

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Li-İYON PİL DESTEKLİ YAKIT PİLİ GÜÇ SİSTEMİNİN SU ÜSTÜ
PLATFORMA UYGULANMASI**

DOKTORA TEZİ

Mahmut TURHAN

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Prof.Dr. Nurettin ABUT

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Lİ-İYON PİL DESTEKLİ YAKIT PİLİ GÜÇ SİSTEMİNİN SU
ÜSTÜ PLATFORMA UYGULANMASI

DOKTORA TEZİ

Mahmut TURHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 TEMMUZ 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 14 EKİM 2011

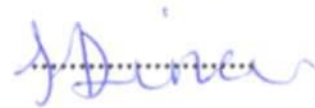
Tez Danışmanı
Prof.Dr. Nurettin ABUT


.....

Üye
Prof.Dr. Bekir ÇAKIR


.....

Üye
Prof.Dr. Hasan DİNÇER


.....

Üye
Prof.Dr. Hadi SARUL


.....

Üye
Prof.Dr. Hacı BODUR


.....

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde enerji, büyük oranda fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtların aşırı kullanımı sonucu bilinen rezervlerin hızla tükenmesi ve yanma sonucu oluşan emisyonların küresel ısınmaya neden olan olumsuz çevresel etkilerinden dolayı alternatif enerji kaynakları için çalışmalar artmaktadır. Bu kaynaklardan biri olmaya aday olan hidrojen enerjisi ile ilgili de araştırma ve uygulamalar oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Sudan üretilbildiği için sınırsız bir enerji kaynağı olan hidrojenin, çevre dostu olması bakımından fosil yakıtlara göre avantajlarının bulunması, yüzyıla damgasını vuracak bir enerji uygulama potansiyeline sahip olacağını göstermektedir. Aynı zamanda, elektrik enerjisine dönüşümünün sessiz olması nedeniyle de savunma sanayi için de önemi artmaktadır.

Hidrojenin en önemli uygulama alanı yakıt hücreleridir. Yakıt pilleri verimli, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu enerji üretimine uygun bir kaynak konumundadır. Bu özelliklerinden dolayı endüstriden ulaşıma, konutlardan haberleşme sistemleri ve taşınabilir elektronik sistemlere kadar birçok alanda yakıt hücrelerinin sivil ve askeri amaçlı uygulamaları bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Tübitak-MAM da üretilmiş olan yaklaşık 1kW'lık PEM yakıt pilinin Li-iyon pil destekli güç kaynağı haline getirerek savaş gemisine uygulaması ve gerekli donanımın tasarımı yapılarak bir su üstü platformda kurulumu yapılmıştır. Deneysel bir model çalışma düzeneği hazırlanarak sistemin karada ve denizde çalışma denemeleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların daha büyük güç ihtiyacı olan sistemlerin oluşturulabilmesini sağlamaktır. Bu çalışma yakıt pilinin önemli, güncel olan yerli üretim ve uygulamalarından biri olan su üstü platform uygulamaları açısından özgün bir uygulamadır. Çalışmanın yakın gelecekte denizaltı gemilerinde de uygulamaları yapılabileceği görülmektedir. Bu uygulamalardan başarılı sonuç alınabildiği durumda denizaltı savaş gemilerinde büyük teknolojik ve stratejik üstünlük sağlanabilecektir. Ayrıca çalışmanın bilimsel katkılarının yanında yakıt pili sisteminin yerli olanaklarla üretilbileceği ve savunma sanayi için özgün uygulamalarında yapılabileceği gösterilmektedir.

Çalışmada bilimsel yönlendirmeler ve her alanda danışmanlıkları ve eleştirileri ile yol gösteren ve başta Kocaeli Üniversitesinden, Doktora Tez danışmanım Prof.Dr. Nurettin ABUT, olmak üzere Tez izleme jürüsü üyeleri Prof.Dr. Bekir ÇAKIR ve Prof.Dr. Hasan DİNÇER hocalarıma teşekkür ederekken yararlı eleştirileri ve birçok noktada yeniden düzenleme yapmamı sağlayan yönlendirmelerinden dolayı Yıldız Teknik Üniversitesi' den Prof.Dr. Hacı BODUR ve Prof.Dr. Hadi SARUL hocalarıma teşekkür ediyorum. Doktora çalışmalarım süresince her an desteğini esirgemeyen eşim Canan Esen TURHAN'a teşekkür ediyorum. Deneysel çalışmalarda destek veren TÜBİTAK-MAM da görevli olan sayın Celal ERGİN ve Mustafa TIRIS'a teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iiiv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. YAKIT HÜCRESİ	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Birim Hücreler	6
2.2.1. Temel yapı.....	6
2.2.2. Hücre bileşenlerinin ölçütsel işlevleri.....	12
2.3. Yakıt Hücresi Yığıını	14
2.3.1. Düzlemsel çift kutuplu yığın.....	14
2.3.2. Silindirik hücreli yığınlar	16
2.4. Yakıt Hücresi Kurulumları.....	16
2.5. Yakıt Hücresi Türleri	18
2.5.1. Polimer elektrolit yakıt hücresi (PEYH).....	20
2.5.2. Alkalin yakıt hücresi (AYH).....	21
2.5.3. Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)	22
2.5.4. Eriyik karbonat yakıt hücresi (EKYH)	23
2.5.5. Katı oksit yakıt hücresi (KOYH)	24
2.6. Yakıt Hücrelerinin Özellikleri	25
3. GEMİLER İÇİN YAKIT PİLİ	28
3.1. Yakıt Pillerinin Matematiksel Modeli.....	34
3.2. Yakıt Pillerinin Denizaltı Uygulaması	37
3.3. Gemilerde Hibrit Tahrik Sistemi.....	39
3.4. Bataryalar	43
3.4.1. Birincil (şarjsız) bataryalar.....	45
3.4.2. İkincil (şarjlı) bataryalar.....	46
3.4.3. İkincil kurşun asit ve lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar.....	48
3.4.4. İkincil tip bataryalar	61
3.4.5. Batarya şarj sistemleri	62
3.4.6. Yükler.....	64
4. DENEYSEL SİSTEM VE SONUÇLARI.....	66
4.1. Li-iyon Pil Grubu	68
4.2. Polimer Elektrolit Yakıt Pili	71
4.3. DA-DA Dönüştürücüler	73
4.3.1. DA-DA Dönüştürücülerin Sınıflandırılması	75
4.3.1.1. A Sınıfı Dönüştürücü	75
4.3.1.2. B Sınıfı Dönüştürücü	76

4.3.1.3. C Sınıfı Dönüştürücü	78
4.3.1.4. D Sınıfı Dönüştürücü	78
4.3.1.5. E Sınıfı Dönüştürücü	79
4.3.1.6. Düşürücü Tip (Buck) Dönüştürücüler	79
4.3.1.7. Yükseltici Tip (Boost) Dönüştürücüler	81
4.3.1.8. Ters Kutuplayan DA/DA Dönüştürücü	84
4.3.1.9. İleri DA/DA Dönüştürücü	85
4.3.1.10. Geri yansımali (Flyback) DA/DA Dönüştürücü	87
4.3.1.11. Push-pull tipi DA/DA Dönüştürücü	89
4.4. Eviriciler	91
4.5. Deneysel çalışma için dönüştürücüler	114
4.5.1. Düşürücü tip DA/DA dönüştürücü	136
4.5.2. Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü	139
4.6. Sınırlayıcı	143
4.7. DA-AA Dönüştürücü (Evirici Devresi)	144
4.8. İzleme Sistemi	145
4.9. Şarj Devre Donanımı	146
4.9.1. Şarj kontrol sistemi	147
4.9.2. Güvenlik ve koruma	148
4.9.3. Diğer donanımlar	149
5. TEST SONUÇLARI	150
5.1. Şarj Eğrisi	150
5.2. Deşarj Eğrisi	152
5.3. Deneysel Yük	154
SONUÇ VE ÖNERİLER	155
KAYNAKLAR	157
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	178
ÖZGEÇMİŞ	163

