam tekrar tam şarjlıdır. Bunlar bir FV batarya için optimum çalışma koşullarıdır. Kış mevsiminde ise eğer fazlaca boyutlandırılmamışsa, aynı FV sistem, enerji açığıyla daha fazla karşılaşabilir. Bulutlu hava (direkt güneş olmadan) daha fazla devam ettiğinde, bataryanın şarj durumu kademeli olarak azalır ve daha sonra batarya voltajı minimum voltaj eşiğinin altına düşer. Kullanıcılar tüketimi kendi isteğiyle azaltmadıkça sonuç yükü kesmektir. Yük kesilmesi, batarya makul voltaj seviyesine ulaşana kadar devam eder. Kış mevsimi boyunca, batarya daha sık zararlı derin deşarj periyotlarına maruz kalabilir. Kullanıcının kendi FV sistemini dikkatli kontrol etmesi gerekir. Batarya %100 şarj durumuna ulaştığında veya minimum deşarj voltajı eşiğine vardığında, bir yarı şarj denge durumunda çevrim oluşur. Ancak, diğer durumlara kıyasla bu orta çalışma durumu batarya ömrü için diğerleri kadar sık olmadıkça düşük önemdedir.

FV bataryanın çalışma koşulları ve ömrü birincil olarak, batarya %100 tam şarj durumunda (optimum olanı) olduğu gün sayısı ve minimum deşarj voltajı eşiğine (en kötü çalışma koşulu) ulaştığı gün sayısı ile saptanır. Eğer FV jeneratör, göze alınan yükler için çok küçük boyutlandırılmışsa, batarya derin deşarj koşullarına yıl boyunca daha sık ulaşır ve ömrü kısalır. Bunun yerine FV jeneratör aşırı boyutlandırılmışsa, batarya %100 tam şarj koşullarına hemen hemen yılın hergünü ulaşır ve ömrü uzar.

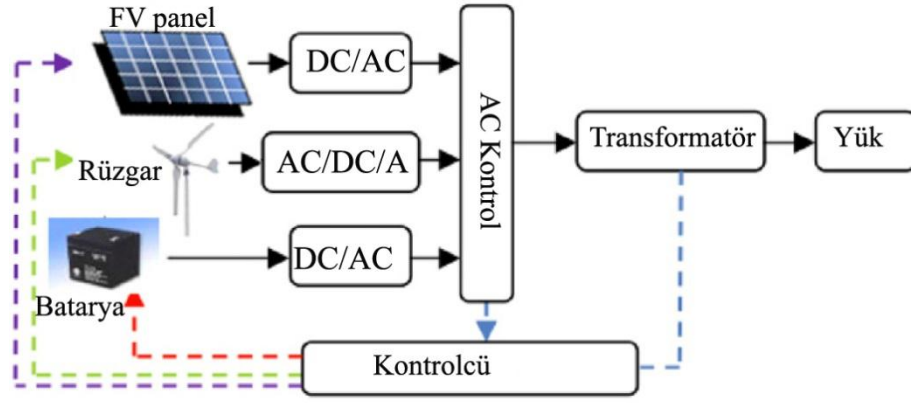


Şekil 3.1. Batarya ve FV dizi [Pistoia, 2008].

Bir batarya ve FV dizi şeması (Şekil 3.1)'de temsil edilmektedir.

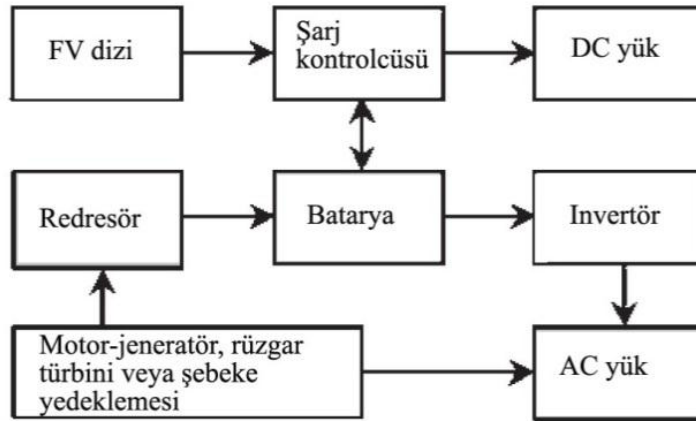


Şekil 3.2. Geleneksel FV batarya sisteminin blok diyagramı [M. Fadaee et al., 2001].



Şekil 3.3. Geleneksel FV rüzgâr batarya sisteminin blok diyagramı [Fadaee et al., 2012].

(Şekil 3.3)'de geleneksel FV rüzgâr bataryası gösterilmektedir. (Şekil 3.4) yardımcı güç kaynağıyla hibrit sistemi temsil etmektedir.



Şekil 3.4. Yardımcı güç kaynağıyla hibrit sistem [Pistoia, 2008].

Batarya ömrü, FV sistemin ömür maliyetlerini belirleyen bir faktör olduğu sürece, maksimum batarya ömrü hedefleniyorsa kompleks bir kurallar dizisine uyulmalıdır. Bunlar, uygulama için en uygun olan teknolojinin seçilmesi, uygun olan şarj sonu ve deşarj sonu eşiklerinin belirlenmesi, derin deşarjdan kaçınmak, elektrolitte asit katmanlaşmasından kaçınmak, yüksek batarya sıcaklıklarından kaçınmak, sıklıkla tam şarj sağlamak gibi kurallardır.

Bataryanın şarjı sırasında yüksek voltajlardan kaçınmak daha az korozyon ve su kaybı oluşturur. Deşarj sırasında düşük voltajlardan kaçınmak, korozyon miktarını azaltır. Bataryanın tam şarj olmadan uzun periyotlarından kaçınmak, sülfatlaşmayı azaltır. Derin deşarjdan kaçınmak, daha az sülfatlaşma ve daha az dendrit büyümesi sağlar. Elektrolitte katmanlaşmadan uzak durmak, daha az sülfatlaşmaya neden olur. Yüksek batarya sıcaklıklarından kaçınmak, yavaş yaşlanma prosesi sağlar. Her ay bir kez aşırı şarj etmek sık tam şarj sağlar. Görülebiliyorki bazı kurallar birbiriyle çelişmektedir. (örneğin tam şarj yüksek voltajlar gerektirir ama yüksek voltajlar korozyonu artırır). Fotovoltaik sistemlerde bu kurallara her zaman uyulması zordur [Luque et al., 2003].

Nispeten büyük bir bataryayla bile temel sistem (güneş jeneratörü batarya) %100 enerji sağlama garantisi vermez. Bataryanın mevcut depolanan enerjisi ve güneş jeneratörü zirve güç kabiliyeti arasındaki oranı 25 kWh/kW'dan küçük olan sistemler ek güç kaynağına ihtiyaç duyarlar. Motor jeneratörü güç kaynağı, uzun kötü hava periyotları veya olağan dışı yüksek enerji gereksinimleri gibi durumlar içindir. Bu, her durumda sistemin güvenilirliğini artırır ve ek olarak maliyeti de azaltabilir çünkü batarya boyutunu önemli ölçüde azaltır.

Ek bir güç kaynağıyla ya da kaynaksız bataryaların FV sistemlerde olmasının önemi, kritik yüklerde ortaya çıkmaktadır. Normal koşullarda enerji, FV dizisi veya yardımcı güçlerle sağlanır. Şebekede başarısızlık ya da enerji kesilmesiyle batarya kritik yüklere enerji sağlar. Batarya kullanımıyla gece-gündüz çevrimlerinde veya güneşli-bulutlu koşullarda çıkış dalgalanmaları düzeltilir.

Güç çıkışındaki dalgalanmalar, rüzgâr hızının kübüyle orantılı olduğundan rüzgâr jeneratörlerinde daha önemlidir. Bir jeneratöre batarya eklemek dalgalanmaları yok eder. Çok sayıda jeneratörün bağlı olduğu rüzgâr çiftliği gibi uygulamalarda toplam güçteki dalgalanmalar azaltılır. İdeal şartlarda güç çıkışı değişimi $1/n$ oranında azaltılır, burada n jeneratör sayısıdır.

Çok büyük rüzgâr türbinleri ve rüzgâr çiftlikleri yapılmıştır. (Şekilde 3.5)'de büyük batarya kurulumu, vanadyum-redoks akış teknolojisini çıkış dalgalanmalarını düzeltmek için kullanmaktadır.

Enerji depolama, gereksinim duyulan enerji ve hazır bulunan rüzgâr enerjisi arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırmaya yardımcı olabilir. İki karakteristik özellikle ilgi alanıdır: (1) Her birim maliyete depolanabilecek enerji miktarı (2) Enerjinin alınabileceği ve nakledilebileceği oran (güç). Depolamanın zaman ölçeğinde önemlidir. Günümüzde, rüzgâr enerji uygulamaları için en yaygın depolama ortamı bataryalardır.

Büyük bataryalar 1000 V da 50 MWh seviyesinde gereklidir. Küçük boyutlu bataryalar yenilenebilir ancak kesintili enerji kaynakları sistemlerinde, enerji depolamada kullanılmaktadır.

Bakım gerektirmeyen bataryalar (100 Ah boyutunda) ayda %5'den daha düşük kendiliğinden deşarj oranıyla, tekrar şarjı 8 saatten az, 1000-2000 çevrime %80 derin deşarjda operasyon sağlarlar [Linden et al., 2002; Manwell et al., 2009].



Şekil 3.5. Sappora Japonya'da 32 MW rüzgâr çiftliği. Yapı, bir Vanadyum Redoks batarya kullanmaktadır [Pistoia, 2008].

4. KURŞUN-ASİT BATARYALARLA ENERJİ DEPOLAMA

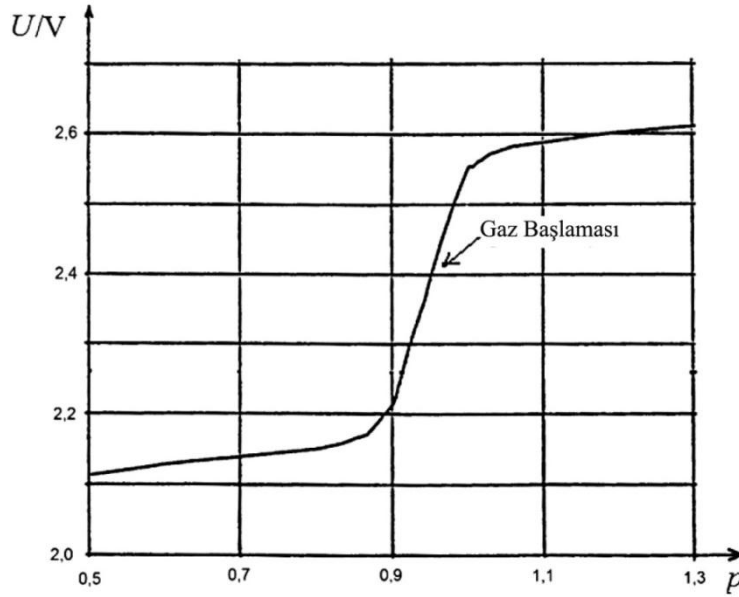
Kurşun-asit batarya, 1859 yılında Fransız elektrokimyacı Gaston Planté tarafından, keten beziyle ayrılmış saf kurşun levhadan yapılmış iki spiral rulo kullanarak icat edilmiştir. Bu düzenek, sülfürik asit çözeltisi içeren bir cam kavonoza daldırılmıştır. Plakalar arasından akım geçirilerek ve periyodik olarak akım ters çevrildiğinde, pozitif plakanın yüzeyi kademeli olarak kurşun dioksit (PbO_2) dönüşmektedir ve negatif plaka süngersi metalik kurşuna dönüşmektedir. Bir süre sonra, şarj olan hücrenin faydalı deşarj akımı kabiliyeti ortaya çıkmaktadır. Bu tip hücrelerin gelişmiş, spiral plakaların tersine düz plakalarla spesifik uygulamalar için günümüzde halen kullanılmaktadır. Özellikle, bekleme gücü alanlarında görev çevriminin ara sıra olduğu ancak uzun ömür ve güvenilirlik öncelikli durumlarda tercih edilmektedirler.

Geleneksel kurşun-asit bataryalar “suludur”. Elektrolit plakaların üstünde serbest sıvıdır. Bunun dezavantajı, şarj sırasındaki serbest bırakılan gazlar (pozitif elektrotta oksijen ve negatif elektrotta hidrojen) için hücreler delikli olmak zorundadır. Bu havalandırma sebebiyle, batarya sadece dik konumda kullanılmalıdır. Aksi halde, sülfürik asit sızıntısı meydana gelir. Ayrıca, yayılan gazlar, fazla korozyon etkili çok ince bir sülfürik asit dumanı taşır. Valf-düzenli kurşun-asit (VRLA) bataryanın icadıyla negatif plakada oksijen suya geri dönüştürülür (rekombinasyon). Buna karşılık, hidrojen rekombinasyon çevrimi oluşmaz çünkü pozitif elektrotta gazın oksidasyonu çok yavaştır. Aşırı basınç oluşumuna karşı koruma amacıyla her hücrenin tek yönlü bir valfle düzenlenmiş olması gerekir. Buradan “valf kontrollü” terimi doğmaktadır. VRLA bataryanın yerleştirilmesi her yönde yapılabilir. Fazla enerji depolama gereksinimi olduğu çoğu durumda, kurşun-asit bataryalar yaygın kullanımdadır. Büyük batarya uygulamalarında diğer bataryalar, maliyet alanında bu kadar avantajlı olmamaktadırlar [Dell et al., 2001].

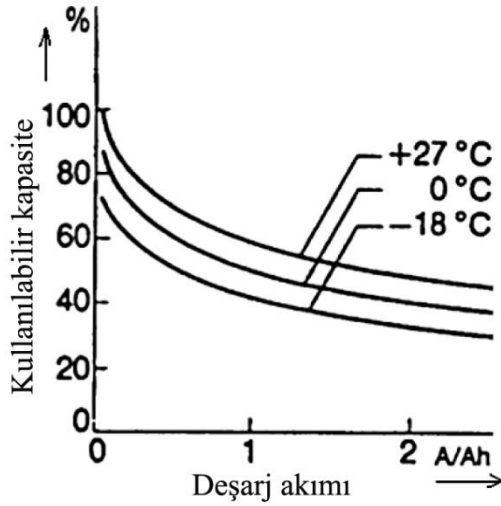
Kurşun-asit bataryalarda deşarj sırasında, su ve kurşun sülfat oluşur, su sülfürik asit elektrolitini seyreltir, ve şarj seviyesiyle birlikte elektrolitin spesifik ağırlığı düşer. Kurşun-asit bataryalar çeşitli şekillerdedir. Derin olmayan çevrim versiyonu

otomobillerde kullanılır ve kısa patlama enerjisi bataryadan ihtiyaç durumunda alınır. Derin çevrim versiyonu, tekrarlı tam şarj ve deşarj çevrimleri için uygundur. Çoğu enerji depolama uygulamaları, derin çevrim bataryaları gerektirir. Jel-hücre versiyonu, katkılarla birlikte elektroliti akmayan jelle dönüştürür. Bu türden bataryalar yan veya yukarı aşağı kurulabilirler. Yüksek maliyetlidirler [Patel, 1999].

Güneş ve rüzgâr dönüşüm sistemlerinde kullanılan akümülatörler geleneksel otomobil bataryalarının modifikasyonlarıdır. Bataryanın bir hücresi iki elektrot ve elektriksel olarak onları izole eden seperatör içerir; negatif olanı kurşun (Pb) ve pozitif olanı kurşundioksittir (PbO_2). Elektrotlar sülfürik asite daldırılmışlardır (H_2SO_4). Şarj edildiğinde ve 25°C 'de asit yoğunluğu 1.24 g/cm^3 'tür. Hücre voltajı kabaca 2 V, seride 6 hücreyle bir batarya için 12 V ile sonuçlanır. Yolcu taşıtları için bataryalarda ortak olan bir sayıdır. Tam şarjlı durumda voltaj biraz daha yüksektir, 2.3 V. (Şekil 4.1) hücre voltajını şarj derecesine göre göstermektedir. 2.4 V'da gaz serbest bırakmanın başlangıcını da belirtmektedir.

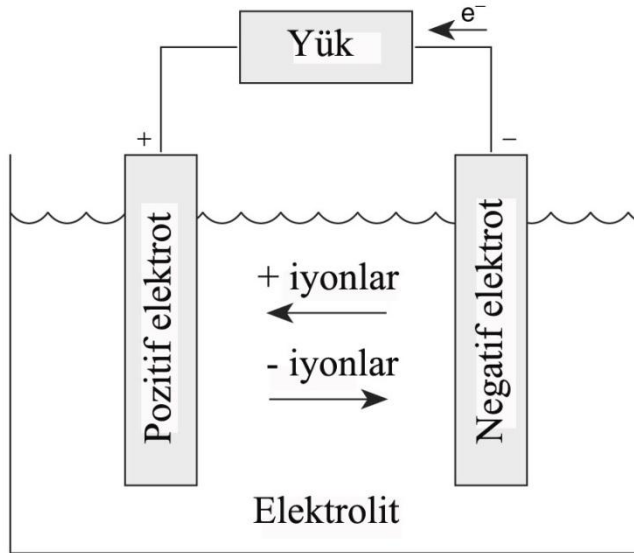


Şekil 4.1. Hücre Voltajı U şarj derecesi p'ye göre [Stiebler, 2008].



Şekil 4.2. Geleneksel bataryanın karakteristiği, kullanılabilir kapasite [Stiebler, 2008].

Kullanılabilir kapasite, sıcaklığa ve alınan deşarj akımına bağlıdır. Kapasite C_{20} , kapasitenin I_{20} akımında deşarj edilmesiyle deşarj bitiş voltajına 20 saat sonra ulaşıldığı anlamındadır. (Şekil 4.2) standart 12 V bataryanın karakteristiğini göstermektedir. Aşırı şarjdan ve derin deşarjdan uzak durulmalıdır [Stiebler, 2008].

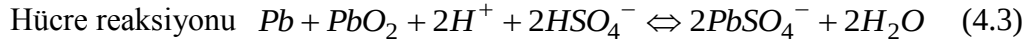
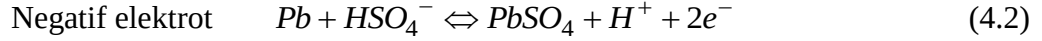


Şekil 4.3. Genelleştirilmiş bataryanın şeması [Goswami et al., 2008].

Elektron ve iyon göçünün yönü deşarj için gösterilmiştir, pozitif elektrot katot ve negatif elektrot anottur. Şarj sırasında, elektronlar ve iyonlar ters yönde hareket

ederler ve negatif elektrot katot olurken pozitif elektrot anot olur. (Tüm batarya kimyasında, soldan sağa batarya deşarjını ve sağdan sola şarjını göstermektedir). Kurşun-asit batarya, güç nitelikli uygulamalar için düşük maliyetli popüler depolama seçeneğidir. Fayda sağlama uygulaması kısa ömür çevrimi nedeniyle limitlidir. Tipik bir tesisat, maksimum 1500 derin çevrime kadar sürmektedir. Kurşun-asit bataryalar, 0.18 MJ/kg spesifik enerjiye sahiptir ve bu nedenle bir motoru başlatmak için gerekli düşük miktarda enerji sağlama haricinde geçerli otomotiv seçeneği değildir. Ayrıca 0.25 MJ/L civarında düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Kurşun-asit bataryaların avantajı düşük maliyet ve yüksek güç yoğunluğudur [Goswami et al., 2008].

Kurşun-asit bataryalar, şarjlı durumda aktif materyal olarak pozitif elektrot kurşun dioksit (PbO_2) ve negatif elektrot kurşundan (Pb) oluşur. Her iki elektrot sert kurşun alaşımlardan yapılmış bir destek ızgarası içerir. Esas reaksiyonu aşağıdaki reaksiyon eşitlikleriyle tanımlanır;



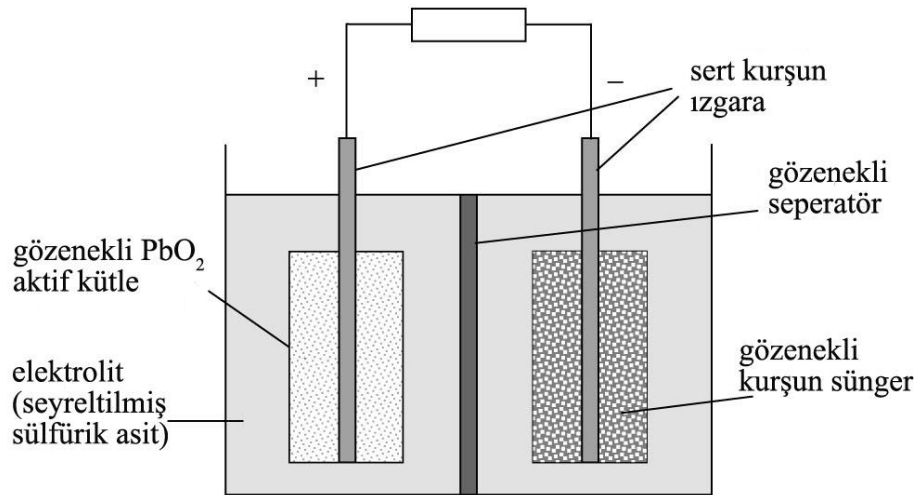
PbO_2 ve Pb , deşarj sırasında kurşun sülfata $PbSO_4$ dönüştürülür. Elektrolit olarak sülfürik asit deşarj sırasında kullanılır. Bu nedenle, şarj durumu ile birlikte sülfürik asitin konsantrasyonu lineer olarak azalır. Elektrolitin sadece iyon kondüktörü fonksiyonu olduğu durum tüm diğer batarya tipleriyle kıyaslandığında önemli bir farktır. Kurşun-asit bataryalarda, iyonlarının kaynağı elektrolitte elektrokimyasal tepkimeyle çözünmüş şarjla karşılanır. Bu nedenle, elektrolit yapısal değişimlere, elektrot materyalleri gibi uğrar.

Şarj edilmiş elektrot, katı halde kurşun (Pb) içerir. Bir deşarj akımı oluştuğunda, iki elektron metalik kurşundan alınır ve Pb^{2+} iyonlarının elektrolitte çözünümü oluşur. Difüzyon yardımıyla şarj olmuş iyonlar reaksiyon yüzeyinden uzağa taşınır. Şarj olmuş iyonlar için elektrolitte pozitif ve negatif iyon sayısı dengelenemediği sürece, negatif şarj olmuş iyonlar pozitif fazlalığı karşılamak için

gereklidir. Bunlar SO_4^{2-} iyonları olarak sülfürik asit elektrolitinden sağlanmaktadır. SO_4^{2-} iyonları difüzyonla elektrolit hacminden elektrokimyasal reaksiyonun reaksiyon bölgesine taşınırlar. Burada, Pb^{2+} ve SO_4^{2-} iyonları karşılaşır ve kimyasal prosesle PbSO_4 oluşturulur. Bu, PbSO_4 kristalleri oluşumuyla sonuçlanır.

Şarj sırasında, ters proses oluşur. Pb^{2+} iyonları elektrolitten katı Pb oluşturmak için proses sırasında alınır. Bu iyonlar, reaksiyon bölgesine difüzyonla taşınır. Elektrolitte Pb^{2+} iyon konsantrasyonu dengelemek için PbSO_4 kristallerinin bir kimyasal çözünüm prosesi meydana gelir. Pozitif iyonlar, elektrokimyasal çökeltme prosesiyle elektrolitten uzaklaştırıldığı için, SO_4^{2-} iyonlarının reaksiyon bölgesinden elektriksel nötrlük elde etme amacıyla taşınması gerekir. Tüm prosesler sıcaklığa ve elektrolit konsantrasyonuna bağlıdır [Luque et al., 2003].

Katı kurşun ızgaralar, bar veya plakalar, akımı iletmek için ve gözenekli aktif materyali mekanik olarak stabilize etmek için kullanılırlar.



Şekil 4.4. Kurşun-asit hücrenin şematik konstrüksiyonu [Luque et al., 2003].

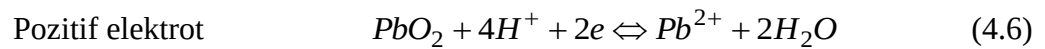
(Şekil 4.4) elektrokimyasal $\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{PbO}_2$ hücrenin konstrüksiyonunu göstermektedir. Batarya tipine bağlı olarak, ızgara için değişik kurşun alaşımları stabilizeyi arttırmak, özellikleri iyileştirmek ve korozyonu azaltmakta kullanılır. Gözenekli aktif materyal, ızgaraya pozitif elektrot için PbO_2 (kurşun dioksit) ve Pb süngerine negatif elektrot için bağlanmıştır. Reaksiyon hızı ve böylece şarj ve deşarj

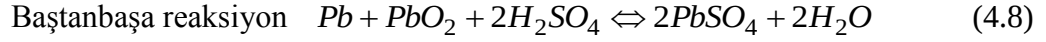
özellikleri iç yüzey ile tesbit edilir. Sülfürik asit, hem elektrotlar arasında iyon iletici hem de şarj ve deşarj reaksiyonlarında reaktiftir. Batarya deşarj olurken, PbO_2 ve Pb , kurşun sülfata dönüştürülür ($PbSO_4$). Sülfat iyonları (SO_4^{2-}) elektrolitten alınır, elektrolit konsantrasyonunun düşmesine neden olur. $PbSO_4$ ve Pb spesifik hacim oranı 2.4 ve $PbSO_4$ ile PbO_2 oranı 1.96'dır. Bu, aktif materyalin katı-evre hacminin deşarj sırasında arttığı anlamındadır. Bu, gözeneklerde serbest elektrolit hacmini azaltır ve aktif materyalde mekanik gerilmeye neden olur.

Sulu bataryalarda elektrolit sıvı haldedir. Bataryadan gazların ortaya çıkmasına izin vermesi için sıvı elektrolitli bataryalar açık bırakılmışlardır. Bu, bataryanın su miktarında düşüşle, elektrolit seviyesinin azalmasına ve sülfürik asit konsantrasyonunda artışla sonuçlanır. Su kayıpları, bakım sırasında yılda bir ya da iki kez karşılanması gerekir. Doldurma için sülfürik asit değil deiyonize su kullanılmalıdır [Luque et al., 2003].

4.1. Kurşun-Asit Bataryanın Elektrokimyasal Sistemi

Kurşun-asit batarya, kurşun dioksiti pozitif elektrot aktif maddesi olarak, metalik kurşundan yüksek yüzey alanlı geçirgen yapıyı ise negatif elektrot aktif maddesi olarak kullanmaktadır. Hücre deşarj oldukça, her iki elektrot kurşun sülfata dönüştürülür. Proses şarj sırasında ters yönde oluşur. Aşağıdaki proseslerde sağ yönden sola şarjı, sol yönden sağa deşarjı temsil etmektedir.





Deşarj sırasında elektrolitte sülfürik asit tüketildikçe su oluşur, elektrolit “aktif” metaryeldir ve belli batarya dizaynlarında kapasite limitleyen materyal olabilir. Hücre, tam şarja yaklaştıkça ve $PbSO_4$ çoğunluğu Pb veya PbO_2 formuna dönüştürüldükçe, şarjdaki hücre voltajı gazlaşma voltajından daha büyük olmaya başlar (yaklaşık hücre başına 2.39) ve aşırı şarj reaksiyonları başlar. Hidrojen üretimiyle sonuçlanan oksijen (gazlaşma) ve su kaybıyla sonuçlanır. Kapalı kurşun-asit hücrelerde hidrojen yayılımı ve su kaybı negatif plakayla yayılan oksijenin tekrar-birleşmesiyle minimize ederek kontrol edilir [Linden et al., 2002].

Hücre voltajında elektrot potansiyelinde ikincil reaksiyonlar vardır. Örnek olarak su ayrışması:



Bu reaksiyonun denge voltajı $E_0 = 1.23$ V olup, kurşun-asit bataryanın nominal voltajından çok daha düşüktür. Bu, oksijen indirgenmesinin devamlı negatif elektrotta beklendiği anlamındadır. Pozitif elektrotun potansiyelinde, kurşun PbO_2 ye oksitlenir ve bu bir koruyucu tabaka oluşturur;



Ancak bu tabaka tam stabil değildir ve bir miktar korozyon devam eder [Berndt, 2001].

Su ayrışması, elektrolite su eklenerek yapılan bakımı gerektirir. Kurşun-asit bataryaların temelde şarjı, hidrojen aşırı voltajıyla mümkündür. Şarj sırasında, büyük miktarda gaz negatif plakadan yayılır. Hücre deşarj oldukça, iç direnç kayıpları ve

polarizasyon nedeniyle voltaj azalır. Eğer deşarj akımı sabitse, yük altındaki voltaj, son voltaj değerine kadar azalır [Linden et al., 2002; Kiehne et al., 2003].

Kurşun-asit hücreler için aşırı şarj reaksiyonları sonucunda hidrojen ve oksijen gazı üretimi ve sonradan su kaybı oluşur. Tüp şeklinde pozitif plaka Avrupa’da kullanılmaktadır ve Amerika’da düz plaka tercih edilmektedir. Tüp şeklinde hücrenin negatif plakasının verimli kimyasal reaksiyonun oluşmasını sağlamak için pozitif plakanın elektrik kapasitesine eşit olması gerekir. Bu, düz plaka pozitif dizaynına benzerdir ancak kafesler bu durumda süngersi kurşunla dolmuştur. Pozitif ve negatif plakalar bir mahfazaya yerleştirilir. Her pozitif bir negatifin yanına yerleştirilir. Kurşun-asit hücrede, plakalar her zaman tek sayıdadır, ekstra olan negatiftir. Bu nedenle 13 plaka hücrede yedi negatif ve altı pozitif plaka vardır. Zıt kutuplu plakalar arasında temastan, kısa devreyi önlemek için kaçınılmalıdır. Bu, normalde negatif plakayı bir mikrogözenekli zarf içine yerleştirmekle gerçekleştirilir. Mikro gözenekli zarflar iyi yalıtım özelliklerine ancak düşük elektrik direncine sahiptir. Böylece iyonların serbest akışına ve elektrolitin difüzyonuna izin verir. Bir hücrenin pozitif kutubunun bitişiğindeki negatif kutbuna bağlanması seri olarak ifade edilir. Serideki voltaj birbirine eklenir ancak bataryanın amper saat kapasitesi halen bir tek hücrenininkidir. Hücreler tüm pozitif kutuplar ve negatif kutuplar benzer şekilde birleştirildiğinde paralel bağlanırlar. Böyle bir bağlantının voltajı tek hücreninki kadardır ancak birleşimin kapasitesi, tüm hücrelerin kapasitelerinin toplamıdır. Hücre kutupları, geleneksel olarak sert kauçuktan yapılır ancak plastik materyal kullanımı artmıştır. Polipropilen bu materyallerden biridir. Bataryalar alternatif akımda (a.c.) çalışmazlar. Bu nedenle deşarj olmuş bir bataryayı tekrar şarj etmek için doğru akım (d.c.) deşarjın zıt yönünde bataryaya verilmelidir. Bir hücrenin büyüklüğü, boyutları ve kapasitesiyle tanımlanır. Başka deyişle, verilen bir hücrenin plakalarındaki aktif yüzey miktarıyla tanımlanır. Bu, örneğin A yüksekliğinde 7 plakayla veya $\frac{1}{2}A$ yüksekliğinde 14 plakayla oluşturulur. Her iki hücre yaklaşık aynı elektrik depolama kapasitesi üretir [Crompton, 2000].

Kurşun-asit bataryalarda şarj-deşarj prosesi aslında tersinirdir, sistem zararlı kimyasal olaylardan uzaktır ve enerji yoğunluğu ve spesifik enerjisi düşük olduğundan kurşun-asit batarya geniş bir sıcaklık aralığında güvenli bir şekilde çalışır. Popülerliğinin nedeni, düşük maliyet, iyi performans ve çevrim ömründendir.

Kurşun-asit bataryalar 1 Ah kapasiteli küçük kapalı hücrelerden 12,000 Ah'a kadar çeşitli konfigürasyonlarda dizayn edilirler. Düz plaka bataryalarda, kurşun-antimon veya kurşun-kalsiyum ızgara alaşımları kullanılmaktadır [Linden et al., 2002].

4.2. Kurşun-Asit Bataryaların Performansı

Son voltaj, hücrenin daha fazla yararlı enerji sağlayamayacağı voltajdır. Düz pozitif plakalı ve tüp şeklinde pozitif plakalı bataryaların enerji yoğunluğu benzerdir. Düz plakalı hücreler tüp şeklinde plakalılarından daha ince yapılabildikleri için performansları daha yüksektir. Sabit bataryaların optimum sıcaklığı 20 ile 30 °C arasındadır. Ayrıca, -40 ile 50 °C arasındaki sıcaklıkları da tolere edilebilir. Yüksek sıcaklıkta çalıştırılmaları kendiliğinden deşarjı artırır, çevrim ömrünü azaltır ve ters etkilere neden olur. Tam dolu batarya durumunda, 25 °C sıcaklıkta kalsiyum-kurşun pozitif plakalı hücreler için kendiliğinden deşarj ayda %1, antimonlu kurşun pozitif hücreler için %7 ile %15 arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda, kendiliğinden deşarj oranı önemli ölçüde artmaktadır. Sıcaklıkta her 10 °C artış için kendiliğinden deşarj iki katına çıkmaktadır. Genel olarak, düz ve antimonlu kurşun bataryalar en kısa ömüre sahiptirler (5-18 yıl), bunu düz kalsiyum kurşun bataryalar (15-25 yıl) ve tüp şeklinde bataryalar (20-25 yıl) izlemektedir [Linden et al., 2002].

4.2.1. Çalışma Modu

Sülfürik asit (H_2SO_4) sadece iyon iletimi yapmaz aynı zamanda elektrot reaksiyonlarında rol alır. Her iki plaka kutubunda deşarj ürünü olarak kurşun sülfat ($PbSO_4$) oluşur. Sülfürik asit, deşarj sırasında tüketilir ve şarj sırasında tekrar üretilir. Bu, şarj durumunun elektrolitin bağlı yoğunluğu ölçülerek tespit edilmesine imkân sağlar.

Elektrot reaksiyonları sonucunda deşarj sırasında pozitif elektrot asitsizleşme eğilimindedir. Bataryada, su bunun yerini alır ve şarj sırasında asitle tekrar dolar. Diğer bir etki asit katmanlaşmasıdır. Asit katmanlaşması sırasında kurşun sülfat, aktif kütledeki gözenekleri kapatır ve böylece asit sağlanmasını engeller. Dengeleme, difüzyon prosesiyle yavaşça olur. Kurşun-asit bataryanın en büyük sınırlaması aşırı

ağırlığıdır. Bu, kurşunun atom kütesinin yüksek olmasının bir sonucudur ve oldukça zayıf sıcaklık performansı vardır [Dell et al., 2001].

Kurşun-asit bataryanın avantajları, düşük maliyet, hücre başına yüksek voltaj ve iyi kapasite ömrüdür. Dezavantajları ise nispeten ağır ve düşük sıcaklık karakteristiklerinin zayıf olması, deşarj edilmiş durumda uzun süre zarar görmeden bırakılamamasıdır. Kurşun-asit bataryanın anma kapasitesi C_{20} oranında verilir. Bu, tam şarjlı bataryanın 20 saatte 1.75 V/hücre son voltajına getirilme deşarjında elde edilen kapasitedir. Kurşun-asit hücrenin nominal voltajı 2 V olmaktadır. Açık devrede voltaj, doğrudan elektrolit konsantrasyonunun fonksiyonudur. Elektrolit özgül ağırlığının seçimi, uygulama ve servis gereksinimlerine bağlıdır. Elektrolit konsantrasyonu, iyonik iletkenlik için yeterince yüksek olmalıdır ve elektrokimyasal gereksinimleri yerine getirebilmelidir; ancak, seperatör bozulması veya hücrenin diğer kısımlarının korozyonuna neden olacak derecede yüksek olmamalıdır. Bu, ömrü kısaltır ve kendiliğinden deşarjı arttırır. Deşarj sırasında özgül ağırlık düşer. Bir batarya sistemi için açık-devre voltajı, sıcaklığın ve elektrolit konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Elektrolitin konsantrasyonu değiştiği sürece, H_2SO_4 ve H_2O bağlı aktiviteleri değişmektedir. Tipik olarak alaşımlar, özellikle derin çevrimler için %4 ile %6 antimon içerir. Izgara alaşımlarında %1.5 ile %2 antimon seviyesine, bataryanın gereksinim duyduğu bakımı (su eklenmesi) azaltmak için daha düşük antimon içeriğine gidilir [Linden et al., 2002; Crompton, 2000].

4.2.2. Kendiliğinden Deşarj

Kurşun-asit hücrenin kendiliğinden deşarj (harici yük uygulanmadığında kapasite kaybı) oranı oldukça hızlıdır ancak belli dizayn özellikleriyle birleştirilerek önemli ölçüde azaltılabilir.

Kendiliğinden deşarj oranı birkaç faktöre bağlıdır. Kurşun ve kurşun oksit, sülfürik asit çözeltisinde ve açık devrede termodinamik olarak kararsızdır. Elektrolitle reaksiyona girerler.





PbSO₄ oluşumu kendiliğinden deşarjla, tipik olarak 25 °C sıcaklıkta %0.5/gün oranından yavaştır. Negatifin kendiliğinden deşarjı, özellikle hücre çeşitli katalitik metalik iyonlarla kirletildiğinde daha hızlıdır. Kurşun-antimon ızgaralı yeni bataryalar 25 °C sıcaklıkta her gün %1 şarjını kaybeder, ancak şarj kaybı batarya yaşlandıkça 2 ile 5 kat arasında artar. Antimonsuz kurşun ızgaralı bataryalar, yaşlarına bağlı olmaksızın, günde %0.5'den daha az şarjlarını kaybederler. Düşük antimonlu kurşun alaşımları faydalı olabilmektedir.

Kendiliğinden deşarj, antimonlu kurşun ızgara alaşımlarını pozitif plakalarda kullanan bataryalarda daha şiddetlidir. Bu kayıp, bataryanın kutup voltajında ve/veya özgül ağırlıkta düşüşle kolayca tespit edilir. Kalsiyum kurşun antimonsuz kurşun negatif ve antimonlu kurşun pozitif ızgaralı bataryalarda, antimon negatif kutba difüze olabildiği sürece kendiliğinden deşarj oranı azalır. Bu, özellikle düşük antimonlu alaşımlar için doğrudur. Geleneksel kurşun-asit bataryalar, derin deşarja karşı hassastırlar ve asla tam deşarj edilmemelidirler [Kiehne, 2003; Linden et al., 2002].

4.3. Kurşun-Asit Bataryalar ve Diğer Bataryalar

Kurşun-asit akümülatörlerden ayrı olan elektrokimyasal depolama yöntemleri, yüksek enerji yoğunlukları, daha uzun ömürleri ve çabuk şarj olma yetenekleriyle bilinirler ancak daha pahalıdır. Rüzgâr enerjisi sistemlerinde fazla uygulama alanı bulamamışlardır. Bunlardan birkaç tanesi karşılaştırma için aşağıda belirtilmiştir. Genel özellikler karşılaştırma amacıyla kurşun-asit hücrelerle birlikte listelenmiştir. NiCd bataryalar yaygın olarak cihazlarda ve bilgisayarlarda kullanılmaktadırlar. Metaller nikel ve kadmiyumdur. Kadmiyumun çevre için zararlı etkilerinden dolayı problemlidirler. Bunun yanı sıra, hafıza etkisi (memory affect) gösterirler, uygun aralıklarda batarya tam şarj edilmediğinde tersinmez (geri döndürülemez) kapasite düşmesi oluşur. NiMH (nikel metal hidrit) bataryalar çevresel etki bakımından daha az problemlidirler. NiCd bataryalarla karşılaştırıldığında aynı hücre voltajına (1.2 V)

sahiptirler, fakat yüksek enerji yoğunlukludurlar ve hafıza etkisi gözlemlenmemiştir. Diğer taraftan çalışma sıcaklık aralıkları daha sınırlıdır. NaS (sodyum sülfür) bataryalar daha yüksek enerji yoğunluğundadırlar ancak yüksek çalışma sıcaklığı ve kimyasal aktif bileşen sodyum nedeniyle geliştirilmesi durdurulmuştur [Stiebler, 2008].

Tablo 4.1. Akümülatörlerin özellikleri [Stiebler, 2008].

	Kurşun-asit	NiCd	NiMH	NaS
Enerji yoğunluğu, Wh/kg	25...35	35...55	50...80	80...150
Güç yoğunluğu, W/kg	100	200	300	90...160
Çalışma sıcaklığı, °C	-10...60	-20...55	-20...45	290...350
Hücre Voltajı, V	2	1,2	1,2	2,1
Kendiliğinden deşarj %/ay	5...15	20...30	20...50	0
Yararlı tam çevrimler	600...1500	~2000	~1000	~1000
Enerji verimliliği, %	70...85	60...75	65...85	80...95

5. VRLA BATARYALAR

Valf kontrollü kurşun-asit (VRLA) bataryalar bir valfle kapalıdırlar. Valf, gaz salınımına sadece bataryada aşırı basınç varsa izin verir. Normal çalışmada gaz, bataryada tekrar birleşik olur. Bu etki, elektrolitin hareketsizleşmesiyle oluşturulur. İki değişik teknik kullanılmaktadır: Elektrolite SiO₂ eklenerek, elektrolit viskoz jele dönüştürülür veya elektrolit yüksek gözenekli cam elyafa emdirilir (emdirilmiş cam elyaf tipi AGM). Her iki durumda, oksijen negatif elektrotta geçebilir. Oksijen ve hidrojen negatif elektrotta tekrar birleştirilir. VRLA bataryalarda, elektrolit sıvı fazında değildir. Bu nedenle kırılma ya da diğer kazalarda elektrolit dökülmez. Ancak, eğer batarya yanlış şekilde aşırı şarj edilirse, tekrar birleşenden daha fazla gaz oluşur. Gaz, aşırı basınç oluştuğunda valf yardımıyla hücreyi terk etmelidir. Aynı zamanda valf, ortam havasının bataryaya girişini engellemelidir. Bu bataryalar su ile tekrar doldurulamadığından, hücrenin kurumaması önlemek için, gazın hücreden çıkışı en aza indirilmelidir. Su kaybının %10'dan fazla olması bataryanın ömrünün bitmesi demektir. VRLA bataryalarda düşük gazlaşma oranı meydana getirmek için, kurşun-kalsiyum alaşım ızgaralar kullanılır. VRLA bataryalarda gazlaşmanın minimize edilmesi gerektiğinden, antimon ızgaralar iyi bir seçim değildir.

Bir hücrenin açık devre voltajı U_0 elektrolit konsantrasyonuna bağlıdır, ancak pratikte açık devre voltajı aşağıdaki formülle belirlenebilir:

$$U_0 / V = \frac{\rho}{(g / cm^3)} + 0.84...0.86 \quad (5.1)$$

ρ elektrolitin yoğunluğudur. Elektrolit konsantrasyonu elektrolit yoğunluğuna yaklaşık lineer bağlıdır. Elektrolit yoğunluğu kolayca ölçülebildiğinden çoğunlukla elektrolit konsantrasyonunu ifade etmek için kullanılır. Tam şarjlı bataryada tipik elektrolit yoğunluğu, uygulamaya bağlı olarak 1.22 ve 1.32 g/cm³ arasındadır. Eşitliğe göre açık devre voltajı da değişmektedir. VRLA bataryaların sulu bataryalara göre daha az elektrolit amper-saat kapasitesi vardır. Bu nedenle, deşarj sırasında açık devre voltajı VRLA bataryalarda sulu bataryalara göre daha hızlı düşer.

Günümüzde iki değişik plaka teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın plaka tipi düz plaka tipidir. Gözenekli aktif kütle, sert kurşun ızgaraya macun biçiminde uygulanmaktadır. Düz plaka basit ve üretimi kolaydır. Tüp şeklindeki plakalar da yaygındırlar. Aktif maddeyle çevrili merkezi bir çubuk, elektroliti geçiren koruyucu bir tübün içine yerleştirilir. Düz plaka elektrotlar düşük iç dirence sahip olduklarından tüp şeklindeki plakalardan daha fazla özgül güce sahiptirler, ömürleri boyunca daha fazla çevrim yaparlar. Ayrıca, elektrotları arasında çok ince cam elyaf seperatörleri olan kurşun hücreler mevcuttur. Bu bataryalar birincil olarak yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Sonuçta iyi çevrim ömrü verirler [Luque et al., 2003].

Valf düzenli kurşun-asit bataryalar (VRLA), doymamış veya hareketsiz elektrolitle oksijenin tekrar birleşmesi prensibiyle çalışırlar. Bu batarya tasarımında şarj sırasında pozitif elektrotta üretilen oksijen, difüzyonla negatif elektrotta taşınır. Burada sülfürik asit sebebiyle yeni oluşmuş kurşunla reaksiyona girer. VRLA batarya tasarımıyla gaz emisyonu %95'den fazla azaltılmıştır. Oksijenin tekrar birleşmesi basıncı azaltan bir valf ile kolaylaştırılmıştır. Bu valf, normal çalışma sırasında kapalıdır. Basınç önceden belirlenen bir seviyeye ulaştığında valf açılır, gazları serbest bırakır. Valf, hücre basıncı atmosferik basınca düşmeden önce tekrar kapanır. Bu batarya, maliyet avantajı sebebiyle FV sistemlerde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar kurşun-asit bataryanın enerji ve güç yoğunluğunun artırılmasını gerektirir.

Dünyanın en büyük batarya sistemlerinden biri Chino Kaliforniya'da kurulmuştur. Bağımsız endüstriyel boyutlu kurşun-asit hücreleri seri ve paralel bağlantıyla 10 MW boyutunda sistem kurmak için kullanılmaktadır. Şebeke sistemine 2000 V ve 8000 A enerjiyi 4 saat iletmektedir. AC ve DC dönüştürme, sistemde gerçekleştirilmiştir. Bu batarya on yıldan fazla süre gösterim projesi olarak çalışmıştır [Linden et al., 2002].

5.1. VRLA Teknolojisinin Özellikleri

Kurşun-asit batarya teknolojisinin birçok avantajının yanında (örneğin enerji yoğunluğunda ve çevrim ömründe artış, kendiliğinden deşarjın azaltılması, üretim maliyetini azaltan otomasyonla üretim vs.) gaz-tekrar-birleşmesi teknolojisinin geliştirilmesi muhtemelen en önemlilerindendir. Tekrar-birleşme bataryalarında ek avantajlar vardır. Bataryanın tüm ömrü boyunca su ekleme gerekmez. Su ayrışmasında belirgin azalma nedeniyle, az miktarda hidrojen gazı salınımı ve düşük oranda kendiliğinden deşarj vardır. VRLA bataryalarda elektrolit, emici cam elyaf (AGM bataryalar) veya jelleşme (jel bataryalar) nedeniyle hareketsizdir. Elektrolitin hareketsizleştirilmesi tekrar-birleşme prosesini mümkün kılar; pozitif plakada oksijen üretimi, özellikle şarj sırasında negatif plakaya taşınabilir ve burada su oluşturmak üzere tepkimeye girer (tekrar-birleşme). Bu reaksiyon, negatif plakadan çıkan hidrojen miktarını azalttığı sürece, hücreyi terk eden hidrojen ve oksijen miktarında belirgin azalma olur. Bununla beraber, gaz bırakma tamamen giderilmediği için, bazen kullanılan kapalı (sealed) batarya terimi atmosfere gaz salınmadığı anlamına gelmez.