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1: Bireysel bir yakıt hücresi prensibi	6
Şekil 2. 2: Bir yakıt hücresinde temel işlevler ve donanımı.	13
Şekil 2. 3: Bir düzlemsel yakıt hücresi yığıcı prensibi	15
Şekil 2. 4: Bir silindirik yakıt hücresi yığıcı prensibi	16
Şekil 2. 5: Yakıt hücresi enerji akışı prensibi	17
Şekil 2. 6: Bir yakıt hücresinin Akım-Gerilim özğrisi	27
Şekil 3. 1: Gemiler için enerji elde etme yöntemleri prensibi.....	28
Şekil 3. 2: Elektrik tahrikli gemi prensibi	32
Şekil 3. 3: Elektrik tahrikli gemi yol verme sistemi	32
Şekil 3. 4: Elektrik tahrikli gemi güç sistemi	33
Şekil 3. 5: Elektrik tahrikli gemi sisteminin elektrik donanım ve kontrolü	34
Şekil 3. 6: Hibrit tahrik sistemi blok diyagramı	40
Şekil 3. 7: Hibrit tahrikli güç sisteminin oluşumu	40
Şekil 3. 8: Geleneksel tahrik sistemi ile hibrit tahrik sistem uygulaması	41
Şekil 3. 9: Dört-bölgeli DC kıyıcı güç devresi	42
Şekil 3. 10: Kapalı-çevrim kontrollü ve dört-bölgeli DC motor sürücü sistemi.....	42
Şekil 3. 11: Kurşun Akü çalışma prensibi ve kurşun plakaların yerleştirilmesi	48
Şekil 3. 12: Kurşun asit akü eşdeğer devresi.....	51
Şekil 3. 13: Kurşun asit akü için farklı deşarj akımına göre gerilim değışimi.....	51
Şekil 3. 14: Akü şarj deşarj grafiğı.....	51
Şekil 3. 15: Silindirik bir Li-iyon batarya yapısının fiziksel şekli	52
Şekil 3. 16: Li-iyon ve diğr batarya türlerinde enerji-güç değışim sınırları.....	52
Şekil 3. 17: Sıcaklığa bağılı akü deşarj zamanı	53
Şekil 3. 18: Batarya içeren hibrit bir güç kaynağıında akımın durum değışimi.	54
Şekil 3. 19: Hibrit bir güç kaynağıında batarya-kondansatör benzetim devresi, (b)Li-iyon batarya şarj özğrisi oluşturma devresi.	55
Şekil 3. 20: Deneysel ve benzetim durumlarında batarya şarj özğrileri, 23°C ve 1A yük akımında SOC:Şarj durumu (State of Charge).	56
Şekil 3. 21: Bataryada farklı soğutma koşullarında gerilim değışimleri	57
Şekil 3. 22: Li-iyon bataryada deşarj kapasitesinin deşarj akımına bağılı (çemberli hat modelden teorik, üçgenli hat deneysel) değışimleri, (b)Peukert eğrisi ile batarya deşarj akımının deşarj zamanına bağılı değışimi	57
Şekil 3. 23: Li-iyon bataryada farklı deşarj ve farklı sıcaklıklarda.....	58
Şekil 3. 24: Li-iyon Batarya Elektriksel Eşdeğer Devresi	59
Şekil 3. 25: Li-iyon Batarya Topolojisinde genişletilmiş Thevenin eşdeğer devreleri	59
Şekil 3. 26: Li-iyon batarya basit eşdeğer devresi	60
Şekil 3. 27: Farklı gerilimlerde NiMH tipi ve Li-iyon tipi bataryalarda histeresiz etkisi	60
Şekil 3. 28: Li-iyon batarya için genel amaçlı örnek bir şarj devresi prensibi.....	63

Şekil 3. 29: Güneş panelinden doğrudan şarj sistemi-engelleme diyotlu.	63
Şekil 4. 1: 1000W nominal gücünde Li-iyon pil destekli yakıt pili sistem prensibi..	66
Şekil 4. 2: Li-iyon pil destekli yakıt pili sisteminin fotoğrafı	67
Şekil 4. 3:Li-iyon pil destekli yakıt pili sisteminin iç fotoğrafı	67
Şekil 4. 4: Li-on pilin şarj ve deşarj özeğrileri.....	70
Şekil 4. 5: Deneysel çalışma için tasarlanan Li-iyon pil grubu görüntüsü.....	71
Şekil 4. 6: Polimer Elektrolit yakıt pilinin görünümü.....	72
Şekil 4. 7: Polimer Elektrolit yakıt pilinin akım-gerilim değişimi.....	72
Şekil 4. 8: DA/DA Dönüştürücü prensibi	74
Şekil 4. 9: DA/DA Dönüştürücülerin Çalışma Bölgelerine Göre Sınıflandırılması ..	75
Şekil 4. 10: B sınıfı dönüştürücü prensip devresi.....	79
Şekil 4. 11: B sınıfı dönüştürücü yük akımı I_L değişimi... ..	79
Şekil 4. 12: B sınıfı dönüştürücü yük gerilimi V_L değişimi.....	76
Şekil 4. 13: C sınıfı dönüştürücü prensip devresi	78
Şekil 4. 14: D Sınıfı Dönüştürücü	78
Şekil 4. 15: E Sınıfı Dönüştürücü	79
Şekil 4. 16: Düşürücü tip bir DA/DA dönüştürücü prensip devresi	79
Şekil 4. 15: Endüktif şarj devreli, düşürücü DA/DA dönüştürücünün	81
Şekil 4. 17: Yükseltici tip DA/DA dönüştürücünün, devre şeması, akım-gerilim değişimleri	82
Şekil 4. 19: Ters kutuplayan DA/DA dönüştürücü	84
Şekil 4. 20: İleri enerji aktaran transfer devresi DA/DA dönüştürücü.....	86
Şekil 4. 21: Geri yansılmalı DA/DA dönüştürücü devre şeması, endüktansın enerjisiz kalmadığı, endüktans enerjisinin sıfıra indiği, endüktansın enerjisiz durumu, primer ve sekonder akımları ve V_o/V_i 'nin değişimleri.....	88
Şekil 4. 22: Orta uçlu ve iki güç anahtarlı push-pull tipi DA/DA dönüştürücü devresi	89
Şekil 4. 23: Orta uçlu ve iki güç anahtarlı push-pull tipi DA/DA dönüştürücü devresi a) S_1 anahtarı kapalıyken T_1 tarzistörü iletimde eşdeğer devre, b) S_1 ve S_2 anahtarlarının her ikisi de açık durumdayotların ilettiği eşdeğer devre c) S_2 anahtarı kapalıyken T_2 tarzistörü iletimde eşdeğer devre ve akımları	90
Şekil 4. 24 Sinüsoidal DGA için evirici çıkışında kullanılan üçgen ve sinüs eğrileri	96
Şekil 4. 25: Dört tranzistörlü köprü evirici çıkış sinyalleri değişimleri.....	97
Şekil 4. 26: İki tristörlü tek fazlı evirici devresi.....	98
Şekil 4. 27: Şekil 4.26'te gösterilen devre için akım ve gerilimlerin değişimi ($T/(4R_Y C_S)=1$ için)	99
Şekil 4. 28: Üç fazlı evirici prensip devresi	101
Şekil 4. 29: Üç fazlı altı darbeleri evirici çıkış gerilimlerinin değişimi.....	103
Şekil 4. 30: Denetimsiz DA gerilimi uygulanan eviricide dengesiz yüklemde evirici akımı ve kondansatör geriliminin değişimleri. ($R_{YR}=R_{YS}=20\Omega$, $R_{YT}=2000\Omega$).....	104
Şekil 4. 31: Giriş DA gerilimi denetlenen eviricinin dengesiz yük çıkış kondansatör gerilimi değişimi	105
Şekil 4. 32: Üç fazlı eviricinin tüm devrelerle sürülmüş IGBT'li örnek devresi.....	106
Şekil 4. 33: AA motor denetiminde kullanılan evirici prensibi devresi.....	106
Şekil 4. 34: DGA-PWM taşıyıcı ve referans sinyallerinin değişimi, anahtarlama ile üretilen sinüs dalgası, harmonik bileşenlerinin görünümü	108