Jel ve AGM teknolojiler birçok benzerliğe sahiptirler, ancak bazı farklılıklara da sahiptirler. Örneğin, dikey pozisyonda yüksek hücreler için sadece jel hücreler kullanılabilir aksi halde asit katmanlaşmasından kaçınılamaz. Piyasada oldukça yüksek AGM bataryalar bulunmaktadır ancak bunlar asit katmanlaşması probleminden kaçınmak için sadece yatay pozisyonda kullanıma yöneliktir. Kısa hücreler için, hücre oryantasyonu kısıtlaması olmadan, hem jel, hem de AGM tasarımı mümkündür. Çoğunlukla, AGM yüksek güç gerektiğinde kullanılır jel ise özellikle uzun ömür sağlamakta yararlıdır.

Genelde, VRLA bataryalar kurşun alaşımları kullanır ve antimon içermemektedirler. Bunun nedeni, antimonun pozitif ızgaradan korozyonla salınarak negatif plakaya taşınmasıdır. Hidrojen yayılımı artar, daha yüksek kendiliğinden deşarja ve daha çok su kaybına sebep olur.

Çoğu üretici, kurşun-kalsiyum alaşımları kullanmayı tercih etmektedir. Kalsiyumun ızgara sertleştirici etkisi vardır. Ayrıca, alaşımda bir miktar kalay (%1'e kadar bazen daha fazla) vardır. Bu, döküm prosesini iyileştirir ve pozitif plakanın ızgara/aktif materyal arayüzünü problemlerden uzak tutar. Kurşun-kalsiyum-kalay ve kurşun-antimon alaşımlarının korozyon davranışları arasında önemli farklılık vardır. Testler, antimon içeren alaşımların genellikle daha yüksek korozyon oranı sergilediğini ve azalan antimon içeriğiyle oranın düştüğünü göstermektedir. Kurşun-kalsiyum alaşımlar durumunda, iyi dökülmüş örnekler, düşük korozyon oranları sağlar ancak ızgaralar uygun dökülmemiş ise taneler içinde aşırı korozyon oluşabilir.

Genellikle tüp şeklindeki plakalar için basınçlı döküm kullanılmaktadır ve düşük korozyon oranlarında kurşun-kalsiyum-kalay ızgaralar üretilmektedir. Birkaç yıl kullanımdan sonra bile bu şekilde üretilmiş ızgaranın omurgaları çok ince korozyon tabakası sergilemektedir.

Izgaraların yerçekimsel dökümleri, genellikle düz plakaların üretiminde kullanılmaktadır. Düz pozitif kurşun-kalsiyum-kalay ızgaralar daha hassastırlar ve korozyona tüp şeklindeki ızgaralardan daha eğilimlidirler. Bakırın tane iyileştirici malzeme olarak eklenmesi, pozitif ızgaraların korozyon direncini belirgin biçimde iyileştirir. Genellikle daha yüksek sıcaklık daha yüksek korozyon oranına sebep olmaktadır. Bu, hem sulu hem de VRLA bataryalar için geçerlidir. Bataryanın 20 °C civarında tutulması maksimum dayanıklılık elde etmek için önerilmektedir. Burada vurgulanan batarya sıcaklığıdır, çevre sıcaklığı ilgili faktör değildir. Eğer batarya sıcaklığının 20 °C'nin kayda değer miktarda üzerine çıkmasından kaçınılamazsa servis ömrünün önemli miktarda düşmesinden kaçınmak için, batarya üreticisinin talimatlarına göre şarj voltajının ayarlanması gereklidir. Şarj voltajının ayarlanması, bataryanın sıcaklığı 20 °C'nin altındaysa gereklidir. Tipik bir hata, yer kazanmak için bataryaları yakın yerleştirmektir. Denge şarjı sırasında, batarya bir miktar ısı ürettiğinden bataryaların yakın paketlenmesinden kaçınılmalıdır. Bitişik bataryalar arasında en az 10 mm boşluk bırakılmalıdır.

Derin deşarj ve yüksek batarya sıcaklıklarında çok yüksek oranda şarjdan kaçınılmalıdır. Eğer, çok yüksek sıcaklıklar potansiyel tehditse, özel soğutma sistemlerinin kullanılması gerekebilir.

Yüksek bir şarj voltajı, şarj zamanını azaltmada ve sülfatlaşmadan kaçınmada yardımcıdır. Bununla beraber, hücre içinden yüksek akım geçmesi koşulunda termal kaçak riski artar.

Termal kaçaktan kaçınmanın en iyi yolu, batarya sıcaklığını izlemek ve denge voltajı veya akımını ölçülen sıcaklığa göre otomatik olarak değiştirmektir. Denge voltajını veya denge akımını kontrol etmek için, oda sıcaklığı değil, batarya sıcaklığı ölçülmelidir. AGM bataryalar durumunda, seperatörün doyma derecesinin iyi kontrolünde önemlidir. Çok düşük seviyede doyma, yüksek akımlarda denge voltajlarında bile çok yüksek oksijen tekrar-birleşme verimliliğiyle sonuçlanır. Jel batarya için durum farklıdır. Biraz su kaybindan sonra, bu bataryalarda da tekrar-birleşme verimliliği artmaktadır. Eğer çok su kaybı olursa (kuruma), jel bataryaların tekrar-birleşme verimliliği artabilir.

Yüksek açılma basınçlı basınç salıveren bir valf, su kayıplarını azaltmada yardımcı olabilir ancak böyle bir cihazın faydası hücredeki yüksek basınçla ilgili problemlerin dengelenmesinde yeterli değildir. Genelde, 100 ile 200 mbar arasında bir basınç, aşırı su kaybindan kaçınmak için kullanılır.

Tekrar-birleşme verimliliği yüksek olduğunda, oksijen yayılması oksijen azalmasıyla dengelenir; elektrotların herhangi bir deşarjından kaçınmak için, negatif plakada hidrojen yayılma akımı pozitif plakada ızgara akımına yaklaşık eşit olmalıdır. Denge voltajının çok fazla azalması yüksek sıcaklıklarda bataryada sülfatlaşma problemiyle sonuçlanır. AGM bataryaların çevrim uygulamaları için geliştirilmesinin başlangıcında asit katmanlaşmasıyla ilgili büyük problemler vardı. Kilit faktörler, oldukça yüksek basınç uygulamak ve seperatörlerin doyma derecesini doğru seçmektir. Yüksek plakalı AGM tasarımında, asit katmanlaşması sorunu, ancak hücreleri yatay pozisyonda yerleştirmekle çözülebilir. Pozitif kurşun-kalsiyum ızgaralı kurşun-asit bataryalar pazara ilk kez sunulduğunda çok düşük çevrim ömrü önemli bir sorundu. Araştırmalar, pozitif ızgara ve aktif materyal arasında kurşun sülfat bariyer tabakası oluşumunun başarısızlığa neden olduğunu göstermiştir. Bu durum antimonun bataryadan hariç tutulduğunda daha kolay oluşması nedeniyle “antimonsuz etki” olarak adlandırılır.

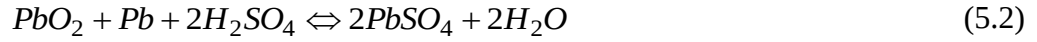
Yüksek şarj voltajının ızgara korozyonu ve kuruma problemini arttırması ve düşük şarj voltajının sülfatlaşmayı desteklemesi sebebiyle, verilen sürede bataryayı şarj ettikten sonra otomatik olarak şarj voltajını düşüren bir şarj edici kullanılması uygundur. Örneğin 12 saat şarjdan sonra şarj voltajı hücre başına 2.4 V'dan 2.3 V'a düşürülebilir. Bu prosedür aynı zamanda sulu bataryalar için de yararlıdır [Broussely et al., 2007].

VRLA batarya, geleneksel versiyonla aynı materyal ve elektrot reaksiyonları temellidir. Temel fark, elektrolitin hareketsizleştirilmesidir ve iç oksijen çevrimi bu şekilde meydana gelmektedir. Hareketsizleşen elektrolitte, AGM'nin büyük gözeneklerinde elektrolitle doldurulmayan boşluklar kalır veya jelleşmiş elektrolitte çatlaklar bulunur ve bu gaz fazında difüzyonla hızlı oksijen taşınmasını sağlar. Bu, çözünmüş durumdan 10^5 kez daha hızlıdır [Berndt, 2001].

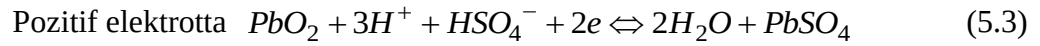
VRLA tasarımı iki genel biçime sahiptir, biri spiral elektrotlarla silindirik şeklinde bir mahfazadan, ikincisi ise düz plakalarla prizma şeklinde bir mahfazadan oluşur. Silindirik şeklindeki mahfazalar daha yüksek iç basınçlara şekil değiştirmeden dayanabilirler ve prizmatik hücrelerden daha yüksek basınçta gaz salınımı yapmak üzere tasarlanabilirler. Bazı tasarımlarda bir dış metal mahfaza, yüksek sıcaklıklarda ve iç hücre basınçlarında, plastik kasaların şekil değiştirmesini önler. Açılıp kapanabilir valfler, normalde dışarıdaki havadan oksijen girişini önlemek için kapalıdır.

Emilmiş elektrolitte, çok yüksek gözenekli ve emici elyaf, mikro yapıda fiberlerden üretilir. Kısmen elektrolitle doldurulur ve seperatör/elektrolit rezervuarı olarak davranır. Jelleşmiş elektrolitte, elektrolite onu bir jele sertleştiren silis eklenmiştir. Sonraki şarjlarda, jel bir miktar su kaybederek pozitif ve negatif elektrotlarda çatlak veya çatlak ağı oluşuncaya kadar kurur. Oluşturulan açıklıklar, oksijen transferi ve tekrar-birleşmesi için gereklidir. Emilme veya jelleşme kimyasal olduğu kadar doğada fizikseldir. Silis, sülfürik asitle tepkimeye girer. Elektrolitin hareketsizleştirilmesi, değişik yönlerde yerleştirilen bataryanın dökülme olmadan çalışabilmesini sağlar. VRLA tasarımı termal kaçak oluşumuna sulu bataryalardan daha elverişlidir.

Her ne kadar VRLA bataryanın tasarım ve imalatı farklı olsa da kimyası geleneksel kurşun-asit batarya gibidir;



Deşarj sırasında (soldan sağa olan reaksiyon), negatif elektrotun kurşunu (aktif materyal) ve pozitif elektrotun kurşun dioksiti, kurşun sülfata dönüşür. Sülfürik asit sülfata (kurşun sülfat) ve suya dönüşür. Suyun oluşumu asit konsantrasyonunun düştüğünü gösterir. Asit, oluşan su tarafından seyreltilir. Şarj sırasında (sağdan sola reaksiyonlar), bu prosesler ters yönde oluşurlar [URL-3].



Hücre tekrar şarj edildiğinde, $PbSO_4$ partikülleri negatif elektrotta elektrokimyasal olarak kurşuna ve pozitif elektrotta PbO_2 formuna dönüştürülür. Hücre tam şarja yaklaştığında $PbSO_4$ ın büyük çoğunluğu Pb ve PbO_2 formuna dönüştürülür, aşırı şarj reaksiyonu başlar. Geleneksel kurşun-asit bataryalar için bu reaksiyonların sonucu hidrojen ve oksijen gazı oluşumu ve sonraki su kaybıdır. VRLA tasarımının benzersiz bir özelliği, normal şarj aşırı voltaj oranlarındayken hücrelerde üretilen oksijenin büyük çoğunluğunun hücrelerde tekrar-birleşmesidir. Tasarımda kullanılan saf kurşun-kalay ızgaralar, aşırı şarjda hidrojen yayılımını minimize eder. Hücrelerde üretilen hidrojenin büyük çoğunluğu baca veya plastik mahfaza içinden atmosfere verilir.

VRLA bataryada yakın boşluklu plakalar, bir cam elyafla ayrılmışlardır. Bu, ince cam liflerden yapılmış gözenekli bir yapıdır. Hücre, yeterince elektrolitle plakaların yüzeyini ve seperatördeki cam lifleri kaplamak için doldurulmuştur. Böylece doymamış elektrolit durumu oluşturulur. Bu durum, plakalar arasında tekrar-birleşme reaksiyonlarını oluşturan homojen gaz transferine izin verir.

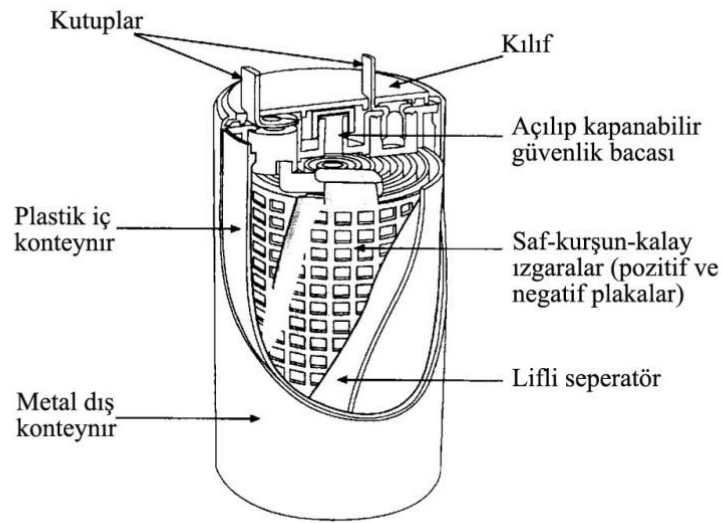
Basınç salıverme valfi, bir iç basınç sağlar ve bu durum gazları hücrede difüzyonun oluşması için yeterince uzun süre tutarak tekrar-birleşmeye yardımcı olur. Net sonuç, hücreden salıverilme yerine sudur. Hücre, su kaybı olmadan tüm aktif materyali dönüştürmek için tavsiye edilen tekrar şarj oranlarında yeterince aşırı şarj edilebilir. Devam eden yüksek aşırı şarj oranlarında (örneğin C/3 ve üstü) tekrar-birleşme prosesi yeterince etkili olmayacak kadar yavaş olabilir ve O₂, H₂ gazları hücreden salıverilir. Bu oranlarda şarjdan kaçınılmalıdır. VRLA bataryanın beklenen denge ömrü, oda sıcaklığında 8 yıldan fazladır. VRLA bataryanın birincil başarısızlık modu, pozitif plakanın büyümesidir. Bu büyüme, hücredeki kimyasal reaksiyonların sonucudur ve büyüme oranı artan sıcaklıkla artar. Ömür sonu hücrenin %80 anma kapasitesini iletmesi başarısızlığıyla tanımlanır [Linden et al., 2002].



Şekil 5.1. Sabit uygulamalar için ön erişim kutuplarıyla Valf düzenli kurşun-asit (VRLA) batarya (12 V, 105 Ah) [May, 2009].

VRLA bataryalarda hidrojen tekrar-birleşme çevrimi, kinetik olarak mümkün değildir. Yeterli miktarda boş gözenek, oksijenin seperatör içinden negatif plakaya nüfuz edebilmesi için bırakılmıştır. Elektroliti doymamış hücreler, piyasada olan geleneksellerden farklıdır (geleneksel sulu elektrolit hücrelerde serbest asit tüm plakayı kaplar). Sabitleşen jel, viskoz bir çözelti oluşturur. AGM bataryalarda, seperatörün üretiminden gelen emici cam, mikro-fiber anlamındadır. AGM'ye genellikle emiş kapasitesinin %90 ile %95'i arası asit emdirilir. Kalan gözenek hacmi, oksijenin negatif plakaya geçişi için kullanılır. AGM seperatörleri, iyonların hem şarj hem de deşarj sırasında hızlı transferine izin vererek iç direnci minimize etmek için plakalarla yakın temasta olmalıdır.

Siklon hücre, sırasıyla 2.5, 5.0 ve 25 Ah kapasiteli ($C_{10}/10$ saat oranda) silindirik şeklinde bir AGM hücresidir. 6 V monobloklarında bulunmaktadır. Siklon hücrenin hem pozitif hem de negatif plakası, saf kurşun-kalay alaşımdandır ve çok incedir (kalayın eklenmesi alaşımın mekanik özelliklerini arttırmak, korozyon direncini arttırmak ve plakanın elektriksel iletkenliğini iyileştirmek içindir). VRLA üreticileri kurşun kalsiyum kalay alaşımı kullanmayı tercih etmektedir. Izgaralar kurşun oksitle yapıştırılmıştır, bir AGM tabakasıyla ayrılmışlardır ve spiraldir. Sülfürik asit, baca deliğinden eklenir ve sonra basınç salıverme valfiyle birlikte kapatılır. Maksimum akım 2.5 ve 5.0 Ah hücrelerde 65 A ve 25 Ah hücrede 250 A dir. Ayrıca, hücrelerin düşük sıcaklık performansı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar çok iyi olup, yüksek sıcaklıkta da kapasitelerini kaybetmezler. Örneğin, %20 kapasite kaybı $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de beklemede bir senede, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ise sadece altı haftada olur. Bununla birlikte hücreler $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar şarj edilebilirler veya denge şarjında tutulabilirler. Siklon hücrelere ~300 çevrime kadar derin deşarj, 2000 çevrime kadar sığ deşarj uygulanabilir. Ayrıca denge görevleri için oldukça uygundurlar.



Şekil 5.2. Siklon hücre [Dell et al., 2001].

Bolder hücresi spiral VRLA (AGM) dizaynının yeni bir çeşitidir. Hücre bir çift ultra-ince (0.05 mm) kurşun-kalay alaşım folyodan yapılmış çok ince (0.21 mm) plakalar kullanmaktadır. Her plaka 0.08 mm kalınlığında tabakadan aktif materyalle her iki taraftan kaplıdır. Böylece bir kenarda kaplanmamış folyodan dar şerit bırakmaktadır. Pozitif ve negatif plakalar birbirlerinden uzaklaşmıştır ve aralarında mikrocama seperatörlerle bir araya gelmişlerdir. Bu plakaların yüksek yüzey alanı, hücreye son derece düşük iç direnç verir.

Spiral hücreler, bobin veya plaka hücrelerden daha yüksek güç çıkışı ve daha düşük kapasite vermektedirler. Bolder kavramı ile çok ince plakalardan yapılmış çok düşük dirençli bir hücre düzenlemesi sağlanmıştır. Sonuçta 1.2 Ah hücre, sadece 77 g ağırlığındadır ve tümüyle 30 A oranında deşarj olabilmektedir. Bu yaklaşık 800 Wkg⁻¹ özgül güce karşılık gelir. Aslında, bu hücreler %70 DoD'da 800 Wkg⁻¹ den fazlasını iletir ve %90 DoD'da 400 Wkg⁻¹ verir. Her ne kadar Bolder hücrenin kapasitesi limitli olsada, portatif uygulamalarda aynı hacimli nikel-kadmiyum hücrelerden daha iyi olmaktadır. Bolder teknolojisi güçlüdür ve altı küçük hücre sadece 0.5 kg ağırlığındadır.

Düz plakalı VRLA bataryalar 3000 Ah kapasiteye kadar, 6 V ya da 12 V monobloklardan olanlar ise 500 Ah kapasiteye kadar üretilirler. Kapalı olduklarından ve bakım gerektirmediklerinden, alan kazanmak için birbiri üstüne katmanlar halinde yerleştirilebilirler. Denge uygulamaları için 20 °C sıcaklıkta kutuplara uygulanan voltajın hücre başına 2.27 ile 2.29 V arasında olması tavsiye edilir. Bu değer, sıcaklıkla çok değiştiğinden şarj kontrolü kritiktir. Bu bataryalar spiral hücrelerle aynı avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler [Dell et al., 2001].

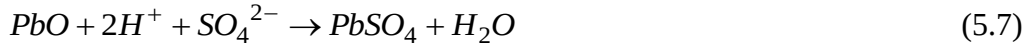
5.2. VRLA-Jel Bataryalarda Tekrar-Birleşme

VRLA bataryaların özel bir karakteri, şarj sırasında oksijenin tekrar-birleşmesidir. Çevrim pozitif elektrotta başlar.



Su ayrışır ve gaz oksijen oluşur. Hidrojen iyonları, elektrotta çözünmüş olarak kalır ve gaz olarak salınmazlar. Elektronlar, pozitif elektrot yoluyla uzaklaşırlar. Kurşun-Asit bataryaların sulu tasarımı oksijenin negatif elektrotta hareket etmesi pratik olarak mümkün değildir. Pozitif elektrottan ayrıldıktan hemen sonra, kabarcıklaşır ve baca tıpası içinden kaçar. VRLA bataryalarda, yoğun gözenekli bir ortam, oksijene hareketini kolaylaştırmak için sunulur (AGM bataryalar: cam keçede gözenekler; Jel bataryalar: jelde çatlaklar).

Negatif elektrotta, aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir.



Eşitlik 5.6'da oksijen, kurşunu kurşun oksite oksitler. Eşitlik 5.7'de bu kurşun oksit daha sonra elektrolitte ve sülfat iyonlarında çözünen hidrojenin katılımıyla kurşun sülfata dönüşür. Bu pratik olarak bir deşarj prosesini temsil eder. Bu reaksiyonun ileriki ürünleri su ve ısıdır. Böylece, oksijen tekrar-birleşerek suya dönüştürülür. Çevrim kapanır. Jel bataryalardaki tekrar-birleşme verimliliği $\geq 95\%$, tipik olarak 98% olmaktadır. Eşitlik 5.8'de şarj sırasında sürekli akan akım, kurşun sülfatı kurşuna tekrar dönüştürür. Bu şekilde negatif elektrot devamlı şarj prosesindedir ve hidrojen üretmez. Aksi halde, tekrar dönüştürülemeyen hidrojen üretilirdi çünkü hidrojenin tekrar-birleşmesi oluşmamaktadır. Dolayısıyla negatif elektrot asla tam şarj olmaz. Doğal olarak, hidrojen üretimi elektrokimyasal nedenlerden dolayı tümüyle önlenemez. Özellikle uygun olmayan çalışma şartları

(örneğin yüksek şarj voltajları ve sıcaklıkları) hidrojen üretimini tahrik eder. Esasen, hidrojen pozitif plakaların korozyonu sırasında küçük miktarlarda üretilmektedir. Oksijen, hücrede belirli bir aşırı-basınç oluşturur. Bu tamamen normaldir. Valf çok düşük basınçlarda açılmamalıdır. Bu durumda telafi edilemeyen kayıpta fazla oksijen kaçabilir. Eğer tanımlı açılma basıncı meydana gelirse, valf kısa süreliğine açılır ve biriktirilen gazı bırakır. Normal çalışma şartları altında bu gaz temel olarak hidrojenden meydana gelir. Uygun olmayan şartlar altında (yüksek sıcaklıklardaki yüksek şarj voltajlarında) oksijen yine de kaçabilir. Elektrot, batarya normal çalışma şartlarında beklenen tasarım ömrüne ulaşacak şekilde boyutlandırılır. Jel bataryalarda elektrolit fazlalığı vardır [URL-1].

Şarj sırasında hidrojen iyonları, negatif elektrotlarda suya dönüşür. Bu şekilde su-hidrojen-su sirkülasyonu oluşur. Bunu sağlamak için, pozitif plakalarda oluşan oksijen, negatif plakaların yüzeyine taşınmalıdır. Oksijen tekrar-birleşmesi için temelde gereken fonksiyon, oksijenin pozitif plakalardan taşınmasını sağlayan pozitif ve negatif plakalar arasındaki serbest kanallardır. AGM metodu, fiber seperatörün tamamiyle elektrolitle doyurulmamasını gerektirir. Böylece oksijen gazı katoda göç etmek için yeterli kanal bulabilir. Oksijen seperatör içinden negatif plakaya taşınır. Burada gaz tekrar-birleşme prosesi oluşur [Kiehne, 2003; Muneret et al., 2005].

Valf düzenli bakım gerektirmeyen kurşun-asit bataryaların önemli özelliği, kurşun-antimon ızgara alaşımları yerine kurşun-kalsiyum kullanmasıdır. Elektrolitte tüm kullanılan materyallerde yüksek temizlik gerekir çünkü küçük kirlilikler, hidrojen aşırı voltajını düşürdüğünden bataryanın kendiliğinden deşarjını artırır. Jel bataryalarda çok düşük dirençli ve yüksek gözenekli plastik seperatörler kullanılır. AGM tipinde, cam fiber elyaflar sıvı elektroliti emmek için kullanılır. Aynı zamanda bu cam elyaflar seperatör özelliğindedir. Valf düzenli bataryaların önemli bir özelliği valftir. Valf, hücrelere havadan oksijen taşınmasını önlemek için dıştan içe oldukça sıkı düzenli olmalıdır, aksi halde serbest kanallar nedeniyle negatif kütleyi oksitleyebilir. Bu türden hücreler, seri bataryalarda zamanından önce olan tüketimden sonraki deşarj işleminde derin deşarja uğrarlar [Kiehne, 2003].

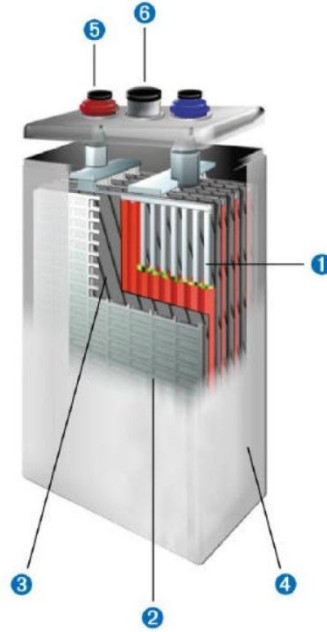
5.3. VRLA Ömrünü Belirleyen Faktörler

VRLA bataryalar alanında yapılan teorik gözlemler ve deneyler, denge servisi ömrünü sınırlayan temel faktörleri şöyle belirlemektedir;

- Pozitif ızgaranın korozyonu
- Çevrim sırasında aktif kütle bozulması
- Aktif kütle sülfatlaşması
- Su kaybıyla kuruma

Diğer başarısızlıklar, üretim kalitesi düşüklüğünden olanlardır (kısa devreler, sızıntı, negatif grup bar korozyonu) [Muneret et al., 2005].

5.4. VRLA-Jel Bataryalarda Tasarım ve Malzemeler



Şekil 5.3. Jel Valf Düzenli Kurşun-Asit hücrenin tasarımı (OPzV tipi) [URL-1]

Pozitif plakalar (1) yüksek korozyon direnci için optimize edilmiş kurşun-kalsiyum alaşımı içeren dayanıklı boru şeklinde plakalardır. Negatif plakalar (2)

kurşun-kalsiyum alaşımı içeren ızgara plaka tasarımıdır. Ayırıcı (3) mikro gözenekli ve dayanıklı, düşük iç direnç için optimize edilmiş pozitif ve negatif plakaların elektrik yalıtımı içindir. Muhafaza (4) SAN veya yanmayı geciktirici ABS malzemedendir. Kutuplar (5) kolay ve güvenli montaj ve mükemmel iletkenlikle birlikte bakım gerektirmeyen bağlantı için vida bağlantısı vardır. Valfler (6) aşırı basınç durumunda gaz serbest bırakırlar ve hücreyi atmosfere karşı korurlar.

SAN: (Stiren-Akrilonitril Kopolimer)

ABS (Akrilonitril-Bütadien Stiren Kopolimer): Bir termoplastiktir. Camlaşma sıcaklığı yaklaşık 105 °C (221°F). ABS Amorfür (kristalin yapıya sahip değildir) gerçek erime noktası yoktur.

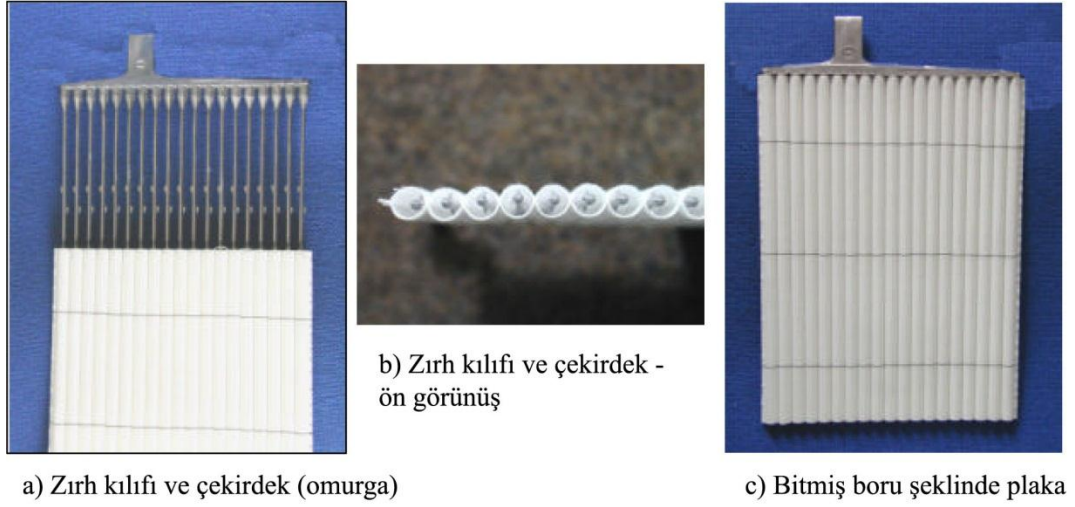
5.4.1. VRLA-Jel Bataryalarda Plaka Konstrüksiyonu ve Alaşımlar

Tüm negatif plakalar yapıştırılmıştır ve ortak ızgara tasarımına sahiptirler. Alaşım olarak, kurşun-kalsiyum (PbCa) alaşımı kullanılmıştır.

Tek gövdeli bataryaların hepsinin pozitif plakaları da yapıştırılmış ızgaralara sahiptirler. Kurşun-kalay-kalsiyum (PbSnCa) alaşımı kullanılmıştır.

Jel-hücreler pozitif boru şeklinde plakalara sahiptirler. Kurşun-kalay-kalsiyum (PbSnCa) alaşımı kullanılmıştır.

Kalsiyum, ızgaralara mekanik stabilite verir ve düşük gazlaşma oranlarını garantiler. Kalay, yüksek korozyon direnci ve yüksek çevrim sayıları için iyi etkiye sahiptir. En yüksek sayıda çevrimlere, boru şeklinde plakalarla ulaşılır. Basınçlı dökümle çok iyi tane yapısına sahip omurgalar oluşturulur. Zırh kılıfı, aktif pozitif materyali yüksek basınç altında aktif materyal kaybından korur.



Şekil 5.4. Boru şeklinde bir plakanın dizaynı [URL-1].

- a) Zırh kılıfı ve çekirdek (omurga)
- b) Zırh kılıfı ve çekirdek-ön görünüş
- c) Bitmiş boru şeklinde plaka

5.4.2. Hücre/Tek Gövdeli Mahfazalar

Mahfazalar ve kapaklar için üç değişik çeşit materyal kullanılmaktadır.

- PP (Polipropilen)
- ABS (Akrilonitril-Bütadien Stiren Kopolimer)
- SAN (Stiren-Akrilonitril Kopolimer)

5.4.3. VRLA-Jel Bataryalarda Valfler

Jel bataryalar ve hücreler valflerle donanımlıdır. Valfler, normal çalışmada daima kapalıdır ancak belirli miktarda gaz hücrenin içinde biriktiğinde açılırlar. Bu birikme, anormal çalışma koşullarında daha hızlı ilerler (yüksek şarj voltajları, artan sıcaklık). Valfler kıvılcım tutma konusunda onaylanır. Bu, bir çeşit labirent olan valf tasarımı sayesinde bir dış kıvılcımın hücrenin kendisini tahrip ederek valfi delmesinin önlenmesi anlamına gelir. Kullanılan adaptör, batarya tipine bağlıdır.

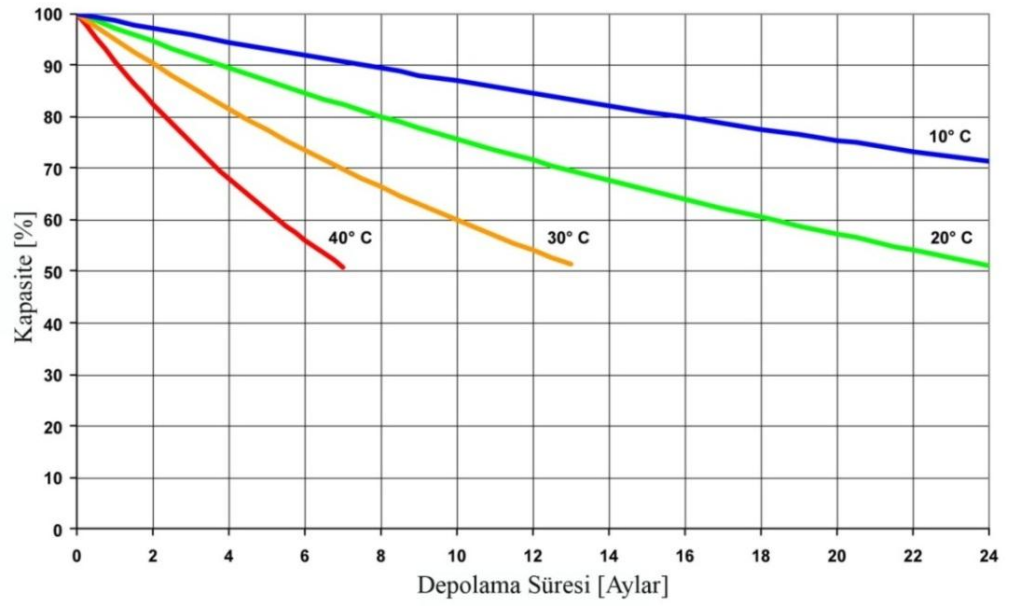
Valfler $0.180 \geq p \geq 0.06$ bar açılma basıncında, $0.155 \geq p \geq 0.03$ bar kapanma basıncında çalışırlar [URL-1].

5.5. VRLA-Jel Bataryalarda Depolama Koşulları

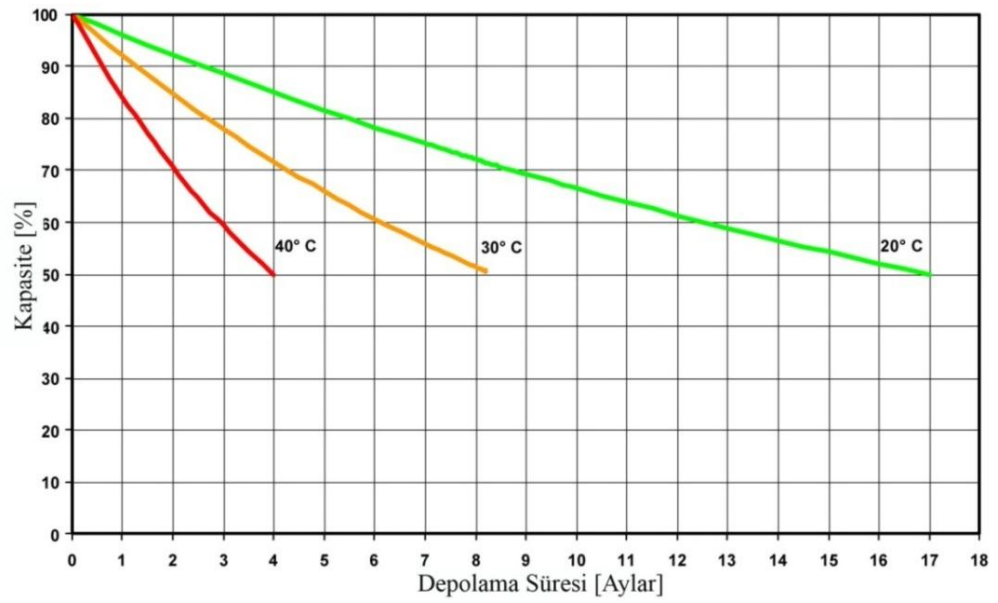
Sıcaklığın kendiliğinden-deşarj oranı üzerinde etkisi vardır. Bundan dolayı, bataryaların tam şarjlı halde serin ancak buz tutmayan odada depolanması önemlidir. Plastik materyal içinde depolama onaylanmaktadır. Ancak sıcaklığın önemli ölçüde dalgalandığı odalarda ve plastik örtü altında yüksek bağıl nem yoğunlaşmaya neden olduğunda depolama önerilmez. Zamanla, bu yoğunlaşma kutuplarda beyazımsı hidrasyona neden olur ve kaçak akım vasıtasıyla yüksek kendiliğinden deşarja sebep olur. Bu hidratlaşmanın eğer korozyon oluşmazsa, batarya çalışma ve servis ömründe etkisi yoktur [URL-2].

5.6. VRLA-Jel Bataryalarda Depolama Süresi

Maksimum depolama süresi $\leq 20^\circ \text{C}$ 'de, standart jel bataryalar için 24 ay, jel-güneş bataryaları için 17 ay olmaktadır. Güneş bataryalarının kısa depolama zamanı, elektrolite düşük miktarda fosforik asit eklenmesindendir. Fosforik asit çevrimlerin sayısını artırır fakat kendiliğinden deşarj oranını da artırır. Daha yüksek sıcaklıklar daha yüksek kendiliğinden deşarja ve tekrar şarj operasyonları arasında daha kısa depolama zamanlarına neden olur. Geniş depolama periyotları için “açık-devre” voltajının şu aralıklarda kontrolü tavsiye edilir: 20°C 'de depolama için, 12 ay depolama periyodu sonrasında ve daha sonra her 3 ayda bir yapılmalıdır. 30°C 'de depolama için, 6 ay depolama periyodu sonrasında ve daha sonra her 2 ayda bir yapılmalıdır. Tampon şarjı, ölçülen açık devre voltajı $< 2.07 \text{ Vpc}$ (hücre başına Volt) olduğunda gerekli görülmelidir [URL-2].



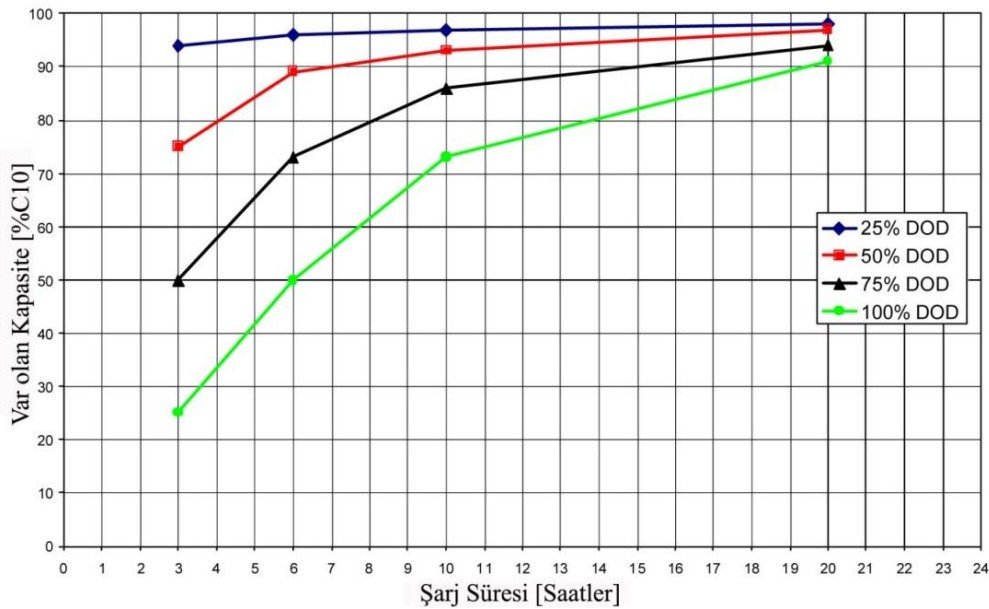
Şekil 5.5. Kendiliğinden deşarj ve sıcaklık grafiği (standart jel bataryalar) [URL-2]



Şekil 5.6. Kendiliğinden deşarj ve sıcaklık (jel güneş bataryalar) [URL-2].

5.7. VRLA Şarj Koşulları

Sabit akım-sabit voltaj (IU) şarjı, VRLA bataryalar için çok uzun servis ömrü sağlamakta en uygunudur. Diyagramlarda gösterim, kullanım şarjı voltajından daha büyük voltajlarda, başlangıç U-sabit seviyesine ulaşımdan sonra düşük kullanım voltaj seviyesine otomatik geçişi takip eder. Örneğin, 2.40 Vpc ile IU şarjda eğer voltaj 2.40 Vpc'e ulaşırsa, 2.25 Vpc'e değiştirilir. Yüksek akımlar tekrar şarj süresiyle ilgili kazanca yol açmaz. Düşük akımlar tekrar şarj süresini önemli ölçüde uzatır [URL-2].



Şekil 5.7. 2.25 Vpc'de tekrar şarj, I_{10} [URL-2].

Ah-Verimlilik, deşarj edilen Ah/tekrar şarj edilen Ah olarak tanımlanır. Şarj katsayısı, tekrar şarj edilmiş Ah/deşarj edilmiş Ah olarak tanımlanır. Gerekli şarj katsayısı, artan deşarj oranıyla artar. Jel VRLA bataryalar, derin-deşarja dayanıklı olsalar da servis ömürleri çok fazla tekrar eden deşarjlardan etkilenebilir. Bu nedenle deşarja, deşarj zamanı için tavsiye edilen en son deşarj voltajı altında devam edilmemelidir.

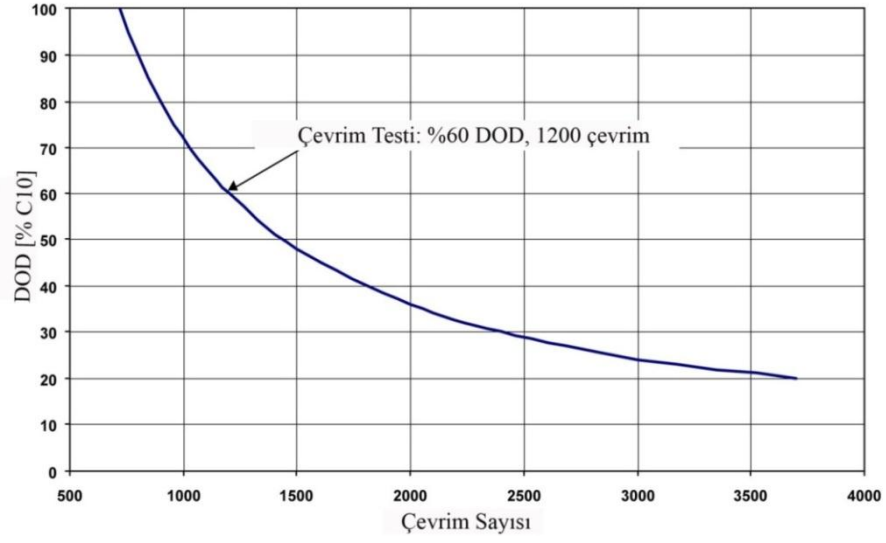
Dengeleyici şarjlar, derin deşarjdan sonra, uygun olmayan şarjlardan sonra veya her bir hücre ya da blok voltajı belirtilen oranın dışında olduğunda gerekli

olurlar. Hücre/blok sıcaklığı asla 45 °C aşmamalıdır. Eğer aşarsa şarj kesilmeli veya sıcaklığın düşmesine izin vermek için kullanım şarjına geçilmelidir [URL-2].

Bir akünün kapasitesi, deşarj akımının, nominal deşarj akımından fazlalık derecesine bağlı olarak azalır. Örneğin 100 Ah bir akü, 10 Amperle 10 saat deşarj edildiğinde, voltajı 1.8 V'a düşer. Yani 10x10 100 Ah anma kapasitesini verir. Aynı akü 50 Amperle deşarj edilirse voltajı 2 saatten önce 1.8 V'a düşer. Diğer bir ifadeyle 2x50 100 Ah değil, daha düşüktür. Bu sonuç, akünün yapısından gelen normal bir durumdur. Akü kapasitesinin, deşarj akımıyla değişim değerleri, ilgili deşarj ve kapasite eğrilerinin kullanılmasıyla belirlenir. Jel VRLA bataryalar derin deşarja dayanıklı olsalar da servis ömürleri çok fazla ardışık derin deşarjlardan etkilenir.

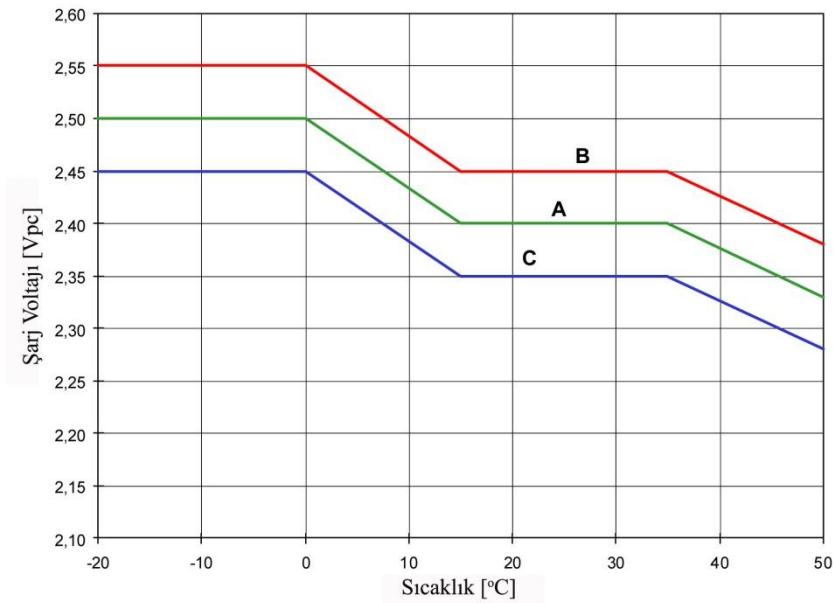
Valf kontrollü bataryaların nominal kapasitesi, I_5 ve I_{20} arasında, bataryanın uygulamasına ve teknolojisine göre tanımlanır. Deşarj oranlarını takip eden anma kapasitesi $T = 20^\circ\text{C}$ 'de tanımlıdır. Düz plakalı hücreli bataryalarda I_{20} ve sabit bataryalarda (tüp şeklinde plakalı) I_{10} ile tanımlanır [Kiehne, 2003].

Jel güneş bataryalar, çevrimsel uygulama için optimize edilmiştir. Elektrolite katkı, fosforik asit, çevrimlerin sayısını arttırır. Mümkün çevrim sayıları, değişik parametrelere bağlıdır. Örneğin yeterli tekrar şarj, derin deşarj (DOD) ve sıcaklık. Daha derin deşarj (yüksek DOD) daha düşük çevrim sayılarıyla sonuçlanır çünkü aktif kütle çok daha fazla gerilime uğrar ve daha kuvvetli tekrar şarj gereklidir (korozyon). Bu nedenle, daha düşük DOD yüksek çevrim sayılarıyla sonuçlanır. DOD ile çevrim sayıları arasındaki ilişki hep tam orantılı değildir. Bu, ayrıca aktif materyal miktarının elektrolit miktarına oranına bağlıdır. Çevrim ömrü (belirtilen günlük derin deşarj (DOD) ile hesaplanan yıl sayısı), servis ömrünü asla geçemez. Çevrim ömrü beklenmeyen etkilerden dolayı servis ömründen oldukça azdır. Batarya montajı her bir hücre/blok arasındaki sıcaklık farkı 3 °C'yi hiçbir zaman aşmayacak şekilde yapılmalıdır.



Şekil 5.8. Çevrim sayısı DOD grafiği [URL-2].

Şarj voltajının sıcaklığa bağlı olarak ayarlanması 15 °C'den 30 °C'ye kadar gerekli değildir. Eğer çalışma sıcaklığı kalıcı olarak bu aralığın dışındaysa, şarj voltajı ayarlanmak zorundadır. Güneş bataryaları mevsimsel ve diğer koşullardan dolayı %100'den daha düşük şarj durumunda (SOC) çalıştırılırlar. Şarj durumları (SOC) yaz mevsiminde %80 ile %100 arasına, kış mevsiminde ise %20 seviyesine düşer.



Şekil 5.9. Şarj modu ve sıcaklığa bağlı olarak jel güneş batarya şarjı [URL-2].

(Şekil 5.9)'da değiştirme regülatörüyle (2 basamaklı kontrolcü): Her gün 2 saat için B eğrisindeki şarj (maksimum şarj voltajı) sonradan devamlı şarja dönmekte, eğri C. Standart şarj (değiştirme olmadan): Eğri A. Hızlı şarj (Dış jeneratör ile şarjın dengelenmesi): Ayda 5 saat için B eğrisindeki şarj, sonradan eğri C'ye değiştirme yapılmaktadır [URL-2].

5.8. Sıcaklığın Etkisi

Nominal sıcaklık, kapasite ve ömür süresi (servis süresi) dikkate alınarak 20 °C olmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar ömür süresini ve çevrim sayılarını azaltır. Daha düşük sıcaklıklar mümkün kapasiteyi azaltır ve tekrar şarj süresini uzatır. Meydana getirilebilir servis ömrü, eşdeğer tasarımdaki standart jel bataryalardan daha kısadır çünkü çevrim sayısını arttırmak için fosforik asit eklenmiştir. Fosforik asit, korozyon oranını ve kendiliğinden deşarj oranını bir miktar arttırmaktadır. Jel bataryalar -40 °C ile +55 °C geniş sıcaklık aralığında çalışacak şekilde tasarlanmışlardır. -15 °C'den biraz düşük sıcaklıklarda derin deşarja bağlı olarak donma riski vardır. Diğer taraftan bataryaları özel koşullar altında, daha düşük sıcaklıklarda kullanmak mümkündür.

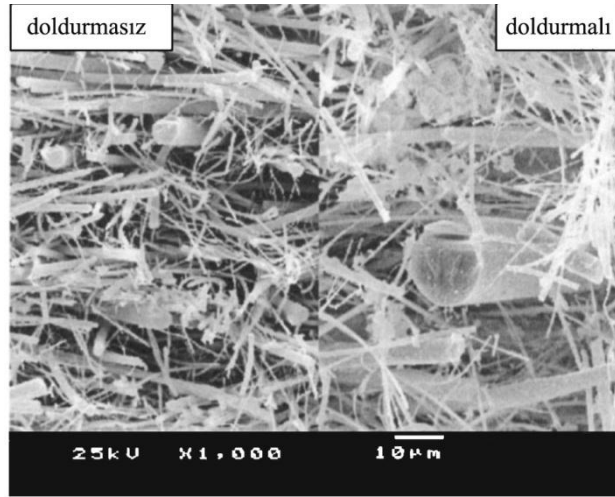
Yüksek sıcaklıklar, bataryaların servis ömrünü etkiler. Korozyon oranı her 10 °C sıcaklık artışında ikiye katlanır. Bu nedenle, ömür her 10 °C sıcaklık artışında yarıya düşer. 20 °C'de 15 yıl, 30 °C'de 7.5 yıla düşer. Sıcaklık artışının ömür kaybına etkisini azaltmak için pozitif omurga çerçevesinin basınçlı döküm makineleriyle yüksek basınçta dökülmesi gereklidir. Burada enjeksiyon basıncı 100 bardır. Bu işlem korozyon prosesine dayanıklı çok iyi taneli yapı sağlar [URL-2].

Valf kontrollü kurşun-asit bataryalar (VRLA) asit katmanlaşmasına dayanıklıdır ve bakım gerektirmeme avantajına sahiptirler. VRLA bataryalar dikkatli şarj etmeyi gerektirir çünkü aşırı şarj su tüketimini arttırabilir, yüksek yeniden-birleşme etkisi ve buna bağlı ısı üretimi nedeniyle ısı hasarlara neden olabilir. VRLA bataryanın %60 DOD'da ve kısmi şarj durumu (PSOC) hallerinde 800 çevrime ulaşması hedeflenmiştir [Fernandez et al., 2001].

5.9. Yeni bir seperatör materyali geliştirilmesi

VRLA bataryası performansını arttırmak için yeni bir AGM seperatör materyali geliştirilmiştir. Yeni seperatör, cam mikro fiberi düzenleyen özel doldurma materyalleri içermektedir. Bu, büyük ölçüde asit katmanlaşmasını azaltır. Böylece batarya ömrünü uzatır ve sistemin ömür maliyetini azaltır.

Asit katmanlaşmasını minimize etmek için bir materyal üretiminde, iç yapının karakteristiklerini değiştirmek veya yapısında aynı fonksiyonda bir miktar hareketsiz doldurucu kullanmak gerekir. Bu iki olanaktan ilki, ince mikro fiber maliyetinden dolayı oldukça pahalıdır. Ayrıca mikro fiberin karakteristiklerinden dolayı (özellik yüzey) iyileşme sınırlıdır. Bundan dolayı, ikinci yaklaşım (hareketsiz doldurucular) seçilir. Organik, inorganik doldurucular, anyonik ve katyonik, seramik fiberler test edilmiştir. Bu testler sonucunda, doldurucunun en önemli parametresinin kimyasal etki olmadığı, bataryanın bileşenleriyle birlikte özgül yüzey alanı olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10. Standart (doldurmasız) ve değiştirilmiş (doldurmalı) seperatör malzemesinin SEM (elektron mikroskobu taraması) fotoğrafı [Fernandez et al., 2001].

Yüzey alanında oldukça büyük artış olmaktadır, gözenek boyutu dağılımı düşük seviyelere çekilmektedir ve uzun zamanda kılcallar artmıştır (bu son iki

özellik, asit katmanlaşmasının giderilmesi içindir). Gözenek boyutlarında düşüş, diğer bir önemli faydadır. Bu, kurşun dallanmalarının büyümesinden dolayı olan kısa devrelerin azaltılmasını kolaylaştırır. (Şekil 5.10)'da özgül yüzey alanının artması ve düşen gözenek boyutu gösterilmiştir. Bu yeni seperatör malzemelerinin, batarya performansını yükseltmesi beklenmektedir. Yeni VRLA bataryanın geliştirilmesinin amacı, ömür ve güvenilirliği olabildiğince arttırmaktır.

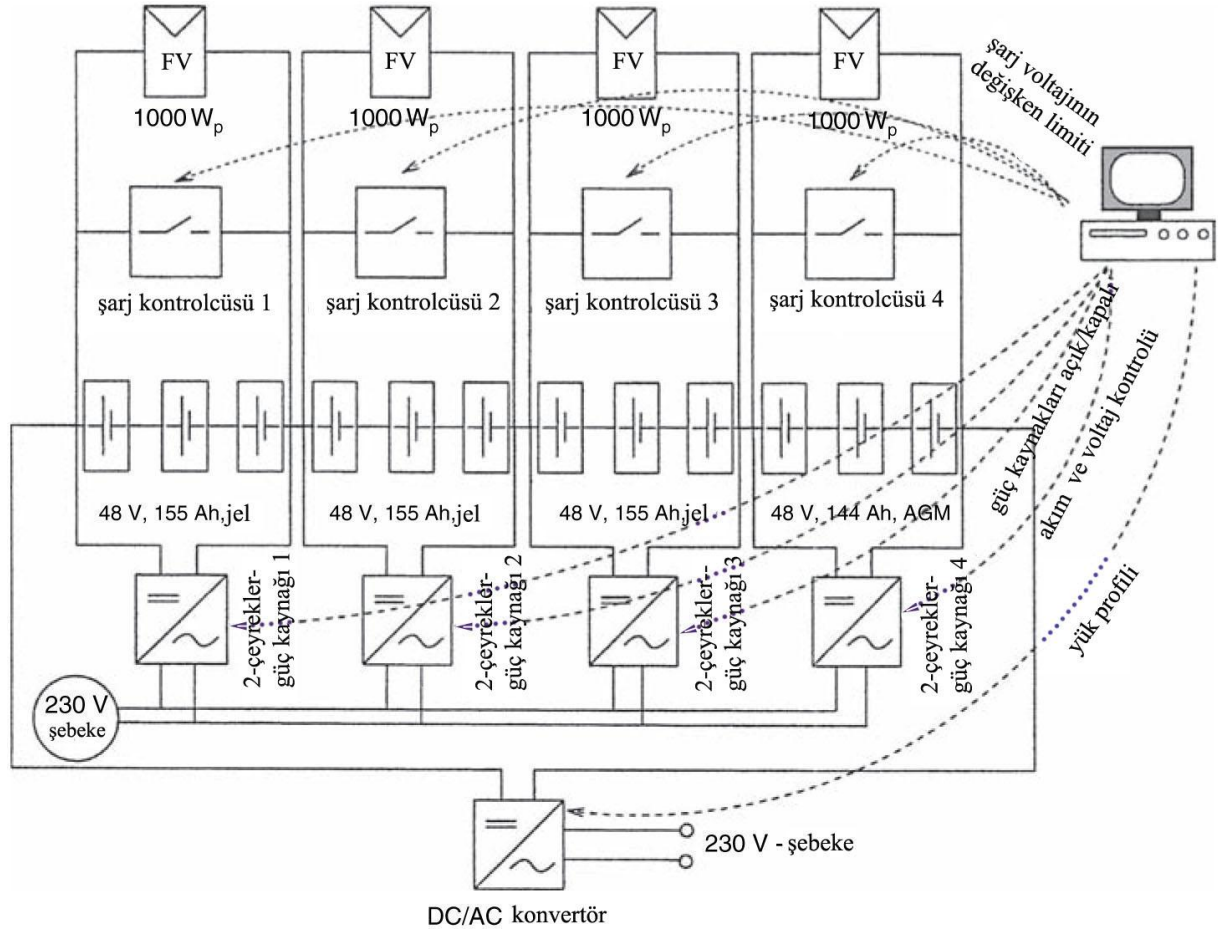
İki seviyede derin deşarjı içeren iç çevrim testi yapılmıştır. Birincisinde %20 DOD (şarj durumu çevrimde %60 ile 80 arasında değişen), ikincisinde %60 DOD (şarj durumu %20 ile 80 arasında değişen) uygulanmıştır. Çevrime başlamadan önce bataryalar %20 anma kapasitesine deşarj edilmiştir (%80 SOC bırakılmıştır). Bu kısmi şarj durumu PSOC operasyonu, FV uygulamalarda normalde oluşan çevrimle benzeşmektedir. Çevrimlerde şarj, deşarj edilen miktarın aynısı kadar yapılmaktadır. Her 25 çevrim serisi sonunda bataryalar bir tam tekrar şarj almaktadır. Kontrol deşarjı, her 50 çevrimden sonra yapılmaktadır ve bir tam tekrar şarjı içermektedir. Bu, 5 saatlik bir tam deşarjı takip etmektedir. %60 DOD'da hareketsiz doldurucularla şarj edilen seperatörler, 750 çevrim gösterirken standart bataryalar 500 çevrim göstermektedir. Ömür %50 artmıştır [Fernandez et al., 2001].

5.10. VRLA Bataryalı Sistemler

Telekomünikasyon ve UPS servislerinde olduğu gibi, güneş ve rüzgâr güç uygulamalarında yine VRLA tasarımına yönelim vardır. Güneş ve rüzgâr sistemleri, jel bataryaları, AGM bataryalara nazaran daha fazla kullanılmaktadır. Bunun nedeni, bu sistemlerin çoğunda yüksek güç gereksinimi bulunmamasıdır. Ancak, yüksek güç gerektiren sistemlerde AGM güneş bataryaları tercih edilmektedir. Güneş ve rüzgâr uygulamaları için sulu (flooded) bataryalara benzer şekilde mahfaza boyutlarında bekleme için kullanılan güneş/rüzgâr uygulamalarında kullanılanlar arasında hiç fark yoktur ancak güneş bataryaları için kapasite 100 saat deşarj oranına bağlıdır. Bu, düz plaka tasarımıyla küçük bataryalarda ya da tüp şeklinde tasarımda büyük bataryalarda olduğu gibi çoğu VRLA güneş bataryaları için geçerlidir. Bekleme, hizmet, telekom, UPS genellikle fazla çalışma çevrimi içermez. Bu nedenle orta şarj voltajı, pozitif ızgara korozyonu ve su kayıplarının düşük seviyesi için seçilir. Güneş

ve rüzgâr gücü uygulamaları çoğu zaman önemli çevrim görevleri içerir. Bu uygulamalar için geliştirilmiş bataryaların farklı hücre tasarımına ek olarak, bataryaları sağlıklı ve iyi koşulda tutmak için değişik bir şarj stratejisine ve voltajına gereksinim vardır. Genellikle yoğun çevrimler için, önemli ölçüde yüksek şarj voltajı, bataryanın düşük şarj veya sülfatlaşma nedeniyle servis ömrünün azalmasından sakınmak için gerekir. Diğer taraftan çok yüksek bir voltaj, kabul edilemeyecek yüksek ızgara korozyonu ve su kayıplarına neden olur, bu da bataryanın ömrünü kısaltır. Güneş ve rüzgâr gücü uygulamalarında bataryaların ızgara korozyonu ve su kayıplarından ziyade, düşük şarj ve sülfatlaşmaya daha fazla uğradıkları görülmektedir. Bu, genellikle şarj voltajının bataryayı uygun şarj edemeyecek yükseklikte olduğu anlamına gelir. Özellikle yüksek plakalarla ve belirgin çevrim görevlerinde, jel bataryalar pozitif plakaların sülfatlaşmasından kaçınmak için periyodik olarak nispeten yüksek şarj voltajları gerektirirler. Yüksek şarj voltajlı şarj rejimi dikkatli seçilmelidir. Yüksek açılma basıncı olan basınç salıveren bir valf, su kaybını azaltmada yardımcı olabilir ancak etki, hücre içindeki yüksek gaz basıncı problemini düzeltmede yeterli değildir. Genel olarak, 100 ile 200 mbar arasında bir basınç, aşırı su kaybından kaçınmak için uygundur. Bu nedenle, güneş ve rüzgâr gücü uygulamalarında, jel ve AGM bataryaların servis ömrünü uzatmak için şarj stratejilerinin optimizasyonu önemli bir noktadır. VRLA bataryaların bu tür uygulamalarda şarj stratejilerini araştırmak ve geliştirmek için bir program geliştirilmiştir. Deşarj stratejilerinin bir araştırması (örneğin maksimum kabul edilebilir DoD) içerilmektedir. Bu araştırmaların en önemli sonuçları aşağıda belirtilmektedir.

Araştırmanın bir kısmı, Freiburg Almanya’da güneş istasyonunda yapılmıştır. Bu istasyon, güneş gücü uygulamaları için test alanı olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik (FV) hibrit sistem, elektrik şebekesine bağlanmıştır ve bu bağlantı dizel veya benzin jeneratörü yerine yedekleme sistemi olarak kullanılmıştır. 192 V batarya düz pozitif plaka dizaynına sahiptir. Fotovoltaik (FV) hibrit sistem dört kısım sisteme ayrılmıştır; her biri 48 V bataryayla, 1000 W_p güneş jeneratörü, bir şarj kontrolcüsü, elektrik şebekesinden yedekleme için bir redresör (doğrultmaç). (Şekil 5.11) tam sistemin bir şemasını göstermektedir [Broussely et al., 2007].



Şekil 5.11. Düz pozitif plakalarla ve dört kısmi sistemle, bir yedekleme sistemiyle güneş istasyonunun 192 V, 155 Ah bataryalı güç sisteminin şeması [Broussely et al., 2007].

Düz pozitif plakalarla ve dört kısmi sistemle bir yedekleme sistemiyle Freiburg güneş istasyonunun 192 V, 155 Ah bataryalı güneş güç sisteminin şeması (üçü jel dizaynı ve biri AGM dizaynı). Kısım sistemleri 1-3: 12 V modüller, 155 Ah (pozitif düz plakalar, jel). Kısım sistemi 4: 6 V modüller, 144 Ah (pozitif düz plakalar, AGM) (Şekil 5.11)'de gösterilmiştir. 48 V ünitelerin üçü, her biri 12 V ve 155 Ah jel monoblokler içermektedir. Oysa dördüncü 48 V ünite her biri 6 V ve 144 Ah AGM monobloğa sahiptir. Jel monobloklerin kapasitesi 100 saat için 185 Ah ve 10 saat için 155 Ah'dır. AGM dizaynı için kapasite, 100 saat için 170 Ah ve 10 saat için 144 Ah olmak üzere biraz daha düşüktür. Tüm monoblokler 192 V bir batarya dizisinde olmaktadır ve böylece tüm hücreler için deşarj yükü aynıdır.

Güneş jeneratöründen maksimum şarj akımı 19 A, elektrik şebekesinden yedekleme olarak şarj akımı 20 A'dır ve maksimum deşarj akımı 25 A'dır. Bataryaların sıcaklığı yılın zamanına bağlı olmaktadır ve 12-25 °C seviyesindedir.

Dört kısmi sistem bağımsız olarak güneş jeneratörü/şarj kontrolcüsü ve elektrik şebekesi/redresör ikilisinden şarj edilebilmektedir. Sırayla, şarj kontrolcülerini ve redresörü, bir bilgisayar kontrol etmektedir. Bu bilgisayar ayrıca ilgili veriyi ölçmek ve depolamak için kullanılmaktadır. Bu, bağımsız monoblok voltajını ve içeri veya dışarı akan tüm akımları, batarya, güneş jeneratörü, redresörler ve yükü kapsamaktadır. Dört değişik şarj stratejisi vardır, burada şarj voltajı hücre başına 2.30 ve 2.45 V arasında kalmaktadır. (Tablo 5.1)'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Freiburg güneş hibrit sistemlerinde şarj/deşarj stratejisindeki değişiklikler [Broussely et al., 2007].

	Sistem 1	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Batarya tipi	Düz jel plaka	Düz jel plaka	Düz jel plaka	Düz AGM plaka
Maks. DoD(%)	70	70	70	70
Maks. Şarj voltajı (V/hücre)	2.35 zaman sınırı yok	2.45 günde maks. 2 saat sonra 2.35	2.30-2.45 DoD'a bağlı	2.35 zaman sınırı yok
Maksimum voltajda süre “güneş tam şarjı” kabul edilmekte	5 saat	2 saat	voltaja bağlı	5 saat

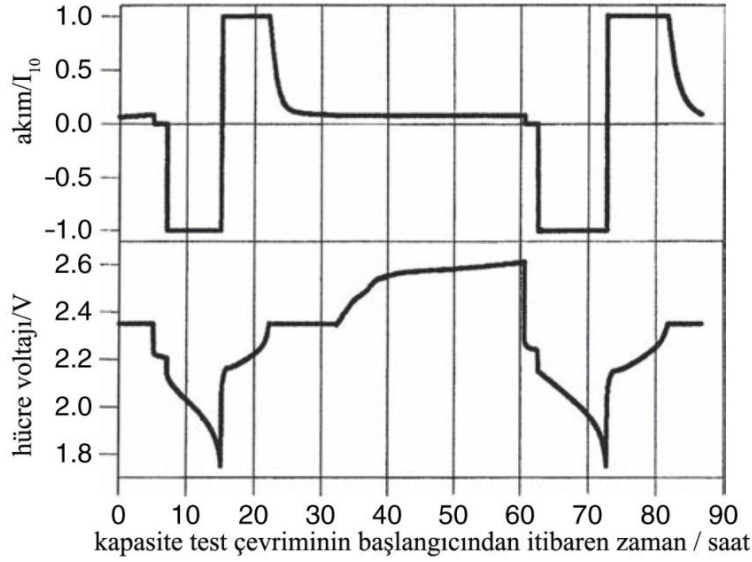
FV jeneratörün normal çalışmasında ya da yedekleme şarj ünitesinin ekstra şarj işlemiyle en az 30 günde bir “tam güneş şarjı” olmaktadır (Tablo 5.1). Böyle bir “güneş tam şarjı” sonrası tekrar şarj durdurulmakta ve DoD hesaplaması (Ah dengesi temelli) %0 belirlenmektedir.

Her yarım yılda, bataryaların kapasitesi tipik bir “güneş şarjı” rejiminden sonra birdeşarjla test edilmekte ve bunu oldukça şiddetli bir şarj rejiminden sonra ikinci birdeşarj takip etmektedir. Bu, ilkdeşarjdan önce (Tablo 5.1)’de verilen kriterlere göre bir şarjın olduğunu göstermektedir. İkincideşarjdan önceki şiddetli şarj, bir sabit akım/sabit voltaj/sabit akım IUI_a şarjıdır. Burada son aşamada batarya voltajı, normal çalışmadakinden oldukça yüksektir. %112 nominal kapasiteye tekrar şarj edildiğinde, şarj sonlandırılmaktadır. IUI_a şarj için asıl şarj programı $I = I_{10}$, hücre başına $U = 2.35$ V, $I_a = 0.08 \times I_{10}$. İkincideşarjdan sonra, güneş batarya tipik şarj rejimiyle şarj edilir ve güneş güç sisteminde tekrar kullanılabilir. Bu zaman harcayan prosedürün amacı, kullanıcı için kullanılabilir kapasiteyle (ilkdeşarj) bataryanın sağlık durumu (ikincideşarj) arasındaki farklılığı göstermektir. Farklılıklar, sistemin kullanılabilir kapasitesi ve batarya üreticisi tarafından garanti edilen servis ömrü bakımından çok önemlidirler. Birinci ve ikincideşarj arasında %15’e kadar fark olmaktadır.

Bu, aynı zamanda şarj durumu ve tam şarj durumu tanımlarını da içermektedir. Verilen tanıma göre, “güneş şarjı” rejimi “pratik tam şarj durumu” ($FULL_p$) vermekte ve karşılıktaki şarj durumu “pratik şarj durumu” (SOC_p) vermektedir. Bu tanımlar, sistemin kullanıcısının tam kapasiteye ulaşmadığını çünkü FV sistemlerdeki şarj durumunun bataryanın tam tekrar şarjına izin vermediğine dikkat çekmektedir. İkinci şarj rejimi “%112 şarj” ile “tam şarj durumu” ($FULL$) vermektedir ve bu “nisbi şarj durumu” na (SOC_r) karşılık gelmektedir. Bu, bataryanın gerçek sağlık durumu temelli kapasite tanımıdır. Ancak bu, kullanıcı için mevcut kapasitesiye karşılık gelmemektedir.

(Şekil 5.12) “güneş” IU şarjıyla (I şarjının süresi test başlangıcındaki batarya şarj durumuna bağlıdır) kapasite test çevrimlerinin tipik akım ve voltaj profilini göstermektedir, ilkdeşarj (10 saat için) bir öncekideşarj kapasitesinin %112’sine sonra nominal kapasiteye bir IUI_a tekrar şarjı (“şiddetli” şarj diye anılan) olmaktadır.

İkinci bir 10 saat için deşarj ve bataryayı çalışabilir hale getirmek için bir IU tekrar şarjı olmaktadır [Broussely et al., 2007].



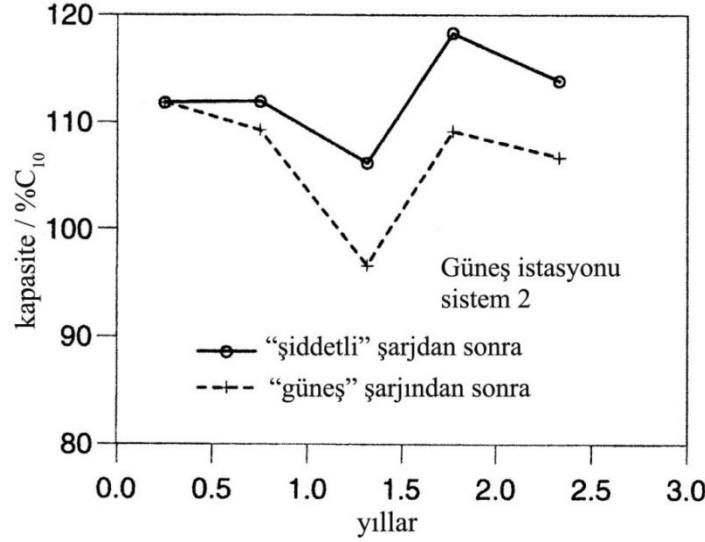
Şekil 5.12. Kapasite test çevrimi sırasında bir güneş şarjıyla tipik akım ve voltaj profili [Broussely et al., 2007].

Bir I_{10} deşarjı, bir %112 IUI_a şarjını (şiddetli şarj) ve ikinci bir I_{10} deşarjını takip etmektedir. Bu test profili tüm testlerde kullanılmıştır (Şekil 5.12).

Kapasite testleri nedeniyle, bataryalar yılda iki kez şiddetli tekrar şarj edilmektedirler. Ancak bu günümüz FV sistemleri teknolojilerinde bulunmamaktadır. Freiburg güneş istasyonunda bataryaların araştırılması 2 yıl servisten sonra, “güneş şarjı” ve “şiddetli şarj” sonrası kapasiteler arasında aslında bir fark olduğunu göstermektedir (%5-15). Bu kapasite testlerinin sonuçları (Şekil 5.13)’de gösterilmiştir.

Her bir jel monobloğun kapasitesinin sapması tümüyle düşüktür. Oysa AGM monoblokların sapması daha belirgindir. Son şarj durumunda, bağımsız monoblokların voltajı önemli derecede değişmektedir. VRLA bataryaların tekrar-birleşme davranışları, sulu hücrelerin aksine batarya başarısızlığı göstermemiştir. Değişik şarj rejimlerinde, düz pozitif jel bataryaların karşılaştırılmasında bir şiddetli tekrar şarj sonrasında kapasite bakımından çok büyük farklılık olmamıştır, ancak

sistemin kapasitesi en yüksek şarj voltajıyla (hücre başına 2.45 V sistem 2’de) diğer sistemlerden çok daha iyidir.



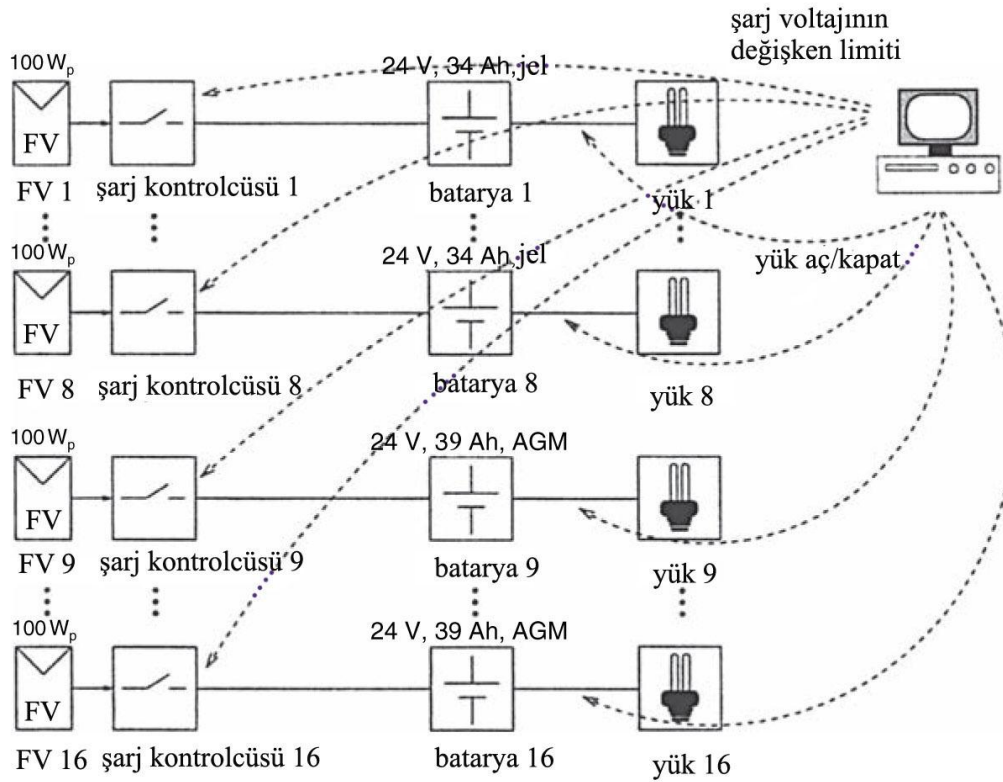
Şekil 5.13. Freiburg güneş istasyonunda sistem 2 (jel, düz plaka) 10-saat oran kapasitesinin geliştirilmesi [Broussely et al., 2007].

Kullanılan şarj rejimleri düşük deşarjdan tümüyle kaçınmazlar ama kapasite daha yüksek voltajla ekstra şarjla geri kazanılabilir. Bataryanın yılda toplam enerji devri, nominal kapasitenin yaklaşık 100 katıdır. Farklı şarj stratejileri, bataryanın deşarj performansında ve servis ömründe fazla etkiye sahip değildir. Sistem 2 ve 3 daha yüksek şarj voltajına sahiptir, fakat bu, kapasiteyi önemli derecede geliştirmemektedir. Jel bataryalarla üç sistemin hepsi, AGM bataryalı sistemlerden daha küçük sapmalara sahiptirler.

Araştırmaların diğer bir kısmı, oldukça küçük sistemlerde yedekleme olmadan yapılmıştır. Yine her iki VRLA batarya tipi (AGM ve jel) kullanılmıştır. Toplamda, araştırma her biri 28 V olan 16 sistemi içermektedir.

- 8 sistem: 12 V modüller, 41 Ah (pozitif düz plakalar, jel)
- 8 sistem: 12 V modüller, 45 Ah (pozitif düz plakalar, AGM)
- Yük: Her sistem 7 W,
- Güneş jeneratörü ve yedeklemesiz

Bu sistemler Freiburg'dakinden oldukça değişiktir. Yük, tüketicilerin kararlarına göre değişebilmektedir. Oysa küçük sistemler için yük oldukça sabittir. 16 bağımsız sistem vardır, her biri 100 W_p güneş jeneratörü, bir şarj kontrolcüsü, 7 W yük olarak bir lamba ve 24 V VRLA batarya içermektedir. Sekiz sistem, 100 saat için 41 Ah ve 10 saat için 34 Ah kapasiteyle jel bataryalı ve diğer sekiz sistem 100 saat için 44 Ah ve 10 saat için 39 Ah kapasitelidir. Tüm bataryalar düz plaka tasarımlı 12 V monobloklardan oluşmaktadırlar. Dört kısmi sistem şekilde görülmektedir [Broussely et al., 2007].



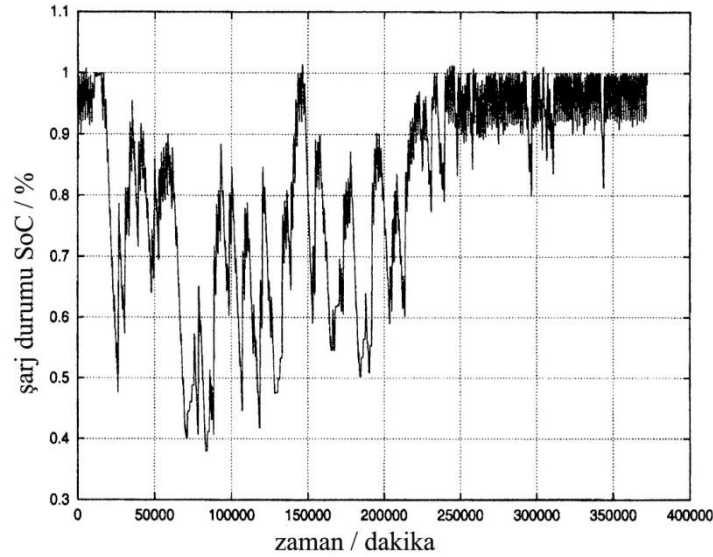
Şekil 5.14 Her biri düz pozitif plakalı 24 V batarya içeren, 16 küçük güneş güç sisteminden dördünün şeması [Broussely et al., 2007].

Sekiz kısmi sistem jel tasarımına sahip (34 Ah) ve diğer sekizi AGM tasarımına (39 Ah) sahiptir (Şekil 5.14). Bilgisayar, şarjı kontrol etmiştir ve voltaj çok düşük olduğunda yükü kesmiştir. Ek olarak, monoblokların voltajı tüm akımlar gibi bilgisayar tarafından ölçülmüş ve depolanmıştır. Değişik şarj/deşarj stratejileri (Tablo 5.2)'de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Şarj/deşarj stratejisinde küçük sistemlerde değişiklikler [Broussely et al., 2007].

Çalışma stratejisi	1	2	3	4
Test sayısı	4	4	4	4
Batarya tipi	Jel/AGM Düz plaka	Jel/AGM Düz plaka	Jel/AGM Düz plaka	Jel/AGM Düz plaka
Maks. Şarj durumu DoD (%) (voltajla belirlenmiş)	70	70	50	70
Maks. Şarj voltajı (V/hücre)	2.35	Günde 2.40 maks. 2 saat, sonra 2.30	Günde 2.40 maks. 2 saat, Sonra 2.30	Günde 2.40 maks. 2 saat, Sonra 2.35
Maks. şarj voltajı yük kesildikten sonra (V/hücre) (24 saat, birikmiş)	2.35	2.45	2.45	2.45
Maksimum voltajda süre “güneş tam şarjı” farzedilene kadar	5 h	2 h	2 h	2 h

7 W yük sistem tarafından yılın 8 ayı boyunca temin edilebilir. Deşarj akımı ~ 0.25 A kadardır. Bu, ~ 150 saat deşarj süresine karşılık gelmektedir. Aydınlatma zamanı kısaltılmasıyla, deşarj Ah azaltılabilir (değişik kış/yaz çalışma modları). Genelde, yaz mevsimi sırasında yük, her zaman elektrik enerjisini almaktadır. Oysa kış sırasında yük günde sadece 16 saat bağlı kalmaktadır. Bataryalar, dışarıda ısı yalıtımsız metalik bir kutu içinde yerleştirilmiştir. Bu, yıl boyunca geniş bir sıcaklık aralığında kalır (-15 °C'den $+45$ °C'ye). Tüm sistemlerde, voltaj kontrolü ve belli bir limite ulaşıldığında bağlantı kesilmesi vasıtasıyla, derin deşarj koruması bulunmaktadır. Tekrar değişik maksimum derin deşarj (DoD) ve şarj stratejileri test edilmiştir [Broussely et al., 2007].



Şekil 5.15. Küçük bir sistemin yaklaşık 380,000 dakika (264 gün) sürede SoC şarj durumu (operasyon stratejisi 3, jel batarya) [Broussely et al., 2007].

Başlangıçta, Ekim ayında halen yüksek SoC bulunmaktadır ve tüm kış ayları boyunca SoC önemli derecede %100'ün altındadır. Yaz boyunca, günlük deşarj %8 DoD civarındadır ve her gün %100 SoC ortaya çıkabilmektedir. Kış mevsimi boyunca, yük üçte bir oranında azaltılmıştır.

Tipik güneş tekrar şarjı, %80'e kadar kapasite meydana getirebilmektedir. Oysa şiddetli tekrar şarj %100'den daha fazla kapasiteyle sonuçlanmaktadır. Bağımsız jel monoblokların kapasite sapması tümüyle düşüktür. Oysa AGM

monobloklarda daha belirgindir. Diğer taraftan, AGM bataryalarda şiddetli şarj önce ve sonrası arasındaki kapasite farkı, jel bataryalarla karşılaştırıldığında daha azdır. Bu, AGM bataryaların daha iyi şarj alışıyla açıklanabilir. Güneş güç uygulamalarında düşük şarjdan kaçınmak için, jel ve AGM tasarımlarında uygulanan optimum şarj stratejilerinin farklı olması gerektiğini önermektedir. Küçük sistemlerde maksimum şarj voltajına Nisan ile Ekim arasında ulaşılmaktadır. Oysa hibrit sistemlerde maksimum şarj voltajına yaz aylarında bile daha az sıklıkta ulaşılabilir. Monoblokların ağırlığı, her kapasite testinden önce ölçülmektedir. Ağırlık kaybına oldukça az rastlanmaktadır. Su kaybı olması kritik nokta değildir. Bunlar, küçük sistemlerin incelenmesinde asıl sonuçlardır. İlk 2.5 yıl boyunca bataryaların kapasiteleri önemli ölçüde azalmıştır ama sonra dengeleme sebebiyle toplam 4 yıllık çalışma süresini müteakiben testin sonuna dek daha fazla azalma ölçülmemiştir. Daha düşük maksimum derin deşarj (DoD), sistemi (%70 yerine %50) en kötü sonucu göstermektedir. %70 DoD servis ömrü için dezavantaj olmaksızın kabul edilebilir. AGM bataryaların jel bataryalara kıyasla performansında daha fazla sapma olmaktadır. Bazı AGM bataryalar aynı veya daha iyi performansa sahiptirler fakat diğerleri muhtemelen üretim hatası nedeniyle daha kötü olmaktadır. Hem jel hem de AGM bataryalar bu tür uygulamalar için kullanılabilir.

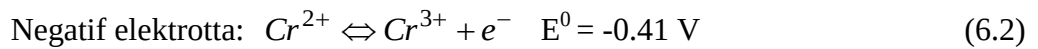
Güneş güç uygulamalarında şarj/deşarj stratejilerinin VRLA bataryaların ömrüne ve performansına etkisinin sistematik araştırılması ilk kez gerçekleştirilmiştir. Sonuç, mevcut kapasiteyle kalan kapasitedeki sapmaların farkını göstermektedir. Tipik bir şarj rejimi sonrası kapasite testleri, bataryaların tümüyle şarj edilemeyeceğini ortaya çıkarmıştır. Ancak, şiddetli bir şarj sonrası batarya tam kapasitesine geri dönmektedir [Broussely et al., 2007].

6. AKIŞ BATARYALARI

Çoğu batarya, elektrotları elektronları toplamak veya biriktirmek için bir arayüz olarak kullanır. Sonuç olarak, hem enerji hem de güç yoğunluğu, elektrotların boyutuna ve şekline bağlıdır. Akış bataryaları, elektrik enerjisini iki sıvı elektrolit içinde geri tersinir elektrokimyasal reaksiyonlar olarak depolar ve verirler. Bir elektrokimyasal hücre, her elektrolit için bir tane olmak üzere fiziksel olarak bir iyon değişim membranı ile ayrılmış iki bölüme sahiptir. Elektrolit, hücrenin içine ve dışına ayrılmış kollektörler içinden akar ve kollektör içinde iyon veya proton değişimiyle ve dış elektrik devresi içinde elektron değişimiyle hücrede kimyasal reaksiyona uğrar. Elektrolit içindeki kimsayal enerji, elektrik enerjisine dönüşür ve şarj için tersi gerçekleşir. Hepsi aynı genel şekilde oluşur ama elektrolitin kimyasıyla çeşitlenirler. Akış bataryasını kullanmanın geleneksel bataryaya göre bazı avantajları vardır. Sistemin kapasitesi, basitçe çözeltinin miktarı artırılarak ölçeklenebilir. Bu, sistem büyüdükçe daha ucuz kurulum maliyeti sağlar. Batarya, sorunlu etki olmadan tümüyle deşarj edilebilir ve zamanla çok az elektrolit kaybeder. Elektrolit, büyük kaplarda ayrı depolandığı için (hacime göre düşük yüzey alanıyla), akış bataryaları var olan teknolojiler içinde en düşük kendiliğinden deşarj oranlarına sahiptirler [Goswami et al., 2008].

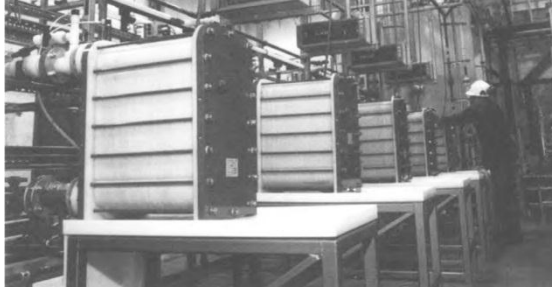
6.1. Redoks Akış Bataryaları

Redoks akış bataryaları, tepkenleri dış bir rezervuarda depolama prensibiyle yapılmışlardır. Bir redoks bataryada, elektrotlar hareketsizdir ve sadece elektron transfer yüzeyleri olarak etkirler. Önceki redoks hücreleri, demir-krom çiftiyle elektrot reaksiyonları vasıtasıyla çalışmaktaydılar;



Hücre 1.18 V standart voltaja sahipti. Demir-krom redoks kümeler 60 kW güç çıkışıyla Japonya'da elektrik kullanım operasyonları için enerji depolama

programının bir parçası olarak yapılmış ve test edilmişlerdir. Metal iyonlarının seperatörlerden sızıntısı nedeniyle üretimlerinden vazgeçilmiştir, çünkü iki yarı hücrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu kirlenmeden kaçınmanın yeni bir yöntemi, aynı metali her iki yarı hücrede değişik valans (bir atomun en dış enerji seviyesinde bulunan ve bağ yapma kabiliyetini belirleyen elektron sayısını belirtir) değerlerinde tutmaktır. Bu dört değişik valans durumunda bulunan vanadyumla mümkündür. Japonya’da, 200 kWh’lik vanadyum redoks batarya kurulmuştur ve elektrik uygulamalarında değerlendirilmektedir. Vanadyum redoks sistem tiplerine benzeyen bu batarya, dış depolama tankı prensibiyle kurulmuştur [Dell et al., 2001].

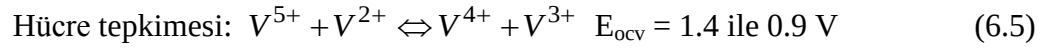


Şekil 6.1. Regenesys redoks akış bataryası modülü [Dell et al., 2001].

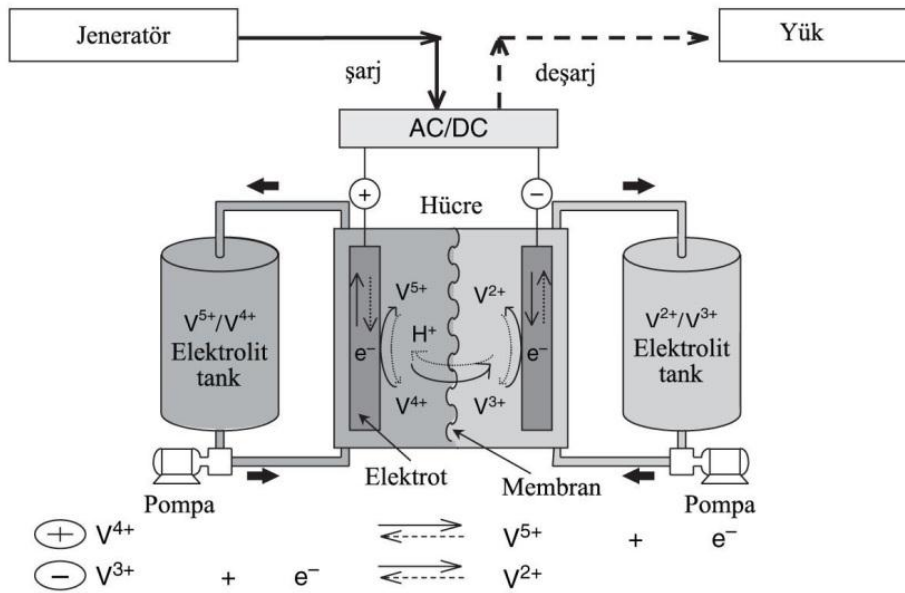
6.2 Vanadyum Redoks Bataryaları

Vanadyum redoks bataryası (VRB) önemli gelişme kaydetmiştir. “Redoks” terimi “indirgeme” ve “oksidasyon” kelimelerinin birleşiminden elde edilmiştir. Her ne kadar indirgeme ve oksidasyon tüm batarya sistemlerinde oluşsa da, bu elektrokimyasal sistemler için oksidasyon ve indirgeme çözeltide sadece iyonik türleri ve hareketsiz elektrotlarda oluşan reaksiyonları içerir. Bu, aktif materyallerin yoğunlukla batarya hücrelerinin dışında depolanması gerektiği anlamındadır. Her ne kadar redoks sistemler uzun ömürlü olsalar da, enerji yoğunlukları aktif malzemelerin tipik olarak içerdiği sınırlı çözünürlük nedeniyle düşüktür. Japonya’da demir/krom redoks akış bataryası geliştirme teknolojisiyle elektrik enerjisi depolama hedeflenmiştir. VRB pozitif ve negatif elektrot bölmelerinde elektrolit vanadyum sülfatı değişik valans durumlarındadır. Çözeltide elektrot tepkimeleri oluşur, deşarjda reaksiyon:



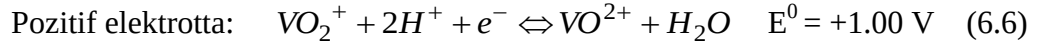


Kullanılan elektrotlarda her iki tepkime tersinirdir. Bir iyon-seçici membran, elektroliti hücrelerin pozitif ve negatif bölmelerinde ayırmak için kullanılır. Tepkenlerin karıştırılması, sistem için aktif malzemelerin seyreltilmesi sonucu enerji depolama kapasitesinde kalıcı kayıplara neden olabilir. Diğer iyonların elektrik-yüksüzlüğü sağlamak için taşınmasına (temelde H^+) izin verilmelidir. Böylece, iyon seçici membranlar gereklidir. Elektrolit çözeltileri uzak depolarda bulundurulur ve hücreler içinden pompalanır. Tüm tepkime bileşenleri iyonik türlerdir. Katı fazların ve elektrolit dolaşımının olmaması bu bataryalara son derece yüksek güç kabiliyeti vermektedir. Diğer özellikler; (1) kapasite sadece elektrolit hacmi artırılarak artırılabilir (2) zararlı etkiler olmadan tam deşarj mümkündür (3) solüsyon süresiz kullanılabilir; (4) kendiliğinden deşarj önemsizdir (5) batarya tepkisi anlıktır (<1 ms) [Linden et al., 2002].



Şekil 6.2. Vanadyum Redoks Bataryanın şematik gösterimi [Pistoia, 2008].

Vanadyum redoks bataryanın yarı hücre reaksiyonları:



Bu tepkimeler bir hücreye 1.26 V standart voltaj verir. Batarya için harici dört depolama tankı bulunmaktadır (şarj durumunda tepkenler için iki ve deşarj durumunda iki). Bu tür bir bataryanın enerji depolama kapasitesi sadece depolama tanklarının boyutuyla sınırlıdır. Vanadyum redoks bataryanın düşük özgül enerji ve düşük enerji yoğunluğu vardır ama bu özellikler sabit uygulamalar (fotovoltaik elektrik sistemler) için çok önemli değildir. Vanadyum redoks bataryanın kurşun-asit bataryaya (güneş güç sistemlerinde geleneksel seçim) üstünlüğü, süresiz çevrim ömründe gizlidir. Bu, sadece kurulum malzemeleriyle ve çözeltideki tepkenlerle sınırlıdır. Bir katyon-değişim membranı etkili bir seperatör olarak davranır, elektrolitin karıştırılması kendiliğinden deşarja neden olur. Batarya 3000 çevrimden daha fazla çevrimi 10 ile 45 °C sıcaklık aralığında verir. Genelde, VRB güç çıkışı elektrolit akışı oranıyla veya kümedeki hücre sayılarıyla arttırılabilir. Günümüzde küme membranı bileşen olarak daha bozulma eğilimlidir ve her 5 yılda bir değiştirilmelidir. VRB sabit uygulamalarda, yük desteklemede, anlık voltaj düşmesi düzeltmede, acil güç sağlamada, rüzgâr/güneş güç üretim stabilizasyonunda, güç talep ve sağlama kontrolü uygulamalarında kullanılabilir. Vanadyum redoks akış bataryası geniş montajlarda uzun çevrim ömrü ve enerji verimliliği için %80'den daha fazla potansiyel göstermektedir. Vanadyum redoks batarya, her elektrolit tankı için vanadyum elementi bileşimi kullanır. Vanadyum bileşiminin iyon değişim membranının her iki tarafında kullanılması, elektrolitin çapraz kirletilmesi problemini ortadan kaldırır ve geri dönüşümü kolaylaştırır [Pistoia, 2008; Dell et al., 2001; Goswami et al., 2008].