Şekil 4. 35: Anahtarlamalı eviricinin çevirici ve filtre prensibi, akım ve gerilimlerin değişimi, dönüştürücünün çalışma bölgeleri, evirici devrenin bir kolu	109
Şekil 4. 36: Sinüsoidal DGA-PWM darbe üretim prensibi.....	111
Şekil 4. 37: DGA-PWM parametrelerine bağlı benzetimi	113
Şekil 4. 38: DGA-PWM darbe sinyalleri	113
Şekil 4. 39: DGA-PWM de minimum doluluk oranı	114
Şekil 4. 40: DGA-PWM maksimum doluluk oranı.....	114
Şekil 4. 41: Pil iç direnci R_{piDA} nın ölçülmesi için örnek devre.....	118
Şekil 4. 42: Pil iç direnci R_{piDA} direncinin ölçülmesi sırasında akım ve gerilimin değişimi.....	119
Şekil 4.43: Li-iyon pil gurubunun diğer enerji depolama sistemlerine göre performansı.....	120
Şekil 4. 44: Li-iyon pilin sabit akım sabit gerilim şarj özgeçirileri	122
Şekil 4. 45: Li-iyon pil şarjının prensip diyagramı	124
Şekil 4. 46: Li-iyon pil şarjı için tasarlanan DA/DA dönüştürücüsü basit eşdeğer devresi	125
Şekil 4. 47: Güç MOSFET lerinin sürülmesi için üretilen DGA (PWM) sinyalleri	126
Şekil 4. 48: MATLAB için çıkartılan DA/DA dönüştürücü ve pil modelleri.....	127
Şekil 4. 49: Şarj gerilimi değişimi benzetimi.....	128
Şekil 4. 50: Pilin AA şebekeden şarj başlangıcındaki akım darbeleri	128
Şekil 4. 51: Filtre indüktansı bağlandıktan sonra Pilin AA şebekeden şarj başlangıcındaki akımdaki salınım darbeleri	129
Şekil 4. 52: Pilin deşarj değişimleri (4A sabit akım, 3,5V sabit gerilim)	129
Şekil 4. 53: Sisteme sağlanan güç ve enerji kapasitesi eğrileri.....	130
Şekil 4. 54: Sistemde akım ve gerilim ölçüm prensibi gösterimi	131
Şekil 4.55: Benzetim yapılmış akımlarla ölçülen pil akımlarının karşılaştırılması.....	135
Şekil 4. 56: Pil benzetim gerilimi ile ölçülen pil gerilimi karşılaştırılması	136
Şekil 4. 57: Denetim devresi sinyallerinin benzetim değişimleri	137
Şekil 4. 58: Ölçülen denetim devresi sinyallerinin değişimleri	138
Şekil 4. 59: Ölçülen denetim devresi sinyallerinin değişimleri	138
Şekil 4. 60: Tezde kullanılan deneysel DA-DA dönüştürücü görünümü	139
Şekil 4. 61: DA/DA dönüştürücü düzeneğin görünümü	139
Şekil 4. 62: Düşürücü tip DA/DA dönüştürücü devre şeması	140
Şekil 4. 63: DA/DA dönüştürücü kapı darbelerine göre çıkış gerilimi değişimleri.	141
Şekil4. 64: Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü devre şeması ve akım gerilim değişimleri	142
Şekil 4. 65: DA-DA çevirici yükseltici fotoğrafı	143
Şekil 4. 66: DA-DA çevirici yükseltici devre şeması	144
Şekil 4. 67: Yükseltici DA-DA dönüştürücünün sürekli akım çalışmasında gerilim ve akım değişimleri	144
Şekil 4. 68: DA-DA dönüştürücü için sınırlandırıcı devresinin görünümü	146
Şekil 4. 69: DA-DA dönüştürücü için sınırlandırıcı devre algılayıcı prensip şeması	147
Şekil 4. 70: Çalışmada kullanılan DA/AA dönüştürücü olan eviricinin görünümü	148
Şekil 4. 71: DA/AA dönüştürücü şeması	149
Şekil 4. 72: Güç izleme sistemi görünümü	150
Şekil 4. 73: Farklı deşarj oranları ve farklı sıcaklıklarda bir Li-iyon pilinin deşarj özgeçirileri	151

Şekil 5. 1: Farklı konumlarda şarj özeğrileri.....	152
Şekil 5. 2: Pil deşarj akımının zamana göre değişim eğrisi	154

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2. 1: Bazı yakıt hücresi tiplerinin karşılaştırılması	10
Tablo 2. 2: Temel Yakıt Hücresi Tiplerinin Anahtar Özellikleri.....	19
Tablo 4. 1: Li-iyon pilin öz değer tablosu.....	69
Tablo 4. 2: Üç fazlı eviricide anahtarlama aralık ve adları	101
Tablo 4. 3: Üç fazlı eviricide anahtarlama aralıklarında yük gerilimi değerleri	102
Tablo 5. 1: Li-iyon pil şarj değerleri	151
Tablo 5. 2: Li-iyon pil deşarj değerleri	152

SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım
AYH	: Alkalin yakıt hücresi
C	: Kapasite [F]
DA	: Doğru akım
DAHY	: Doğrudan alkol yakıt hücresi
DD	: Devre Dengeleyici
DGA	: Darbe Genişlik Ayarı
DID	: Düşük ısıtma değeri
E	: Enerji [kWh]
EKYH	: Eriyik karbonat yakıt hücresi
EMK	: Elektromotor kuvvet
FAYH	: Fosforik asit yakıt hücresi
I	: Akım [A]
KOHY	: Katı oksit yakıt hücresi
P	: Güç [W]
PEYH	: Polimer elektrolit yakıt hücresi
R	: Direnç [ohm]
SA-SG	: Sabit-akım ve sabit-gerilim
T	: Sıcaklık [°C]
V	: Gerilim [V]

Li-İYON PİL DESTEKLİ YAKIT PİLİ GÜÇ SİSTEMİNİN SU ÜSTÜ PLATFORMA UYGULANMASI

Mahmut TURHAN

Anahtar Kelimeler: Yakıt pili, yakıt hücresi, Li-iyon pil, DA/DA dönüştürücü, darbeli akım, destek güç sistemi, su üstü platformu

Özet: Bu çalışmada yakıt pillerinin darbeli akım ihtiyacı duyan sistemlerde kullanılması için gerekli olan sistemin bir su üstü platforma uygulaması yapılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen sistemde darbeli akım gereksinimi için sorunlar araştırılmış ve sistemin başarılı çalışması için önlemler tartışılmıştır. Çalışmayı önceden yapılan çalışmalardan ayıran en önemli fark yakıt pilinin kullanım alanının genişletilebilmesi için darbeli akım ihtiyacı duyulduğu durumlarda darbeli güç ihtiyacının Li-iyon pillerden sağlanmasının düşünülmesidir. Önceki çalışmalarda Li-iyon piller yerine kurşun asit piller kullanılmıştır. Li-iyon piller yeni bir teknoloji olup günümüzde hafif olması az yer kaplamasıdır. Bu piller aynı zamanda hızlı şarj edilebilir ve güç yoğunluğunun yüksek olmasına karşı şarj karakteristiğinden dolayı bazı sorunların görülmesidir. Li-iyon piller seri ve paralel olarak çalıştırılarak istenilen akım ve gerilim elde edilebilmektedir. Li-iyon ve yakıt pilleri geliştirmekte olan teknolojilerdir. Bu pillerin avantajlı yönleri kullanılarak su taşıtlarında daha etkin bir sistem elde edilmesi planlanmıştır. Yakıt pilleri sayesinde enerji verimliliği yüksek, sessiz bir enerji kaynağı elde edilirken; Li-iyon piller ile desteklenerek darbeli akım gereksinimi duyan sistemlerde de yakıt pili uygulamalarına olanak sağlanabilecektir. Günümüzde, gittikçe yaygınlaşan bu iki yeni teknoloji, bu çalışma ile yeni bir uygulama alanı olacak su üstü platformları enerji gereksinimi sağlanması ve ileri hedef olarak da denizaltılarda verimli şekilde kullanımının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

APPLICATION OF A POWER CONTROL WITH A Li-ION BATTERY SUPPORTED POWERFUL FUEL CELL TO A SURFACE SHIP

Mahmut TURHAN

Keywords: Li-ion batteries, DC/DC converter, fuel cell, impulse current, support power system, surface ship