7. JEL BATARYALAR

Genelde, özellikle derin deşarj uygulamalarında jel VRLA bataryaların AGM VRLA bataryalara göre daha az elektrolit katmanlaşmasına uğradığı kabul edilir. Katmanlaşma, elektrolit azalmasından dolayı kapasite düşüşüne neden olur. Izgara korozyonu, plakaların alt bölgelerinde tersine döndürülemez aktif materyal bozukluğu nedeniyle hızlı hücre başarısızlıklarına neden olur [Lambert et al., 2002].

Jel VRLA hücrelerde tekrar-birleşme reaksiyonu, pozitiften negatif plakaya jelleşmiş elektrolitte mikro-çatlak ağından gaz oksijen taşınmasıyla (difüzyon) oluşur. VRLA hücrelerin sabit voltaj (denge) şarjı rejiminde gazlaşma kinetiği konusunda yapılan araştırmalarda, AGM seperatörlü hücrelerde gaz tekrar-birleşme verimliliğinin jelleşmiş elektrolitten daha önce stabilleştiği görülmüştür. Jel VRLA hücrenin yeni doldurulmuş elektrolitinin kısmen kuruması (jelin kendini çekmesi için yeterli su kaybının oluşması) ve oksijen difüzyonunun oluşması için çatlak matrisi üretmesi zaman almaktadır. Jel VRLA hücrede oksijen tekrar-birleşmesi gerçekleşirse, bu hücreler su kaybında azalmayla birlikte önemli ölçüde düşük denge akımına sahip olurlar.

Genelde, AGM VRLA bataryalar, çalışma ömrünün azalmasına sebep olan yüksek sıcaklıklara karşı çok hassastırlar ve kararsız ısıl kaçaklar oluşabilir. İç dirençte artış, kuruma ve aşırı durumlar, kurşun bileşenlerinin erimesiyle, batarya patlamasıyla ve çok miktarda oksijen üretimiyle (ekzotermik olarak tekrar-birleşme) sonuçlanır.

AGM VRLA hücreler düşük iç dirençe sahiptirler (her 100 Ah 10 saat oranında 0.3-0.8 mΩ) ve sonuç olarak çok iyi deşarj performansına sahiptirler (%35-45 10 saat kapasitesi 10 dakikada deşarj olabilir). Tekrar şarj rejimleri önemli ölçüde iç sıcaklık artışına ve aşırı gaz yayılımına yol açar. Bu, VRLA batarya durumunda su kaybını artırır ve sonradan elektrolitin kurumasına neden olur. Şarj ve deşarj çevrimi sırasında VRLA hücrelerde üretilen ısı, elektrokimyasal kutuplaşma etkisi, direnç kayıpları ve oksijen tekrar-birleşme çevrimiyle doğrudan bağlantılıdır. Sonuç olarak, VRLA bataryalarda ısı artışı çok iyi kontrol edilmelidir. AGM VRLA bataryalar jel

VRLA bataryaların tersine, termal kaçağa çok daha duyarlıdırlar [Lambert et al., 2002].

Gelenseksel sulu-elektrolit tasarımında, birim ünite hacim kapasiteleri düşük olmasına rağmen, jel VRLA bataryalar güvenilir, tümüyle bakım gerektirmeyen uygulamalarda servis ömrü sağlayabilirler (fotovoltaik ve rüzgâr güç uygulamaları). Aşırı şarj ~%5'e (veya daha az) sınırlandırılır. Bu çevrim verimliliğini iyileştirir, ızgara korozyonu ve iç ısınmayı en aza indirir. Gazlaşma, oksijen çevriminin verimli fonksiyonu seviyesine azaltılır [Lambert et al., 2002].

7.1. Jel Kimyası

Bir “jel” bitişik üç boyutlu ağıdır. İki aşamada jel oluşumuna ulaşılır;

- Tersinir aşama: Birleştirme ve “zayıf” hidrojen bağı oluşumudur. Sülfat iyonu (SO_4^{2-}) pozitif şarj olmuş silis (SiO_2) parçacıkları arasında köprü rolü görür.
- Tersinmez aşama: Silis parçacıkları arasında (Si-O-Si) köprüsü oluşumudur. Bu çok güçlü iç molekül bağı oluşturur.

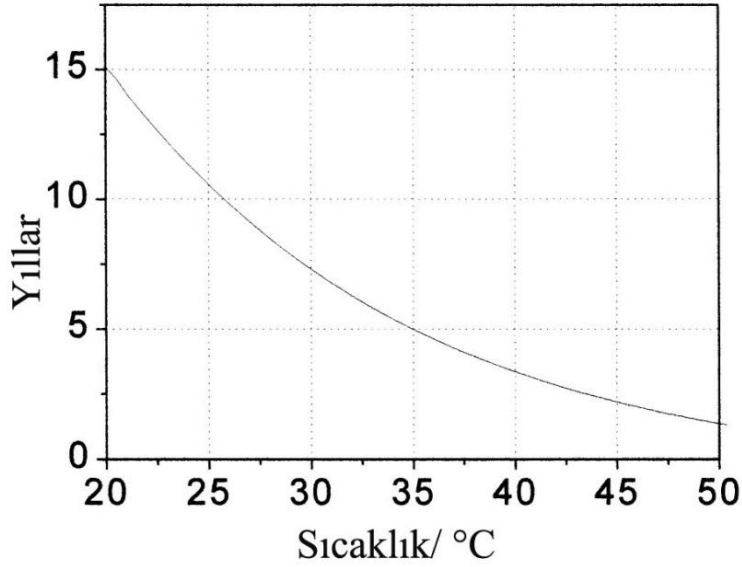
Jel VRLA hücrelerde ve bataryalarda, tersinmez jel oluşumu temel öneme sahiptir. Diğer kimyasal reaksiyonlarla birlikte, sıcaklığın jelleşme prosesine etkisi vardır (her 10 °C sıcaklık artışıyla jelleşme oranı ikiye katlanır). Jelin oluşumu ve dengeli olması, pH, tuz konsantrasyonu ve cinsi, silis içeriği, parçacık boyutu, ve zamana çok bağlıdır [Lambert et al., 2002].



Şekil 7.1. Tüp şeklinde jel sabit hücre (2V, 1000Ah) [May, 2009].

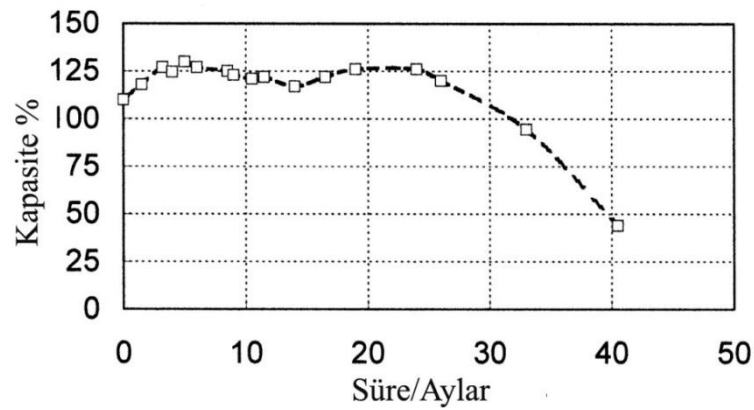
Jelleşme, elektroliti haraketsiz hale getirmenin yoludur. Genel olarak çok yüksek yüzey alanlı ($200 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ veya daha yüksek) silis, jelleşme etkenidir. Birincil parçacıklar çok küçüktür, ancak hücrede, bunlar üç boyutlu ağ yapısı oluştururlar. Doldurma öncesi jel, silis ile birlikte elektrolit karışımıdır. Karışım sıvı sistem gibi olduğundan hücre içine kolayca doldurulur. Bundan sonra, daha fazla serpilme olayı olmadığından, silis üç boyutlu yapı oluşturur ve karışım kararlı bir jel oluşturacak şekilde katılaşır. Bu jel yapısının önemli bir özelliği, büyük hücreler içine dikey konumda yerleştirilen büyük plakalarda bile asit katmanlaşmasından kaçınılabilesidir. Asit katmanlaşması, sulu (flooded) bataryalar için bilinen bir problem olmakla birlikte burada aşırı şarj kuvvetli gazlaşmayla sonuçlanır. Bir elektrolit karıştırma sistemi, elektroliti karıştırmak için kullanılmalıdır. Jel bataryalar asit katmanlaşmasına uğramazlar. Jel bataryalar için, hem tüp şeklinde, hem de düz pozitif plakalar kullanılmaktadır. Yüksek plakalı jel hücrelerde, genellikle tüp şeklinde pozitif elektrot tasarımı kullanılır. Buna rağmen düz pozitif elektrotlu olanları da vardır. Küçük plakalı jel hücrelerde, genellikle düz pozitif elektrotlar kullanılır, ancak birkaç istisna tüp şeklinde pozitif elektroda sahiptir. AGM tasarımıyla karşılaştırıldığında, jel bataryaların iç elektrik direnci belirgin olarak yüksektir. Bu, yüksek güç uygulamaları için bir dezavantajdır.

Jel tasarımının avantajı, yüksek sıcaklıklarda veya derin deşarj peryotlarında bile çok uzun servis ömrü ve son derece yüksek güvenilirliğidir. Diğer avantajı ise jel bataryaların oda sıcaklığında oldukça uzun süre (2 yıla kadar) hiç şarj olmadan depolanabilesidir. Bunun nedeni, çok düşük kendiliğinden deşarj oranı ve mükemmel tekrar şarj özelliğidir. Normal olarak bataryaların tekrar şarjı 2 sene depolamadan sonra oldukça zordur, jel bataryalarla birlikte bu sorun ortadan kalkmıştır. Jel bataryalar, bazen fosforik asit katkılı elektrolitle veya katkısız olarak üretilmektedirler. Fosforik asit genellikle bekleme uygulamalarında kullanılır. Kurşun dioksit yüzeyine fosforik asit emdirilir. Bu, kristal büyümesini modifiye eder. Fosforik asit, pozitif aktif kütleyle ızgara arasında yalıtım filmi oluşmasını engeller. Jel bataryaların denge akımı, genel olarak nispeten düşüktür ve sıcaklıkla çok fazla artmaz. Bu, termal kaçak riskinden kaçınmak için yardımcı olmaktadır [Broussely et al., 2007].



Şekil 7.2. Sabit Jel bataryanın (OpzV, A600 tipi) dengeleyici çalışmada değişik sıcaklıklar için ömrü [Broussely et al., 2007].

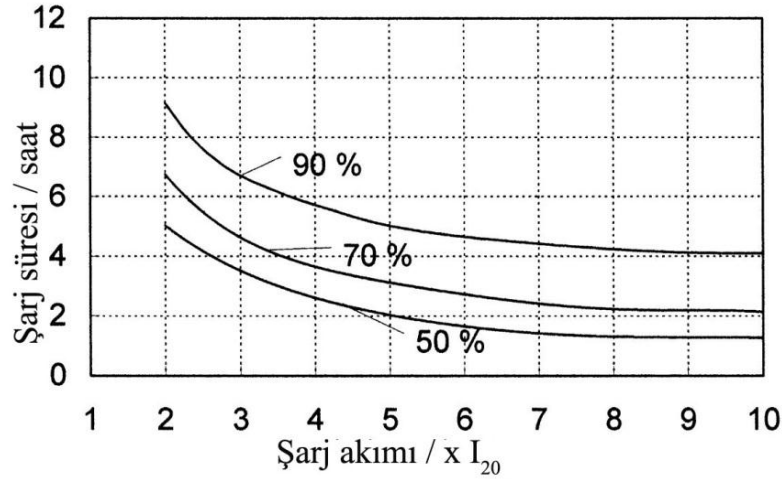
Elektrolit jel olarak hareketsizleştirildiği sürece, hücreler asit sızıntısı riski olmadan yatay konumda yerleştirilebilirler. Ayrıca, 6 V ve 12 V luk tek gövdeli jel bataryalar 5 ile 180 Ah arasındaki kapasitelerde üretilebilirler. Düz pozitif plakaları vardır ve 12 yıldan daha uzun servis ömrü sağlarlar. 12 V gerilimli, 16 Ah kapasiteli bataryaların 40 °C sıcaklıkta ve hücre başına 2.22 V dengeleyici voltajda hızlandırılmış ömür testi (Şekil 7.3)'de görülmektedir.



Şekil 7.3. Jel bataryanın hücre başına 2.22 V dengeleyici voltajla 40 °C'de hızlandırılmış ömür süresi testi (A400 tipi) [Broussely et al., 2007].

Görülebileceği gibi kapasite %80 oranının altına 35 aydan sonra düşmektedir ve %50'ye 40 ay sonrasında ulaşmaktadır. Bu, beklenen ömrün 20 °C'de 12 yıldan fazla olmasına karşılık gelmektedir.

Kurşun-asit temelindeki bataryalar, genel olarak şarj durumu (SoC) %70-80 seviyelerinde olduğu sürece bir deşarjdan sonra oldukça hızlı şarj edilebilirler. Ancak, şarj giderek zorlaşmakta ve son yüzde birkaç miktar için çok daha uzun süre gerekmektedir. Bu, sulu (flooded), jel ve AGM bataryalar için geçerlidir. Tam deşarj sonrasında (%100 DoD) değişik şarj durumları için (%50, %70 ve %90) jel bataryanın tekrar şarj süresi, değişik başlangıç şarj akımlarında ve hücre başına 2.40 V voltaj limitinde (Şekil 7.4)'de gösterilmektedir.



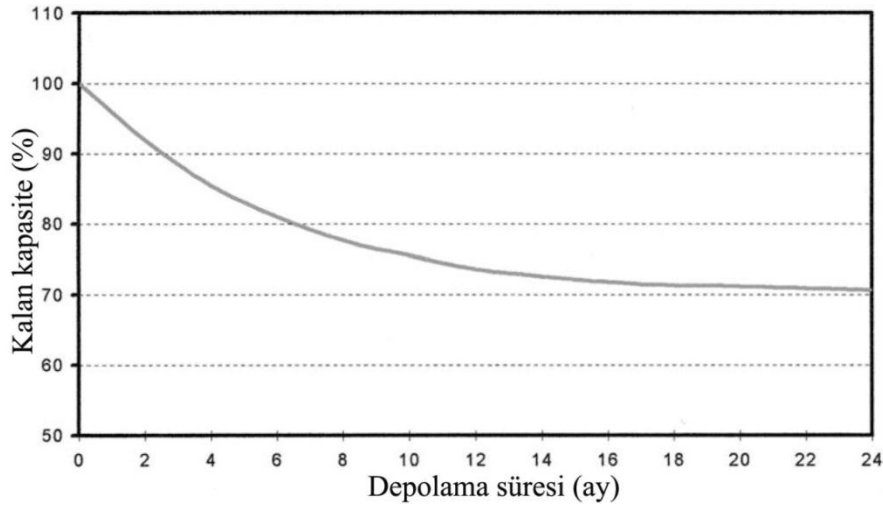
Şekil 7.4. Kuru bataryanın şarj süresi (A500 tipi) [Broussely et al., 2007].

(Şekil 7.4)'de değişik başlangıç akımlarında hücre başına 2.40 V şarj voltajı limitinde tam deşarj sonrasında (%100 DoD), SOC artışı gösterilmektedir (20 saat uniform deşarj için deşarj akımı I₂₀'dir) [Broussely et al., 2007].

20 saatlik deşarj akımının 10 katı başlangıç şarj akımıyla, yaklaşık 2 saat sonra %70 şarj durumuna ulaşılmaktadır ve 4 saat sonra şarj durumu %90 olmaktadır. Yüksek güç AGM bataryaları daha hızlı şarj edilebildiği gibi, jel bataryalar için de hızlı şarj mümkündür. Hücre başına 2.40 V şarj voltajı limiti, denge voltajından önemli ölçüde büyüktür. Bu tür şarj işlemleri için batarya üreticisinin belirttiği

maksimum voltaj ve zaman periyoduna bağılı kalınması önemlidir [Broussely et al., 2007].

I_{10} ile I_{20} arasında, 20 °C sıcaklıkta, düz plakalı jel bataryalarda 250-300 çevrim sonunda kalan kapasite başlangıç kapasitesinin %80'i olmaktadır. Bu ömrü antimonsuz valf kontrollü bataryalarla elde etmek için, pozitif plakaların üretim teknolojilerinin çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Bu, normalde antimonsuz bataryaların çevrim ömrünü sınırlandırır. Antimonsuz ızgara alaşımlarına göre valf kontrollü bataryaların kendiliğinden deşarjı oldukça düşüktür. (Şekil 7.5) uzun dönemli bir testi göstermektedir. Zaman ilerledikçe, kendiliğinden deşarj düşmektedir. İki yıllık depolama süresinden sonra bile jel bataryanın kalan kapasitesi halen %70'dir. Böylece bu bataryalar 2 yıl depolamadan sonra bile tekrar şarj edilmeden kullanılabilirler [Kiehne, 2003].



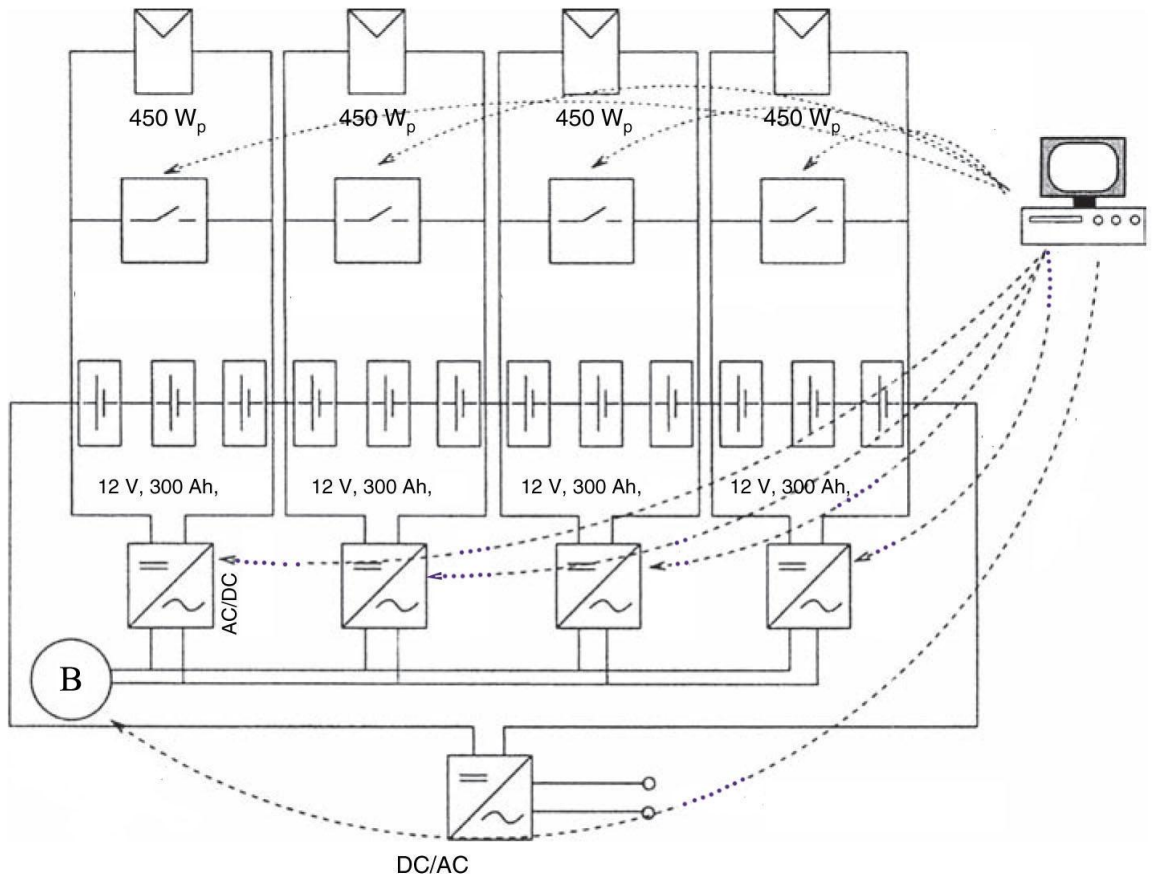
Şekil 7.5. 12 V 100 Ah jel bataryanın oda sıcaklığında kendiliğinden deşarjı [Kiehne, 2003]

7.2. Jel Bataryalı Büyük Sistemler

Önemli miktarda enerjinin depolanması gereken durumlarda, yüksek kapasiteli büyük bataryalar kullanılmaktadır. Bu bataryalar genellikle tüp şeklinde pozitif plakalara sahiptirler. VRLA güneş bataryaları, çoğu durumda büyük plakalı jel güneş bataryaları (OpzV) olmaktadır. VRLA bataryaların OpzV hücrelerle testleri yapılmıştır. Bu araştırmaların bir kısmı, elektrik şebekesine bağılı bir istasyon

olmadan ama bağımsız bir güneş sistem ile elektrik enerjisini sağlayan Almanya Talhof'da yapılmıştır.

Talhof'da 1.8 kW_p 'lık güneş jeneratörlü, 5 kW 'lık benzin motorlu ve 48 V jel bataryalı bir fotovoltaiik (FV) hibrit sistem kullanılmıştır. Sistem dört kısma ayrılmaktadır: her biri 12 V olan batarya üniteleri, bir 450 W_p güneş jeneratörü, bir şarj kontrolcüsü ve benzin motoru için bir redresör. Tam sistemin bir şeması (Şekil 7.6)'da verilmiştir [Broussely et al., 2007].



Şekil 7.6. Tüp plakalı ve dört kısmi sistemle bir besleme sistemiyle jel tasarının 48 V 300 Ah bataryalı güneş güç sistemi şeması [Broussely et al., 2007].

Her bir 12 V'luk ünite, tüp şeklinde plakalı 6 adet jel hücreden oluşur. Kapasite 100 saat için 360 Ah ve 10 saat için 300 Ah olmaktadır. Tüm hücreler seri bağlıdır ve 48 V batarya bir dizidir, böylece tüm hücreler için deşarj yükü aynıdır. Dört kısmi sistem, güneş jeneratörü/şarj kontrolcüsü ve benzin motoru/redresör donanımlarının her ikisiyle bağımsız olarak şarj edilebilir.

Maksimum şarj akımı, güneş jeneratöründen 26 A ve benzin motorundan 59 A olmaktadır. Maksimum deşarj akımı 75 A olmakla birlikte, tipik deşarj akımı 10 A'den küçüktür. Bataryaların sıcaklıkları mevsime bağlıdır ve 5-25 °C aralığında değişir. Amaç, benzin motorunu mümkün olduğunca az kullanmaktır. Ek bir kısıtlama, benzin motorunun gece çalıştırılmamasıdır. İstisnalar bataryanın derin deşarjından ($DoD > \%80$) kaçınmak için kabul edilebilir. Bataryanın şarj durumu (SoC) gece boyunca tüketilen enerji beklentisi düşünülerek akşamları otomatik olarak kontrol edilmektedir. Batarya, gerekli olduğunda benzin motoruyla şarj edilmektedir.

Çok derin bir deşarjdan kaçınmak için, deşarj DoD $\%90$ 'ı aştığında tamamen durdurulur. Şarj kontrolcüsünü, redresörler ve benzin motorunu bir bilgisayar kontrol etmektedir. Bu bilgisayar aynı zamanda tüm ilgili veriyi ölçmek ve kaydetmek için kullanılmaktadır. Bu aynı zamanda her bir hücre voltajı, içeri veya dışarı akan tüm akım, batarya, güneş jeneratörü, benzin motoru ve yük için kullanılmaktadır.

Dört kısmi sistem için, dört ayrı şarj stratejisi bulunmaktadır. Bu esas olarak şarj voltajı sınırlamasının değişik kullanımı anlamındadır. En yüksek voltaj, hücre başına 2.30 ile 2.45 V arasındadır. Maksimum DoD, üç sistemde $\%70$ ve bir sistemde $\%90$ olmaktadır. Değişik şarj/deşarj stratejileri (Tablo 7.1)'de verilmiştir. En az 30 gün batarya güneş jeneratörünün normal operasyonu veya benzin jeneratörünün ekstra operasyonu ile bataryanın “güneş tam şarjı” (Tablo 7.1)'de bulunan parametrelere göre olmaktadır. “Güneş tam şarjı” sonrasında şarj DoD hesaplaması (Ah dengesi temelli) $\%0$ belirlenerek durdurulmaktadır.

Tablo 7.1. Talhof güneş hibrit sistemlerinde şarj/deşarj stratejisinde değişimler [Broussely et al., 2007].

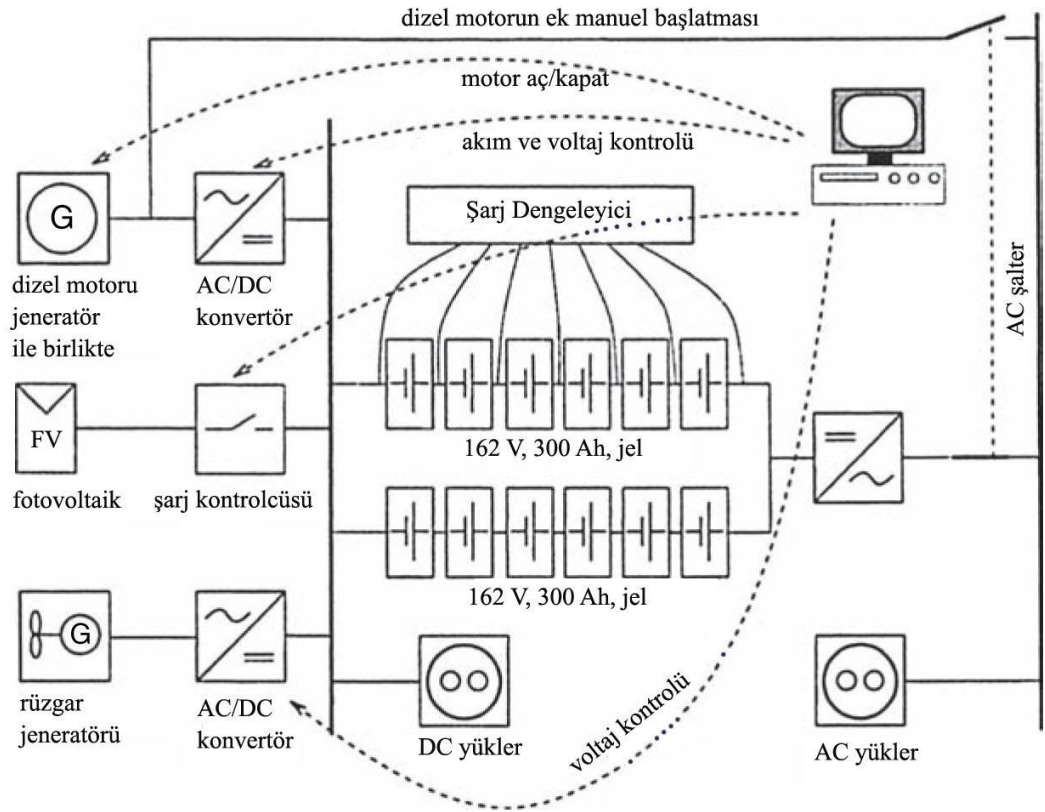
	Sistem 1	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Batarya tipi	Jel Tüp şeklinde	Jel Tüp şeklinde	Jel Tüp şeklinde	Jel Tüp şeklinde
Maks. DoD (%)	70	70	70	90
Maks. şarj voltajı (V/hücre)	2.35 Zaman sınırı yok	2.45 Günde maks. 2 saat, sonra 2.35	2.30-2.45 DoD'a bağlı	2.35 Zaman sınırı yok
Güneş tam şarjı için maksimum voltajda süre	5 saat	2 saat	Voltaja bağlı	5 saat

Değişik şarj rejimlerinde kapasite bakımından şiddetli tekrar şarj sonrasında fazla bir fark yoktur. Hücre başına 2.45 V'luk nispeten yüksek voltajda bile bir miktar düşük şarjdan kaçınılamaz. Kapasite daha yüksek voltajla yapılan ekstra şarjla geri kazanılabilir. Her gün kontrollü bir zamanda uygulanan 2.45 V luk nispeten yüksek voltaj bataryalara zarar vermemektedir.

Batarya için enerji devri günlük nominal değer 100 katı kadardır ve toplam enerji tüketimi nominal değer 150 katıdır. Bu, tüketilen enerjinin üçte ikisinin ilk olarak bataryada depolandığı anlamındadır. Deşarj/şarj faktörü 1'e oldukça yakındır ve bu çok iyi bir değer olan %90'dan fazla enerji verimliliğiyle sonuçlanmaktadır. Jeneratör her ay 5-100 saat arasında kullanılmaktadır. Toplamda, bataryalar 3.5 yıl periyodunda test edilmiştir. Aslında, şiddetli şarj sonrasında ve 3.5 yıl servis sonrasında kapasite başlangıçtakinden daha yüksektir. Bu, bataryaların çok iyi koşulda olduğunu ve çok daha uzun servis ömrünün beklenebileceği anlamındadır. Tüp şeklinde plakalı jel hücrelerin çok dayanıklı olduğunu, güneş ve rüzgâr güç

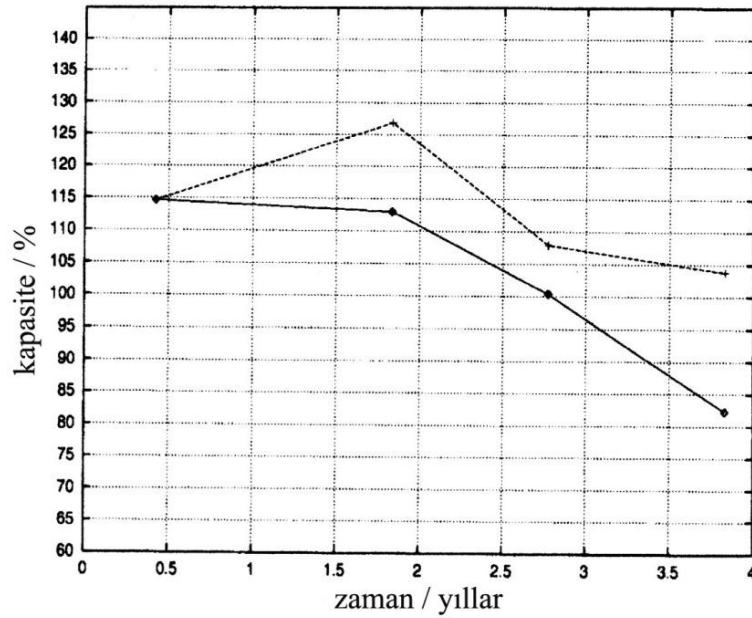
sistemlerinde uzun bir çalışma ömrüne sahip olacaklarını göstermektedir. Her yarım yılda bir, sülfatlaşmadan kaçınmak için şiddetli şarj yapılmaktadır. Aslında şiddetli şarj işlemlerini içeren toplam şarj/deşarj faktörü 1'den biraz daha büyüktür.

Başka bir araştırma, en iyi şarj/deşarj stratejisi hakkında Alpler'de yapılmıştır. Elektrik şebekesine bağlı olmayan bağımsız elektrik enerji sistemine sahiptir. Bu sistem 162 V'luk 2 paralel batarya dizisine sahiptir. OpzV jel hücreler kullanılmıştır. Alpler'de güneş ve rüzgâr jeneratöründen oluşan bir hibrit sistem kullanılmıştır. Ayrıca bir dizel motor yedekleme için kullanılmıştır. Tüp şeklinde plaka tasarımıyla 100 saat için 720 Ah ve 10 saat için 600 Ah 162 V jel batarya kullanılmıştır. Tam sistemin bir şeması (Şekil 7.7)'de verilmiştir, Birinde ChEq donanımı olan birinde olmayan iki dizi vardır [Broussely et al., 2007].



Şekil 7.7. Alpler'deki tüp şeklinde plakalı jel tasarım, 162 V 600 Ah bataryalı hibrit güç sisteminin şeması [Broussely et al., 2007].

Paralelde iki dizi vardır (Şekil 7.7). Her biri 10 saat için 300 Ah ve 100 saat için 360 Ah kapasitelidir. Aynı 2 V hücre tipi (OpzV), Talhof sistemi için de kullanılmıştır. Bu sefer sadece bir şarj stratejisi vardır ve tek fark bir dizide bir şarj dengeleyici (ChEq) kullanılmasıdır. Bu, gerçekte bir dizideki tüm hücreler veya hücre grupları için aynı voltajla sonuçlanmaktadır. Böyle bir sistemin daha yüksek enerji devri veya daha uzun batarya ömrü verip veremeyeceğini bulmak için bu araştırmada ChEq bulunmaktadır. Şarj stratejisi hücre başına 2.35 V voltaj limiti içermektedir ve DoD %80'e sınırlanmaktadır. Her dizide bu şarj/deşarj stratejisi aynı olduğu sürece, bir dizideki performans farklılığı ChEq ile doğrudan alakalıdır. Tüm önemli parametreler kontrol edilmekte, ölçülmekte ve bilgisayar sistemiyle depolanmaktadır. Dizel jeneratörün çalışma zamanı olabildiğince kısa tutulmaktadır ve en yüksek öncelik bataryanın derindeşarjından kaçınmaktır. En azından ayda bir kez şarj durumu SoC ölçen ünitenin kalibrasyonu dizel jeneratörü tarafından bataryanın bir tekrar şarjından sonra yapılmalıdır. Her yıl bir kapasite testi yapılmaktadır. Her test ikideşarj içermektedir ve biri şiddetli şarjdan önce ve biri sonradır. (Şekil 7.8) dizinin kapasitesini ChEq ile birlikte %112 şiddetli şarjdan önce ve sonra göstermektedir. Üst eğri şiddetli şarjdan sonraki kapasiteleri göstermektedir.

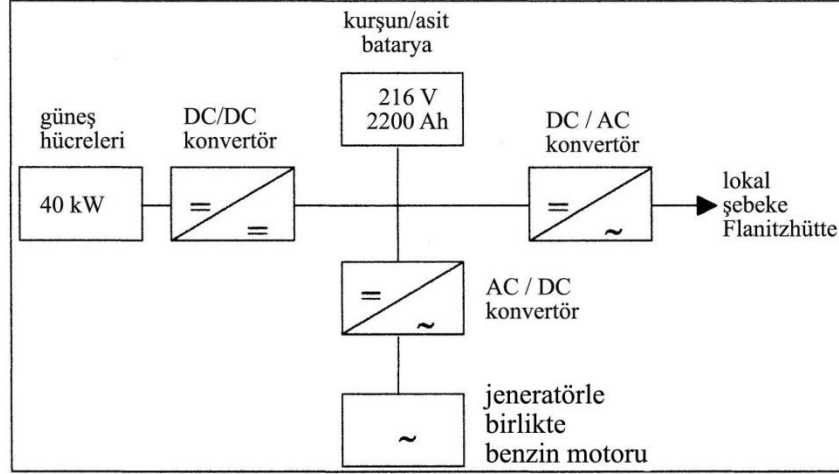


Şekil 7.8. Şiddetli şarjdan önce ve sonra, şarj dengeleyici kullanılan dizinin 10 saat için kapasite gelişimi [Broussely et al., 2007].

Şiddetli bir şarjdan sonra kapasite testi oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Dizilerin karşılaştırmalı sonuçları, gerçekte kapasitenin aynı olduğunu ve 1.5 yıl çalışma boyunca oldukça dengeli olduğunu göstermektedir. ChEq kullanılmadan dizi daha iyi davranmakta, kapasite 3.5 yıl çalışma sonrasında bile başlangıç değerinden daha yüksek olmaktadır. ChEq ile birlikte dizi test sonunda oldukça düşük kapasitelidir: Güneş ve rüzgâr uygulamaları için bir şarj düzenleyici faydalı değildir.

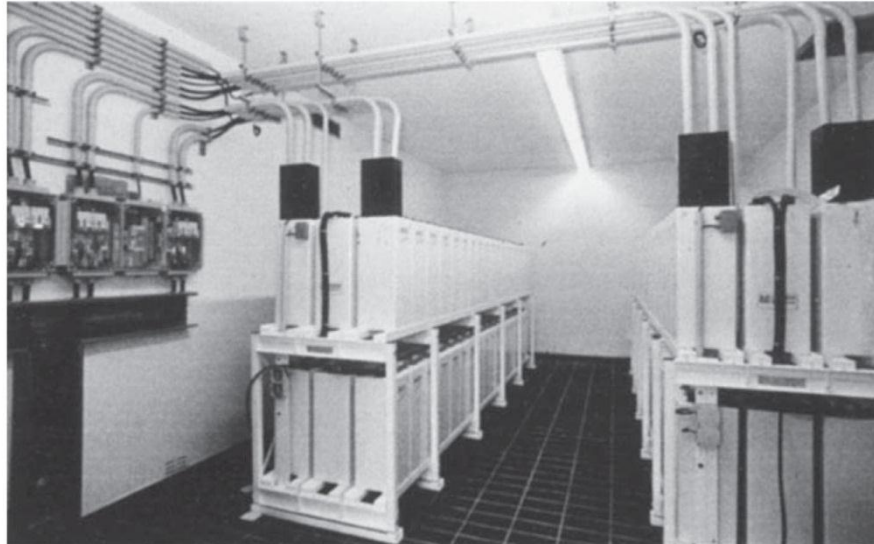
Negatif bakır ızgaralar büyük valf kontrollü kurşun-asit bataryalarda kullanılarak yüksek-güç bataryaları elde edilebilir. Bu bataryalar, valf kontrollü tasarımın tüm avantajlarına sahiptir. Bakır negatif ızgaralar, sadece jel hücrelerde bakırın yüksek plakalarla en iyi faydaya sahip olması sebebiyle kullanılmışlardır. Bu tür tasarımlarda AGM'den ziyade jel tercih edilmektedir. Bakır negatif ızgaralarla ve jel teknoloji bir arada kullanılarak yapılan bir araştırma, bu sistemin yüksek güç verdiğini saptamıştır. Daha yüksek gücün yanında, bu tür hücreler geneldedeşarj akımı çok yüksek olmasa bile daha iyi bir şarj alışına sahiptirler ve CSM teknolojisini güneş ve rüzgâr güç uygulamalarında ilgi çekici yapmaktadırlar.

Almanya'nın yaz mevsiminde 70 halkı olan Flanitzhütte kasabası elektrik şebekesine bağlı değildir ve elektrik enerjisi talebi yılda 40 MWh civarındadır. Testler yapıldığında elektrik enerjisi tedarigi bir güneş güç istasyonundan sağlanmaktadır. Güneş güç istasyonunun bir şeması (Şekil 7.9)'da görülmektedir. Güneş güç istasyonunun en gerekli kısımları, güneş jeneratörü, batarya, jeneratörle birlikte benzin motoru ve konvertörleri içermektedir. Güneş jeneratörü, 40 kW zirve güçlü 360 m² alanlı silikon güneş hücrelerinden oluşmaktadır. Bir d.c/d.c konvertör ve iki üç-evre d.c./a.c. konvertörü (biri 25 kW temel gereksinim için ve bir diğeri 40 kW zirve gücü için) vasıtasıyla tüm konutlar için her zamanki voltaj ve frekansta üç-evre a.c. mevcuttur. Güneş hücreleri esas talepten fazla enerji sağladığında batarya şarj olacaktır. Gece boyunca ve ışık yoğunlu çok düşük olduğunda, batarya esas kaynak olmaktadır. Diğer taraftan, güneş ışığı periyotlarında güneş hücreleri gereksinim duyulan tüm enerjiyi tüketiciye sağlamakta ve aşırı enerji bataryayı şarj etmede kullanılmaktadır.



Şekil 7.9. Güneş güç istasyonu şeması [Broussely et al., 2007].

216 V ve 2200 Ah kurşun-asit batarya, tüp şeklinde pozitif plakalara ve jel elektrolite sahiptir. Aslında batarya 1100 Ah kapasitesinde 2 V OCSV hücreden oluşmaktadır ve paralel iki dizi bulunmaktadır. Her biri 108 hücre 1100 Ah'dır. Toplamda, 475 kWh'lık bataryadır. Bakır, negatif ızgara malzemesi olarak kullanılmıştır, çünkü bu kadar yüksek kapasite için yüksek plakalar gereklidir. Deşarj akımları güneş güç uygulamalarında oldukça küçük olmasına rağmen, bakır ızgaralar daha iyi bir şarj verimliliği vermektedir.



Şekil 7.10. Batarya odasının fotoğrafı. İki dizide 216 V jel batarya, her biri 1100 Ah [Broussely et al., 2007].

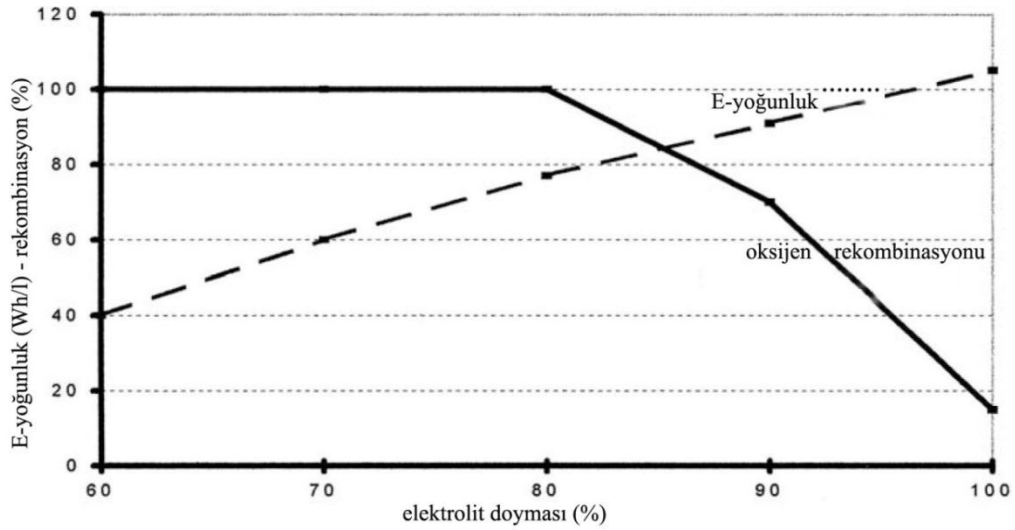
OCSV hücrelerle iki dizi, her biri bir raf üzerine iki seviye kullanılarak kurulmuştur. Flanitzhütte'de güneş enerjisinin toplam tüketilen enerjiye oranı tüm yıl için yaklaşık %65'dir (yazın yaklaşık %98 ve kışın %50'den az). Bu katkı daha büyük güneş jeneratörü kurularak arttırılabilir ancak bu daha yüksek maliyete neden olur.

Tüketilen enerjiyle güneş hücreleri tarafından üretilen enerji arasındaki fark, benzin motoru tarafından sağlanmakta ve bataryanın şarj durumu (SoC) çok düşük olduğu zamanlarda kullanılmaktadır. Bu, yaz mevsiminde nadiren olmaktadır ancak kışın özellikle uzun yağış periyotlarından sonra daha sık olmaktadır. Genelde, benzin motoru bataryanın şarj durumu (SoC) %40'dan daha düşük olduğunda çalışmaya başlamakta, SoC %80'e ulaştığında durmaktadır. Aslında benzin motoru için kullanılan algoritma daha karmaşıktır ve aşağıda verilen koşullar için yazılmış bir bilgisayar programı tarafından kontrol edilmektedir. Bu koşullar; yaz ya da kış olması, gün veya gece zamanı ve bataryanın şarj durumu (SoC) gibidir. Enerji tüketimi ve güneş hücrelerinden sağlanan enerji dengesinden, bilgisayar programı, güneş enerjisi miktarını arttırmakta ve benzin motoru kullanımını olabildiğince azaltmaktadır.

Şarj durumu Ah dengesiyle ölçülmekte, batarya sıcaklığı ve voltajı, şarj/deşarj akımları gibi parametrelerle düzeltilmektedir. Yaz mevsiminde SoC genelde %40 ile %90 arasındadır. Güneş hücrelerinden sağlanan enerjinin, enerji tüketimi ve batarya devri bakımından en uygunsuz periyotları Kasım ve Şubat aylarıdır, çünkü bu zaman boyunca güneş hücreleri tarafından sağlanan az miktarda enerjiye rağmen, yüksek enerji talebi vardır. Batarya devri her ay 1.7 ile 3.3 MWh arasındadır. Toplamda her yıl yaklaşık 30 MWh olmaktadır. Bataryanın enerji verimliliği oldukça iyi bir değerde, yaklaşık %91'dir. Flanitzhütte'deki OCSV bataryası 11 yıldan fazla kullanımda kalmıştır ve jel bataryalar hiç bir problem olmadan başarıyla çalışmışlardır. Sonrasında batarya servis ömrünün sonuna varmıştır [Broussely et al., 2007].

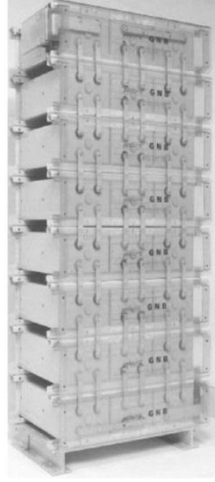
8. AGM BATARYALAR VE SULU BATARYALAR

AGM sisteminde, sıvı elektrolitin fiber seperatörlere emilişiyile asit sızıntısı önlenmiştir. Bu sistemde belirlenen oksijen tekrar-birleşmesini sağlamak için, doldurma sırasında aşırı elektrolitten kaçınılmıştır. Negatif plakalara oksijen taşınması için serbest gözenekler meydana getirme amacıyla, seperatör sıvıyla doyurulmaz. Başlangıç kapasitesi jel bataryalardaki gibi %80-85'dir. (Şekil 8.1) AGM bataryaların elektrolit doymasının tekrar-birleşme ve kapasiteye etkisini göstermektedir [Kiehne, 2003].



Şekil 8.1. AGM bataryalarda elektrolit doymasının enerji yoğunluğu ve oksijen tekrar-birleşmesine etkisi [Kiehne, 2003].

AGM tasarımı, elektroliti elektrotlara yakın tutmak için cam elyafı şeklinde seperatör kullanmaktadır. Bu sayede verimlilik artar. Hem jel, hem de AGM konfigürasyonları için kullanılmama durumunda hidrojen patlaması ve korozyon riski büyük oranda azaltılmıştır. Bu iki çeşit batarya tipi, daha düşük şarj oranı gerektirir. Hem jel hücre, hem de AGM bataryalar kapalıdır ve basınçlıdır; böylece üretilen oksijen ve hidrojen gazları şarj çevrimi sırasında tekrar-birleşerek su oluşturur [Goswami et al., 2008].



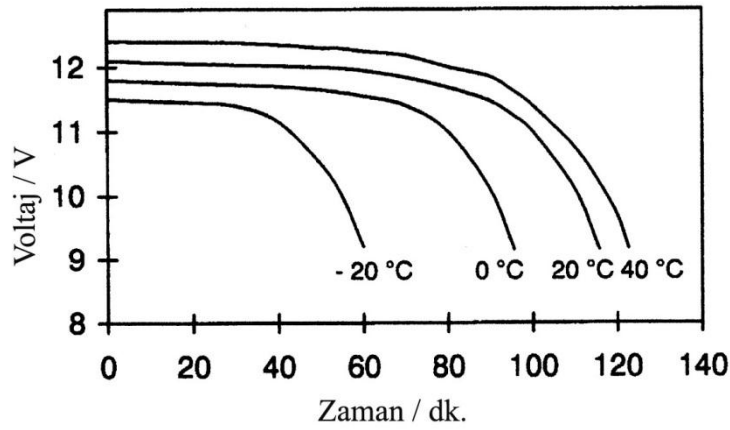
Şekil 8.2. AGM seperatörlü, büyük 48 V'luk sabit batarya hücreleri [Berndt, 2001]

AGM bataryalarda, %90'dan fazla elektrolit, çok yüksek gözenekli cam elyaf seperatörlerde hareketsizdir; tipik değer %93'tür. Cam fiberler oldukça incedir ve bu nedenle emme kapasiteleri yüksektir. Cam elyaf ortam gözenek boyutu birkaç mikrondur.

İnce fiberlerin kalınlarından çok daha pahalı olması nedeniyle genellikle benimsenen, karışımda üçte bir ince ve üçte iki kalın fiber kullanmaktır. Bu orana, seperatörün mekanik özellikleri ve diğer parametrelerden kılcal ıslanma kabiliyeti ve ortam gözenek boyutlarının da etkisi gözönüne alınarak karar verilmektedir. Değişik miktarlarda fiber içeren seperatörler kullanılan bataryalar üzerinde yapılan araştırmalar, ince fiber oranı yüksek olanların, asit katmanlaşmasını azalttığı ve çalışma ömrünü uzattığını göstermektedir. %100 ince fiberli cam elyaflar maliyetlerinden ötürü nadiren kullanılmaktadırlar. Zorlu koşullarda standart ince ve iri taneli fiber karışımı uygun değildir ancak %100 ince fiber veya yüksek oranda karışımları iyi bir seçenektir. Yakın zamanda, AGM seperatörlere daha fazla ilgi duyulmuştur. AGM bataryalar için genelde seperatörler %100 cam fiberden (elyaf) yapılmaktadır. Bazı sentetik takviyeler, seperatörün dayanımını arttırmak için kullanılmaktadır. %100 cam fiber seperatörler bazı dezavantajlara sahiptir ve mekanik özellikleri nispeten düşüktür. Bu, plaka grup prosesleri sırasında ve batarya içinde kısa devrelerden kaçınmak için dezavantaj olabilmektedir. Bazen organik fiberler %100 saf cam elyafa eklenerek, AGM seperatörlerin mekanik dayanım

özellikleri artırılır. AGM bataryalar için genelde düz pozitif plakalar kullanılmaktadır. Seperatörün yüksek gözenekliliği ve gözenek yapısı, aşırı düşük elektriksel dirençle sonuçlanmaktadır ve AGM bataryayı yüksek deşarj oranları için uygun kılmaktadır. Yüksek deşarj oranında yapılan testler, AGM bataryaların jel bataryalardan daha iyi olduğunu açık bir şekilde göstermiştir. Böylece yüksek güç performansının ihtiyaç duyulduğu birçok uygulamada, jelden ziyade AGM kullanılmaktadır. Ancak, yüksek sıcaklık veya derin deşarj gibi aşırı şartlardaki uygulamalarda, güç gereksinimi yüksek olduğunda jel daha iyi bir seçenek olabilmektedir.

AGM bataryalar, ömür, enerji yoğunluğu veya güç için optimize edilebilirler. Bu batarya tipi, 10 saat deşarj için kapasitesi 30 ile 180 Ah arasında, 6 veya 12 V monoblok, ya da kapasitesi 200 ile 500 Ah arasında, 2 V hücrelerden yapılmıştır. Uzun çalışma ömrü gereken uygulamalarda yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek deşarj gücü gerektiren ortamların uygulamalarında kullanılmaktadırlar. (Şekil 8.3)'de AGM bataryanın -20 °C ve 40 °C arası değişik sıcaklıklarda deşarj davranışı görülmektedir.

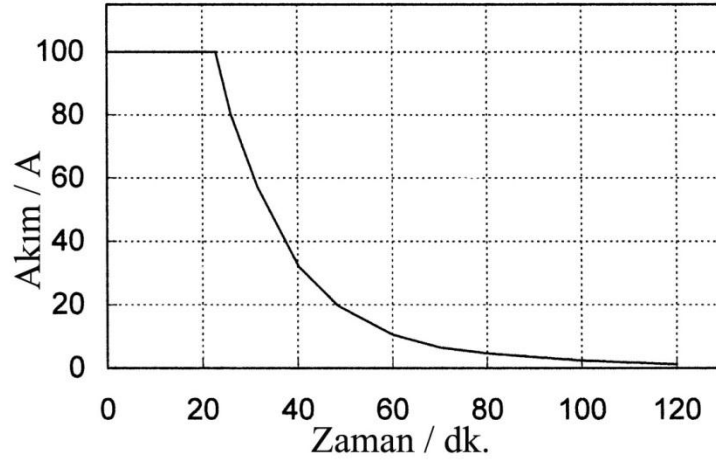


Şekil 8.3. 30 A'de 12 V, 60 Ah AGM bataryanın değişik sıcaklıklarda deşarj eğrileri [Broussely et al., 2007].

Düşük sıcaklıklarda, özellikle 0 °C'ın altında, kapasitenin belirgin düşüşü vardır. Bu, bataryanın tam performansı gerektiğinde çok düşük sıcaklıklardan kaçınılması gerektiği anlamındadır. Diğer taraftan, batarya sıcaklığının artmasıyla kapasitesi artmaktadır. Kullanılabilir enerji bakımından bu yararlı olsa da, bataryanın

servis ömrünün azalmasıyla sonuçlanan korozyon miktarının önemli derecede artması nedeniyle yüksek sıcaklıklardan kaçınılmalıdır. AGM bataryalar çok yüksek güç yoğunluğu sağlamak için tasarlanırlar. 10 yıl ömür sunabilirler ve 6 ile 12 V gerilimlerde, 60 ile 180 Ah arasındaki kapasitelerde üretilirler.

İkinci bir grup yüksek güç bataryası, 12 V luk, 5 ile 85 Ah arasındaki kapasitelerdedir. Yüksek güç sağlamak üzere optimizasyon nedeniyle, beklenen ömür, 10 yıl ömürlü bataryadan önemli ölçüde azdır. Yüksek güç performansına ek olarak, AGM bataryaların şarj alışı kabiliyetleri iyidir. (Şekil 8.4)'te 12 V, 60 Ah'lık AGM bataryanın, sabit voltaj şarjı için (14.4 V, 100 A e sınırlanmış) sınırlı akımın zamanla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 8.4. 14.40 V'da, akımı 100 A'le sınırlanmış 12 V AGM bataryanın hızlı şarj karakteristiği [Broussely et al., 2007].

Batarya başlangıçta %100 derin deşarja (DoD) boşaltılmıştır. Görülebileceği gibi batarya 20 dakikadan uzun bir süre 100 A akımı almıştır. Toplam kapasitenin %50'den fazlası bu sürede tekrar şarj olmuştur. 1 saatten sonra, şarj akımı belirgin ölçüde azalmıştır ve batarya %90 kapasitesi civarına tekrar şarj olmuştur. Yüksek güçlü AGM bataryalar %50 şarj durumundan sonra, %80-90 şarj durumuna (SoC) çok hızlı bir şekilde tekrar şarj edilebilirler. Son yüzde birkaç miktar şarj önemli bir süre gerektirir.

Daha yüksek performans elde etmek için plaka kalınlığının azaltılması gerekir. Bu, bataryanın şarj alışı iyileştirir. AGM bataryanın içindeki sıcaklık, hızlı şarj

sırasında artar. Testler, sıcaklıkta önemli artışı gösterse de normalde bu artış katlanılabilir sınırlar dahilindedir. Böylece, hızlı şarj, bataryayı deşarjdan sonra hızlıca eski haline getirmek için kabul edilebilir bir yoldur ancak batarya sıcaklığı temel alınarak şarj kontrolü gereklidir. Sıcaklık ve şarj voltajı kontrol edildiğinde, AGM bataryaların ömrü hızlı şarj ile azalmaz.

Büyük bir AGM (1.4 MWh) bataryayla sabit uygulamada yapılan deneyler rapor edilmiştir. Batarya, adanın güç şebekesini dengelemek amacıyla, şebekeye ani güç sağlamak ve aşırı gücü almak için, Alaska’da bir köye kurulmuştur. Batarya 2 V, 3600 Ah, AGM modüllerden yapılmıştır; her modül 3 paralel bağımsız hücre içermektedir. Hücreler herhangi bir asit katmanlaşması probleminden kaçınmak için yatay pozisyonda çalıştırılırlar. Daha yüksek volümetrik güç ve enerji yoğunluğuna doğru genel eğilim, uzun servis ömrüyle birlikte, korozyon seviyesi düşük ince ızgaralar gerektirmektedir. Bu talep, geleneksel bataryalarda, pozitif ızgara alaşımlarının ve korozyona etki eden diğer parametrelerin geliştirilmesiyle karşılanır [Broussely et al., 2007].

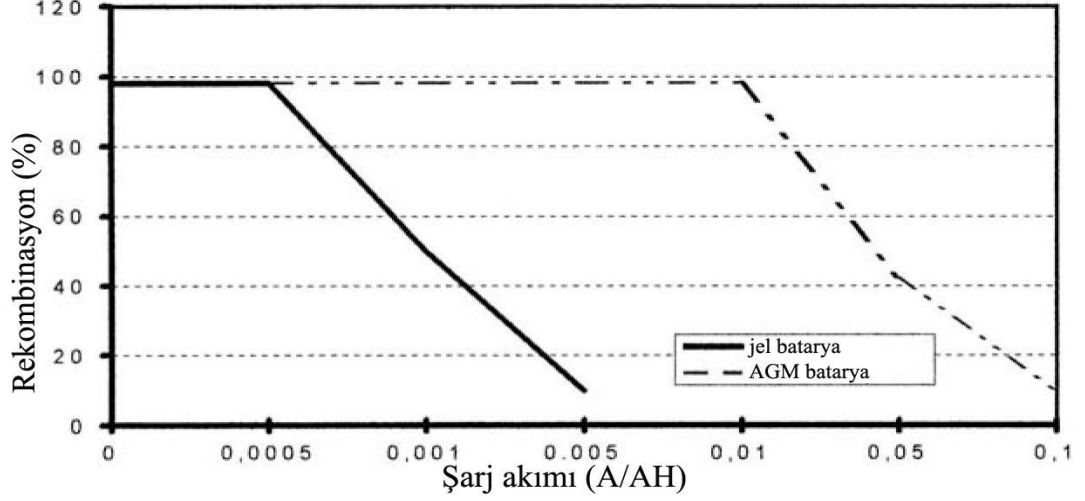
8.1. AGM ve VRLA Sistem Karşılaştırması

Yeni AGM bataryalarda, cam elyafın elektrolitle doyması %100’den önemli ölçüde aşağıdaysa, oksijen tekrar-birleşmesi tamdır. Öte yandan, yeni jel bataryalarda çok az gaz serbest bırakılır. Bu su ayrışması, jel yaşlandıkça daha fazla kılcal oluşmasına sebep olur. Sonuçta, oksijen tekrar-birleşmesindeki artışla gazlaşma önlenir. Böylece, her iki sistemde de su ayrışması nedeniyle kuruma, bataryalar doğru şartlarda şarj edildiği sürece, kısa ömrün bir nedeni değildir. Jel batarya kılcallarına göre, AGM bataryalardaki daha büyük gözenekler nedeniyle, AGM bataryaların tekrar-birleşme oranı jel bataryalardan yaklaşık 20 kat fazladır. Oksijen tekrar-birleşmesi şu eşitlikle tanımlanır;

$$R = 100 - V * 100 / (n * i * t * 0.62)(\%) \quad (8.1)$$

Burada R= tekrar-birleşme oranı (%), V= taşınan gaz (litre), i= ortalama şarj akımı (A), t=şarj süresi (saat), n= hücrelerin sayısı. Şarj voltajının şarj akımına

etkisinden dolayı, tekrar-birleşme oranı R, artan şarj akımıyla azalır. Valf kontrollü bakım gerektirmeyen bataryalar için gerekli olan oksijen tekrar-birleşmesi tam olarak her iki teknolojiyle meydana getirilebilir [H.A Kiehne 2003].



Şekil 8.5. Valf kontrollü batarya sistemlerinde oksijen tekrar-birleşme yüzdesinin şarj akımıyla değişimi [Kiehne, 2003].

Bu iki sistemin şarj durumu çok farklıdır. Bunun sebebi, oksijenin hücrenin pozitif plakasından negatife taşınması için gerekli olan sistemlerdeki gözeneklerin değişik yapılarından kaynaklanan büyük tekrar-birleşme oranı farkıdır. Cam elyafı AGM bataryalar, 100 mikrona kadar gözenek çaplarına sahipken, jel bataryaların kılcalları, yaşlanma nedeniyle jelin kendini çekmesiyle oluşmaktadır. Bu şekilde, AGM malzeme gözeneklerinin maksimum onda biri kadar kılcallar oluşmaktadır. Bu, iki sistem tekrar-birleşme oranlarındaki önemli farkın nedenidir.

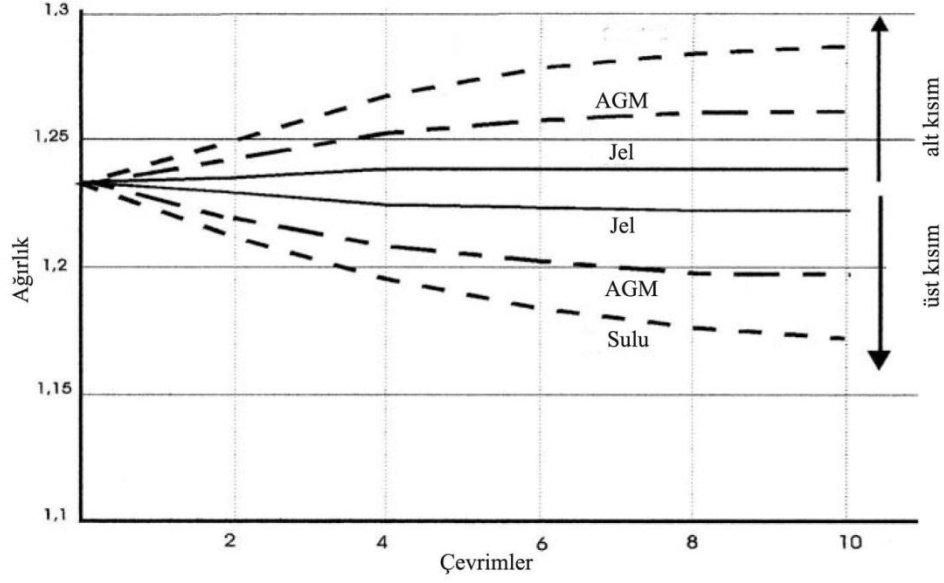
Jel bataryalar için %100 tekrar-birleşme oranı, 0.5 mA/Ah şarj akımına kadar bakım gerektirmeyen çalışma için yeterlidir. Polarizasyon, oksijen yayılmasını arttırdığı için, negatif elektrotta olan ekzotermik (ısı verici) oksijenin suya indirgenmesi, AGM bataryaların sıcaklığını jel bataryalardan daha fazla artırır. Tekrar-birleşme akımı şu tepkimeden etkilenir:



Bu kuvvetli ısı üretimine neden olur. AGM bataryalarda jel bataryaların tersine, yüksek oksijen çevrimi sonucu ortaya çıkan tepkime enerjisinin aktarımı mümkün değilse, ısı kaçak oluşur. Isıl kaçak, aşırı ısınma nedeniyle bataryaların ömrünün kendiliğinden sonlanmasına neden olur. Teknik yayınlarda valf kontrollü kurşun-asit bataryaların bu problemi sıkça anlatılır. Bu durum, düşük tekrar-birleşme oranı nedeniyle, jel batarya sistemlerinde gözlemlenmemiştir.

Bu iki sistemin başka bir farkı da asit katmanlaşmasıdır. Asit katmanlaşması, sulu kurşun-asit batarya ömürlerinin sıkça erken sona ermesine neden olmaktadır. Asit katmanlaşması sülfürik asit elektrolitinin seyrelmesiyle oluşur. Bu, bataryanın deşarjı sırasında aktif kütlelerle tepkimeye girer. Şarj sırasında sülfürik asit, yüksek konsantrasyonda oluşur. Gaz gelişimi olmayan sulu bataryalarda, hücrelerin üst kısmında asit konsantrasyonunun düşük, alt kısmındaysa yüksek olması sonucu elektrolitin katmanlaşması meydana gelir. Bu, hücrenin kapasitesini çevrim sırasında azaltır, ancak daha da önemlisi, hücrelerin alt kısmındaki yüksek asit konsantrasyonu alt plaka alanında pozitif ızgaraların korozyonuna neden olur. Asit katmanlaşması etkisinin geleneksel bataryaların bazılarında gözlemlenmemesinin nedeni, kurşun antimon ızgaraların düşük hidrojen aşırı voltajı ve özellikle uygulanan şarj metodu sonunda su ayrışmasıdır. Şarj sırasında oluşan oksijen ve hidrojen gazları elektroliti karıştırır.

(Şekil 8.6) 350 Ah hücreler için durumu göstermektedir. Tüm durumlarda elektrolit 1.23 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir [Kiehne, 2003].



Şekil 8.6. Bakım gerektirmeyen değişik teknolojilerde, kurşun-asit bataryaların çevrimi sırasında asit katmanlaşması [Kiehne, 2003].

AGM bataryalarda elektrolitin hareketsizleşmesi nedeniyle, hücrenin titreşimi, tabakalaşan elektrolit katmanlarını dengeleyemez. Jel bataryalardaki jelin yapısı nedeniyle şarj sırasında plaka yüzeyinde oluşan yüksek konsantrasyonlu asitin çökmesi kısıtlanmıştır. Böylece yüksek konsantrasyonlu elektrolitin difüzyonu, toplam katmanlaşmayı pratik olarak önler. Asit katmanlaşması nedeniyle erken başarısızlık, jel bataryalarda gözlemlenmemiştir.

8.2. Sulu Bataryalar

Sulu kurşun-asit bataryalar için mahfaza boyutları, güneş ve rüzgâr güç sistemlerindeki diğer sabit uygulamalarla aynıdır. Pozitif kısımda düz plakalar ve yüksek kapasiteler gerektiğinde tüp şeklinde plakalar vardır. 2 V'luk hücreler OpzS tiplerinde kullanılmaktadır. Küçük tipler, düz pozitif plakalı, 6 veya 12 V, tek gövdelidirler. 10 saat oran kapasitesi bekleme bataryalarından farklı olarak, güneş bataryası versiyonu 100 saat oran kapasitesi nominal performansına sahiptir. 360 Ah kapasiteli (100 saatlik deşarj için) güneş bataryası, 300 Ah kapasiteli (10 saatlik deşarj için) bekleme bataryasıyla aynı mahfaza boyutlarına sahiptir. Asit katmanlaşması, çevrim uygulamalarında kullanılan sulu bataryalar için ciddi problemdir. Tipik çevrim uygulamaları sonrasında önemli derecede asit

katmanlaşması oluşabilir. Güçlü bir aşırı şarjla, hücre içinde güçlü gazlaşma, sülfürik asitin bir miktar hareket etmesine neden olur ve bu nedenle elektrolit karışır. Asit katmanlaşması çoğunlukla derin deşarj (DoD) ile saptanır. Daha derin deşarj daha şiddetli asit katmanlaşmasına yol açar. Aşırı şarjın alternatifi olarak elektrolit sirkülasyon sistemi kullanımı periyodik olarak elektrolitte bir miktar harekete neden olur.

Güneş ve rüzgâr gücü uygulamalarında kullanılan bataryaların servis ömürlerinin uzatılması, bu tür sistemlerin toplam maliyetini önemli ölçüde etkiler. Pozitif ızgara korozyon direncinin ve pozitif aktif kütle çevrim performansının iyileştirilmesi önemli anahtar noktalardır. Modern bataryalar, yüksek korozyon dirençli ızgaralara ve oldukça iyi çevrim performanslarına daha iyi aktif kütle yapıları nedeniyle sahiptirler. Bataryanın başarısızlığı, her zaman pozitif ızgara korozyonuna veya pozitif aktif kütle bozulmasına bağlı değildir. Bataryanın düşük şarjları nedeniyle aktif kütle sülfatlaşma etkileri de düşünülmelidir.

Sülfatlaşma, bir deşarj sonrasında batarya tekrar şarj edildiğinde kurşun sülfatın kurşun ve kurşun dioksite tam dönüşümü gerçekleşmediğinde oluşmaktadır. Birkaç deşarj/şarj çevrimi sırasında oluşursa, plakalarda kurşun sülfat birikmesi ortaya çıkar. Bu birikim, sülfürik asit konsantrasyonunu düşürür ve kullanılabilir kapasitenin düşmesine yol açar. Bir olumsuz etkisi de, kurşun sülfatın, aktif kütle yüzey alanını ve gözeneklerin çaplarını küçültmesidir. Bu durum, sülfürik asitin gözeneklere taşınmasını yavaşlatır ve bataryanın performansını düşürür. Aslında olay daha da kötü etkilidir. Kurşun sülfat bir kristal yapıyı yüksek yüzey alanına sahip çok küçük kristaller halinde çökeltir. Bu, şarj sırasında çözülmemiş kurşun sülfatla sonuçlanır. Ancak, deşarjın çok sonrasında tam şarj uygulanmazsa, yüksek yüzey alanlı, çok küçük kristalli yapının, daha düşük yüzey alanlı, daha büyük kristalli yapıya dönüşümüyle kurşun sülfat tekrar-kristalleşir. Bu yaşlandırılmış kurşun sülfatın tekrar çözünmesi daha zordur ve çok daha fazla zaman gerektirir. Plakalarda kurşun sülfatın daha uzun süre kalması, kristallerin daha zor çözünmesi ve bataryanın tam tekrar şarjının daha zor olması demektir. Bir yıl geçtikten sonra, nispeten uzun şarj süreleri ve özel şarj teknikleri, yaşlanmış kurşun sülfatlı plakaların tam şarj durumuna getirilmesini sağlayabilir.

Optimum şarj voltaj sınırı seçimi önemli bir noktadır. Bu sınırı arttırmak sülfatlaşmayı azaltmaya yardımcı olabilir. Ancak, sınırın dikkatli seçimi gereklidir, çünkü daha yüksek şarj voltajı, daha yüksek korozyona ve fazla su tüketimine yol açar. Deşarj edilmiş veya kuvvetli sülfatlaşmış bataryaların oldukça düşük sülfürik asit konsantrasyonuna sahip olduğu düşünülmelidir. Bu, elektrolitin düşük sıcaklıklarda kullanılırken donmasına sebep olmaktadır.

Bataryanın şarj durumunun bilinmesi için bazen şarj durumu göstergeleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemler özellikle tam doğruluk ve güvenilirlik gerektiğinde kullanılırlar, pahalıdırlar ancak büyük güneş ve rüzgâr gücü sistemleri günümüzde şarj durumu göstergelidirler [Broussely et al., 2007].

25 °C sıcaklıkta çalışan sulu elektrolit bataryaların çevrim ömründe çok küçük değişimler vardır. Düşük antimonlu batarya ömrü 72 haftadır. Tüp şeklinde plakalı yüksek antimonlu bataryalar, düşük antimonlu tüp şeklinde plaka ve düz plaka bataryalar için 90 haftadır. Düz plaka tipi batarya, 7 gün profilinde en iyi performansa sahiptir (300 hafta). Sulu elektrolitli düz plaka birimi 45 °C testinde 140 çevrim çalışmasına rağmen mükemmel kapasite verebilmektedir. Aynı birim 25 °C'de sadece 90 hafta kalabilmektedir. Tüp şeklinde-plakalı bataryanın 45 °C sıcaklıktaki ömrü (60 hafta), 25 °C sıcaklıktakinden (80 hafta) 20 hafta azdır. Tüp şeklinde plakalı biriminin 25 ve 45 °C sıcaklıklardaki başarısızlığı, aktif malzeme dökülmesinden ve kısa devrelerdendir. Bu dökülme, üst ve alt tüpleri uygunsuz kapatmadan kaynaklanmıştır. Ek olarak, 45 °C'de çalışan tüp şeklinde bataryanın çok az kurşun omurgası oksitlenmeden kalabilmiştir. Bu şiddetli korozyon seviyesi bataryanın ömrünü kısaltmaktadır [Newnham et al., 1997].

Sulu bataryalar temel olarak %2.5'dan düşük antimonlu (Sb) kurşun-antimon alaşımları kullanılırlar. Antimonun yararlı etkileri, döküm için uygun ızgara koşulları ve düşük temas direnciyle sonuçlanan aktif materyalin ızgaraya iyi temasıdır.

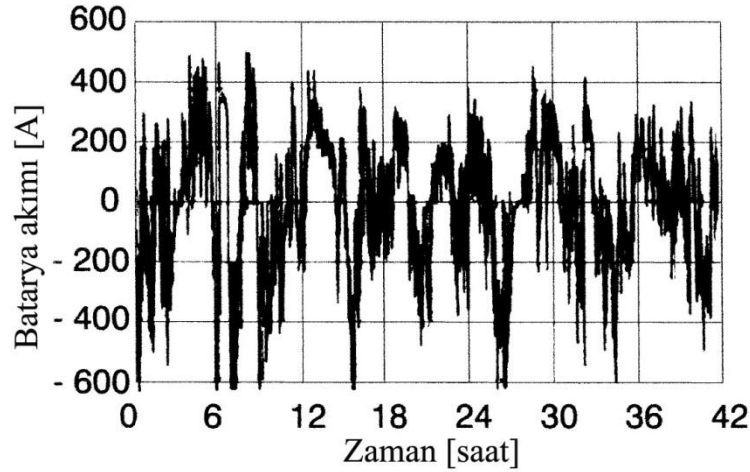
9. BÜYÜK BATARYALAR

Çok fonksiyonlu enerji depolama sistemi, tekrar-üretilebilir enerjinin kullanımını iyileştirmekte faydalı olmaktadır. Bu sistemin üç değişik fonksiyonu vardır. Birincisi, kesintisiz güç sağlama, ikincisi güç kalitesini iyileştirme ve üçüncüsü düşük talep dönemlerinde bataryada zirve-yük dönemlerini desteklemektir. Birkaç bin amper-saat kapasiteli sabit kurşun-asit bataryalar ticari olarak 2 V birimlerindedirler. Bu batarya hücrelerinin pozitif kısmında genelde tüp şeklinde plakalar kullanılır. Bunlar çok dayanıklıdır. Bataryanın servis ömrünü oldukça uzatırlar. Bu çeşit bataryalar OpzS diye adlandırılırlar ve hücreler şeffaf mahfazalarda 300 Ah ile 3000 Ah arasındaki kapasitelerde ve hatta sert kauçuk mahfazalarda 12000 Ah gibi daha yüksek kapasitededirler. Denge voltajı genelde hücre başına 2.23 V olmaktadır. Bu tür yüksek kapasiteli bataryalar genellikle yüksek plakalıdır. Genel kural, daha yüksek plakaların hücre iç direnci yani ızgara elektrik direnci oranı daha büyüktür. Yaklaşık 50 cm'den yüksek plakalar hücrenin dibinde daha düşük derin deşarja uğrarlar.

CSM (bakır-gerilme-metal) hücreler standart hücrelerle aynı ağırlığa ve hacime sahiptirler fakat negatif ızgara malzemesi olarak kurşun yerine bakır kullanılmaktadır. Aslında, ızgara ince katmanlı kurşunla kaplanmış geniş bakır yapıdır. Hücrenin pozitif kısmında tüp şeklinde plakalar kullanılmaktadır. Bakırın negatif plakanın ızgara materyali olarak kullanılmasının deşarj ve şarj davranışına etkisi teorik bir modelle tanımlanır. Bu modelde, hücre dikey ve yatay dirençlerin bir ağı olarak düşünülür. Aynı yükseklikteki (555 mm) plakalar, CSM hücre iç direncinin standart hücreden yaklaşık %17 daha az olduğunu göstermektedir. Negatif plakanın düşük direnci nedeniyle CSM tasarımı, hücrenin dibi ve üstü arasında belirgin biçimde daha tekdüze akım dağılımı göstermektedir. CSM ve standart hücreler içindeki akım dağılımının deneysel incelemeleri teorik modeldeki varsayımı doğrulamaktadır. CSM plakalarda akım dağılımı daha tekdüzedir. CSM teknolojisi negatif bakır ızgaralı, yüksek plakalı, büyük bataryalar kullanıldığında güneş ve rüzgâr uygulamaları için uygundur. Bakırın elektriksel iletkenliği kurşundan daha fazla olduğundan CSM hücrelerde daha az ızgara malzemesi gerekir. Bu, hücrede daha fazla aktif kütle ve elektrolit olmasına imkân sağlar ve hem hacimsel yoğunluğu

hem de güç yoğunluğunu artırır. Negatif ızgara için kurşun yerine bakır kullanılması sadece deşarj sırasında fayda sağlamaz, aynı zamanda daha iyi enerji verimliliğiyle yüksek miktarda geliştirilmiş şarj kabul etme yeteneği sağlamaktadır. CSM hücreler ve OCSM hücreler (sabit uygulamalarda) yüksek plakalı hücreler gerektiğinde orta veya yüksek deşarj gücü ve yüksek enerji verimliliği sağlamada kullanılırlar.

Tüp şeklinde plakalı ve bakır negatif ızgaralı OCSM hücreler çeşitli uygulamalar için başarılı bir şekilde kullanılmışlardır. 17 MW/14 MWh'lık batarya Berlin'de akım düzenleme ve döngü rezervi için kullanılmıştır. 12 batarya dizisi paralel olarak ve her dizi 1000 Ah kapasiteyle 590 hücreyi seri olarak içermektedir. Bu, toplamda 1180 V 12000 Ah batarya sağlamaktadır. Konvertörler ve transformatörler vasıtasıyla Berlin'de 30 kV şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Bir dizideki tipik akım dağılımı 42 saatlik frekans düzenlemesi için verilmiştir (Şekil 9.1). Akım her dizide ± 700 A sınırlandırılmıştır. Bu, ± 8.5 MW maksimum güce karşılıktır. Bu, akımı ± 0.2 Hz sapmayla sürekli 50 Hz frekansında tutmak için yeterlidir [Broussely et al., 2007].



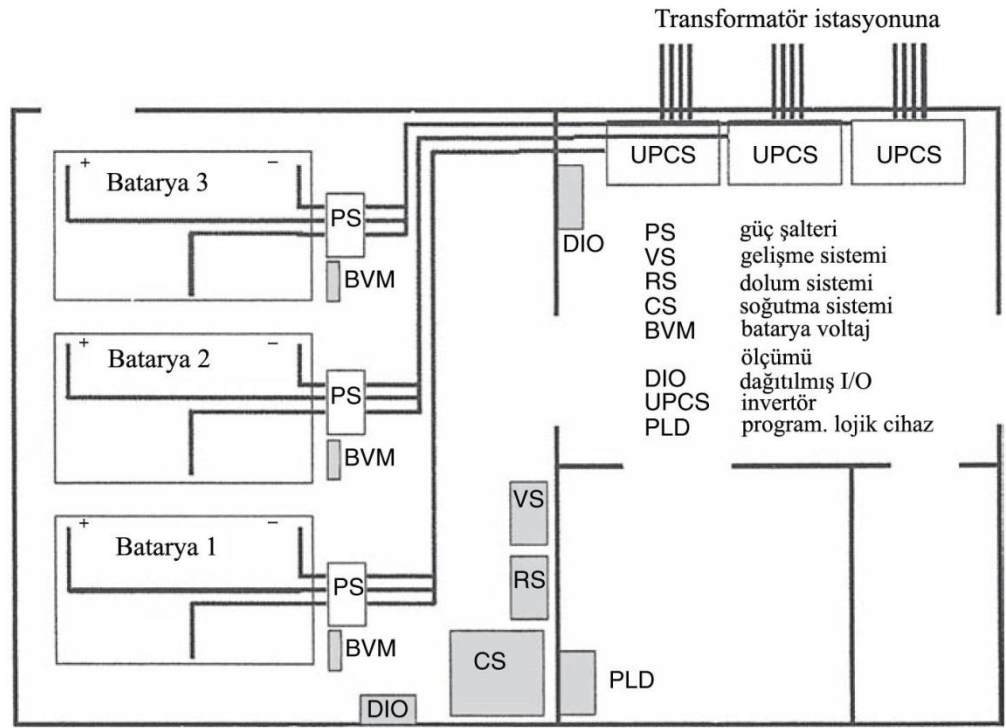
Şekil 9.1. Frekans düzenlemesi sırasında bir batarya dizisinin tipik akım dağılımı [Broussely et al., 2007].

Döngü rezervine gerek duyulduğunda deşarj akımının sınırı her dizide 1400 A'e değişmekte, böylece 17 MW mümkün olabilmektedir. Şarj durumu %70 civarında ± 20 sapmayla tutulmaktadır. Burada hep iyi şarj alımı ve kesin kapasite

rezervi vardır. En düşük SoC %50'de bile döngü rezervi 17 MW gücü en az 30 dakika için mümkün kılmıştır. İki günlük frekans düzenleme görevinden sonra hücreler bir IU şarj işlemiyle 4 saatten fazla şarj edilmektedir. Her hafta 14 saat tam tekrar şarj yapılmaktadır. Bu tür uygulamalar için yüksek güçte iyi şarj alışlı aynı zamanda iyi çevrim ömürlü bataryalar gereklidir. Önemli bir hedef, %80'den fazla toplam enerji verimliliğine sahip olmaktır. Bu nedenle negatif bakır ızgaralı ve pozitif tüp şeklinde plakalı CSM tasarımı kullanılmasına karar verilmiştir. 14 MWh'lik batarya kurulmasında, tek hücre tasarımından ziyade yüksek güç ve %80'den fazla enerji verimliliği almak için 10 V'luk blok bataryalar kullanılmıştır. Her hücre için otomatik su doldurma sistemi bulunmaktadır. Böylece bakım görevi nispeten düşük seviyeye çekilmektedir. Plaka yüksekliği 800 mm olduğu sürece ve şarj voltajı hücre başına 2.4 V sınırlı olduğu sürece, asit katmanlaşmasıyla ilgili problemler beklenmektedir. Bu problemleri yenmek için bir elektrolit karıştırma sistemi yerleştirilmektedir. Başlangıçta maksimum devir miktarının günlük nominal kapasitenin 2.2 katı olacağı tahmin edilmiştir. Aslında, günlük devir miktarının çok daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır (3.3'e kadar). Tüm bataryada aşırı sıcaklık farklarından kaçınmak için plastik boru ısı değiştiriciler kullanılmıştır. 14 MWh'lik batarya bir fabrikada çalışmaya başlamıştır. 48 V, 1000 Ah bataryalar test ünitelerinde bataryaların çalışma koşulları altındaki davranışlarını daha detaylı incelemek için kurulmuştur. Bu araştırmalar değişik batarya türlerinin karşılaştırmalı testlerini içermektedir. Asıl hedefler, frekans düzenlemesi ve döngü rezervinde kullanılan batarya depolama sistemlerinde optimum çalışma rejimlerini geliştirmektir. Berlin 1993 yılında Batı Avrupa elektrik şebekesine bağlanmıştır. Bu nedenle, frekans düzenlemesi ciddi problem olmaktan çıkmıştır. Bu zamandan sonra, sadece küçük frekans sapmaları olmuştur ve kapasite devri oldukça düşük olmaya başlamıştır. Buna rağmen, batarya döngü rezervi servisine, yaklaşık 2 yıl daha devam etmiştir. 1995 yılında Berlin'deki batarya servis ömrünü doldurmuştur. Servisi sırasında 14 MWh batarya depolama sistemi gerçekte problem olmadan başarıyla çalışmıştır. Bu, çalışma koşullarının zorlu olmasından dolayı önemli bir sonuçtur. Batarya, nominal kapasitenin 7000 katı civarında devir kapasitesine sahiptir ve toplam enerji devri yaklaşık 100 GWh olmaktadır. Aslında Berlin'deki elektrik şebekesinin boyutunda 4 tane daha batarya depolama sistemi kurulması planlanmıştır. Avrupa şebekesinde bu türden büyük ara-bağlantılı şebeke sistemlerine rağmen frekans düzenlemesi ciddi bir problem değildir. Başka alanlarda

büyük bataryalar halen faydalı olabilmektedirler. Bataryalar, birincil ve ikincil kontrol olarak kullanıldıklarında belirgin ekonomik fayda sağlayabilirler. Bu türden bir uygulama, kurşun-asit bataryalar için ilginç bir pazar olmaktadır.

Her biri 1.2 MWh'lık kurşun-asit batarya olan iki çok fonksiyonlu enerji depolama sistemi Almanya'da kurulmuştur. Bir sistem güneş güç fabrikası kombinasyonu ve diğeri rüzgâr çiftliği kombinasyonudur. Bataryalar OCSM hücrelerle standart dizaynlıdır ancak çok fonksiyonlu uygulamanın özel gereksinimlerine göre değiştirilmişlerdir. Batarya sisteminin şeması (Şekil 9.2)'de gösterilmiştir.



Şekil 9.2. 1.2 MWh'lık çok fonksiyonlu kurşun-asit bataryanın şeması.

Toplamda 554 V, 4140 Ah bataryadır; üç batarya dizisi paraleldir. Her dizi, seri bağlı 1380 Ah kapasiteli 272 hücreye sahiptir [Broussely et al., 2007].

Batarya 2 V OCSM hücrelerden oluşmaktadır. Pozitif tüp şeklinde plakalara sahiptir ve negatif ızgara malzemesi bakırdır. Pozitif kısımda düşük antimon ızgara alaşımı kullanılmıştır. İkisi soğutma boruları için, biri elektrolit karıştırma sistemi

için, biri otomatik dolum sistemi için ve biri elektrolit seviye göstergesi kurulumu seçeneği olmak üzere beş delikli özel bir kapak kullanılmıştır. 24 hücrede bu delikler sıcaklık sensörleri için kullanılmıştır. Her hücre için otomatik bir dolum sistemi vardır. Böylece bakım işi nispeten düşük seviyede tutulmaktadır. Aslında, bir batarya doldurma sistemi hücreler üzerine kurulmuştur ve tüm batarya için su deposu görevi yapan 280 litre hacimli büyük bir tanka bağlanmıştır. Bu tank otomatik olarak bir iyon değiştirici vasıtasıyla su ile doldurulmaktadır.

Asit katmanlaşması, özellikle büyük hücrelerde önemli bir problemdir. Bu problemin üstesinden gelmenin bir yolu, bataryayı aşırı şarj ederek, belirgin gazlaşma sonucu elektroliti karıştırmaktır. Malesef bu tür bir strateji şarj verimliliğini düşürür. Dahası, su kaybını ve hücrede ısı üretimini önemli derecede arttırır. Bir elektrolit karıştırma sistemi kullanılması tüm bu olumsuzluklardan kurtarabilir. Çok fonksiyonlu batarya sisteminin geliştirilmesi, elektrolit karıştırma sistemi işini de içermektedir. Sistem 1.2 MWh bataryanın gereksinimine göre değiştirilir. Merkezi bir kompresör tüm hücrelere hava üflenmesini sağlar. Tüm batarya için hava debisi $24 \text{ m}^3/\text{saat}$ olmaktadır. Her gün elektrolit karıştırma sistemi 15 dakika kadar kullanımda olur. Bu, asit konsantrasyonunu dengelemede etkilidir.

Çok fonksiyonlu bataryanın uygulaması en azından bazen bataryanın nispeten yüksek akımla kullanımıdır. Tüm batarya içinde yüksek sıcaklıklardan veya belirgin sıcaklık farklılıklarından kaçınmak için, plastik boru ısı değiştirici içeren özel bir hücre tasarımı geliştirilmiştir. Her hücre, iç çapı 3 mm olan, dört adet bobinli plastik boruya sahiptir. Yeterli boşluğa sahip olmak ve bobinleri tümüyle elektrolit içinde tutmak için, 797 mm yüksekliğinde daha büyük hücre mahfazası kullanılmıştır. Soğutma sistemi 40 kW güce sahiptir. Güneş güç istasyonunda dört hücre bir devrede seri şekilde soğutulmaktadır. Oysa, rüzgâr çiftliğinde sadece iki hücre seri şekilde soğutulmaktadır. Hücreler, ikisi her kutup için paralel bağlı olmak üzere dört kutupludurlar. Bataryanın kullanım sırasında dengesinden sapmayı kontrol etmek için sekiz hücrenin birlikte voltajı ölçülmektedir. Hücreler, her biri 300 mm^2 alanlı düz bakır çubuklarla bağlanmıştır. Bu, iki kutubun paralel kullanılmasıyla toplamda 600 mm^2 ile bağlantı anlamındadır. Altı 1380 Ah OCMS hücre grubu, beklenen batarya performansını doğrulamak için laboratuvarında test edilmiştir. Değişik deşarj akımlarında standart kapasite araştırmalarından sonra bazı yüksek oran deşarj testleri

de yapılmıştır. OCSM hücreler standart OPzS tasarımına kıyasla daha düşük iç dirençleri nedeniyle belirgin olarak daha iyi davranmaktadırlar. Bir saat deşarj sırasında elektrolit sıcaklığı soğutma sistemiyle yaklaşık 4 °C ve soğutma sistemi olmadan 6 °C artmaktadır. Bu sonuçlar soğutma sisteminin verimliliğini doğrulamaktadır. Güneş ve rüzgâr bataryalarından geniş çeşitlilikte fonksiyonellik elde etmek için, gücü elektrik şebekesine transfer eden ve alan bir konvertör kullanılmaktadır. Dahası, aktif filtreleme yapmak için konvertörün hızlı ve akıllı bir kontrol sistemi vardır. Burada üç fonksiyon vardır.

Depolanan güneş/rüzgâr enerjisi zirve-yük gücünü yerine koymak; Batarya kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarında (güneş veya rüzgâr) depolanan gerekli zirve-yük gücünün yüksek verimlilikle yerine konulmasını mümkün kılar. Depolamayla sistem yükünü düzeltme, var olan sistem kapasitesinin gelişmiş kullanımını sağlar. Aynı zamanda rezervler için sistemdeki transmisyon (aktarma) kayıpları ve maliyetler azaltılır. Birincil enerji kullanımını azaltmayla meydana gelen maliyet avantajları ve güç istasyonu ile şebeke kapasitesinin optimum kullanımı faydalananlar için çekici olmaktadır.

Güç sağlamanın güvenilirliğini arttırmak: Üretim işletmelerinin yapısal değişiklikleri ve sürekli modernizasyonu, gelişen yüksek teknoloji teçhizatlarının kullanımına neden olmuştur (elektronik kontrol, mikro işlemciler vs.). Bu işletmelerde fonksiyonel duraklamalarla, arızalarla, üretim durmasına neden olan başarısızlıklarla ve proses durmalarıyla elektrik şebekesinde kaçınılmaz bozulma tepkisi oluşması önlenmeye çalışılmıştır.

Güç sağlamanın kalitesini arttırmak: Tüketici bakımından, güç kalite gereksinimi sürekli artmaktadır. Güç konvertörü kullanan yenilenebilir enerji kaynaklarından kesintili üretim durumunda, gücün sinüsel şekli harmonikler tarafından bozulur. Bu, paralel çalışmada bozucu etkiye neden olur ve müşterilere zarar verir. Gelecekte, mevcut ızgaraların güvenli çalışması için, izin verilen bozulma seviyesinin azaltılması beklenebilir. Mevcut sistem eklentileri yerine, uygun güç konvertörlü enerji depolama sistemleri kullanarak, çoğu durumda mevcut bozulmalar daha ekonomik bir şekilde telafi edilebilir. Rüzgâr ve Güneş işletmelerinde kullanılan güç konvertörü, konvertör köprüsünün izole edilmiş iki

kutuplu giriş transistörünü (IGBT) tetikliyerek yük voltajının bozulmasını karşılayan gerçek zamanlı kontrol algoritması içermektedir. Almanya'daki güneş ve rüzgâr çiftliği işletmesinde, birleşik güç iyileştirme sistemi (UPCS) kullanılmıştır. Bu, bir optik statik şalter, bir IGBT konvertör, bir filtre devre ve bataryayı içermektedir. Konvertör, üç bağımsız kontrollü IGBT yarı köprüsünü içermektedir. Bölmeli bir d.c bağlantısıyla beslenmektedir. Her yarı köprü, konvertör tarafından üretilen yüksek frekans harmoniklerini bastırmak için çıkış filtresine sahiptir. Besleme transformatörlü bir test düzeni kurulmuştur. Bu, 100 kW gücünde bir UPCS ve yük olarak ayarlanabilir çalışma süreli ve durma modlu kaynak cihazından oluşmuştur. Bu testte kaynak cihazı voltaj titreşimleri olarak ölçülebilen voltaj değişimleri üretmek amacıyla kullanılmıştır. Enerji depolama sistemi üç modüle bölünmüş olup, her biri 400 kW'lık güç konvertörü ve 544 V nominal voltajda 10 saat için 1380 Ah kapasitede batarya dizisi içermektedir. Bu üç depolama modülü bir proses otomasyon sistemi vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Sistem, bir veri toplama ve bir değerlendirme modülüne bölünmüştür. Bataryanın optimum çalışması için, yeterli veri tanımlayan esas batarya aşaması gereklidir. Böylece, batarya için, sekiz hücre grubunda hücre sıcaklıkları, hücre voltajları, şarj ve deşarj akımları hakkında bilgi toplayan özel bir veri toplama sistemi kurulmuştur. Ek olarak, konvertör ve yardımcıları ölçülmekte ve kontrol edilmektedir. Elektrik şebekesinin operatörüyle veri iletişimi, enerji depolama sisteminin doğru çalışması için önemlidir.

Otomasyon sisteminin büyük bir parçası, batarya kontrolü için komutlar üreten veri değerlendirme birimidir. Güvenlikle ilgili bilgi en yüksek öncelikte olup, bunu takip eden ölçüm onaylama ve elde edilen veriden tipik batarya verisi üretmektir. Veri değerlendirme, birincil olarak dizi kontrolüyle yapılan olası ölçüm hatalarının saptanmasıdır. Seviye kontrolü, teçhizatla ölçülen değerlerin, olası seviyenin en üst ve en alt sınırları arasında kaldığının teyidi amacıyla, sistemdeki noktalar hakkında bilgi verir. Teçhizat arızası kolaylıkla tesbit edilebilir. Temel olarak veri düzeltme veya dengeleme doğrulama amacıyla veri değerlendirme yöntemleri kullanılır. Bu, yüksek veri kalitesi ve güvenilirliği elde etmek için yapılır.