Abstract: In this study, a system required for using fuel cells in systems that need impulse current was applied to a surface ship. In the system which was performed experimentally, problems for impulse currents have been investigated and precautions for the system to work properly have been discussed. The most important difference that separates this study from the previous studies is to consider utilizing Li-ion batteries to provide power in case there is a need for impulse current in order to expand the use of fuel cells. In other studies lead acid batteries were used instead of Li-ion batteries. Li-ion batteries are a new technology and they gain attention by being light and occupying small volumes. Even though these batteries can be charged quickly and have high power intensity, there are some problems that must be solved due to their charge characteristics. Desired voltage and current can be obtained through serial and parallel implementation of Li-ion batteries. Li-ion batteries and fuel cells are developing technologies. It is planned to obtain a more effective system in surface ships by bringing the advantages of both to the same system. While obtaining a highly efficient and silent energy source, Li-ion batteries will enable using fuel cells in systems requiring impulse current. In this study, these two new technologies that become more and more common everyday will provide a new application area and make a contribution to providing energy to surface platforms and improving efficiently utilization in submarines as a future goal.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Li-iyon ve yakıt pillerinin darbeli akım ihtiyacı duyan sistemlerde kullanılması için gerekli deneysel prototip oluşturulması ve uygulanmasının tartışılması sağlanmıştır. Bu çalışmada temel farklardan biri, Li-iyon destekli yakıt pilinin kullanım alanının genişletilebilmesi için darbeli akım ihtiyacı duyulduğu durumlarda darbeli güç ihtiyacının Li-iyon pillerden sağlanmasıdır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda Li-iyon piller yerine kurşun asit piller kullanılmıştır. Li-iyon piller yeni bir teknoloji olup günümüzde hafif olması az yer kaplaması ve hızlı şarj edilebilip güç yoğunluğunun yüksek olması ile dikkat çekmektedir. Buna karşılık şarj karakteristiğinden dolayı bazı sorunlar görülmektedir. Li-iyon piller seri ve paralel olarak çalıştırılarak istenilen akım ve gerilim değerleri elde edilebilmektedir. Li-iyon piller ve yakıt pilleri yeni ve stratejik donanımlar olup, olumlu yönlerinden yararlanılarak ağırlık-hacim-güç bakımından daha etkin, gürültüsüz, bir sistem elde edilmesi öngörülmüştür. Yakıt pilleri ile Li-iyon piller beraber kullanarak verimliliği yüksek ve sessiz bir enerji kaynağı sağlanabilecektir. Bununla birlikte Li-iyon piller ile darbeli akım gereksinimi duyan sistemlerde de yakıt pilini kullanılabilir hale getirilmesi deneysel olarak ispatlanacaktır.

Yakıt pilleri, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, rafineri ürünleri, amonyak, metanol gibi kimyasal ürünler, biyogaz gibi alternatif kaynaklardan bir dönüştürücü yardımıyla elde edilen hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürürler. Bununla birlikte doğrudan hidrojenin oksijen ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda elektrik enerjisi üretilebilen sistem olup gelecekte önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olabilecek potansiyelindedir.

Yakıt pilleri, elektriği kimyasal enerjiye dönüştürerek depolayan klasik piller ile karşılaştırıldığında, daha temiz güç kaynağı, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, uzun ömürlü olması gibi avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Fosil yakıtlı ürünlerin maliyetlerinin yükselmesi ve verimlerinin düşük olması gibi nedenlerle

yakıt pilleri alanında çalışmalar artmaktadır. Yakıt pilleri ile yüksek verimli ve sessiz elektrik enerji üretimi yapılabilmesi ile askeri alandaki enerji gereksinimlerinin de karşılanabileceği düşünülmektedir [1].

Yakıt pillerinin darbeli akım ihtiyacı duyan sistemlerde kullanılması durumunda sistemin darbeli güç ihtiyacını karşılayan pil ya da süper kapasitörlerin kullanım gereksinimi nedeniyle hibrit sistemler ortaya çıkmaktadır. Yapılan deneysel tasarım çalışmasında nominal güç gereksinimi yakıt pilinden sağlanması planlanmış olup nominal akım fazlası yada sistemin darbeli akım gereksinimi Li-iyon pillerden sağlanması hedeflenmiştir. Burada hedeflenen yakıt pilinin darbeli güç ihtiyacını sağlayacak kaynak olarak, şimdilik bazı sorunları olmasına karşılık, şarj süreleri kısa, tepkimelere daha hızlı cevap veren yeni pil teknolojisi olan Li-iyon piller kullanılmıştır. Çünkü Li-iyon piller diğer kimyasallarla hazırlanan denklere oranla daha hafiftirler. Bunun sebebi Li-iyon pillerin en üst seviyede doldurulabilme yoğununa sahip olmasıdır. Hacimsel olarak küçük ve taşınabilir. Bu piller için hafıza etkisi sorunu yoktur, dolayısıyla bu pilleri şarj etmek için tam olarak boşalmalarını beklemek gerekmez. Aynı nedenden dolayı şarjı yarıda kesmek pil için olumsuz bir etki oluşturmaz. Şimdilik en belirgin kusurları ise, kullanım ömürlerinin üretim tarihlerinden itibaren başlamasıdır. Şimdiki teknoloji ile üretildiklerinden sonra şarj edilseler de edilmeseler de ömürleri üretim tarihinden itibaren azalmaya başlamaktadır. %100 şarj seviyesindeki ve çoğunlukla 25 °C sıcaklıkta bulunan tam dolu tipik bir dizüstü bilgisayar pili, geri dönüşü olmayacak şekilde her yıl kapasitesinin %20 sini kaybeder. Bu kapasite kaybı ürünün üretim tarihinden itibaren başlar ve pil hiç kullanılmasa bile devam eder. Değişik depolama/saklama dereceleri değişik pil ömrü kayıplarına yol açmaktadır. 0 °C de %6, 25 °C de %20 ve 40 °C de %35 kayıpla karşılaşılabilir.

Eğer pil "tam boşaltma" olarak adlandırılan şekilde boşaltılırsa, pil kapasitesi düşer. Yaklaşık olarak 100 tam boşaltma pilin kapasitesinde %75-%80 civarında bir kapasite kaybına yol açar. Dizüstü bilgisayarlarda ya da cep telefonlarında kullanıldığında bu kayıpların anlamı üç-beş yıllık bir kullanımın ardından pilin kapasitesinin kullanılmayacak kadar düşecek olmasıdır. Bu piller hafıza etkisinden

etkilenmezler ancak nikel metal hidrür ya da nikel kadmiyum piller kadar uzun ömürlü değildirler.

Yakıt pillerinden farklı çıkış akım/gerilim değerleri elde edilebilmekte ve oldukça sınırlı yükleme koşulları sağlanabilmektedir. Uygulama koşulları doğrultusunda darbeli akım ihtiyacı olan sistemlerde hibrit yakıt pili sistemleri kullanılması gerektiği planlanmakta olup yakıt pilleri sistem için gerekli ana akımı sağlarken darbeli akım sağlanabilmesi için piller destek güç sistemini oluşturmaktadır [3].

Son yıllarda taşınabilir cihazlar hızla artmakta olup bunların enerji kaynağının sağlanabilmesi amacı ile şarj edilebilir Li-iyon ya da Li-polimer piller tercih edilmektedir [4]. Şarj edilebilir piller arasında en büyük talep hem yüksek enerji kapasitesi hem de hafifliğinden dolayı Li-iyon pillerdir. Bu tip piller rekabet içinde oldukları nikel-kadmiyum ve nikel-metal hibrit pillere göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olup Li-iyon teknolojisi nikel tabanlı sistemlere göre daha yüksek çıkış gerilimlerine sahiptir. Uygulamadaki kesinleşmiş verilere göre, düşük enerji tüketimi sağlayan bu piller aracılığı ile cep telefonları ve cep bilgisayarlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir [5]. Fakat bununla birlikte daha yüksek enerji gerektiren uygulamalarda, örneğin dijital kameralar, video kaydediciler ve diz üstü bilgisayarlarda Li-iyon pillerin paralel ya da seri bağlanması gerekmektedir. Uzun ömürlü olabilmeleri için gerçekleştirilen seri bağlamada, pillerin şarj edilebilmeleri konusunda mekanik ve elektronik problemler oluşmaktadır. Seri bağlı pillerden her bir pilin eşit olarak şarj edilebilmesi, en önemli sorunu oluşturmaktadır. Çünkü elektrik yüklerinin eşit miktarlarda dağılması gerekmektedir. Oysa paralel bağlı pillerde, elektrik yükünün dengelenmesi gerekmez. Çünkü paralel bağlı devrelerde terminaller birbirlerine sıkı bir biçimde bağlanarak potansiyel farkları sürekli olarak sabit kalır. Eşit şarj edilebilme gerekliliğinin yanında Li-iyon piller aynı zamanda şarj aşımına da uğratılmamalıdır [6].

Li-iyon pillerin şarjı, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan, sabit-akım ve sabit-gerilim (SA-SG) şarj yöntemi ile yapılmaktadır. SA-SG şarj yönteminde pile, ilk olarak nominal gerilimine ulaşana kadar bir sabit akım uygulanır. Pil nominal gerilimine ulaştıktan sonra da sabit gerilimde tutulur ve şarj akımının otomatik olarak

düştüğü görülür. Şarj akımı sıfıra düştüğünde pil %100 olarak şarj edilmiş olur. SA-SG şarj süresi hala birçok mobil cihazın ihtiyacını karşılamak için çok uzundur [7].

Li-iyon pillerde başta, şarj ve güvenlik olmak üzere önemli sorunları vardır. Tam şarjlı Li-iyon pillerde çok yüksek derecede reaktif elektrotların ve susuz elektrolitlerin varlığı nedeniyle tam şarjlı Li-iyon piller, yüksek sıcaklıklarda alev çıkarak delinebilmektedir [8].

Bu çalışmada, nominal çıkış gücü 1000W olan Li-iyon pil destekli prototip model bir hibrit sistem tasarlanmıştır. Yakıt hücrelerinin su üstü platforma uygulaması ve üretilen elektriksel gücün bir Li-iyon pil gurubu desteği ile denetimi yapılmaktadır. Darbeli bir yük olan su üstü platformun bir kısım yükü beslenerek sonuçlar alınmıştır. Bunun için Türkiye’de TÜBİTAK-MAM’da tasarlanarak üretilen yerli bir yakıt hücresi kullanılmıştır. TÜBİTAK-MAM tarafından tasarlanarak üretilen 1000 W DC Yakıt Pili modülü üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla yakıt pilinin akım-gerilim eğrisi gibi sistem tasarım bulguları elde edilmiştir. Yakıt pilinin ülkemizde yerli olarak üretilebilir olması, yakın gelecekte hem endüstriyel uygulamalar ve hem de ülke savunması bakımından stratejik askeri uygulamalar için güvenli olanaklar sağlanabilecektir. Dolayısıyla yerli üretilecek su taşıtlarına uygulama olanaklarını böylelikle bir yerli üretim için altyapı oluşumuna katkılar sağlanacaktır.

Bölüm 2 de yakıt hücresi teknolojisi genel prensipleri incelenmekte olup Bölüm 3 de gemilerde yakıt pilinin kullanımı, kullanım gerekliliği üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bölüm 4 de Li-iyon ve yakıt pili besleme sisteminin tasarımı ve öncelikler incelenmiştir. Bölüm 5 te ise yapılan deneysel çalışmanın sonuçları irdelenmiştir.

2. YAKIT HÜCRESİ

Bu bölümde, yakıt hücresi teknolojisinin genel prensipleri incelenmektedir. Öncelikle, yakıt hücrelerinin temel işleyişini ve yakıt hücresi kurulumunun temel bileşenleri ele alınmaktadır. Daha sonra, başlıca yakıt hücresi tipleri, karakteristikleri ve gelişim durumları irdelenmektedir. Sonuç olarak, bu bölüm var olan yakıt hücresi uygulamalarını özetlemektedir.

2.1. Giriş

Yakıt hücreleri, yakıtlardaki kimyasal enerjiyi, yüksek verimlilik ve düşük çevresel etki ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal sistemlerdir.

Güç üretim yöntemlerinin çoğuna özgü, ısı ve mekanik enerji üretiminin ara basamakları olmadığından, yakıt hücreleri Carnot etkinliği gibi ısı cihazlarının termodinamik sınırlamalarıyla sınırlanmazlar. Ayrıca, yanma olmadığı için, minimum kirlenme ile güç üretirler. Bununla birlikte, pillerdekinin aksine, yakıt hücrelerindeki indirgeyiciler ve oksitleyiciler, prosesin devamlı olmasından dolayı, sürekli doldurulmalıdır. Günümüzde en çok ilgi gören yakıt hücreleri, yakıt ve oksidanları, yaygın yakıtları, türevlerini veya hidrojeni indirgeyici olarak kullanırlar. Ayrıca atmosfer havasını oksidan olarak kullanabilmektedirler.

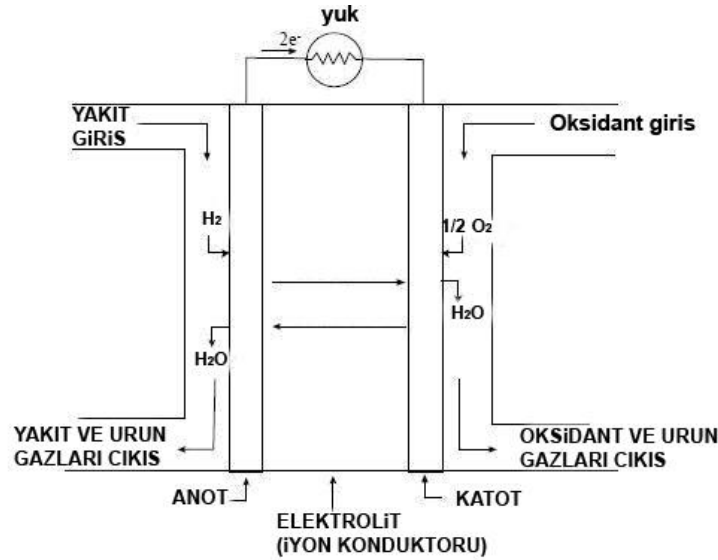
Birçok yakıt hücresi güç kurulumu;

- İçinde elektrokimyasal tepkimelerin meydana geldiği birim hücreler,
- İçinde istenen çıkış kapasiteli üniteler oluşturacak şekilde, hücrelerin elektriksel olarak bağlandığı, uyumla bir araya getirilmiş bireysel hücrelerin yer aldığı, yığınlar,
- Üretilen elektriksel akımı düzenleyecek, gerekirse bir yakıt işlemcisini de içeren, ısı yönetim ve diğer destek ve ara yüz işlevleri arasında elektrik güç düzenleme olanaklarını sağlayan bileşenleri kapsayan devre dengeleyici, bi bileşenleri kapsar.

2.2. Birim Hücreler

2.2.1. Temel yapı

Birim hücreler, bir yakıt hücresinin çekirdeğini oluşturur. Bu aygıtlar, bir yakıtta mevcut kimyasal enerjiyi elektrokimyasal olarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bir yakıt hücresinin temel fiziksel gövde yapısı, her bir tarafındaki anot ve katot ile temas halinde bir elektrolitik tabakadan meydana gelir. Tepkime, oluşan gazlar ile boylu boyunca iyon (elektriksel olarak yüklü atom) akışı ve yönlerinin gösterildiği bir yakıt hücresi, Şekil 2.1' de görülmektedir.



Şekil 2.1: Bireysel bir yakıt hücresi prensibi

Yakıt hücresinin çalışma prensibi, kataliz temeline dayanır. İyonik iletken olan elektrolitte reaksiyona giren yakıtın elektron ve protonları ayrılır. Yakıt hücresi tipine göre oksijen iyonu ya da hidrojen iyonlarını ileterek iyonik iletkenlik gerçekleştirilir. Elektronlar bir elektronik devre üzerinden akmaya zorlanır ve böylece elektrik akımı üretilmiş olunur. Bir diğer katalitik prosesle de, geri toplanan elektronların protonlarla ve oksitleyici ile birleşerek su gibi atık ürünleri açığa çıkarır.

Proton değişim membranlı yakıt hücresinde (PDMYH), proton ileten bir polimer membran (elektrolit), anot ve katodu birbirinden ayırır. Anot tarafında, hidrojen, anot katalizöre yayınarak proton ve elektronlara ayrışır. Protonlar membran üzerinden

katoda doğru ilerlerken, elektronlar da, membranın elektriksel olarak yalıtkan olması nedeniyle harici bir devre üzerinden akar ve elektrik akımı oluştururlar. Oksijen molekülleri katot katalizör üzerinde elektron ve protonlarla reaksiyona girerek su oluşturur.

Bu saf hidrojen tipi yakıt hücreleri dışında, dizel, metanol ve kimyasal hidrürler gibi hidrokarbon yakıtlar da mevcuttur. Bu tip yakıt hücrelerinin atıkları karbon dioksit ve sudan oluşur.

Yakıt hücrelerinde çok çeşitli malzemeler kullanılır. Elektrot–bipolar plakalar genellikle nikel veya karbon nano tüpler şeklinde metal olup daha yüksek verim eldesi için platin, nano demir tozu veya paladyum gibi bir katalizörle kaplanmıştır. Karbon kâğıt, bunları seramik veya suni membrandan yapılmış elektrolitten ayırır. Tipik bir PDMYH 0,6 ila 0,7 V arasında gerilim üretebilir. Değişik faktörler nedeniyle akım arttıkça gerilim azalır. Dolayısıyla:

- Aktivasyon kayıpları,
- Hücre bileşenleri ve iç bağlantıların direnci nedeniyle gerilim düşüşü,
- Reaksiyona giren bileşenlerin katalizör yüzeyinde azalması nedeniyle kütle taşınım kayıpları gerilim düşüşün nedenleridir.