Özellikle geniş aralıklarda ölçüm durumunda, birkaç amperden 1 kA seviyesine kadar batarya akımını ölçmede, sonraki onaylama kavramları veri kalitesi hakkında ek bilgi edinmek için kullanılır. Şarj durumunu belirten, deşarj olmuş Ah

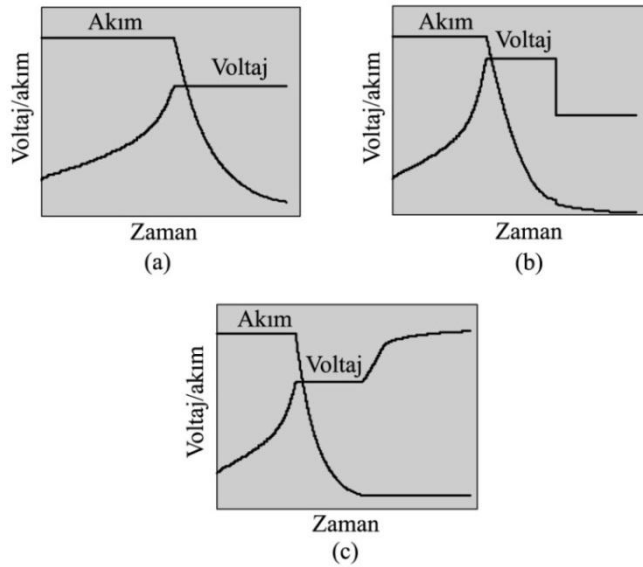
gibi batarya özel verisi, direkt olarak ölçülemez. Bu yüzden hesaplanmaları gerekir. Hesaplanan veri, bataryanın rezerv gücünü ve ızgarada gerekli çalışma zamanını tahminde bir temel oluşturur. İki değer optimize edilmiş çalışma sağlar.

Batarya dizilerinin nispeten yüksek d.c. voltajı, veri edinmeyle ilgili problemlere neden olur. Bu problemten kaçınmak için gerekli voltaj ayırımı kabiliyetini sağlayan özel modüller kullanılır. Bu modüllerin kendi kontrol sistemleri vardır ve köprüler diye adlandırılan genel kontrol sistemine bağlanabilirler. Transfer edilen veri, sadece ölçülen değer değil, aynı zamanda komutlardır. PLD (Programlanabilir Lojik Cihaz), konvertörlere ve diğer çevresel birimlere sinyaller göndererek veri yayılmasını sağlamak için kararlar üretmekten sorumludur. Bu komutlar, konvertörleri aktive ederek veya durdurarak, güç aktarımı için gerekli değerleri belirleyerek, yardımcıları aktive ederek veya durdurarak vs. enerji depolama modüllerinin mod ve durumlarını etkiler. PLD tarafından proses kontrolü yapılırken, bir operatör bir görüntüleme sistemi vasıtasıyla etkileşime geçebilir. Dahası, görüntüleme sistemi proses durumu hakkında bilgi verir ve veritabanını kontrol eder. Bu sistemlerden sağlanan deneyim, çok fonksiyonlu batarya enerji depolama sistemlerinin başarılı şekilde yenilenebilir enerji kullanımını geliştirebildiğidir. Bu, bataryaların güneş ve rüzgâr güç sistemleriyle bir elektrik şebekesine bağlanarak nasıl birlikte kullanıldığına bir örnektir. Özellikle elektrik şebekelerinin karışıklıklarına birçok işletim sisteminin duyarlılığının artmasıyla ortaya çıkan yüksek kaliteli güç talebi sebebiyle, gelecekte büyük kurşun-asit bataryalar için artan bir pazar oluşacaktır. Sıcaklığın homojen olmayışı gibi durumlarda, potansiyel zorluklardan kaçınmak için, dikkatli bir tasarım, özellikle büyük bataryalar için gereklidir. Birkaç dakika süresince yüksek güç gerektiren özel sabit uygulamalar için, OCSM tasarımı temelli bataryalar mevcuttur. OCSM tipinde, negatif bakır ızgaralar vardır, ancak pozitif kısım, tüp şeklinde plakayla kıyaslandığında, oldukça ince olan düz plakayla değiştirilmiştir. Bu, aynı hücre hacminde daha çok plaka çiftinin kullanılmasını ve daha iyi güç deşarj performansını mümkün kılmıştır. OCSM deşarj performansı çok daha iyidir. Büyük bataryalar, çeşitli kullanım uygulamalarında, hızla büyüyen bir pazara sahiptirler. Geçmişte sulu bataryalar için olan pazar, valf kontrollü bataryalar lehine değişmektedir [Broussely et al., 2007].

10. SİSTEM KARAKTERİSTİKLERİ

10.1. Şarj

Özel çalışma koşullarının bir sonucu olarak, tam şarj nadiren gerçekleşir. Şarj vedeşarj çevrimleri birbirini sık takip eder. Uzun batarya ömrü için tam şarj gereklidir. En yaygın şarj stratejisi, sabit akım/sabit voltaj modudur (IU). Otonom güç sağlama sistemlerinde bu, bataryanın tam güçle batarya voltajı belirlenen şarj-sonu voltajına erişinceye kadar şarj edildiği anlamına gelir. Bu andan itibaren, bataryaya şarj gücü, bu voltaj sınırı aşılmayacak şekilde sınırlandırılır (sabit voltaj modu). Daha gelişmiş bir şarj metodu, şarjın sabit akım/sabit voltaj şarjıyla başlaması ancak maksimum voltajın belirli bir andan itibaren daha düşük bir değere düşürülmesidir (IU_0U). Bu, daha yüksek voltajlara ilk sabit-voltaj evresinde izin verir, ancak uzun süren yüksek voltajın sebep olduğu gazlaşma ve korozyon gibi olumsuz etkileri önler. Bu nedenle bu şarj, bataryada tehlikeli durumlar oluşturmadan hızlı şarja imkân verir. Özellikle VRLA bataryalar için uzun ömür, sabit akım/sabit voltaj/sabit akım (IUI_a) şarjı ile sağlanır. Sabit voltaj evresinde akım I_a şarj limitinin altına düştükten sonra şarj, sabit akımla sınırlı bir süre veya miktarda devam eder. Voltaj bu evrede sınırlandırılmaz, ancak I_a akımı I_{50} den I_{100} seviyesine düşürülmelidir.



Şekil 10.1. Değişik şarj rejimlerinin şeması [Luque et al., 2003].

Değişik şarj rejimlerinin şeması (Şekil 10.1)'de görülmektedir. (a) Sabit akım/sabit voltaj şarjı IU, (b) İki şarj sonu sınırlı sabit akım/sabit voltaj şarjı IUU₀, (c) Sınırlı sabit akım evresiyle devam eden sabit akım/sabit voltaj şarjı IUI_a. Günlük sınırlı şarj nedeniyle sistemlerin tam şarjı nadiren gerçekleşir. Bu nedenle, tam şarj terimi gerçek tam şarj teriminden, yani tüm aktif maddenin şarj olmuş maddeye dönüşümünden farklıdır. Pratik şarj veya rüzgâr-güneş şarjı 2.4 V/hücre batarya voltajında en az 5 saat gerektirir. Her dört haftada bir tam şarj önerilir. Sistemlerde bulunan bataryalar için şarj-sonu voltajı 2.4 V/hücre olmaktadır ancak bu voltajda süre günlük iki saatle sınırlıdır. Günün kalan zamanında (eğer şarj gücü yeterliyse) batarya voltajı 2.3 V/hücreyle sınırlandırılmalıdır. Önemli bir ömür uzaması, batarya gerçek tam SoC değerine yılda en az iki kez şarj edilerek sağlanır. Bu, güneş ya da rüzgâr ile tam SoC değerine şarj edildikten sonra yaklaşık I₁₀ ile tamdeşarjıyla elde edilir. Deşarj, IUI_a şarj rejimiyle tekrar şarjla devam etmelidir. Şarj sonu voltajı sınırı batarya çalışma koşuluna ve sıcaklığa bağlıdır. Artan sıcaklıkla voltaj azaltılmalıdır ancak 2.25 V/hücre altına düşmemelidir. Sıcaklık 25 °C'ın altında iken voltaj artırılmalıdır ancak 2.6 V/hücre üstüne çıkmamalıdır [Luque et al., 2003].

10.1.1. Özel Şarj Ediciler İçin Karakteristikler

Tampon (float) şarj, sabit voltajla sürekli şarjdır. Batarya voltajının yaklaşık 0.1 V üzerindedir (DIN 2.23 V / hücre). Bu, kendiliğindendeşarj kayıplarını karşılamak için veya batarya uzun bir süre kullanım dışı olduğunda kullanılır. Kendiliğindendeşarj, bataryanın tipine ve yaşlanmasına bağlıdır. Bakım gerektirmeyen hücreler daha duyarsızdır ve şarjsız yaklaşık 1 sene civarında aktif durabilirler. Ayrıca, sıvı elektrolitli düşük bakım bataryaları şarjsız 6 aya kadar depolanabilirler. Ön koşul, daima tam şarjlı bataryadır. Yaşlanmış bataryalar her gün %1'e kadar kendiliğindendeşarj oranı gösterir. Kendiliğindendeşarjı karşılamak için sabit voltajlı şarj ediciler (IUI tipi gibi) kullanılabilir. Batarya 6-8 hafta aralığında bir şarj ediciye bağlanabilir. Bu yöntemin avantajı, özel bir şarj ediciye gereksinim duymamasıdır. Bakım gerektirmeyen hücreler dikkatli tampon şarja ihtiyaç duyar, aşırı su kayıplarını önlemek için bir otomatik şarj edici en iyisidir. Bu yöntem tüm bataryalar sürekli çalışmada olmadığında tercih edilir. Dengeleyici şarj, aktif malzemedeki sülfatın giderilmesi için (örneğin 5 iş günü) operasyon evreleri sırasında gereklidir. Tam şarj, sabit voltaj metoduyla yapılamaz. Elektrolit

katmanlaşması gaz fazında 2.4 V/hücre üzerinde şarjla dengelenebilir. Valf kontrollü kurşun-asit hücreler (VRLA) elektrolit katmanlaşması göstermez ancak bu hücrelerin hassaslığı, normal şarjı tam şarj olmadığından haftalık denge şarjının gerekmesidir. Modern şarj edicilerin, şarjları dengelemek için (örneğin hafta boyunca) uzun süreli çalışma kesintilerinde dengeleyici şarjı otomatik olarak uygulayan karakteristikleri vardır. Başarılı denge şarjının ölçütü, elektrolit yoğunluğudur. Bu sadece bacalı hücrelerde ölçülebilir. Valf kontrollü hücreler, şarj veya bir kapasite testi sonrası voltajın kontrolünü gerektirirler. Yükseltici (booster) şarj, gazlaşma voltajıyla sınırlı hızlı şarjdır. Bu tür yükseltici şarjlara uğramış bataryaların servis ömrü kısalmaktadır ama bataryadan çalışma sırasında alınan toplam kapasite azalmamaktadır. Normalde yükseltici şarj, batarya maliyetlerini azaltır. En kritik şarj, sülfatlaşmayı engellemek için olandır. Derindeşarj sıkça olduğunda, bataryayıdeşarj edilmiş durumda bırakmak, aktif malzemenin sülfatlaşmasıyla sonuçlanır. Sülfatlaşma genelde normal dengeleyici şarjla tümüyle yok edilemez. Sülfatlaşma belirtisi, kapasite ve performans kayıpları, hızlı voltaj değişimi ve şarj sırasında sıcaklık artmasıdır. Bacalı hücrelerde sülfatlaşma etkileri, elektrolit yoğunluğu nominal yoğunluğa ulaşmadığında, ölçülerek gözlemlenebilir. Sülfatlaşmanın tümüyle önlenmesi ekonomik olarak mümkün değildir. Kontrollü bir işlemle, 1.5 şarj faktörüne ulaşılanada 0.1 ve 0.15 A/100 Ah arasında akımla şarj başarılı olabilir. Bu işlem gün veya haftalarca zaman gerektirir [Kiehne, 2003].

10.1.2. Bataryaların Kullanım ve Hızlı Şarjı

Kullanım şarjından bataryanın nadirendeşarj olduğu yerlerde faydalanılır. Kullanım şarjının uygulanabileceği tipik bir uygulama, kullanım şarj edici, batarya ve paralel yükten oluşur. Normal çalışma sırasında yük, gücü şarj ediciden alır. Şarj ediciye besleme durdurulduğunda, batarya beslemeye katılır. Bataryanın kullanım şarjı, bataryayı düşürülmüş voltajda şarj etmektir. Bu düşürülmüş voltaj, aşırı şarj ihtimalini azaltır. Kullanım şarj edicisi, bataryanın hep şarj edilmiş durumda olmasını sağlar. Kullanım şarj edicisi bataryaya bir şarj voltajı uygular. Şarj gerçekleştikçe bataryanın şarj akımı dereceli olarak azalır. Kullanım şarj edicisi, şarj akımındaki azalmayı algılar ve şarj voltajını düşürür. Batarya boşalmaya başlarsa, kullanım şarj edicisi şarj voltajını tekrar arttırır ve işlem devam eder.

Hızlı şarj, genellikle batarya aşırı deşarj olduğunda bataryayı şarj etmek için kısa süreyle yüksek akım verilmesidir. Hızlı şarj, tüketilmiş bataryaların süratle yüklenmesini sağlar. Deşarj olmuş 2 voltluk bir kurşun-asit batarya önce yaklaşık 2.35-2.4 V şarj voltajında hızlı şarj edilir. Ancak, bataryanın voltajı arttıkça, şarj edici 2.25 V kullanım voltajıyla kullanım şarjı moduna geçer. Çoğu batarya şarj edici, hızlı şarjı ve kullanım şarjını sağlayacak donanımlıdır [URL-3].

10.1.3. Kullanım Voltajı ve Kullanım Akımı

Çalışma sıcaklığı 15 °C ile 35 °C aralığında değişirse şarj voltajının ayarı gerekli değildir. Eğer çalışma sıcaklığı bu aralığın dışında kalırsa, şarj voltajı düzenlenmelidir. Hücre başına voltajın hücre sayısıyla çarpımı batarya kutuplarında ölçülmelidir. Tüm şarj (kullanım, hızlı) bir IU karakteristiğinin sınır değerlerine göre yapılmalıdır: I sabit: $\pm\%2$; U sabit: $\pm\%1$. Bu sınırlar kullanılan redresörlerin toleransını tanımlar. Belirtilen değerlere şarj voltajı ayarlanmalıdır. Alternatif akımlar ve yüklerden gelen reaksiyonlar, batarya sıcaklığının aşırı artmasına yol açarak, elektrotları gerebilir ve dolayısıyla batarya ömrünü kısaltabilir. Kullanım şarjı sırasında bir tam şarjda alternatif akımın değeri 5A/100Ah nominal kapasiteyi aşmamalıdır.

10.2. Güç Performansının Geliştirilmesi

Bir bataryadan sağlanan güç P, deşarj akımı I ile batarya voltajı U nun çarpımı olarak ifade edilir. Burada R_i bataryanın iç elektrik direncidir.

$$P = (U_0 - IR_i) * I \quad (10.1)$$

Maksimum akım kısa-devre akımıdır I_s 'dir:

$$I_s = U_0 / R_i \quad (10.2)$$

Maksimum Güç $P_{\max}$, $U = 1/2 U_0$ dan sağlanabilir;

$$P_{\max} = U_0^2 / 4R_i \quad (10.3)$$

Bu nedenle maksimum güç, açık devre voltajının (OCV) artmasıyla ve/veya iç elektrik direncin azalmasıyla artırılabilir. Açık devre voltajı (OCV) temelde elektrot çiftiyledir. Kurşun-asit batarya durumunda, açık devre voltajı hücre başına yaklaşık 2.1 V olmaktadır. Esasında açık devre voltajı sülfürik asit konsantrasyonuna bağlıdır. İç elektrik direnci oldukça karmaşıktır ve sadece bir çift elektriksel direnci değil ayrıca polarizasyonu da içermektedir. Eğer sadece elektrolitin öz direnci düşünülürse, P_f güç faktörü şöyle hesaplanır;

$$P_f = U_0^2 / \rho \quad (10.4)$$

Çeşitli batarya tipleri için hesaplanan güç faktörleri içinde en yükseği kurşun-asit sisteminkidir. Sebebi, kurşun-asit batarya U_0 açık devre voltajının nispeten yüksek (2.1 V), ρ sülfürik asit öz direncinin oldukça düşük (1.1 Ωcm) olmasıdır [Broussely et al., 2007].

10.2.1. Asit Katmanlaşması

Asit katmanlaşması terimi, bir hücre içinde homojen olmayan dikey asit dağılımını tanımlar. Kaynakları yetersiz şarj ve yerçekimi etkisidir. Asit katmanlaşması bir yaşlanma prosesi değildir ama bataryanın çalışma performansını etkiler. Mevcut kapasiteyi azaltır ve akım/voltaj karakteristiklerini değiştirir. Elektrotlarda homojen olmayan akım dağılımına neden olur. Sülfatlaşmayı artırır, bu en büyük yaşlanma etkisidir. Bu nedenle, asit katmanlaşması yaşlanma için bir nedendir ve kendisi yaşlanma etkisi değildir. Sulu bataryalarda asit katmanlaşması elektrolitin karıştırılmasıyla hemen giderilebilir. Elektrolit fonksiyonlarının elektrot reaksiyonunun aktif bileşeni olmasından dolayı, yoğunlukta yerel farklılıklar ortaya çıkabilir. Sonuçta, asit yoğunluğu hücrenin üst kısmında azalır ve alt kısmında artar. Konsantrasyon farkıyla bağlantılı potansiyel fark, elektrotun alt kısmının deşarjına neden olur. Bu geri çevrilmez yaşlanma etkisiyle sonuçlanır (sülfatlaşmaya yol açar). Sıvı elektrolitli bataryalarda, asit katmanlaşması aşırı şarjla elimine edilebilir (gaz üretimiyle ilişkili). Aynı karıştırma etkisi elektrolitin aktif sirkülasyonu ile meydana getirilebilir. Elektrolit katmanlaşması hareketsiz elektrolitli bataryalarda oluşabilir.

Jel bataryada etki düşüktür ve bu nedenle az ilgilidir. AGM bataryalarda asit katmanlaşması derecesi, cam elyafın kalitesine çok bağlıdır. AGM teknolojiye büyük batarya hücreleri, asit katmanlaşmasından kaçınmak için yatay kurulumlar. VRLA bataryayla ilgili problem, var olan asit katmanlaşmasının yok edilememesidir. Asit katmanlaşmasıyla düşük akımlar, önemli ölçüde elektrotun alt kısımlarının düşük şarjına neden olur. Üst kısım çok yüksek şarj durumuna ulaşabilirken alt kısım tam şarj olmayabilir. Bu, elektrotun alt kısmının, elektrotun ortalama şarj durumundan daha az şarj durumunda çevrimde olması anlamına gelir. Uzun periyotlar için alt kısım tam şarj olmadan çevrim yapar [Luque et al., 2003].

Asit katmanlaşması özellikle periyodik uygulamalar sırasında meydana gelir. Güçlü korozyon gibi nedenlerle kısa batarya ömrüne neden olur. Konsantre olmuş sülfürik asit, tüm tekrar şarj işlemlerinde meydana gelir. Seyreltilmiş asitle karşılaştırıldığında, daha yüksek bir özgül ağırlığa sahiptir. Bu nedenle, aktif malzeme gözeneklerini bıraktıktan sonra direkt olarak hücre mahfazasının aşağı bölgelerine çökme eğilimindedir. Bir hücrenin üst kısmında asit konsantrasyonu 1.10 kg/l iken alt kısımlarda 1.40 kg/l'ye ulaşabilir. Asit katmanlaşması şu şekilde önlenabilir:

Gözenekleri terk edişinden hemen sonra meydana gelen sülfürik asitin yüksek emilişi (aktif malzeme gözeneklerinden kaçarak). Bu nedenle, jel bataryalar katmanlaşma göstermezler. Bacalı bataryalar durumunda (serbest yüzen elektrolit) katmanlaşma önlenemez ve gaz yayılmasıyla şarjın sonunda karşılanması gerekir. Gaz kabarcıkları elektroliti karıştırır. Aynı etkiye, dışarıdan hava vermeye de ulaşılabilir. Bir tekrar şarj prosesi şarj katsayısıyla ifade edilir (şarj faktörü de denir). Aşağıdaki değerler şarj katsayılarını 10 saat deşarjdan sonra ifade etmektedir;

- 1.04'den 1.06'ya, tipik olarak 1.05, jel bataryalar için,
- 1.05'den 1.12'ye, tipik olarak 1.08, AGM bataryalar için,
- 1.15'den 1.30'a, tipik olarak 1.20, bacalı bataryalar için.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, şarj katsayıları göz önüne alınarak Bacalıyla AGM ve Jel bataryalar arasında açık farklar görülmektedir. Jel bataryalarda, asit katmanlaşması tümüyle sıfırdır [URL-1].

10.2.2. Sülfatlaşma

Elektrotlar deşarj olduğunda, aktif kütleler, PbO_2 ve Pb , kurşun sülfata ($PbSO_4$) dönüştürülür. Oluşturulan sülfatın boyutu, deşarj akımının kuvvetine bağlıdır (yüksek deşarj akımları küçük sülfat kristalleriyle sonuçlanır). Eğer bir batarya deşarj edildikten sonra tekrar şarj edilmezse, tekrar-kristalleşme prosesleri sonucunda sülfat kristalleri büyür. Tekrar-kristalleşme oranı sülfat iyonlarının çözünürlüğüyle lineer ilişkilidir. Sülfat iyonlarının çözünürlüğü, azalan asit konsantrasyonuyla artar. Bu nedenle, düşük şarj durumu periyotları (böylece düşük asit konsantrasyonları ve yüksek sülfat çözünürlüğü) geniş sülfat kristalleri büyümesini hızlandırarak bataryaya zarar verir. Sonraki şarj sırasında, nispeten küçük aktif yüzeyli geniş sülfat kristalleri küçük olanlardan daha yavaş tekrar çözünür. Böylece sülfat kristalleri şarj bitmeye yakın halen mevcut olurlar. Bu kalan sülfat kristalleri birikebilir, aktif kütleyi ve kullanılabilir kapasiteyi azaltır. Sülfatlaşma, her deşarj işlemi ardından derhal yeterli tam şarj uygulayarak en düşük seviyeye indirilebilir. Sülfatlaşmanın sonucu olarak, normal şarj ve deşarj operasyonları için mevcut aktif materyal miktarı azalır. Bu, kapasiteyi azaltır ve deşarj sırasında voltaj da düşük değerler alır [Luque et al., 2003].

10.2.3. Korozyon

Pozitif elektrottaki yüksek pozitif potansiyel, kurşun ızgaranın korozyonuyla sonuçlanır. Bu, ızgara kesitinin düşmesine neden olur. Böylece ızgara direnci artar. Diğer taraftan, kurşun-dioksit, kurşun-oksit ve kurşun-sülfat içeren bir tabaka, ızgara ve aktif malzeme arasında oluşur. Bu, ayrıca temas direncini artırır. Bu, şarj ve deşarj sırasında artan bir ohmik voltaj düşüşüyle belirginleşir. Korozyon oranı, asit yoğunluğuna, elektrot potansiyeline, sıcaklığa, ızgara alaşımına ve en önemli faktör olan ızgaranın üretim kalitesine bağlıdır. Korozyon özellikle 2.0 V altı ve 2.4 V üzeri hücre voltajlarında oluşabilmektedir. Korozyon 2.23 V hücre voltajı civarında minimumdur. Korozyon geri dönüşü olmayan yaşlanma etkisidir ve bataryanın iç direncini artırır. Kalın ızgaralar korozyon etkisini azaltmak ve böylece ömrü uzatmak için kullanılır [Luque et al., 2003].

10.2.4. Isı Yayılmı ve Dağıtımı

Ayırıcı/elektrolit içinde daha az boş hacimden dolayı jel bataryalar oksijen tekrar-birleşmesinde AGM bataryalarla karşılaştırıldığında daha az ısı yayılımı ortaya çıkarırlar. Jel bataryalardaki ısı dağıtımı elektrolit fazlalığından dolayı AGM bataryalardan çok daha iyidir. Jel bataryaların elektroliti, AGM gibi sadece içeride ve plakalar arasında değildir. Jel, tümüyle şeritlerin yüksek bir seviyesinde doldurulur ve mahfaza duvarlarıyla direkt temastadır. Böylece, mükemmel ısı dağıtımı garantilenir. Verimli ısı dağıtımı, ağır koşullar altında çalışan bir VRLA batarya içinde termal kaçaklardan kaçınmak için gereklidir (yüksek çevre sıcaklığı, eksik veya yetersiz havalandırma, şarj voltajının eksik veya yanlış olması hallerinde). Aslında, termal kaçak jel bataryalarda şimdiye dek oluşmamıştır [URL-1].

10.3. Batarya Davranışı Tahmini Modeli

Genelde bir kurşun-asit batarya temel olarak şarj durumu (SOC) ve denge voltajı veya kutup voltajı ile karakterize edilir. Bataryanın SOC modeli amper-saat ölçme metoduyla kurşun-asit bataryanın SOC davranışını simüle etmek için meydana getirilmiştir. Ancak bu yöntem yanlış akım ölçme nedeniyle büyük hatalarla sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle hibrit güneş-rüzgâr güç üretim sistemi için bir denge şarjı voltajı modeli ayrıca bataryanın SOC modelini tekrar kalibre etmek ve bataryanın voltaj değişimini simüle etmek için tanımlanmıştır [Zhou et al., 2008].

10.3.1. Batarya Şarj Durumu Modeli

SOC gösteriminin düşük güvenilirliği, istenmeyen durumlara: Tam şarj olmama, aşırı deşarj olma veya aşırı şarj olma gibi durumlara neden olabilir. Bataryada SOC saptanması, batarya tipine ve bataryanın kullanıldığı uygulamaya bağlıdır. Amper saat ölçme yöntemi benimsenen bir çalışma örnek verilmiştir. Bataryanın gerçek SOC değerini tam bilebilmek için başlangıç noktasında batarya SOC değerinin, şarj veya deşarj zamanı ve akım değerinin bilinmesi gerekir.

$$SOC = SOC_0 + \int_{t_0}^t \left(\frac{I_{bat}}{C_{bat}} \right) d\tau \quad (10.5)$$

Burada SOC_0 bataryanın başlangıç SOC değeridir; t_0 başlangıç zamanı ve t zamandır (saat). C_{bat} batarya kapasitesidir (Ah). I_{bat} batarya akımıdır. Eşitlik 10.5 mükemmel bataryalar için batarya SOC değerinin hesaplanmasını göstermektedir. Ancak gerçekte, batarya şarjı ve deşarjı ve depolama periyotları sırasında kayıplar oluşur. Bu faktörler göz önüne alınarak gerçek batarya SOC değeri şu şekilde tanımlanır;

$$SOC = SOC_0 \left[1 - \frac{\sigma}{24} (t - t_0) \right] + \int_{t_0}^t \left(\frac{I_{bat} \eta_{bat}}{C_{bat}} \right) d\tau \quad (10.6)$$

Burada σ biriktirilen şarja ve batarya sağlık durumuna bağlı olarak kendiliğinden deşarj oranıdır, önerilen değer %0.2/gündür. η_{bat} batarya şarj ve deşarj verimliliğidir. Şarj işleminde giriş enerjisinin sadece bir kısmı gerçekte depolanabilir. Ortalama şarj verimliliği için %90 kullanılmaktadır, ancak %100 deşarj verimliliği tavsiye edilmektedir.

Tüm kimyasal prosesler gibi, batarya kapasitesi C_{bat} 'de sıcaklığa bağlıdır. Kinetik parametrelere bağlı sıcaklık nedeniyle, batarya kapasitesi azalan sıcaklıkla %0.5-1/°C oranında azalmaktadır. Genelde batarya kapasite değişimleri sıcaklık katsayısıyla ifade edilir δ_C ;

$$C_{bat} = C'_{bat} (1 + \delta_C (T_{bat} - 298,15)), \quad (10.7)$$

Burada C_{bat} sıcaklık T_{bat} olduğunda, bataryanın mevcut ya da pratik kapasitesidir (Ah). C'_{bat} bataryanın nominal veya anma kapasitesidir. Bu, üretici tarafından verilen bataryayı karakterize eden kapasitedir. Genelde nominal çalışma koşullarında tanımlanır. $\delta_C = 0.006$ veya %0.6/°C sıcaklık katsayısı üretici tarafından başka değer belirtilmemişse kullanılır.

Hibrit güneş-rüzgâr sisteminde, FV modülü ve rüzgâr türbinini içeren enerji kaynağı, yük talebini karşılamak için birlikte çalışır. Eğer kablo kayıpları ihmal edilirse, batarya akımı I_{bat} kısaca şöyle tanımlanır;

$$I_{bat} = \frac{P_{FV} + P_{rüzgâr} \eta_{redresör} - P_{yük} / \eta_{invertör}}{V_{BAT}} \quad (10.8)$$

Burada P_{FV} , $P_{rüzgâr}$, ve $P_{yük}$ sırasıyla FV dizinin, rüzgâr türbininin ve yükün gücüdür (W). V_{BAT} batarya voltajıdır (V). Redresör rüzgâr türbininden aldığı AC gücünü DC sabit voltaj gücüne dönüştürür ve redresör verimliliği $\eta_{redresör}$ sabit olarak düşünülür, burada %95'dir. İnvertör verimliliği $\eta_{invertör}$ yük profiline ve invertöre göre %92 olarak düşünülmüştür [Zhou et al., 2008].

10.3.2. Batarya Denge Şarjı Voltaj Modeli

Bir bataryanın denge şarjı voltajı (veya kutup voltajı) genelde açık devre voltajıyla ifade edilir. Şarj vedeşarj durumlarına karşılık batarya denge şarjı voltaj karakteristikleri eğri uydurma yöntemiyle modellenir. Bu, batarya denge şarjı voltaj değişimlerini bir polinomla bataryanın SOC ve akımı türünden ifade eder.

$$V'_{bat} = a(SOC)^3 + b(SOC)^2 + c(SOC) + d \quad (10.9)$$

Burada V'_{bat} batarya denge şarj voltajıdır. Batarya voltaj tahmininde sıcaklık etkisini hesaba katmak için sıcaklık katsayısı δ_T uygulanır:

$$V_{bat} = V'_{bat} + \delta_v (T_{bat} - 298.15) \quad (10.10)$$

Burada V_{bat} sıcaklık etkileri düşünülerek kalibre edilen batarya voltajıdır. Sıcaklık katsayısı δ_v : -4mV/°C/2V hücre olarak sabit alınır.

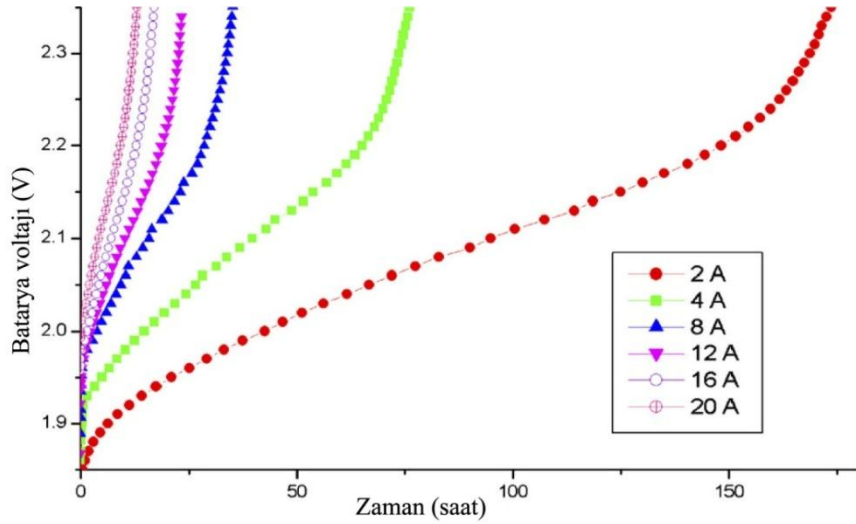
a-d parametreleri Eşitlik 10.9 batarya akımının I_{bat} fonksiyonlarıdır ve şu ikinci derece polinom eşitliğiyle hesaplanır;

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ d_1 & d_2 & d_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{bat}^2 \\ I_{bat} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10.11)$$

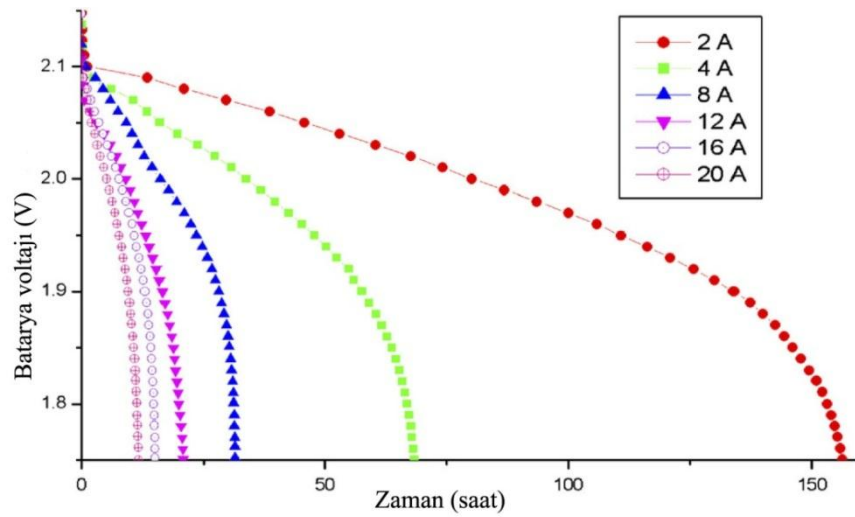
Burada $a_1, a_2, a_3, \dots, d_1, d_2, d_3$ parametreleri en küçük kareler metodu kullanılarak batarya performans verisine eşitlikler uygulanarak saptanır. Bu örnekte deneysel metod kullanılmıştır [Wei Zhou, et al., 2008].

a) Deneysel tanımlama

Kullanılan bataryalar GFM-1000 kurşun-asit bataryalardır. Hibrit güneş-rüzgâr güç üretim projelerinde kullanılanların aynısıdır. Bunlar yenilenebilir enerji uygulamaları için derin deşarj edilebilen, 1000 Ah kapasitede, 10 saat deşarj zamanlı kurşun-asit bataryalardır. Batarya voltaj tepkisini değişik batarya akımlarında almak için şunlar yapılmaktadır: Önce, batarya $I_{\text{şarj}}$ sabit şarj akımıyla, aşırı şarj koruma voltajına (2.35 V tavsiye edilen) şarj edilmektedir ve bu voltajda 20 saat tutulmaktadır. Voltaj, bu belli sürede değişmediği için, batarya tam şarjlı düşünülmektedir. İkinci olarak, batarya $I_{\text{deşarj}}$ sabit deşarj akımıyla, batarya voltajı derin deşarj koruma noktasına düşene kadar deşarj edilmektedir (1.75 V tavsiye edilendir). Bu iki aşama bir test çevrimi teşkil etmektedir. Sonra, akım oranı değiştirilerek bu iki aşama diğer çevrimleri tamamlamak için tekrar edilir. Tüm deney çevrimleri sırasında, batarya voltaj değişimleri bir TJDL-60 veri edinme sistemiyle 1 dakika aralıklarla kaydedilmektedir. Batarya voltaj değişimleri şarj ve deşarj akımları altında harici yük olmadan (şarj periyodu) veya harici güç sağlama olmadan (deşarj periyodu) ölçülmektedir. (Şekil 10.2) şarj periyodunu (Şekil 10.3) deşarj periyodunu göstermektedir.



Şekil 10.2. Değişik akımlarda batarya şarj prosesi [Zhou et al., 2008].



Şekil 10.3. Değişik akımlarda batarya deşarj prosesi [Zhou et al., 2008].

Değişik akımlar için batarya voltaj eğrileri yaklaşık 1 dakikada 1.85 V'a artmış ve sonra şarj prosesiyle batarya voltajı V_g gazlaşma voltajının üstüne çıkmıştır ($SOC \approx 0.95$). Bundan sonra, batarya aşırı şarj durumuna geçmiştir. Bu, bataryanın hemen hemen dolu olduğunu ve şarj almasını düşürmeye başladığını ifade etmektedir. Sonuç olarak, batarya voltajı bu voltajın maksimize edildiği doyma alanına ulaşınca dek hızlıca artmış ve batarya daha fazla enerji kabul edememektedir. Bu nedenle gözlemlenen, kurşun-asit bataryanın şarj koşulları altında 1.85-2.35 V voltaj sınırında çalışmakta olduğudur ve bu örnekte batarya şarj davranışı analizi bu voltaj

seviyesine odaklanmaktadır. Benzer bir durum deşarj testleri sırasında oluşmaktadır (Şekil 10.3). Batarya voltajının önce hızlıca 2.1 V'a düştüğü saptanmıştır ve sonra aşırı deşarj bölgesine ulaşınca kadar sürekli elektrik deşarjı sağlamaktadır. Burada batarya voltajı bataryanın elektrokimyasal reaksiyonlarının nonlinear etkilerinden dolayı hızlıca düşer. Bu nedenle, deşarj analizi için 1.75-2.1 V çalışma voltaj seviyesi tavsiye edilmektedir. Akım oranıyla ve batarya voltajıyla ölçülen zaman serisiyle, batarya SOC değeri şarj durumlarında şöyle hesaplanır:

$$SOC = \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} = \frac{\int_0^t I_{değ} \eta_{bat} dt}{C_{bat}} \quad (10.12)$$

Burada Q_{bat} bataryaya şarj edilen veya deşarj edilen amper saat değeridir (Ah). $I_{değ}$ değişen akımdır, $I_{deş}$ deşarj akımıdır. Batarya SOC değeri deşarj durumlarında şöyle hesaplanır:

$$SOC = \frac{C_{bat} - Q_{bat}}{C_{bat}} = \frac{C_{bat} - \int_0^t I_{deş} dt}{C_{bat}} \quad (10.13)$$

(b) Parametre tahmini

Ölçülen batarya verisi, hesaplanan batarya SOC değeri ile Eşitlik 10.11 parametreleri en küçük kareler yöntemiyle $I > 0$ ve $I < 0$ için hesaplanır. $I > 0$ batarya şarj prosesini ve $I < 0$ deşarj prosesini temsil etmektedir. Parametreler hesaplandıktan sonra batarya modeli simülasyonlar için kullanılabilir. Batarya denge şarjı voltajı modeli yardımıyla, batarya akımı, denge voltajı, geniş aralıkta şarj ve deşarj proseslerindeki akım değeri ile batarya SOC değeri arasındaki ilişki tam olarak tahmin edilebilir [Zhou et al., 2008].

10.3.3. Simülasyon ve Tekrar-Kalibrasyon Yöntemleri

Geliştirilen batarya SOC modeli ve batarya denge şarjı voltajı modeliyle birlikte, eğer başlangıç noktasında batarya voltajının yanısıra, her bileşenin güç üretimi veya güç tüketiminin zaman serisi (FV dizi, rüzgâr türbini, ve yük), ayrıca batarya sıcaklığının zaman serisi (sıcaklık etkileri düşünülerek) bilinirse, batarya voltajı, batarya akımı ve sonraki batarya SOC değeri şu yöntemlerle tahmin edilebilir:

- a) Bataryanın ilk durumu saptanmalıdır. Normal olarak, bataryanın voltajı ve bataryanın akımı başlangıç noktasında doğrudan ölçülebilir ve bataryanın ilk SOC değeri ölçülen batarya voltajı ve akımıyla yarılama metoduyla Eşitlik 10.9 çözülerek bulunabilir. Sonra, Eşitlik 10.10 kullanılarak sıcaklık etkisi göz önüne alınır.
- b) Sonraki zaman için batarya SOC değeri hesaplanır. Eşitlik 10.8 kullanılarak hesaplanan batarya akımıyla sonraki zamandaki bataryanın SOC değeri önceki SOC değeri temelli olarak amper saat ölçme metoduyla Eşitlik 10.6 kullanılarak saptanabilir.
- c) Sonraki batarya voltajı tahmin edilir. Aşama b'den hesaplanan batarya SOC ve batarya akımı kullanılarak batarya voltajı Eşitlik 10.9 ve Eşitlik 10.10 çözülerek elde edilebilir.
- d) Prosedürler b ve c bir çevrim oluşturur. Bu prosedürler tekrar ederek batarya voltajı batarya akımı ve batarya SOC değeri tüm ilgili zaman periyotları için hesaplanır.

Eğer batarya davranışı tahmini modeli sadece batarya SOC değişimlerini analiz etmek için kullanılıyorsa (batarya voltajı ve akımı ölçülmüşse veya biliniyorsa), amper-saat ölçme metodundan (Eşitlik 10.6) kaynaklanan tahmin hatasını minimize etmek için bazı tekrar-kalibrasyon yöntemleri kullanılır [Zhou et al., 2008].

Öncelikle batarya tam şarj durumundaysa, SOC değeri 1 alınabilir (batarya voltajının aşırı şarj koruma voltajından yükseğe çıktığı saptanırsa). Ancak yenilenebilir enerji uygulamalarında tekrar şarj için zaman sınırlıdır, dolayısıyla tam şarj nadiren gerçekleşir.

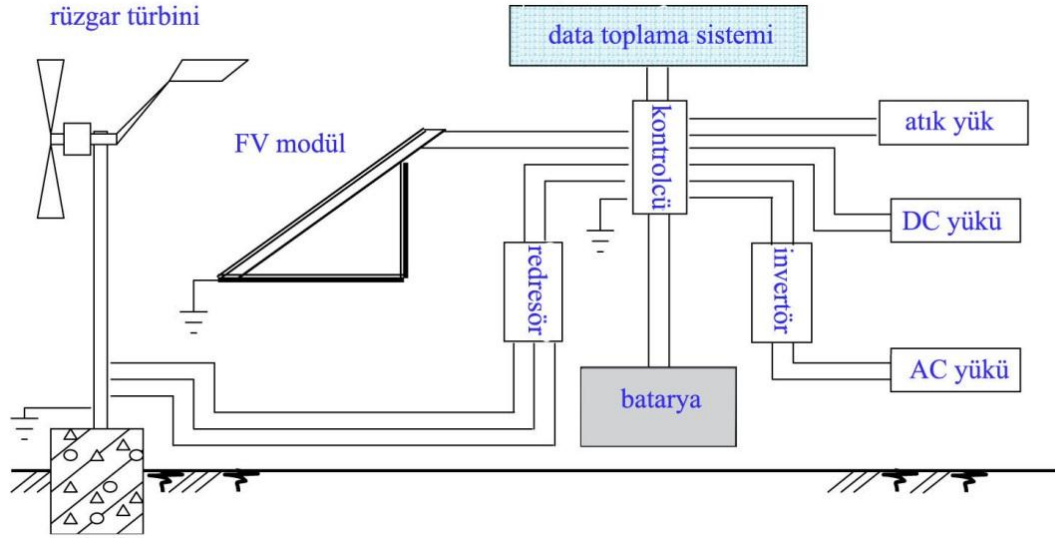
Batarya SOC değeri zaman serisi, batarya voltajı ve akımı kullanılarak da tekrar kalibre edilebilir. Batarya, yaklaşık sabit akımla belli bir süre şarj veyadeşarj edildiğinde, batarya çalışma durumu nispeten sabit farzedilebilir ve batarya SOC değeri Eşitlik 10.9 çözülerek bilinen batarya voltajı ve akımıyla hesaplanabilir. Tekrar-kalibrasyonla batarya SOC hesabı, amper-saat ölçme yönteminden daha hassas sonuç verir. Bu nedenle yeni hesaplanan batarya SOC değeri, sonraki batarya SOC hesaplarında esas alınır. Nispeten kararlı çalışma durumları, tam şarj durumlarından daha kolay değerlendirilebildiğinden, birçok tekrar-kalibrasyon noktası mümkün olabilir. Özellikle uzun süreli simülasyonlar için bataryanın SOC tahmini modeli hassasiyeti arttırılabilir.

10.4. Hibrit Güneş-Rüzgâr Gücü Üretimi Projesi

Tipik bir hibrit güneş-rüzgâr gücü üretimi sistemi, FV dizi, rüzgâr türbini, batarya, regülatör, yük ve kontrol sisteminden oluşur. Güç sağlama sisteminin blok diyagramı (Şekil 10.4)'de gösterilmiştir.

Bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi, iki veya daha fazla enerji üretim yöntemini kullanır. Bunlar, genellikle güneş ve rüzgârdır.

Güneş-rüzgâr hibrit sistemin en büyük avantajı, güneş ve rüzgâr gücü üretimini birlikte kullandığında sistemin güvenilirliğinin artmasıdır. Genelde, güneş olmadığında rüzgâr çok olabilir. Güneş modüllerine kıyasla rüzgâr türbinleri daha yüksek verimliliğe sahiptirler.



Şekil 10.4. Hibrit güneş-rüzgâr üretim sisteminin blok diyagramı [Zhou et al., 2008].

Batarya, FV dizisi ve rüzgâr türbiniyle birlikte yük talebini karşılamak için çalışmaktadır. Enerji kaynakları (güneş ve rüzgâr enerjisi) fazla olduğunda yük talebini karşıladıktan sonra üretilen güç, bataryayı beslemek için kullanılmaktadır. Batarya tam şarj olduğunda, FV modül grubu (Bu örnekte FV modülü üç gruba bölünmüştür) tek tek bağlantısı kesilerek güneş enerjisi üretimi durdurulur. Tüm FV modüllerin bağlantısı kesildiğinde, halen ekstra enerji varsa (rüzgâr türbininin güç üretimi yük talebinden daha büyüktür ve batarya tam şarjlıdır), atık yük birimi (elektrikli ısıtıcı) rüzgâr türbininden enerjiyi almak için açılır. Tersine, enerji kaynakları zayıfsa, batarya enerji yayar. FV dizisi ve rüzgâr türbininin yük gereksinimlerini karşılayabilmesi için batarya tam deşarj olana dek bu üniteleri destekler.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli ve ekonomik kullanabilmek için bir optimum boyut tasarımı yöntemi gereklidir. Bu örnekte, Hibrit Güneş-Rüzgâr Sistemi Boyut Optimizasyonu modeli (HSWSO) benimsenmiştir. Telekomünikasyon istasyonunun elektrik tüketimi, normal çalışmada, temel istasyon (24 V AC) tüketimi için 1300 W, mikrodalga haberleşmesi (25 V DC) için 200 W değerlerindedir. Proje gereksinimine göre 1500 W sürekli enerji tüketimi talep yükü olarak seçilmiştir ve detaylı tasarım parametreleri (Tablo 10.1)'de gösterilmiştir.

Tablo 10.1. Hibrit güneş-rüzgâr güç üretim projesinin parametreleri [Zhou et al., 2008].

	Yük	FV dizi	Rüzgâr türbini	Batarya kapasitesi
Tasarım	1500 W	100Wx78	6 kWx2	GFM-1000 (2 V)
parametreleri	(+24V)	7.8 kW	12 kW	5000 Ah (24 V)

GFM-1000 kurşun-asit bataryalar örnekte kullanılmıştır. Bu bataryalar hibrit güneş-rüzgâr enerjisi sistemlerinde, özellikle derin çevrim çalışmalarında kullanılmaktadır. Üretici 5000 Ah nominal kapasite C_{10} belirtmiştir. Bu, beş dizi derin deşarj kurşun-asit bataryası içermektedir ve her biri on iki adet seri bağlı 2 V/1000 Ah hücreleri içermektedir. Bu diziler, 24 V nominal çıkış voltajı vermektedir. Batarya enerji depolama kapasitesi, sistemin günlük enerji çıkışından üç kat fazla olduğundan, hibrit sistemden saatlik ve hatta günlük düzensiz güç sağlanması kolayca düzeltilebilmektedir. Sistem performansı için gerekli veriyi toplamak üzere, bir veri toplama ve aktarma sistemi kurulmuştur [Zhou et al., 2008].