İstenen miktarda enerji eldesi için, yakıt hücreleri seri veya paralel devreler halinde bağlanabilir. Seri devreler daha yüksek gerilim değerleri oluşturmasına, paralel devreler ise daha yüksek akım çekilmesine olanak verir. Bu tür yapılar "yakıt hücresi yığını" olarak adlandırılır. Ayrıca, her hücreden daha güçlü akım çekebilmek için hücre yüzey alanı da arttırılabilir.

PDMYH'nde membranın sürekli ıslak kalabilmesi için, buharlaşan su miktarı, üretilen su miktarına eşit olmalıdır. Eğer su fazla buharlaşırsa membran kurur, direnci artar ve nihayet çatlar ve bu da gaz kaçaklarına yol açar. Bu çatlaklarda oksijen ve hidrojen doğrudan birleşerek ısı açığa çıkarır ki bu da hücreye zarar verir. Eğer su çok yavaş buharlaşırsa, bu kez de elektrotlar fazla su ile boğulur, reaksiyona giren maddeler katalizöre ulaşamazlar ve reaksiyon durur. Su yönetimine ilişkin yöntemler geliştirilmektedir.

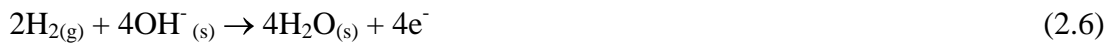
Bu sistemlerde proton geçirgen polimerik membran elektrolit olarak kullanılmaktadır. Kullanılan membranlar yaklaşık 50µm kalınlığındadır. Elektrot reaksiyonları asidik yakıt hücre sistemlerindeki gibidir. Katalizör olarak Pt içeren karbon elektrotlar proton değiştirici membranın iki yüzeyine preslenmiştir. Bir diğer yaklaşım ise hidrojeni difüzleyen ve diğer gazların geçişine izin vermeyen paladyum ya da paladyum gümüş membranların kullanılmasıdır. Proton değişimli yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı yaklaşık olarak 80-100°C'dir.

Anot tepkimesi, Denklem (2.1) – (2.3) de gösterilmektedir. Katod tepkimesi ise Denklem (2.4) de ve hücre tepkimesi ise Denklem (2.5) te verilmiştir. Tepkime tanımları;



şeklinde tanımlanabilir.

Bazı yakıt hücrelerinde ise, katı yakıt oksiti elektrolit olarak kullanılmaktadır (ağırlıkça 30-45%). Bu hücreler oda sıcaklığında çalışırlar ve diğer yakıt hücreleriyle karşılaştırıldıklarında daha yüksek gerilim verimi elde edilir. Bu tp hücrelerdeki tepkimeler; Denklem (2.5) anot tepkimesi, Denklem (2.6) katot tepkimesi, Denklem (2.7) ise hücre tepkimesi olarak tanımlanabilir.



Bazı ortamda karbondioksit karbonata dönüştüğünden dolayı, gaz girişinde CO₂ bulunmasına izin verilmemektedir. Poroz nikel anot ve katotla kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda Pt katalizör elektrotlar üzerine konularak kullanılmaktadır. Bazı hücreler yaklaşık 200°C'de ve yüksek basınçlarda çalışabilmektedir. Fosforik asit yakıt pili sistemleri uzay gemilerinde, elektrikli araçlarda ve denizaltılarda

kullanılmaktadır. Bu tür yakıt hücrelerinde uzun çalışma ömrüne ulaşılabilir. Kullanılan pahalı katalizörlerden, hidrojenin sıvılaştırılması ve sıkıştırılması için ekstra enerji tüketiminden ve saf hidrojenin pahalı olmasından dolayı bu tür yakıt hücreleri yüksek maliyetlidir.

Erimiş karbonat yakıt hücreleri sistemlerinde elektrolit olarak LiAlO_2 matrisi üzerine oluşan erimiş lityum-potasyum karbonat karışımı kullanılmaktadır. Sistemde meydana gelen tepkimeler; Denklem (2.9) anot tepkimesi, Denklem (2.10) katot tepkimesi, Denklem (2.11) ise hücre tepkimesi olarak tanımlanabilir.



Bu tür yakıt hücre sistemlerinin çalışma sıcaklığı $500-700^\circ\text{C}$ arasındadır. Bu sıcaklıklarda elektrotları aktifleyen Pt gibi katalizörler kullanılmaktadır. Hidrokarbonlar yakıt olarak kullanıldıklarında hücreyi doğrudan besler ve burada hidrojen içeren gazlara dönüşürler. Yakıt hücresinin dayanımı önemli bir problemdir. Hücrenin yapımında kullanılacak düşük maliyetli malzemelerin bulunması da karşılaşılan önemli bir zorluktur.

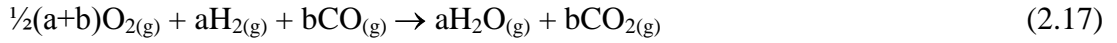
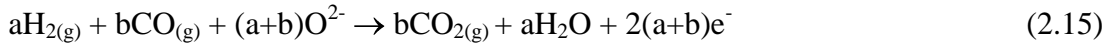
Fosforik asit yakıt hücrelerinde ince silikon karbür matris içindeki fosforik asit elektrolit olarak kullanılmaktadır. Asidik ortamda meydana gelen tepkimeler; Denklem (2.12) anot tepkimesi, Denklem (2.13) katot tepkimesi, Denklem (2.14) ise hücre tepkimesi olarak tanımlanabilir.



Kullanılan elektrolit karardır ve bu hücreler karbondioksit içeren hava ile de çalışabilirler. Sistemin çalışma sıcaklığı yaklaşık olarak $170-200^\circ\text{C}$ arasındadır. Oldukça yüksek çalışma sıcaklıkları katalizörlerin CO ile zehirlenmesini azaltır.

Sistem oldukça düşük maliyetlidir ve yaklaşık olarak 40.000 saat çalışma ömrüne ulaşılabilir.

Katı oksit yakıt hücrelerinde elektrot ve elektrolit arası kararlı itriyum oksit ya da zirkonyum gibi katı oksit seramik bir malzemeden yapılmıştır. Bu malzemeler 800°C'nin üstünde O₂ iyonlarını iletirler. Eğer hücre 900°C civarında çalışıyorsa tepkimeler; Denklem (2.15) anot tepkimesi, Denklem (2.16) katot tepkimesi, Denklem (2.17) ise hücre tepkimesi olarak tanımlanabilir.



Burada tepkime Denklemleri verilen bazı yakıt hücresi tiplerinin karşılaştırmaları Tablo 2.1'de verilmiştir. Çalışma sıcaklığı düşük olan polimer elektrolit membranlı hücrelerin verimi %40 civarında olmasına karşılık, katı oksit hücrelerde 1.000°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışma olduğu halde verim %50-60 gibi daha yüksek değerlerdedir.

Tablo 2. 1: Bazı yakıt hücresi tiplerinin karşılaştırılması

Hücre Özellikleri	Yakıt Hücresi Türü			
	Polimer Elektrolit Membran	Fosforik asit	Karbonat	Katı oksit
Elektrolit	İyon değiştirici membran	Fosforik asit	Bazik karbonat karışımı	İtriyum oksit ya da zirkonyum
Çalışma sıcaklığı (°C)	80	200	650	1000
Yük taşıyıcı	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Elektrolit şekli	Katı	İmmobilize sıvı	İmmobilize sıvı	Katı
Hücre donanımı	Karbon-metal	Grafit	Paslanmaz çelik	Seramik
Katalizör	Platinyum	Platinyum		
Yakıt hücresi verimi %	<40	40-45	50-60	50-60

Akış kontrolü; yanmalı motorlarda olduğu gibi, reaksiyona giren madde ile oksijen arasındaki oranın kararlı olması, yakıt hücresinin verimli çalışması için zorunludur.

Sıcaklık yönetimi; hücrenin termal olarak aşırı yüklenme sonucu tahrip olmasını önlemek için, hücre içindeki sıcaklık dağılımı aynı olmalıdır. $H_2+O_2\rightarrow H_2O$ reaksiyonu, ekzotermik bir reaksiyon olduğundan bu husus önemlidir.

Dayanıklılık, servis ömrü ve bazı tür hücrelerin özel gereksinimleri; sabit tip hücreler, $-35^{\circ}C$ ile $40^{\circ}C$ sıcaklık aralığında genellikle 40.000 saatten fazla güvenilir şekilde çalışabilmeli, otomotiv uygulamalarında ise, aşırı sıcaklıklarda 5.000 saatlik (150.000 mil) bir ömre sahip olmalıdır. Motorlar ayrıca $-30^{\circ}C$ de çalışabilmeli ve yüksek güç/hacim oranına (yaklaşık 2,5 kW/litre) sahip olmalıdır.

Maliyet; 2002 yılında hücrelerin katalizör içeriği, bir kilowatt elektrik üretimi başına 1000 dolar idi. Hedef, içten yanmalı motorların kullanıldığı mevcut teknolojilerle rekabet edebilmek için bu maliyeti azaltmaktır. Pek çok şirket, hücrede kullanılan platin miktarını azaltmak da dahil olmak üzere maliyetleri düşürmenin yolunu bulmaya çalışmaktadır. Ballard Power Systems şirketi, karbonla takviye edilmiş katalizör kullanarak performansta bir düşüş olmaksızın platin kullanımında %30'a varan azalma sağlamıştır.

Yakıt hücrelerinde sürekli bir şekilde; anot yakıt ile, katot da oksidant ile beslenir. Elektrotlardan yükü beslemek için elektrik akımı çekilir. Elektrolit üzerinden bir elektrik akımı üretmek üzere elektrokimyasal tepkimeler meydana gelir. Yakıt hücreleri birçok yönden sıradan bir pile benzese de, aralarında bazı farklılıklar da bulunur. Pil olası bütün enerjisini, içinde depoladığı bir enerji depolama aygıtıdır. Kimyasal reaktantlar tükendiğinde, pil elektrik enerjisi üretmeyi keser. Yakıt hücresi ise, kendisine sürekli yakıt ve oksidant sağlanan bir enerji dönüştürme aygıtıdır. Teorik olarak, yakıt hücresi yakıt sağlandığı sürece güç üretir.

Yakıt hücreleri; elektrot tepkimelerini ve elektrolit üzerinden akımı taşıyan iyon tiplerini belirleyici rol oynayacak olan, elektrolit ve yakıt seçimine göre sınıflandırılır. Kullanılan oksidant yeterli bir oranda indirgenebilen herhangi bir sıvı olabilir. Yakıt hücrelerinde bilinen yakıtların doğrudan kullanımı tercih edilir olsa da, günümüzde geliştirilmekte olan yakıt hücrelerinin çoğu gaz halinde hidrojeni veya hidrojen açısından zengin yapay gazları yakıt olarak kullanmaktadır. Hidrojen anot tepkimeleri için yüksek bir reaktifliğe sahiptir ve elektroliz üzerinden olduğu

kadar, geniş bir fosil ve yenilenebilir yakıt yelpazesinden kimyasal olarak da elde edilebilir. Benzer şekilde oksijen de havadan sağlanabilir. En yaygın oksidant gaz halinde oksijendir. Uzay uygulamaları için, tepkime ürünü sadece su olduğundan, hidrojen ve oksijenin her ikisi de bir arada donmuş olarak depolanabilirler.

2.2.2. Hücre bileşenlerinin ölçütsel işlevleri

Çoğu birim hücrenin kritik bölgesi sıklıkla üç fazlı ara yüz olarak ele alınır. İçinde asıl kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği, çoğu zaman mikroskobik olan bu bölgeler, her iki elektrodun elektrolitle temas ettiği yerde bulunurlar. Bir yer veya alanın aktif olabilmesi için, reaktanta maruz bırakılmalı, elektrot ile elektriksel, elektrolit ile iyonik temas içinde olmalıdır. Tepkimenin istenen oranda gerçekleşmesi için yeteri kadar elektrokatalist içermelidir. Bu bölümlerin yoğunluğu ve bu ara yüzlerin özellikleri, hem sıvı hem de katı elektrolit yakıt hücrelerinin elektrokimyasal performansı açısından önemlidir.

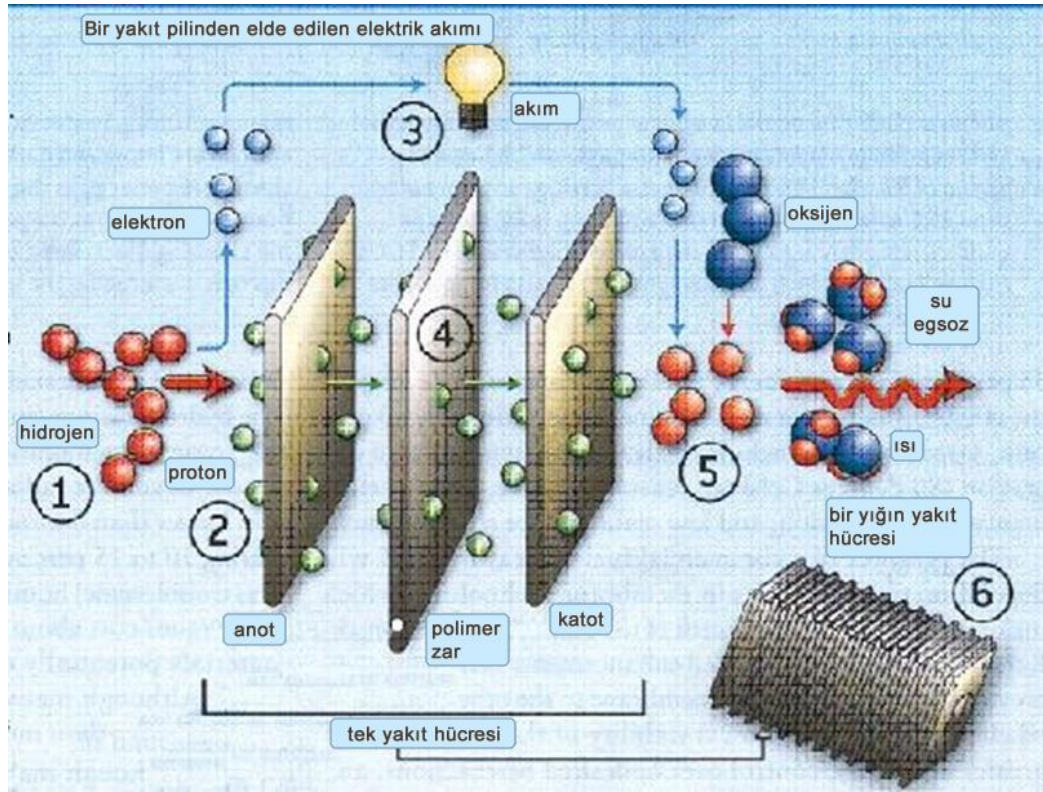
Sıvı elektrolit yakıt hücrelerinde tepkiyen gazlar, gözenekli elektrotun bir kısmını ıslatan ince bir elektrolit filmi boyunca yayılır ve onlara karşılık gelen elektrot yüzeyinde elektrokimyasal olarak tepki verirler. Eğer gözenekli elektrot aşırı miktarda elektrolit içerirse, elektrot yüzebilir ve elektrolit fazındaki gazların tepkime bölgesine geçişini engelleyebilir. Ardından gözenekli elektrotun elektrokimyasal performansında bir azalma meydana gelir. Bu nedenle; elektrot, elektrolit ve gözenekli elektrot yapısındaki gaz fazları arasında hassas bir denge sağlanır.

Katı elektrolit yakıt hücrelerin arayüzünde, elektriksel ve iyonik olarak elektroda ve elektrolite bağlı çok sayıda katalist bölge oluşturulur. Bunun karşılığında etkinlikle tepkiyen gazlara maruz bırakılır. En başarılı katı elektrolit yakıt hücrelerinde, yüksek performanslı bir ara yüz, kataliste yakın bölgede karma iletkenliğe sahip bir elektrot kullanılır.

Bugüne kadar elde edilen yirmi yıllık deneyimin ardından bazı yakıt hücresi teknolojilerinin birim hücre performansı eskiye oranla daha da geliştirilmiştir. Üç faz sınırındaki gelişmeler, elektrolit kalınlığının azaltılması ve hücrelerin çalışabileceği

sıcaklık aralığını genişleten ileri elektrot ve elektrolit malzemeleri geliştirilmesi gibi yenilikler elde edilmiştir.