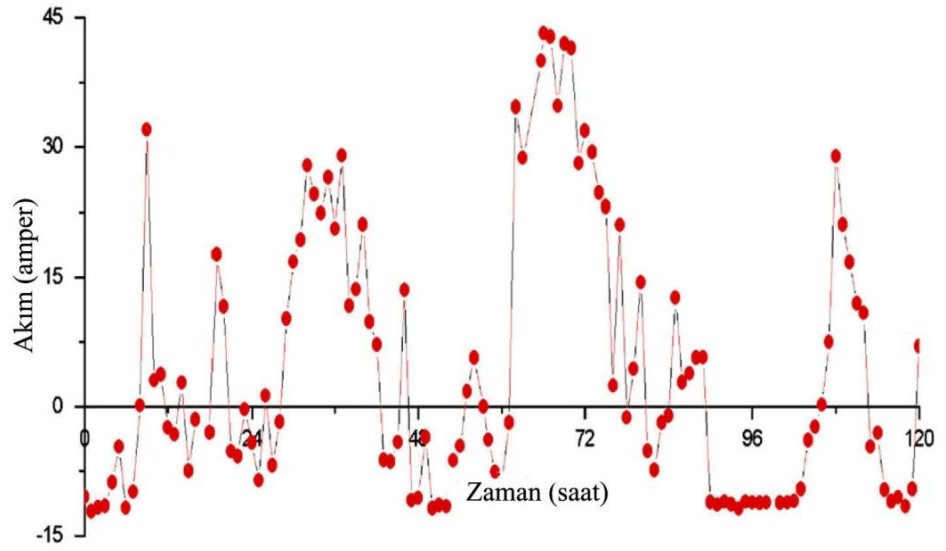
10.4.1. Batarya Kontrol Stratejileri

Batarya kontrol stratejisi, bataryanın ve enerji kaynaklarının verimli kullanımıyla, sistemin yük taleplerinin karşılanmasını sağlamayı hedefler. Bataryanın aşırı şarjını ve deşarjını sistem tasarımından ve mevsimsel yük profili değişimlerinden bağımsız olarak önleme kabiliyeti olmalıdır. Enerji kaynakları fazla olduğunda batarya şarj modunda çalışır. Batarya voltajı aşırı şarj koruma voltajına kadar arttığında, FV dizi bağlantısı kesilir ve atık yük birimi batarya voltajını eşik değerin altında tutmak amacıyla açılır. Deşarj modu için kontrol stratejisi, batarya voltajı aşırı deşarjdan korunma voltajı altına düşerek, bataryanın şiddetli deşarj olmasını, yükün bağlantısını keserek önler. Batarya voltajı yük tekrar bağlantı voltajına çıktığında, yük tekrar bağlanabilir. Değişik yük çeşitleri önceliklerine göre değişik kontrol stratejilerine sahiptir. Temel istasyon birincil yük olmaktadır. Bu, batarya voltajı derin deşarj koruma voltajı (23.4 V, ve $SOC \approx 0.2$) altına düşmedikçe kesilmez ve batarya voltajı deşarj tekrar bağlantı voltajı (24.4 V) üzerine çıktığında

tekrar bağlanır. İkincil yük (mikrodalga haberleşmesi için 200 W), diğer yük (havalandırma için 1500 W) ve atık yük (Tablo10.2)'de gösterilen kendi kontrol voltajlarına sahiptirler.

Tablo 10.2. Hibrit güneş-rüzgâr güç üretiminde yük kontrol stratejileri [Zhou et al., 2008].

	Birincil yük	İkincil yük	Diğer yük	Atık yük
İçerik	(1300 W)	(200 W)	(1500 W)	Hava ısıtıcı
Bağlantı kesme voltajı (V)	23.4	23.7	25	27.2
Tekrar bağlanma voltajı (V)	24.4	24.7	26.4	28.4



Şekil 10.5. Ölçülen batarya akım verisi [Zhou et al., 2008].

Batarya akımı ve voltaj verisi 5 gün sürekli olarak ölçülmüş ve model simülasyonunu göstermek için kullanılmıştır. Bu süre zarfında batarya akımı değişimi (Şekil 10.5)'de gösterilmiştir. Genelde, gündüz zamanı güneş ışınlamı

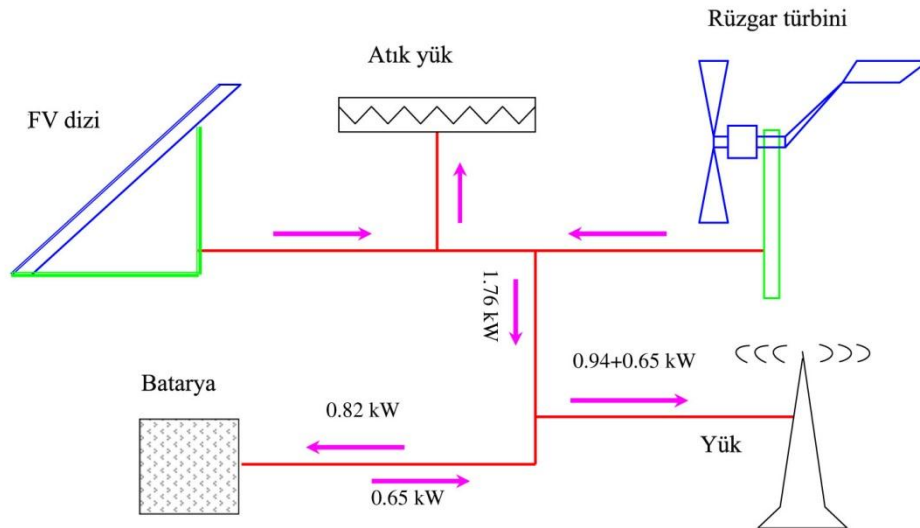
kuvvetli olduğunda daha fazla güç bataryaya verilmiştir. İstisnalar olabilmektedir. Üçüncü gün en büyük şarj akımı, rüzgâr gücü fazla olduğunda oluşmaktadır [Zhou et al., 2008].

10.4.2. Batarya Verimlilik Analizi

Çoğu depolama sistemi ideal değildir. Kayıplar, şarj ve deşarj çevrimlerinde ve ayrıca depolama periyotlarında oluşur. Bataryanın toplam enerji verimliliği ζ_{bat} bataryadan çıkış enerjisi $E_{çıkış}$ (kWh/yıl) ve toplam giriş $E_{giriş}$ (kWh/yıl) arasındaki oran olarak ifade edilir;

$$\zeta_{bat} = \frac{E_{çıkış}}{E_{giriş}} \times \%100 \quad (10.14)$$

Hibrit güneş-rüzgâr güç üretiminden bir yıllık verilerle hesaplanan güç kaynağı, yük ve batarya arasındaki yıllık ortalama enerji dengesi şekilde gösterilmiştir.



Şekil 10.6. Yıllık ortalama enerji dengesi.

FV diziden ve rüzgâr türbininden üretilen güç ortalama 1.76 kW olmaktadır. 0.82 kW batarya güç eksikliği periyodunda takviye için kullanılmak üzere, şarj etmeye ayrılmıştır. Kalan (0.94 kW) doğrudan yüke sağlanmıştır. 0.82 kW bataryaya girişle birlikte şarj, deşarj ve depolama periyotları sırasındaki kayıplar nedeniyle

sadece 0.65 kW mevcuttur. Böylece, bataryanın tüm verimliliği Eşitlik 10.14'den %79 olarak hesaplanır [Zhou et al., 2008].

10.5. Performans Modelleri

10.5.1. FV Dizi Performans Modeli

FV dizi performansı özellikle güneş ışınımından, FV modül sıcaklığından ve hava koşullarından oldukça etkilenir. Basitleştirilmiş bir simülasyon modeli FV modüllerin çeşitli çalışma koşullarında gerçek performanslarını tahmin etmek için sunulmuştur. Beş parametre (α , β , γ , R_s ve η) FV modül performansına tüm nonlinear çevresel faktörlerin etkisi düşünülerek alınmıştır. FV modülü tarafından iletilen maksimum çıkış gücü $P_{\text{modül}}$ şöyle yazılabilir;

$$P_{\text{modül}} = \frac{\frac{V_{OC}}{nKT/q} - \ln\left(\frac{V_{OC}}{nKT/q} + 0.72\right)}{1 + \frac{V_{OC}}{nKT/q}} \left(1 - \frac{R_s}{V_{OC}/I_{SC}}\right) I_{SCO} \left(\frac{G}{G_0}\right)^\alpha \frac{V_{OCO}}{1 + \beta \ln \frac{G_0}{G}} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^\gamma \quad (10.15)$$

Burada α foto-akımın bağlı olduğu tüm nonlinear etkilerin faktörüdür. β bir FV modül teknolojisi spesifik-bağlantılı boyutsuz katsayıdır. γ tüm nonlinear sıcaklık-voltaj etkileri düşünülerek hesaplanmış faktördür. FV modülü FV sistemin temel güç dönüşüm birimidir. FV dizi çıkışını ayarlamak için voltajı ve akımı ölçülendirmede FV modülünü seri ve paralel bağlamak zorunludur. FV modülü matrisi $N_s \times N_p$ düşünülürse FV sistemin maksimum güç çıkışı şöyle hesaplanır;

$$P_{FV} = N_p * N_s * P_{\text{modül}} * \eta_{\text{MPPT}} * \eta_{\text{oth}} \quad (10.16)$$

Burada η_{MPPT} maksimum güç noktası izleme verimliliğidir. Her ne kadar değişik çalışma koşullarına göre değişken olsa da, hesaplamaları basitleştirmek için

%95 sabit değeri farzedilir. η_{oth} kablo direncinden veya biriken toz gibi etkenlerden kaynaklanan diğer kayıpları temsil eden faktördür [Hongxing et al., 2009].

10.5.2. Rüzgâr Türbini Performans Modeli

Rüzgâr türbini gücü simülasyonları için uygun model seçmek çok önemlidir. Tipik rüzgâr türbini için, güç çıkışı karakteristiğinin üretilmeye başlamasının devreye sokma rüzgâr hızı v_c 'de olduğu farzedilir. Güç çıkışı, v_c ' den anma rüzgâr hızı v_R 'ye kadar lineer olarak artar. Anma gücü P_R , rüzgâr hızı v_R 'den rüzgâr türbininin güvenlik gereğiyle kapatıldığı v_F devreden kesme rüzgâr hızına kadar üretilir. Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için, devreye alma rüzgâr hızı nispeten düşüktür ve aşırı olmayan rüzgâr hızlarında bile rahatlıkla çalışabilirler. Rüzgâr türbini çıkış gücü (Eşitlik 10.17)'de verilmiştir [Hongxing et al., 2009].

$$P_{WT} = P_R \cdot \frac{v - v_c}{v_R - v_c} \dots (v_c \leq v \leq v_R) \quad (10.17)$$

$$P_R \dots (v_R \leq v \leq v_F)$$

$$0 \dots (v < v_c \text{ veya } v > v_F)$$

Hibrit güneş-rüzgâr sistemlerindeki kurşun-asit bataryalar özel koşullar altında çalışırlar. Genelde, bir kurşun-asit batarya iki temel indeksle karakterize edilir: Şarj durumu (SOC) ve denge şarj voltajı.

10.5.3. Batarya Şarj Durumu (SOC)

Bataryanın gerçek SOC değerini tam bilebilmek için, başlangıç SOC değeri, şarj ve deşarj zamanı ve akımın bilinmesi gerekir. Çoğu depolama sistemi ideal değildir, kayıplar şarj ve deşarj sırasında ve depolama periyotlarında oluşur. Bu faktörler göz önüne alınarak bataryanın $t+\Delta t$ zamanında SOC değeri şöyle hesaplanır;

$$\text{SOC}(t+\Delta t) = \text{SOC}(t) \left(1 - \frac{\sigma \cdot \Delta t}{24} \right) + \frac{I_{bat}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}}{C'_{bat}} \quad (10.18)$$

Burada σ biriktirilen şarja ve batarya sağlık durumuna bağlı kendiliğinden deşarj oranıdır. C'_{bat} bataryanın nominal kapasitesidir (Ah). η_{bat} batarya şarj ve deşarj verimliliğidir. Farklı şarj ve deşarj verimliliklerini ölçmek zordur. Deşarj verimliliği 1 alınır [Hongxing et al., 2009].

10.5.4. Batarya Denge Şarjı Voltajı

Batarya denge şarj voltajı etkisi, eğri uydurma yöntemiyle modellenir. Bu, batarya denge şarjı voltajını batarya SOC ve batarya akımı cinsinden bir polinomla ifade eder.

$$V_{bat} = A * (\text{SOC})^3 + B * (\text{SOC})^2 + C * \text{SOC} + D \quad (10.19)$$

Burada A, B, C ve D batarya akımı I'nın fonksiyonlarıdır ve şu şekilde hesaplanır;

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ d_1 & d_2 & d_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I^2 \\ I \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10.20)$$

Eşitlikleri batarya performans verisine uydurmayla, $a_1, a_2, a_3, \dots, d_1, d_2, d_3$ parametreleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanabilir (genelde üretici tarafından verilir) [Hongxing et al., 2009].

10.5.5. Akım-Voltaj Karakteristikleri

Değişik yaşlanma mekanizmalarını hesaplayabilmek için mevcut batarya şarj durumunun bilinmesi gerekir. Korozyon ve SoC için voltaj, sapmalara neden

olabilmektedir. Bu nedenle gazlaşma akımının da dahil edilmesi gereklidir. Hücre voltajı, modifiye edilmiş Shepherd eşitliğine göre hesaplanır (Eşitlik 10.21).

$$U(t) = U_0 - gDoD(t) + \rho_c(t) \frac{I(t)}{C_N} + \rho_c(t) M_c \frac{I(t)}{C_N} \frac{SoC(t)}{C_c - SoC(t)} \quad I(t) > 0 \quad (10.21)$$

$$U(t) = U_0 - gDoD(t) + \rho_d(t) \frac{I(t)}{C_N} + \rho_d(t) M_d \frac{I(t)}{C_N} \frac{DoD(t)}{C_d(t) - DoD(t)} \quad I(t) \leq 0$$

Burada: U [V] hücrenin kutup voltajıdır. U_0 [V] tam dolu durumda açık devre denge hücre voltajıdır. g [V] elektrolit oransal sabitidir. SoC şarj durumu ($SoC=1$ tam şarj bataryadır, $SoC=0$ nominal kapasitenin deşarjıdır, $SoC<0$ mümkündür). $DoD=1-SoC$ derin deşarjıdır. ρ_c/ρ_d [Ω Ah] biriktirilmiş iç direnç olmaktadır. I [A] uygulanan akımdır, (şarj: $I>0$; deşarj; $I\leq 0$). C_N [Ah] nominal kapasitedir. M_c/M_d şarj transferi aşırı voltaj katsayısıdır. C_c/C_d normalize edilmiş kapasitedir. “c” şarj edilişi ve “d” deşarj edilişi temsil etmektedir.

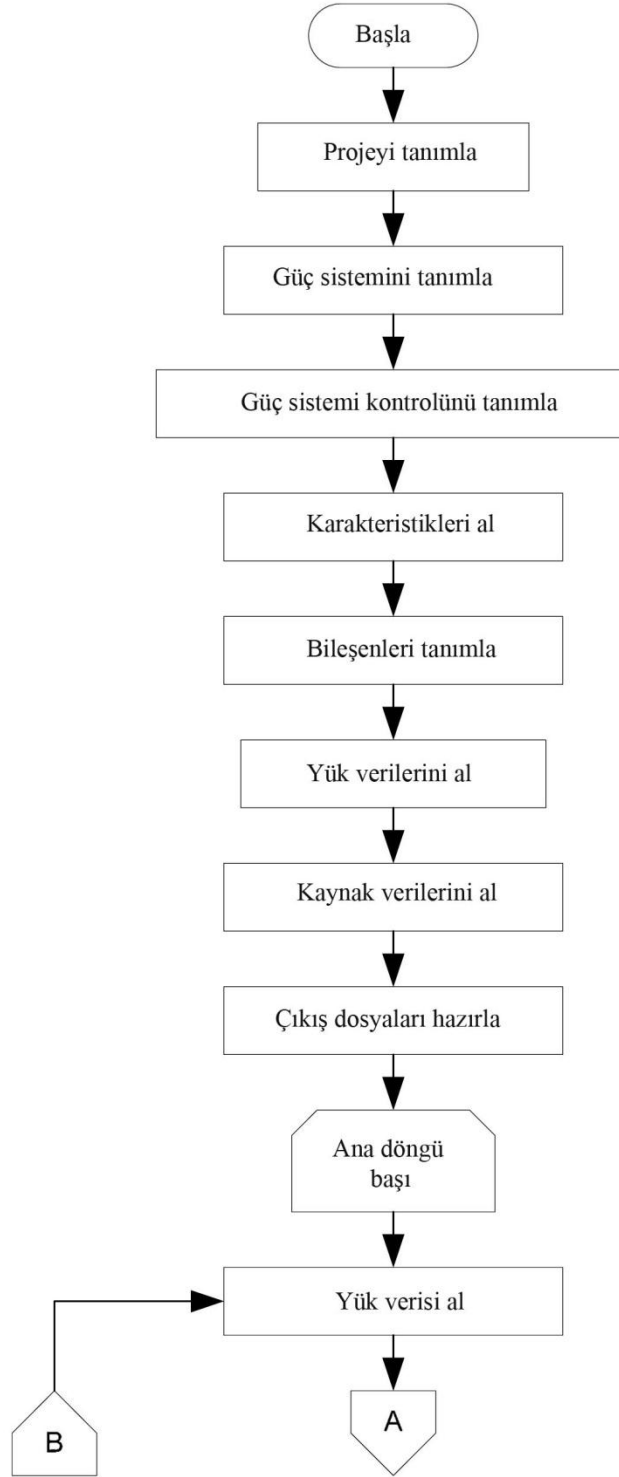
Shepherd eşitliği deşarj durumları için geliştirilmiştir. Bu eşitlik yapısının şarj durumları için farklı parametrelerle aynı olduğu varsayılır. Parametreler, ölçülen veriden bulunur. Esas Shepherd temelli modelde, çalışma koşullarından bağımsız olarak, tüm model parametreleri sabit kabul edilir. Burada şarj ve deşarj iç direnç katsayıları ρ_c , ρ_d ve normalize edilmiş deşarj kapasitesi C_d yaşlanma mekanizmalarına göre değişmektedir.

Shepherd modeli tamamen farklı parametre dizileri, şarj ve deşarj için U_0 ve g içermektedir. U_0 ve g parametreleri nominal asit konsantrasyonu ($\rho_{nominal}$), asitin hücredeki ağırlığı (m) ve batarya hücresinin nominal kapasitesi ($C_{nominal}$) verilerinden hesaplanabilir [Schiffer et al., 2007].

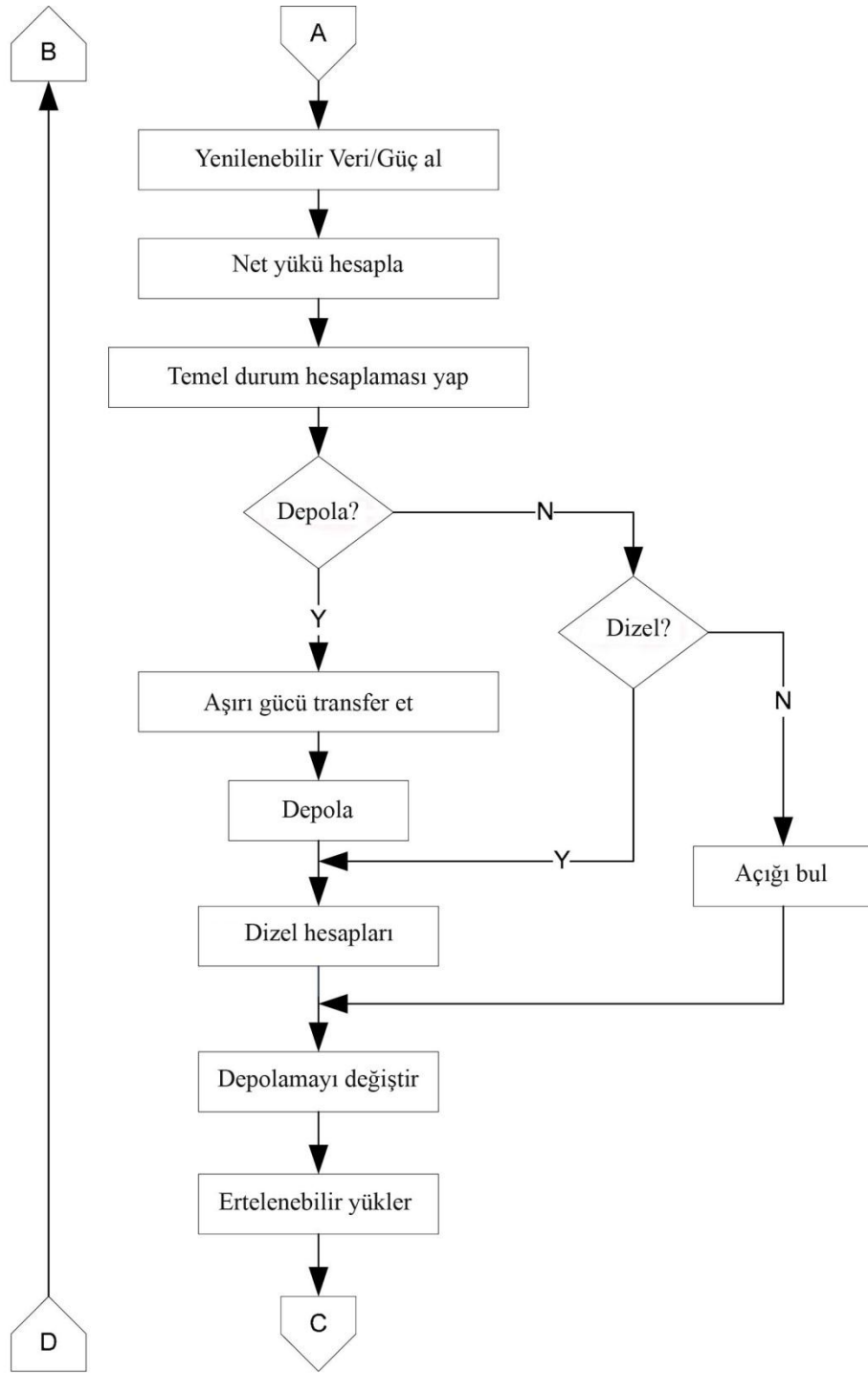
11. BATARYA SİMÜLASYONU

Hybrid2, Massachusetts Üniversitesinde Yenilenebilir Enerji Araştırma Laboratuvarı (RERL) tarafından geliştirilmiştir. Hybrid2, geniş çeşitlilikte hibrit güç sistemlerinde detaylı uzun dönem performans ve ekonomik analizleri yapmaktadır. Geniş çeşitlilikte hibrit güç sistemlerinin teknik-ekonomik performansını tahmin etmeyi hedefleyen, yükler, rüzgâr hızı, güneş ışıınımı, sıcaklık ve kullanıcı tarafından tasarlanmış ya da seçilmiş güç sistemi için zaman serileri kullanan olasılıksal/zaman serileri bilgisayar modelidir. Hybrid2 sistemlerin bağlantılarını belirtmede yüksek esneklik sunmaktadır. Hybrid2'nin oldukça geniş kullanımı vardır ve dört kısma sahiptir; Grafiksel Kullanıcı Arayüz (GUI), Simülasyon Birimi, Ekonomi Birimi ve Grafiksel Sonuçların Arayüzü (GRI). GUI kullanıcının mevcut projelerin tümüne projeleri kolaylıkla kurmasını ve organize olmuş yapı sağlamasını mümkün kılar. GUI, projeler kütüphanesini, güç sistemlerini, zaman serileri verisini ve mekanik bileşenleri birleştirir. Kütüphane, projeler oluşturmada kullanılır ve kullanıcı Hybrid2'ye daha fazla bileşen girdikçe veya zaman serileri verisi aldıkça genişler. GUI, tüm Hybrid2 giriş parametreleri için sıkça kullanılan terimlerin ve tanımların olduğu bir sözlüğü içerir. Simülasyon ve Ekonomi Birimleri kullanıcının simülasyonları oldukça kolay çalıştırmasını sağlar ve hata gözden geçirme girdileri içerir. Sistem birimi tümüyle çok yönlüdür ve sistem kullanıcılarının çeşitli yükler, rüzgâr türbinleri, fotovoltaik diziler, dizel motorlar, bataryalar, konvertörler kullanmasına imkân verir. Simülasyon birimi yüzden fazla değişik sistem kontrol seçeneğine imkân veren geniş bir yönetim algoritması seçimine sahiptir. Bağımsız ekonomi birimi, simülasyon sistem performans bilgilerini kullanarak kullanıcının ekonomik analiz yapmasına imkân sağlar. GRI, kullanıcının grafik formunda detaylı çıkış verisini kolayca görmesini sağlar. Hibrit sistemler için genelde iki tip simülasyon modeli kullanılmaktadır. Birincisi “biçimsel” modellerdir. Bunlar öncelikle uzun dönem performans tahminleri ve ekonomik analizler için giriş verileri sağlamak içindir. Bu modellerin çoğu, zaman serisi türündedir. İkinci tür, “dinamik” modellerdir. Bu modellerde, sistem parametrelerinde değişimler için çok hızlı dalgalanmalar ve sistem tepkileri oluşur. Hybrid2, Microsoft VisualBASIC’de programlanmıştır ve Microsoft Access Veri Tabanı kullanmaktadır [Baring-Gould, 1998].

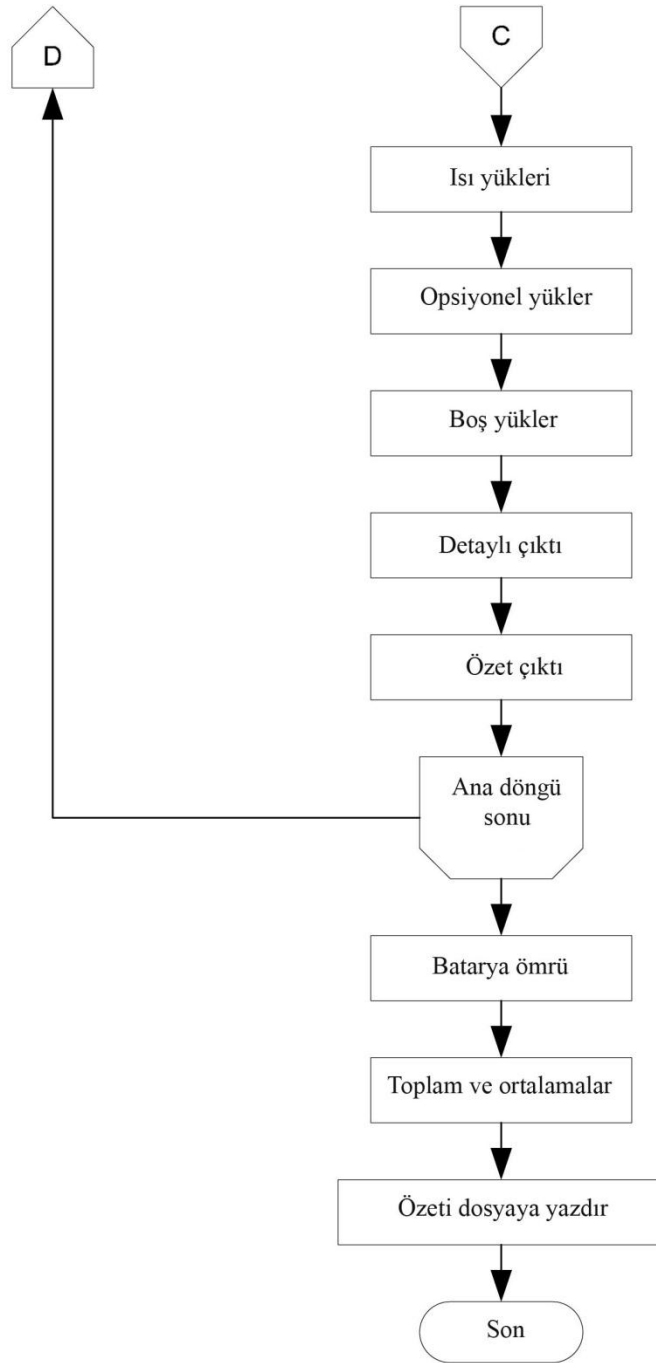
Hibrit2 akış şeması



Şekil 11.1. Akış şeması [Manwell et al., 2006].



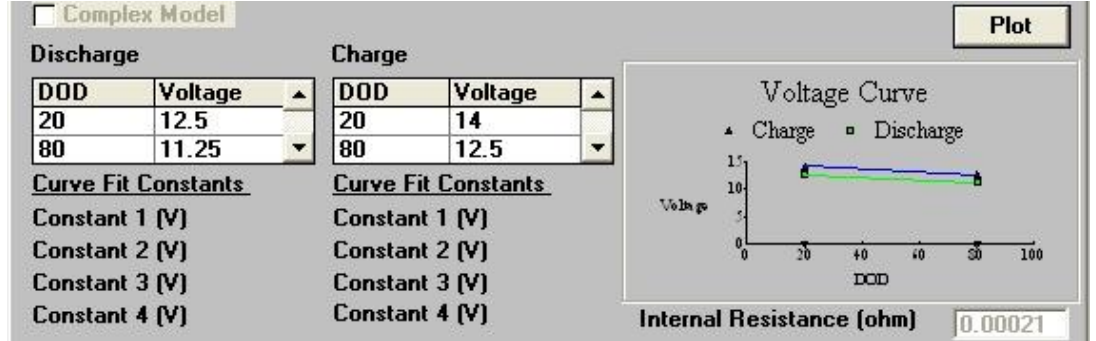
Şekil 11.2. Akış şeması [Manwell et al., 2006].



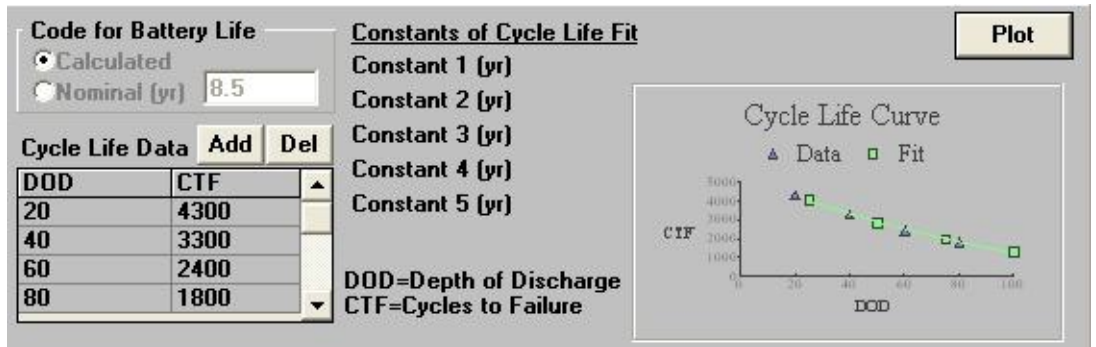
Şekil 11.3. Akış şeması [Manwell et al., 2006].

Simülasyonda Kullanılan Hibrit Sistem;

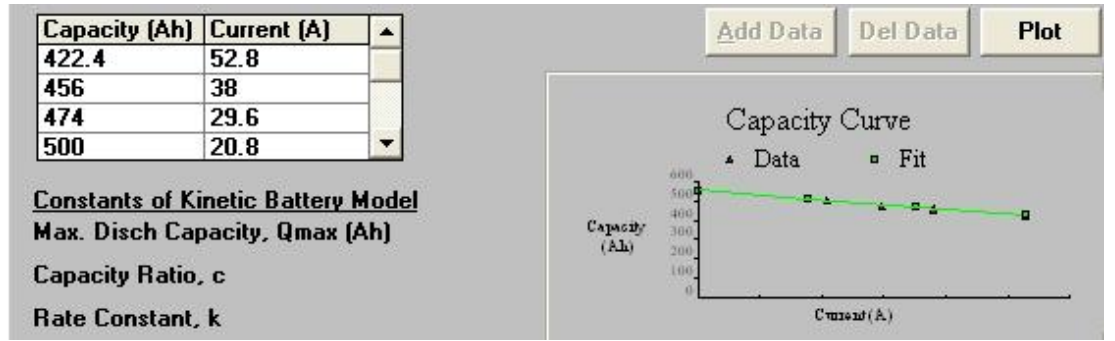
Kullanılan tübiler derin çevrim bataryası 500 Ah kapasiteli 12 V nominal gerilimli kurşun asit bataryadır. Simülasyonda batarya sayısı 20 seri 1 paraleldir, batarya ölçek faktörü 1'dir. Toplamda 120 kWh enerjili, 500 Ah kapasitelidir. Bataryanın başlangıç kapasitesi SOC %65'dir. Kullanılan rüzgâr türbini 2 adet 20 kW gücünde olup rotor çapı 8.84 metredir. Rüzgâr gücü ölçek faktörü 1'dir. Rüzgâr gücü cevap verme faktörü 1.5'dir. Kullanılan FV dizi modülü 30 paralel, 14 seriden oluşmaktadır. FV dizi verimliliği %96'dır. FV dizinin zirve gücü 13.44 kWp olmaktadır. FV dizi eğimi 11 derecedir. Güç dönüşümü için kullanılan invertör 40 kW invertördür. Kullanılan redresör 50 kW güçtedir. Çevre sıcaklığı en fazla 35.88 derecedir. Dizel jeneratör kullanılmayan güç sistemi kontrol stratejisi uygulanmıştır. Kontrol stratejisinde minimum şarj durumu %50 alınmıştır. Yük, rüzgâr hızı, güneş ışınımı, sıcaklık için zaman serileri kullanılmıştır. 2 günlük veriler kullanılmıştır. Veri zaman aralığı 60 dakikadır. Simülasyonda Hybrid2 Version 1.3e kullanılmıştır. Sistemle ilgili diğer veriler;



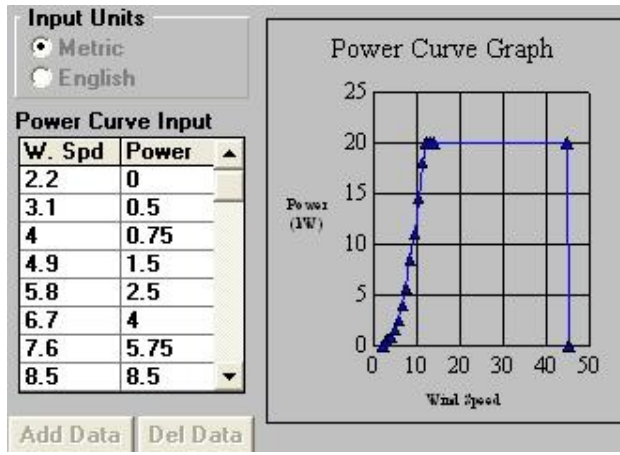
Şekil 11.4. Exide E120-9 tübiler derin çevrim bataryası voltaj eğrisi.



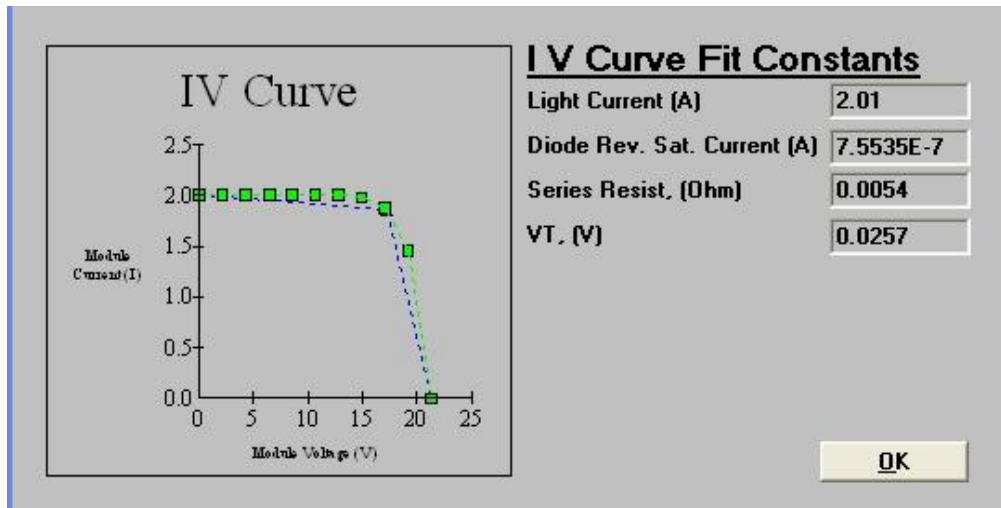
Şekil 11.5. Exide E120-9 tübiler derin çevrim bataryası ömrü.



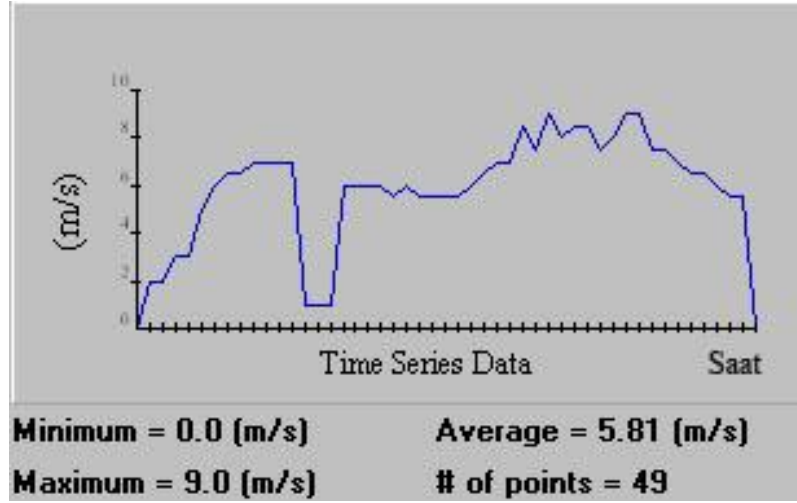
Şekil 11.6. Exide E120-9 tübüler derin çevrim bataryası kapasitesi.



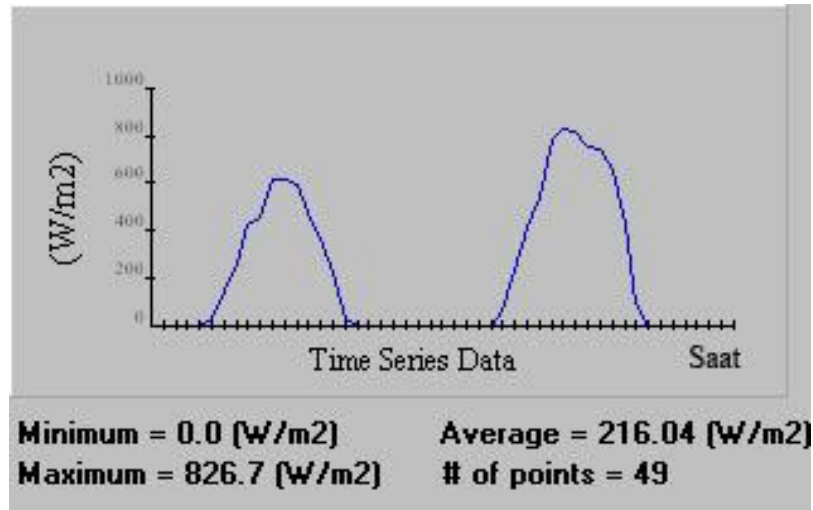
Şekil 11.7. Rüzgar-güç grafiği.



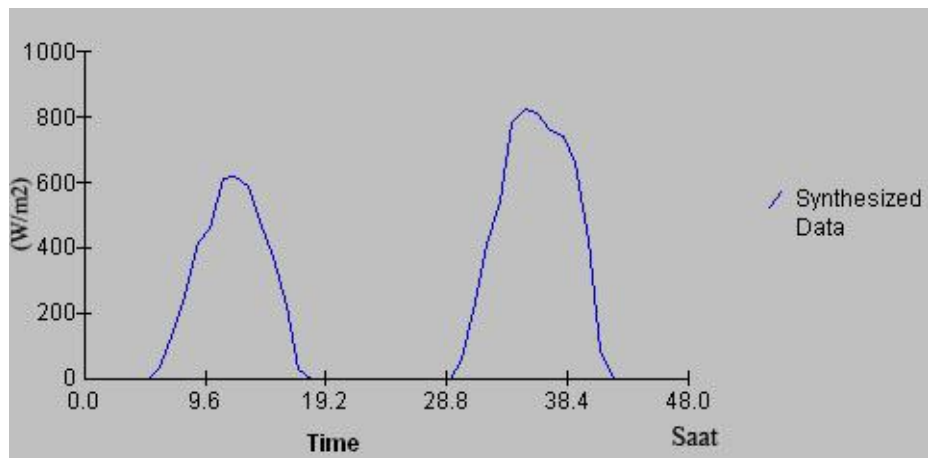
Şekil 11.8. FV modül I-V eğrisi.



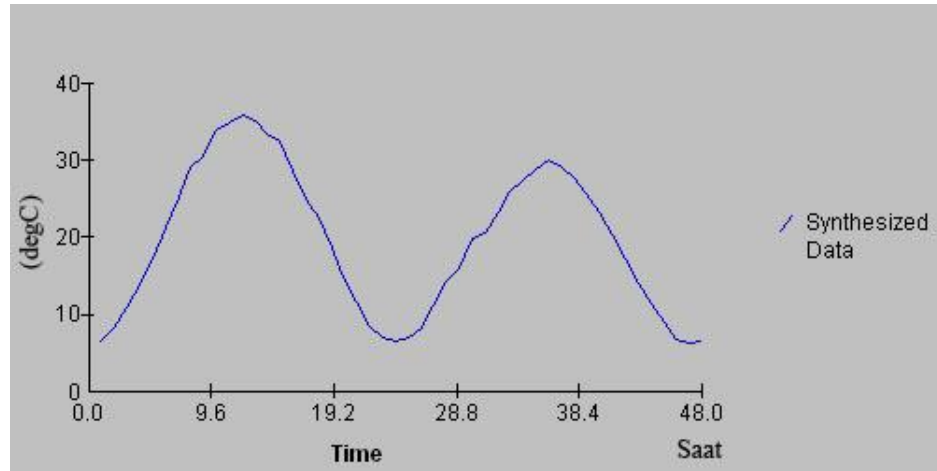
Şekil 11.9. Rüzgar hızı profili.



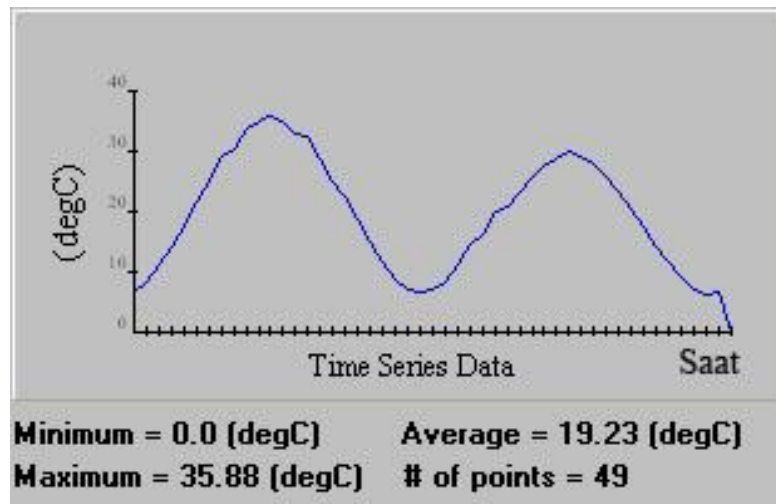
Şekil 11.10. Güneş ışıınımı profili.



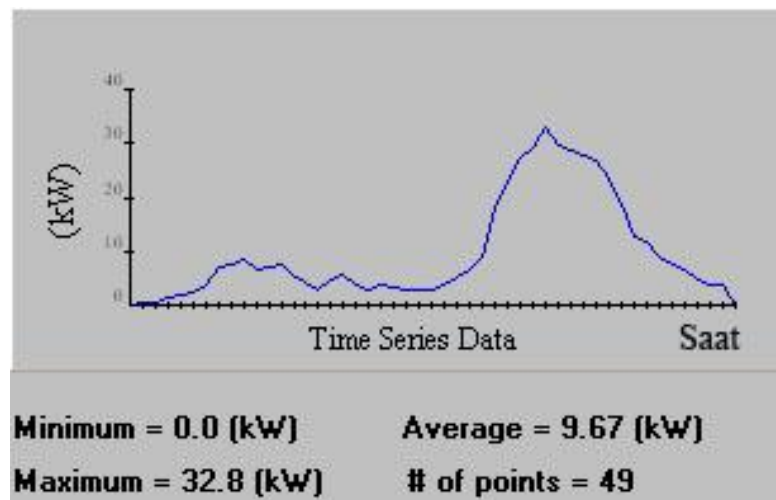
Şekil 11.11. Güneş ışıınımı zaman serisi.



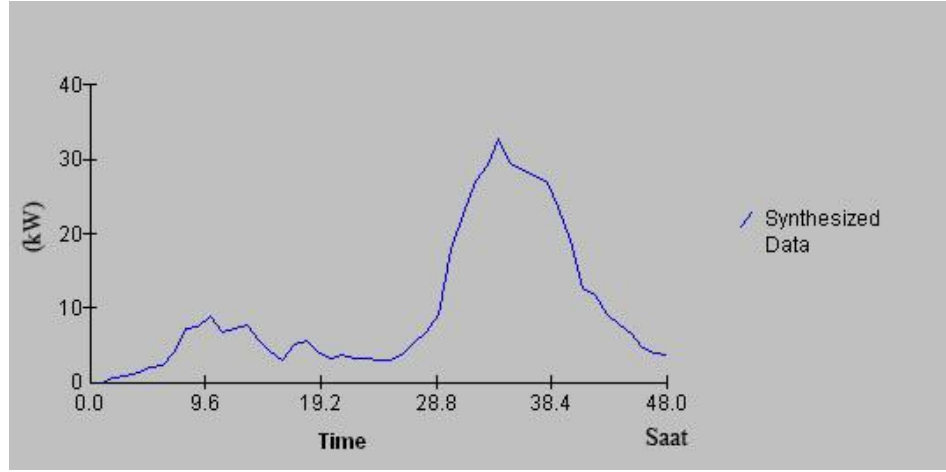
Şekil 11.12. Sıcaklık zaman serisi.



Şekil 11.13. Sıcaklık profili.