Elektrokimyasal tepkimeleri kolaylaştırmaya ilaveten birim hücre bileşenlerinin her birinin başka işlevleri de vardır. Elektrolit sadece çözülmüş reaktantları elektroda taşımaz, aynı zamanda, elektrotlar arasında iyonik yükü de iletir. Dolayısıyla, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, hücrede üretilen elektronların akışı ile dış devreye bağlanacak tüketici yük üzerinden elektrik devre döngüsü tamamlanır [56]. Bu düzenekteki anot-katot arasındaki yalıtkan polimer tabaka, yakıt ile oksidant gaz akışlarının doğrudan karışmasını önleyen fiziksel bir engel oluşturur [56].



Şekil 2. 2: Bir yakıt hücresinde temel işlevler ve donanımı.

(1-Hidrojen iyonları, 2-Protonların geçişi, 3-Elektronların ayrışması ve elektrik akımı oluşumu, 4-Anot-Katot arasındaki polimer zar, 5-Oksijen iyonları ve su oluşumu, 6-Bu donanımların oluşturduğu yığın yakıt hücresi görünümü)

Yakıt hücrelerindeki gözenekli elektrotlar, elektrokimyasal tepkimelerin gerçekleşmesini sağlamakla birlikte;

- Bir kere oluşturulduktan sonra, elektronları üç fazlı ara yüzün içine ya da dışına iletebilmek için, elektrik geçirgenliği iyi olan malzemelerden üretilmiş ve diğer hücreler ya da yük ile gereken toplama ya da bağlantı hattını sağlamalı,
- Tepkiyen gazların hücre boyunca eşit dağılımını sağlamalı,
- Tepkime ürünlerini ana gaz fazına etkin bir şekilde taşınmasını sağlamalıdır.

Sonuç olarak, elektrotlar tipik olarak gözeneklidirler ve elektriksel iletkenliği olan malzemedir yapılırlar. Düşük sıcaklıklarda, sadece birkaç ender ve pahalı malzeme yeterli elektro katalitik aktivite sağlar ve bu yüzden bunun gibi katalistler, ara yüzde ihtiyaç duyulan yerlere küçük miktarlarda yerleştirilir. Yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinde, ana elektrot malzemesinin elektro katalitik aktivitesi yüksek olur.

Her ne kadar geniş çapta yakıt hücresi geometrisi ele alınmış olsa da, şu an geliştirilen yakıt hücrelerinin çoğu ya düzlemsel ya da silindirikdir.

2.3. Yakıt Hücresi Yığını

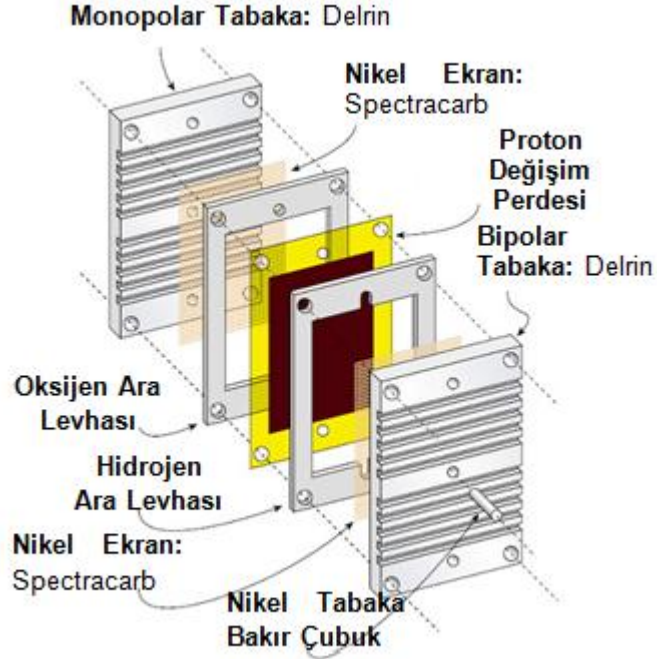
En pratik yakıt hücresi uygulamaları için, birim hücreler, uygulama için gereken gerilim ve güç çıkış seviyelerini elde edebilmek üzere modüler bir şekilde bir hücre yığını içinde bir araya getirilirler. Genellikle, bir araya getirme birçok birim hücrenin elektriksel iletken ara bağlantılar aracılığıyla seri olarak bağlanmasını gerektirir. Böylece, farklı yığın düzenlemeleri ortaya çıkar.

2.3.1. Düzlemsel çift kutuplu yığın

En yaygın yakıt hücresi yığın tasarımı düzlemsel çift kutuplu olanıdır. Şekil 2.3.'de düzlemsel çift kutuplu bir yığın gösterilmiştir [56]. Bireysel birim hücreler ara bağlantılar ile elektriksel olarak bağlanır. Düz levha hücre yapısından dolayı ara bağlantı;

- Komşu hücreler arasında, özellikle düz levha hücreler arasında elektriksel seri bağlantı sağlamak,
- Komşu hücrelerin yakıt ve oksidantını ayıran bir gaz bariyeri sağlamak şeklinde iki işlevli bir ayırıcı oluşturur.

Birçok düzlemsel çift kutuplu tasarımda ara bağlantı, ayrıca, hücreler üzerine gaz akışının yayan kanallar içerir. Düzlemsel çift kutuplu tasarım elektriksel olarak basittir ve kısa elektronik akım yollarına yön verirler ki bu da hücre direncini en aza indirmeye yardımcı eder.



Şekil 2. 3: Bir düzlemsel yakıt hücresi yığını prensibi

Düzlemsel çift kutuplu yığınlar, gaz akışının düzenlenmesine göre daha detaylı özelliklerde tasarlanabilirler;

- Çapraz akış: Hava ve yakıt birbirlerine dik akarlar
- Birlikte akış: Hava ve yakıt birbirlerine paralel ve aynı yönde akarlar. Silindirik hücrelerde ise, gazların radyal olarak dışarı aktığı anlamına gelir
- Ters akış: Hava ve yakıt birbirlerine paralel fakat ters yönlerde akarlar. Silindirik hücrelerde ise, gazların radyal akış demektir
- Yılkavi akış: Hava veya yakıt zikzaklı bir yol takip ederler.
- Spiral akış: Silindirik hücrelere uygulanır.

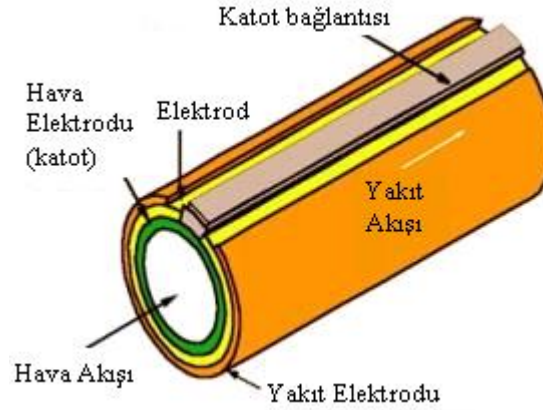
Gaz akışı düzenlemesinin seçimi yakıt hücresinin tipine göre farklılaşabilir. Çift kutuplu yığınlarda hücrelere gaz akışının sağlanması;

- Dahili: Manifoldlar birim hücreler boyunca çalışır
- Birleşik: Manifoldlar birim hücrelere girmez fakat ara bağlantılara birleştirilirler
- Harici: Manifoldlar, bir rüzgâr kutusu gibi tamamen hücrenin dışındadır.

2.3.2. Silindirik hücreli yığınlar

Tüp hücreli yığınlar, özellikle yüksek sıcaklık yakıt hücreleri için geliştirilmiştir. Tüp hücreler sızdırmazlık ve hücrelerin yapısal birleştirilmesinde önemli avantajlara sahiptirler. Örneğin, yüksek güç yoğunluğu ve kısa akım yolları elde etme olanağı vardır. İlk tüp tasarımlarından birinde, akım tüpün etrafında tanjantsal olarak iletilmiştir. Tüplerin arasındaki ara-bağlantılar, dikdörtgensel tüp dizileri oluşturmada kullanılır. Muhafaza ara bağlantısının tüplerin sonunda yapıldığında akım, tüpün eksenini boyunca iletilir. Bireysel hücreler için elektronik iletim yolunu en aza indirmek üzere, ardışıl seri bağlı hücreler geliştirilmektedir. Hücre dizileri seri ya da paralel bağlanabilirler.

Silindirik hücrelerde, yoğunluğu arttırmamak için, bazı düzleştirilmiş tüpler kullanılır. Şekil 2.4' de, bir silindirik yakıt hücresi akışının prensibi gösterilmektedir [56].