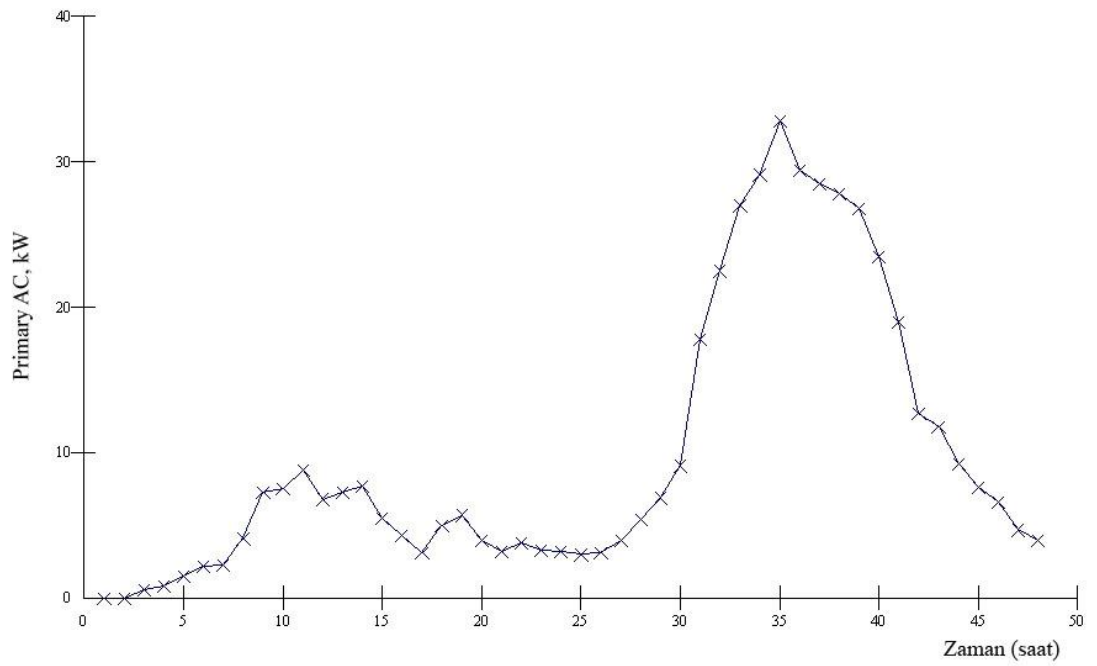


Şekil 11.14. Yük profili.

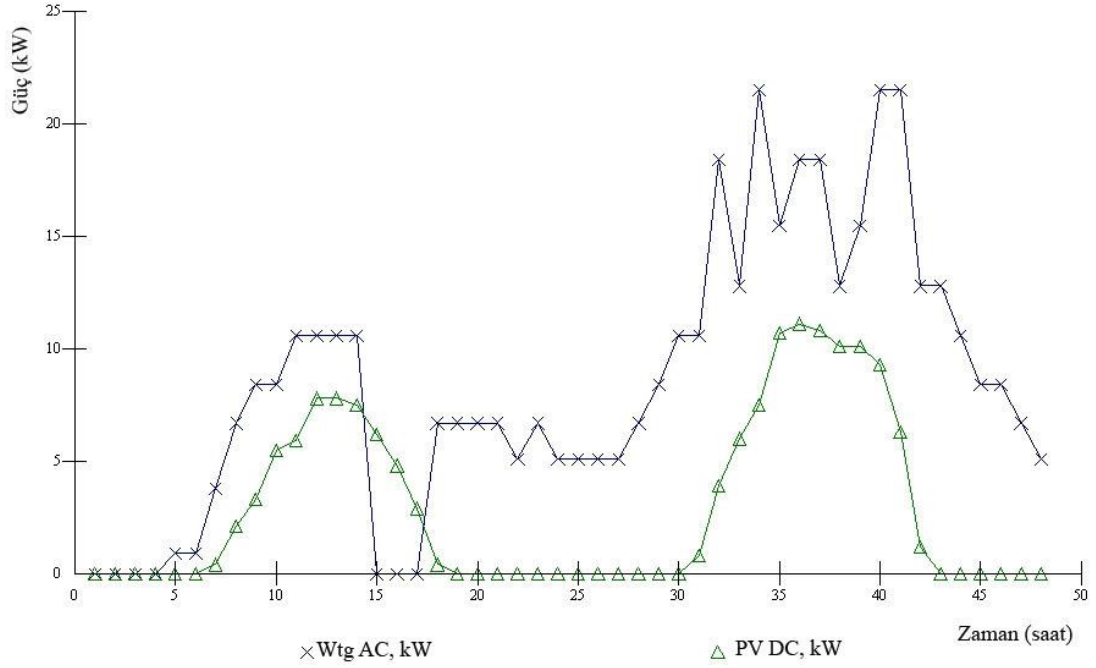


Şekil 11.15. Yük zaman serisi.

Simülasyon sonucunda yük, FV dizi, rüzgâr türbini için elde edilenler;



Şekil 11.16. Ortalama AC birincil yüküdür. Yüke sağlanan gücü temsil etmemektedir.



Şekil 11.17. Kayıpları içermeyen FV dizinin ürettiği toplam güç ve sistemdeki tüm AC rüzgâr türbinleriyle üretilen güç.

Simülasyon sonucunda yük, FV dizi, rüzgâr türbini için sonuçlar;

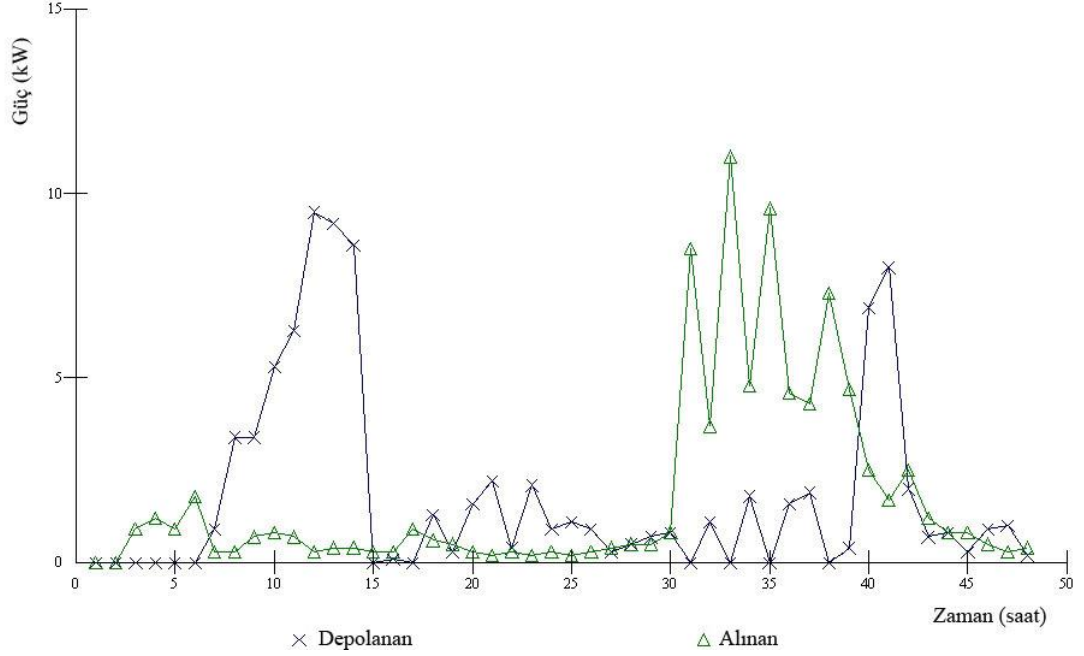
AC birincil yükü olarak belirtilmiş yükler gösterilmiştir (Şekil 11.16). 24 saat süresince önemli bir artış olmamakta yük en fazla 10 kW olmaktadır. Sonraki gün, yük önemli ölçüde artmış ve 32.8 kW seviyesine kadar çıkmıştır. Birincil yük, sonraki bir zamana ertelenemeyen elektrik yüküdür. Birincil yükü karşılamakta herhangi bir başarısızlık güç zayıflığı oluşturur.

Bataryayla ilgili voltaj düşmeleri nedeniyle FV dizinin ürettiği güç alınan gerçek güçten farklıdır ve yeşil renkte gösterilmiştir (Şekil 11.17). FV dizinin ürettiği toplam güç ikinci gün daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. FV dizinin çıkış değerleri sadece FV dizi ve bataryanın voltajı aynı olduğunda yüksektir. Eğer aynı olmazlarsa, dizinin gerçek çıkış değerleri nominal çıkış değerlerinden çok daha düşük olabilir. Bataryanın nominal voltajı, FV dizinin en yüksek güç noktası voltajının (zirve gücü) %65 ile %85'i arasında olmalıdır.

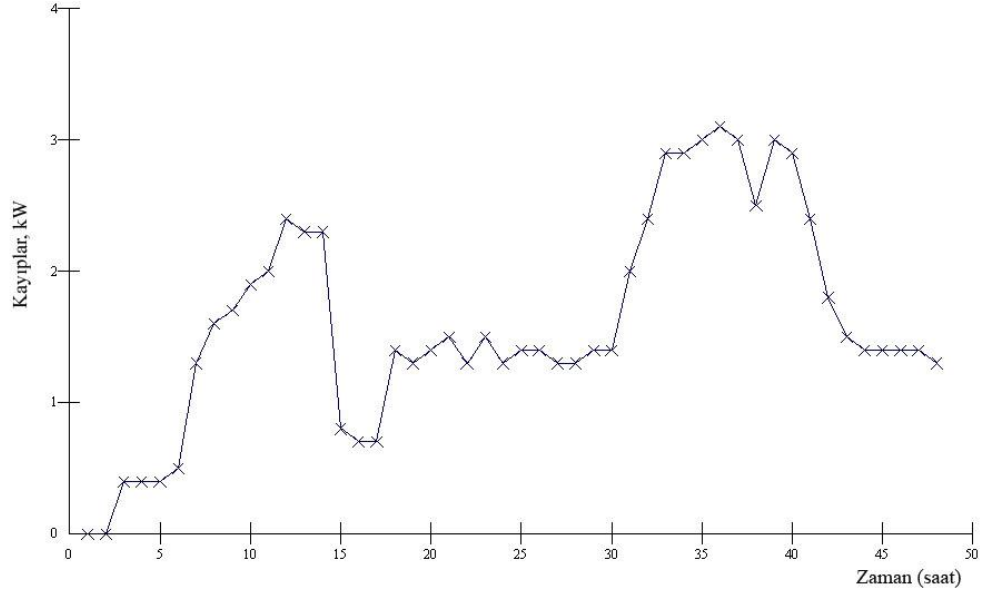
Rüzgâr türbinleriyle üretilen güç ikinci gün artmıştır. Mavi renkte gösterilmiştir (Şekil 11.17). Belirli rüzgâr hızları için rüzgâr türbini gücü değerleri

güç eğrisinde gösterilmiştir. Rüzgâr hızının uygun değerlerinin (Şekil 11.9) birleşimiyle (Şekil 11.7)'ye uygun olarak bu veriler elde edilmiştir.

Batarya modülüne verilen enerji, alınan enerji ve kayıplar için elde edilenler;



Şekil 11.18. Bataryaya verilen enerji ve bataryadan alınan enerji.



Şekil 11.19. Güç dönüşümü ve batarya depolaması nedeniyle tüm sistem kayıpları.

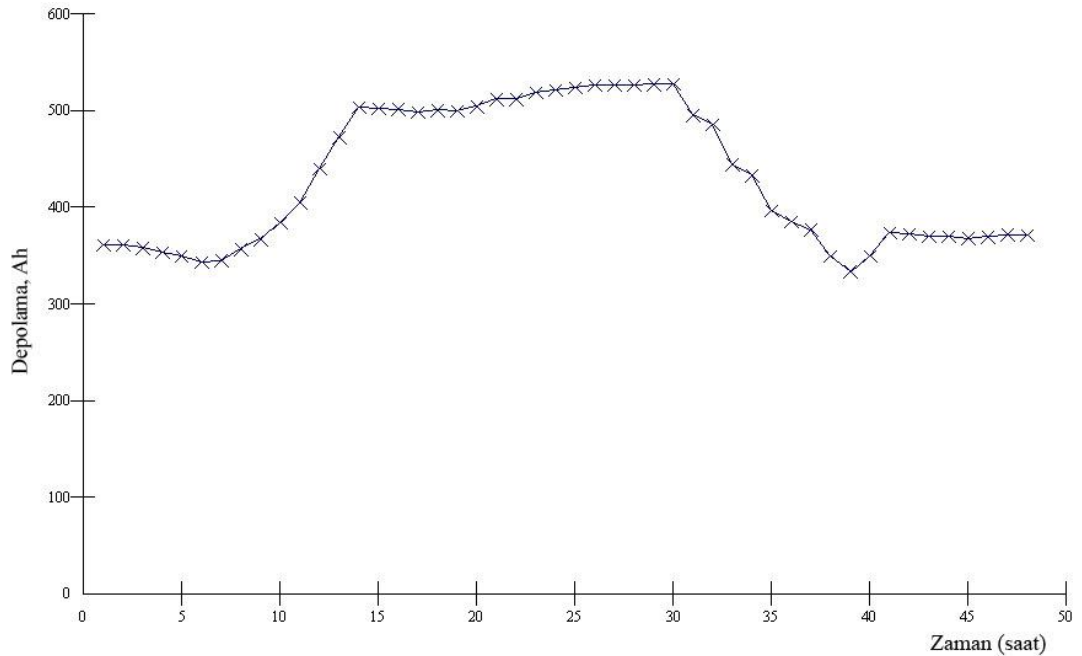
Batarya modülüne verilen enerji, alınan enerji ve kayıplar için sonuçlar;

Depolanan enerji (kW) mavi renkte gösterilmiştir (Şekil 11.18). Yük, FV dizi ve rüzgâr türbininin güç eğrileriyle uyumlu olarak FV dizi ile rüzgâr türbini güç kaynaklarının gücünün yüksek değerlere ulaşmasıyla depolanan enerjide artmıştır.

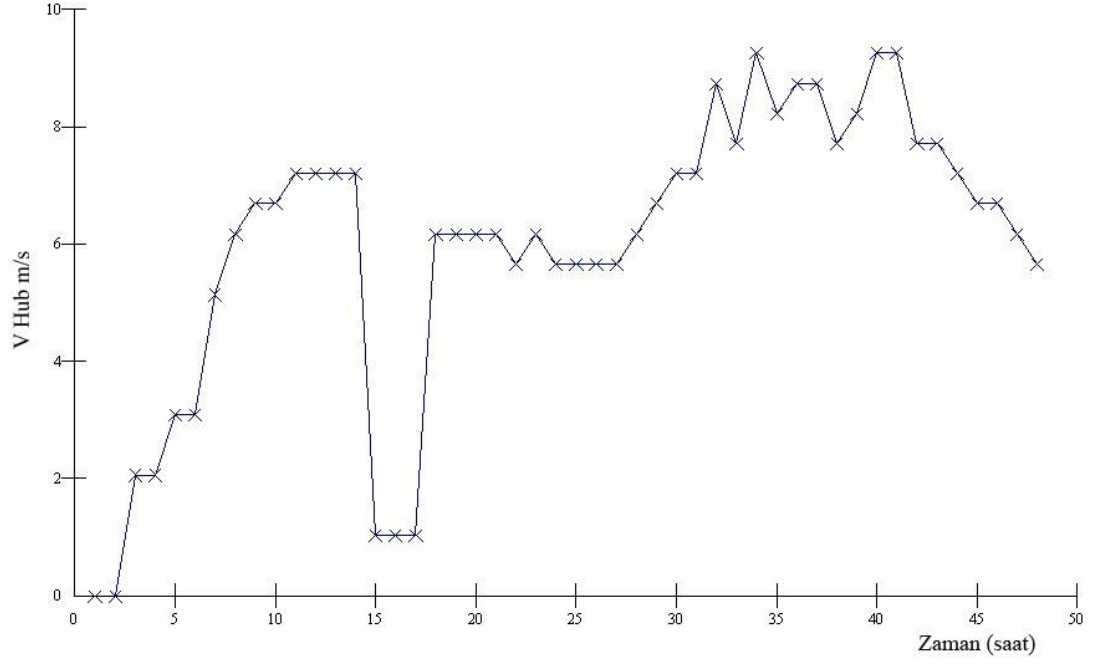
Depolamanın dışarı verdiği (kW) güç yeşil renkli olarak gösterilmiştir (Şekil 11.18). Yükün güç eğrisinin (Şekil 11.16) yüksek değerlerinde bataryadan alınan enerji artmıştır.

Sistem kayıpları bataryadaki şarj etme ve deşarj etme kayıpları, güç dönüştürücülerle ilgili kayıplar konvertör ve redresör kayıplarıyla birlikte diğer sistem kayıplarıdır (Şekil 11.19). Kayıplar birinci gün 6-14 saat aralığında ve ikinci gün 30-39 saat aralığında artmıştır.

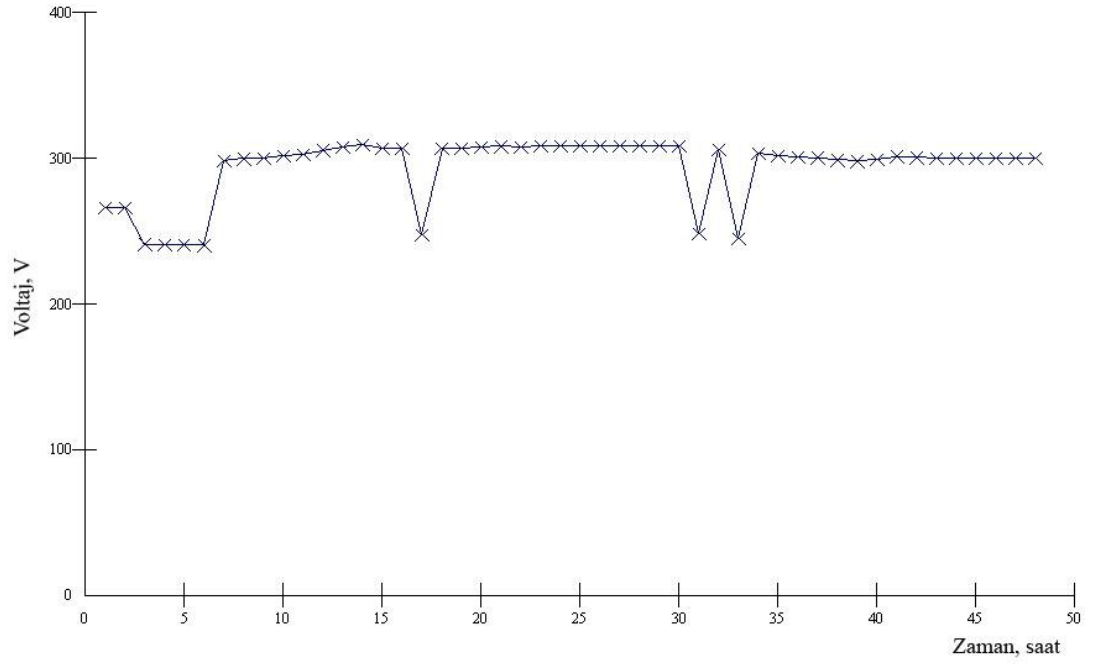
Depolama, türbin rüzgâr hızı ve gerilim için elde edilenler;



Şekil 11.20. Batarya modülünün kapasitesi.



Şekil 11.21. İlk türbinin merkezinde rüzgâr hızı.



Şekil 11.22. Batarya voltajı.

Depolama, türbin rüzgâr hızı ve gerilim için sonuçlar;

Batarya kapasitesi seviyesi (Ah) gösterilmiştir (Şekil 11.20). Yükün düşük seviyelerinde üretilen aşırı güç, depolamaya ayrılmaktadır. 0-30 saatleri arasında daha fazla depolama gerçekleştiği görülmektedir. Depolamaya ayrılan toplam güç,

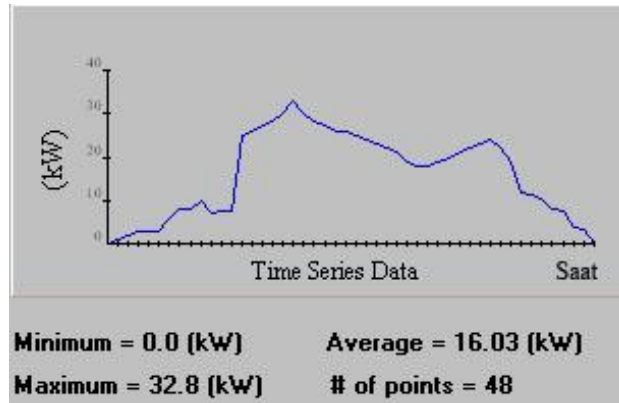
kayıplar ve kalan aşırı güç miktarıyla belirlenmektedir. Genelde depolama, güç dalgalanmalarını düzenlemek için kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbini merkez yüksekliği normalde 20 m ve üstündedir. Kullanılan türbinin merkez yükseliği 24.384 m'dir. Rüzgâr yüksekte daha kuvvetlidir. Bu nedenle rüzgâr hızı yükseklik farkı göz önüne alınarak ayarlanmalıdır. Rüzgâr türbininin gücü, merkez yükseklikteki rüzgâr hızının fonksiyonudur (Şekil 11.21).

Yük fazla olduğunda yenilenebilir enerji yük için kullanılır, yük az olduğunda bataryanın voltajı artma eğiliminde ve şarj olma eğilimindedir. Sistem tarafından karşılanamayan Unmet Load sıfır olduğundan voltaj değişimi fazla olmamıştır (Şekil 11.22). Voltajda büyük değişimler olabilir ama dalgalanmaların etkisi azaltılır.

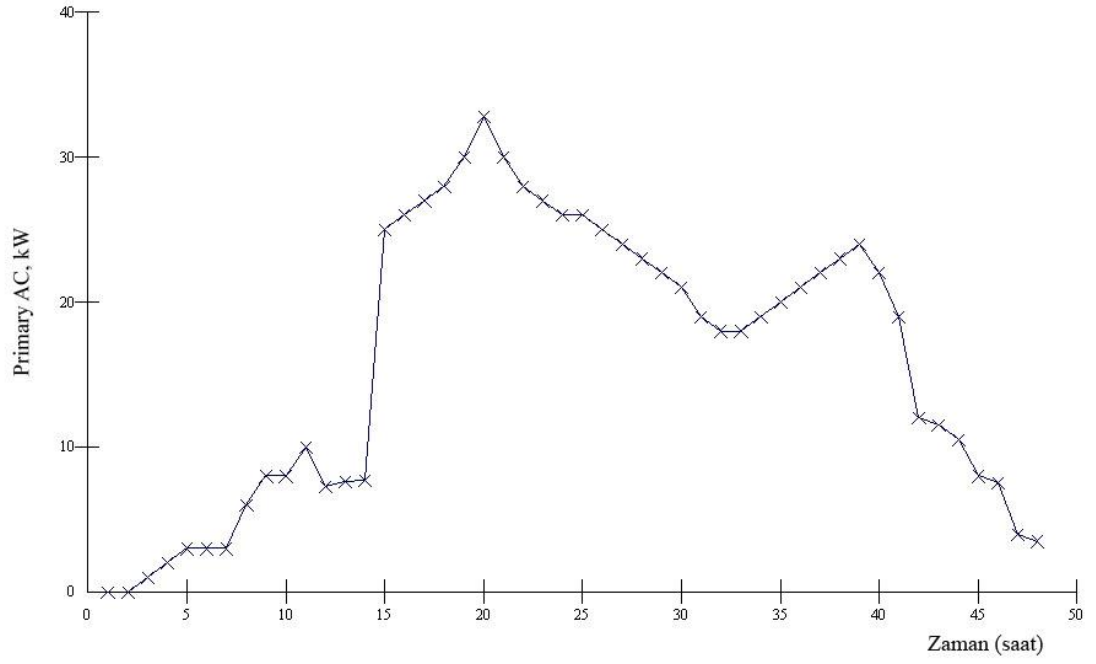
Sistem tarafından karşılanamayan AC ve DC yükleri gösteren Unmet Load ayrıca Dump_AC_XS, Dump_DC_XS grafikleri beklendiği gibi sıfır çıkmıştır.

Bazı durumlarda hibrit güç sisteminin gerekli birincil yükü daima sağlaması mümkün olamamaktadır. Bu durumda Hybrid2 sağlanamayan yük miktarını “unmet load” olarak tanımlamaktadır. Sistem bileşenleri aynı alınarak yük profilinin değiştirilmesi ve simüle edilmesi şöyledir;

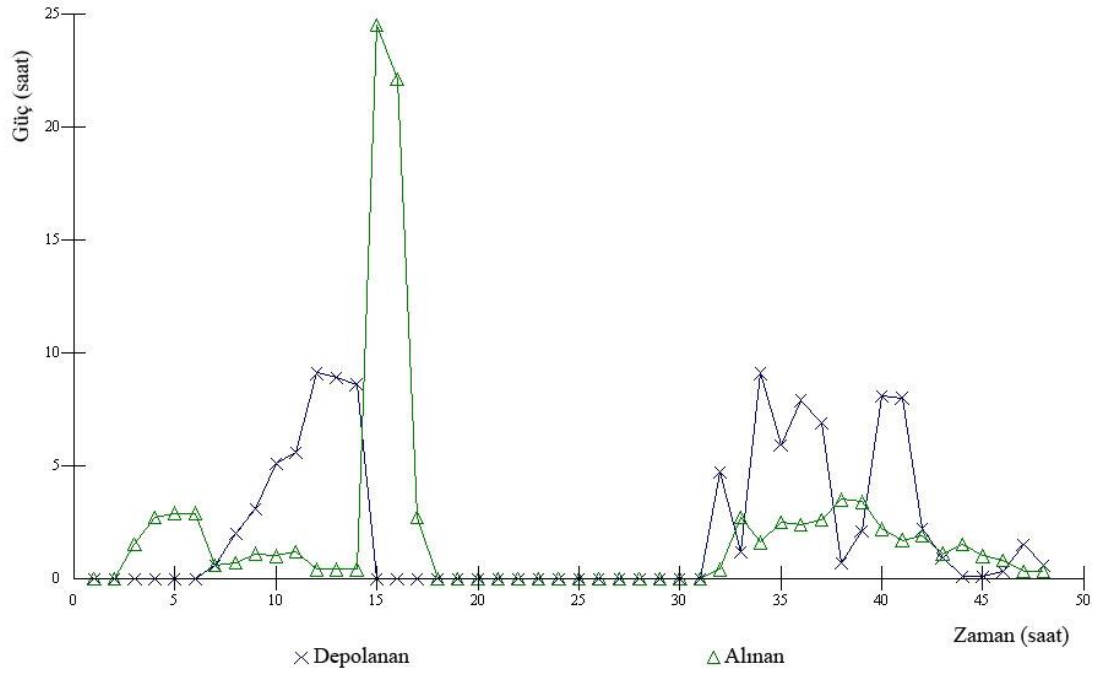


Şekil 11.23. Yeni yük profili.

Simülasyon sonucunda yük, bataryaya verilen enerji, alınan enerji için elde edilenler;



Şekil 11.24. Ortalama AC birincil yükü.



Şekil 11.25. Batarya modülüne verilen enerji ve batarya modülünden alınan enerji.

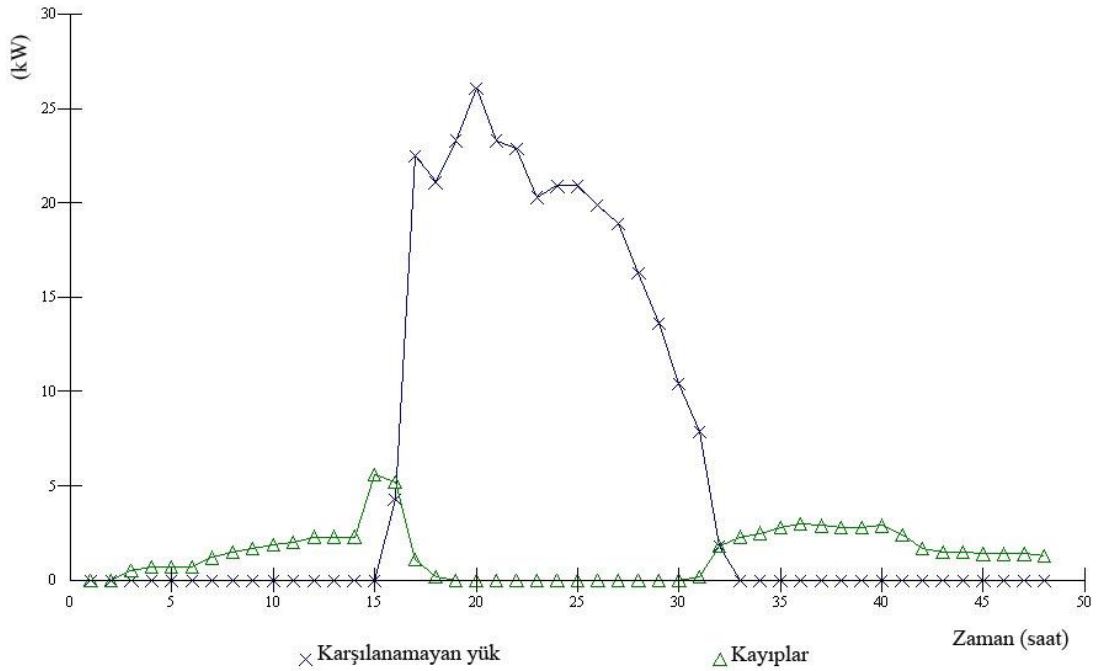
Simülasyon sonucunda yük, bataryaya verilen enerji, alınan enerji için sonuçlar;

AC birincil yükü olarak belirtilmiş yükler gösterilmektedir (Şekil 11.24). Birincil yük 15-40 saatleri arasında artmıştır ve en yüksek 32.8 kW, ortalama 16.03 kW değerlerinde olmaktadır. Birincil yük, başka bir zamana ertelenemeyen elektrik yüküdür. Birincil yükü karşılamakta herhangi bir başarısızlık güç zayıyatı oluşturur.

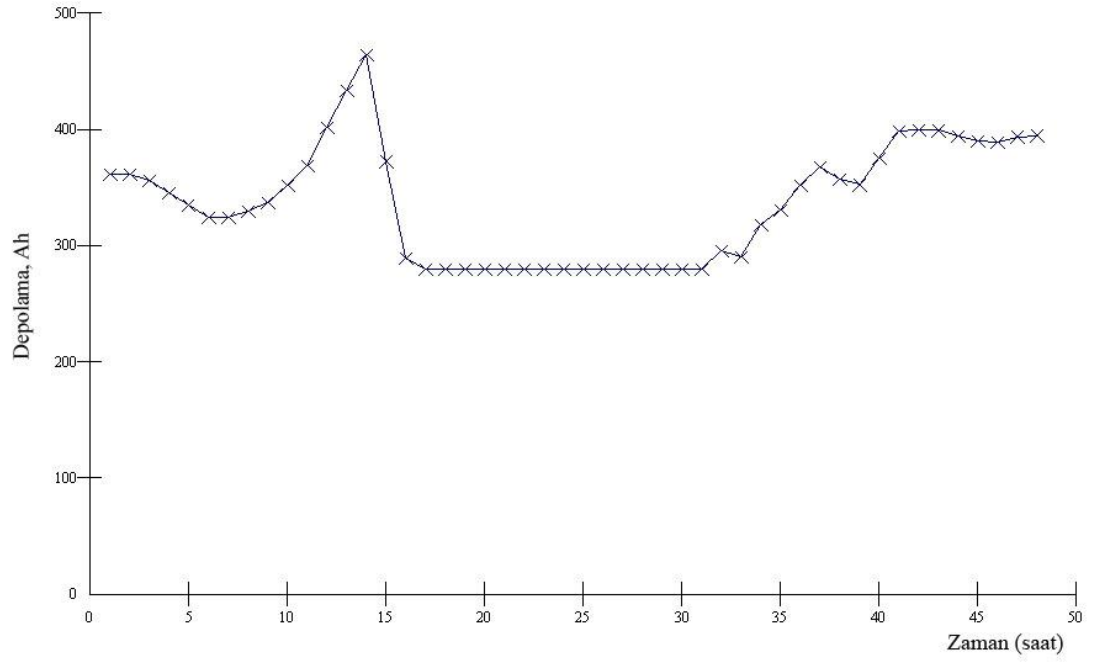
Depolanan enerji (kW) mavi renkte gösterilmiştir (Şekil 11.25) Depolanan enerji 6-15 ve 31-45 saatleri arasında artmıştır. Yük, FV dizi ve rüzgâr türbininin güç eğrileriyle uyumlu olarak FV dizi rüzgâr türbini güç kaynaklarının gücünün yüksek değerlere ulaşmasıyla depolanan enerjide artmıştır.

Depolamanın dışarı verdiği (kW) güç yeşil renkte gösterilmiştir (Şekil 11.25). 14-18 saatleri arasında yüksek değerler almıştır. Yükün güç eğrisinin (Şekil 11.24) yüksek değerlerinde depolama azalmıştır.

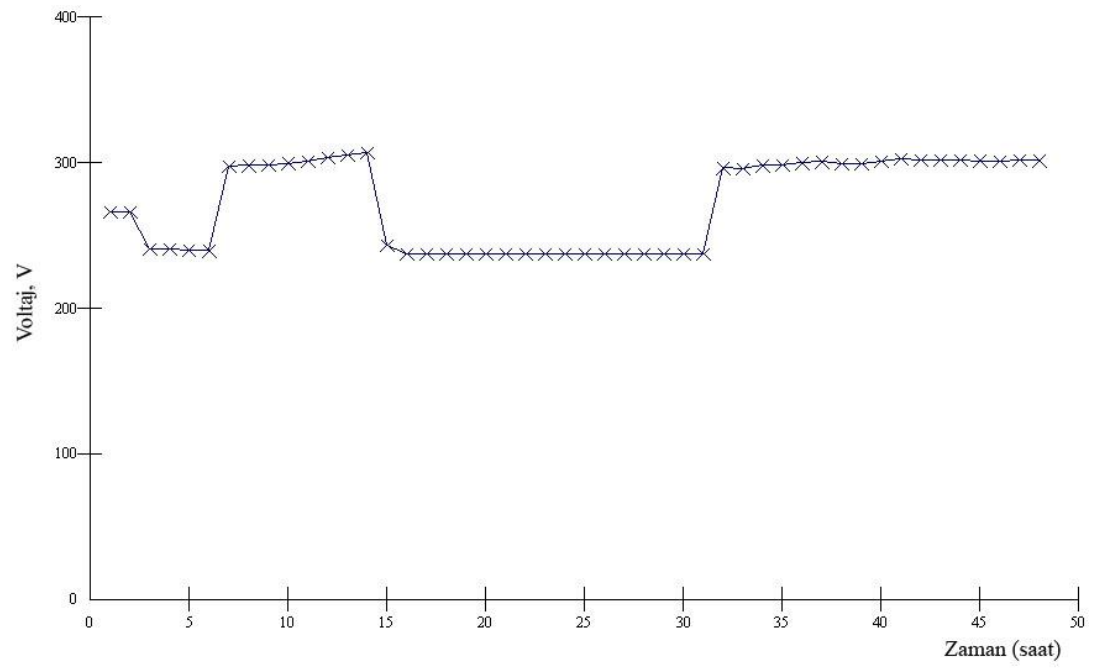
Kayıplar, karşılanmayan yükler, depolama ve gerilim için elde edilenler;



Şekil 11.26. Tüm sistem kayıpları ve sistem tarafından karşılanmayan AC ve DC yükleri.



Şekil 11.27. Batarya modülünün kapasitesi.



Şekil 11.28. Batarya voltajı.

Kayıplar, karşılanmayan yükler, depolama ve gerilim için sonuçlar;

Sistem kayıpları bataryadaki şarj etme ve deşarj etme kayıpları, güç dönüştürücülerle ilgili kayıplar konvertör ve redresör kayıplarıyla birlikte diğer sistem kayıplarıdır ve yeşil renkte gösterilmiştir (Şekil 11.26). Kayıplar birinci gün bataryanın şarj/deşarj olmasıyla ve güç dönüşümleriyle birlikte artmıştır. Kayıplar birinci gün 3-16 saat aralığında ve ikinci gün 31-40 saat aralığında artmıştır.

Yükün büyük olması veya yetersiz yenilenebilir kaynaklar zamanında yükü karşılayamayan depolama nedeniyle hibrit sistemin iletemediği enerji miktarı mavi renkte gösterilmiştir (Şekil 11.26). Sistemin başarısızlığına neden olabilecek açığı göstermektedir. Sistemin başarısızlıkları kabul edebilmesi uygulamaya bağlıdır ve bazı durumlarda geçerlidir. Karşılanamayan yük 15-32 saatleri arasında artmıştır.

Batarya kapasitesi (Ah) gösterilmiştir (Şekil 11.27). Yükün düşük seviyelerinde üretilen aşırı güç, depolamaya ayrılmaktadır. 18-31 saatleri arasında yük fazla olduğundan depolama düşmüştür. Depolamaya ayrılan toplam güç, kayıplar ve kalan aşırı güç miktarıyla belirlenmektedir.

Yük fazla olduğunda yenilenebilir enerji yük için kullanılır, yük az olduğunda bataryanın voltajı artma eğiliminde ve şarj olma eğilimindedir (Şekil 11.28). Yükün fazla olduğu 15-30 saatleri aralığında voltaj azalmıştır.

PV_DC, Sun_Slope, V_Hub, Wtg_AC grafikleri yük profilinin değişimiyle değişmeyip aynı kalmıştır. Dump_AC_XS, Dump_DC_XS grafikleri sıfır çıkmıştır.

Dump_AC_XS ve Dump_DC_XS istenen yüklere ek olarak üretilen yüklerdir. Ayrıca sistem güç üretiminin aşırı boyutlandırıldığını gösterir. Bu, tasarlanan güç sisteminin kararsız olduğunu ve güç kaynakları azaltılarak, depolama artırılarak ya da ek tercihe bağlı yük kullanılarak tekrar tasarlanması gerektiğini gösterir.

Wtg_AC güç sisteminde tüm AC rüzgâr türbinleri tarafından üretilen güçtür.

12. SONUÇLAR

Hybrid2 simülasyon aracı kullanılarak güneş-rüzgâr güç sisteminin 2 günlük verilerle 60 dakika zaman aralığında incelenmesinin ilk aşamasında karşılanamayan yük yoktur ve birincil yük ikinci gün artmıştır. FV dizi ve rüzgâr türbininin ürettiği güç ikinci gün yüksektir. FV dizi ile rüzgâr türbini gücünün yüksek değerlere ulaşmasıyla bataryada depolanan enerjide artmıştır. Yükün güç eğrisinin yüksek değerlerinde depolama azalmıştır. Yükün düşük seviyelerinde üretilen aşırı güç bataryada depolanmaktadır. Birinci gün daha fazla depolama gerçekleştiği görülmektedir. Yükün yüksek değerlerinde bataryadan alınan enerji artmıştır. Simülasyonun ikinci aşamasında yük profili değişmiştir ve yükün güç eğrisinin düşük değerlerinde bataryada depolama artmıştır. Hibrit sistemin iletemediği enerji nedeniyle karşılanamayan yük bulunmaktadır. İkinci gün yük fazla olduğundan daha az depolama gerçekleşmiştir ve yükün fazla olduğu zamanlarda bataryanın voltajı düşmüştür. Hybrid2 simülasyon aracı, rüzgâr ve FV dizi hibrit sistemin bataryayla birlikte performans analizlerinin yapılmasını mümkün kılmıştır ve istenildiği durumda ekonomik analiz de yapılabilmektedir. Yenilebilir enerji hibrit sistemlerde sistem analizleri ve optimizasyon gereksiniminde HOMER simülasyon aracı uygulanabilir.

Batarya kullanımıyla gece, gündüz çevrimlerinde veya güneşli, bulutlu koşullarda çıkış dalgalanmaları düzeltilir. Güç çıkışındaki dalgalanmalar, rüzgâr hızının kübüyle orantılı olduğundan, rüzgâr jeneratörlerinde daha önemlidir. Bir jeneratöre batarya eklemek dalgalanmaları yok eder. Çok sayıda jeneratörün bağlı olduğu rüzgâr çiftliği gibi uygulamalarda toplam güçteki dalgalanmalar azaltılır. Enerji depolama, gereksinim duyulan enerji ve hazır bulunan rüzgâr enerjisi arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırmaya yardımcı olur. Önemli miktarda enerjinin depolanması gereken durumlarda, yüksek kapasiteli bataryalar kullanılmaktadır. Bu bataryalar genellikle tüp şeklinde pozitif plakalara sahiptirler. Tüp şeklinde plakalı jel hücreler çok dayanıklıdır ve güneş-rüzgâr güç sistemlerinde uzun çalışma ömürleri vardır. Yüksek güç performansının ihtiyaç duyulduğu birçok uygulamada AGM batarya kullanılmaktadır. Ancak, aşırı şartlardaki uygulamalarda, örneğin yüksek sıcaklık veya derin deşarjlarda, güç

gereksinimi yüksek ise jel batarya kullanılır. Büyük güneş ve rüzgâr gücü sistemleri günümüzde şarj durumu göstergelidirler. Depolama sistem yükünü düzeltir, var olan sistem kapasitesinin gelişmiş kullanımını sağlar. Aynı zamanda rezervler için sistemdeki aktarma kayıpları ve maliyetler azalır. Enerji kaynakları fazla olduğunda yük talebini karşıladıktan sonra üretilen güç bataryayı beslemek için kullanılmaktadır. Tersine, enerji kaynakları zayıfsa, batarya enerji yayar. Bataryalar hibrit sistemlerde düzensiz güç sağlamayı önlemektedirler. Güneş ve rüzgâr gücü uygulamalarında kullanılan bataryaların servis ömürlerinin uzatılması, bu sistemlerin toplam maliyetini düşürme açısından önemlidir. SOC düştükçe batarya voltaj modelleme hatası da düşmektedir. Batarya deşarj moduna girince davranışı daha doğru modellenebilmektedir. Güneş ve rüzgâr enerji merkezlerinde kullanılan bataryalarda geniş ölçüde fonksiyonellik için, gücü elektrik şebekesine veren ve alan konvertörler kullanılmaktadır. Bataryanın şarj durumunu belirten deşarj olmuş Ah gibi batarya özel verisi doğrudan ölçülemez, hesaplanması gerekir. Enerji depolama sistemleri, kesintisiz güç sağlama ve güç kalitesini iyileştirmede kullanılırlar.

VRLA bataryaların tüm ömrü boyunca su ekleme gerekmez ve düşük oranda kendiliğinden deşarj vardır. Asit dökülmesi riski yoktur. VRLA bataryalarda elektrolit hareketsizdir. Jel bataryalar asit katmanlaşmasına uğramazlar. Hem jel hücre hem de AGM bataryalar kapalıdır ve basınçlıdır. Böylece üretilen oksijen ve hidrojen, şarj çevrimi sırasında tekrar-birleşerek suya dönüşür.

Akış bataryaları sorunlu etki olmadan tümüyle deşarj edilebilir ve zamanla çok az elektrolit kaybına uğrarlar. Vanadyum redoks bataryanın kurşun-asit bataryadan üstünlüğü, çevrim ömrünün sınırsız olmasıdır.

Tipik bir şarj rejimi sonrası kapasite testleri bataryaların tümüyle şarj edilemeyeceğini ortaya çıkarmıştır. Ancak, şiddetli bir şarj sonrası batarya tam kapasitesine geri dönmektedir.

Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan elektrokimyasal sistemleri anlatmakta ve uygulamalarına örnekler vermektedir. Bu çalışmayla birlikte yenilenebilir enerjinin daha verimli olarak nasıl ve hangi elektrokimyasal sistemlerle depolanabileceği gösterilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Baring-Gould E.I., 1998. Hybrid2 The Hybrid System Simulation Model Users Manual. National Renewable Energy Laboratory, USA.
2. Berndt D., 2001. Valve-regulated lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*, 100, 29-46
3. Broussely M., Pistoia G., 2007. *Industrial Applications of Batteries: From Cars to Aerospace and Energy Storage*, Elsevier, Netherlands.
4. Castaner L., Silvestre S., 2002. *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*. John Wiley and Sons, Universidad Politecnica de Cataluna, Barcelona, Spain.
5. Crompton T.R., 2000. *Battery Reference Book*. Newnes, Oxford.
6. Dell R. M., Rand D.A.J., 2001. *Understanding Batteries*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
7. Fadaee M., Radzi M.A.M., 2012. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3364-3369
8. Fernandez M., Ruddell A.J., Vast N., Esteban J., Estela F., 2001. Development of a VRLA battery with improved separators, and a charge controller, for low cost photovoltaic and wind powered installations. *Journal of Power Sources*, 95, 135-140.
9. Goswami D. Y., Kreith F., 2008. *Energy Conversion*. CRC Press, Boca Raton, FL.
10. Hongxing Y., Wei Z., Chengzhi L., 2009. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system. *Applied Energy*, 86, 163-169

11. Huggins R. A., 2010. Energy Storage. Springer, USA.
12. Kiehne H.A., 2003. Battery Technology Handbook. Dekker, Germany.
13. Lambert D.W.H., Greenwood P.H.J., Reed M.C., 2002. Advances in gelled-electrolyte technology for valve-regulated lead-acid batteries. Journal of Power Sources, 107, 173-179
14. Linden D., Reddy T.B., 2002. Handbook of batteries. McGraw-Hill, US.
15. Luque A., Hegedus S., 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, West Sussex, England.
16. Manwell J. F., McGowan J.G., Rogers A. L., 2009. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. John Wiley and Sons, Washington, USA.
17. Manwell J.F., Rogers A., Hayman G., Avelar C.T., McGowan J.G., Abdulwahid U., Wu K., 2006. Hybrid2-A Hybrid System Simulation Model Theory Manual. National Renewable Energy Laboratory, USA.
18. May G., 2009. Secondary Batteries lead acid systems stationary batteries. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 859-864
19. Muneret X., Gobé V., Lemoine C., 2005. Influence of float and charge voltage adjustment on the service life of AGM VRLA batteries depending on the conditions of use. Journal of Power Sources, 144, 322-328
20. Newman J. S., 1991. Electrochemical Systems. Prentice Hall, NJ, USA.
21. Newnham R.H., Baldsing W.G.A., 1997. Performance of flooded- and gelled-electrolyte lead/acid batteries under remote-area power-supply duty. Journal of Power Sources, 66, 27-39
22. Patel M. R., 1999. Wind and Solar Power Systems. Taylor & Francis, New York.

23. Pistoia G., 2008. Battery Operated Devices and Systems. Rome.
24. Sauer D.U., Luque A., Hegedus S., 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, New York, USA.
25. Schiffer J., Sauer D. U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R., 2007. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. Journal of Power Sources. 168, 66-78
26. Stiebler M., 2008. Wind Energy Systems For Electric Power Generation. Springer, Berlin, Germany.
27. URL-1 <http://www.sonnenschein.org/PDF%20files/GelHandbookPart1.pdf>
15.04.2012
28. URL-2 <http://www.sonnenschein.org/PDF%20files/GelHandbookPart2.pdf>
15.04.2012
29. URL-3 <http://www.electrotechnik.net/2010/01/float-and-boost-charging-of-batteries.html> 20.04.2012
30. URL-4 http://www.nrel.gov/analysis/analysis_tools_tech_build.html
10.05.2012
31. Vincent C.A., Scrosati B., 1997. Modern Batteries: An Introduction To Electrochemical Power Sources. London, England.
32. Wagner R., Rand D.A.J., Mosely P.T., Garche J., Parker C.D., 2004. Valve-regulated Lead-Acid Batteries. Elsevier, Amsterdam, Netherland.
33. Zhou W., Yang H., Fang Z., 2008. Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar–wind power generation system. Renewable Energy, 33, 1413-1423

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılı Tunceli Ovacık ilçesi doğumludur. Ortaokul ve lise öğrenimini Gebze Anadolu Lisesi'nde yapmıştır. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur.

2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır..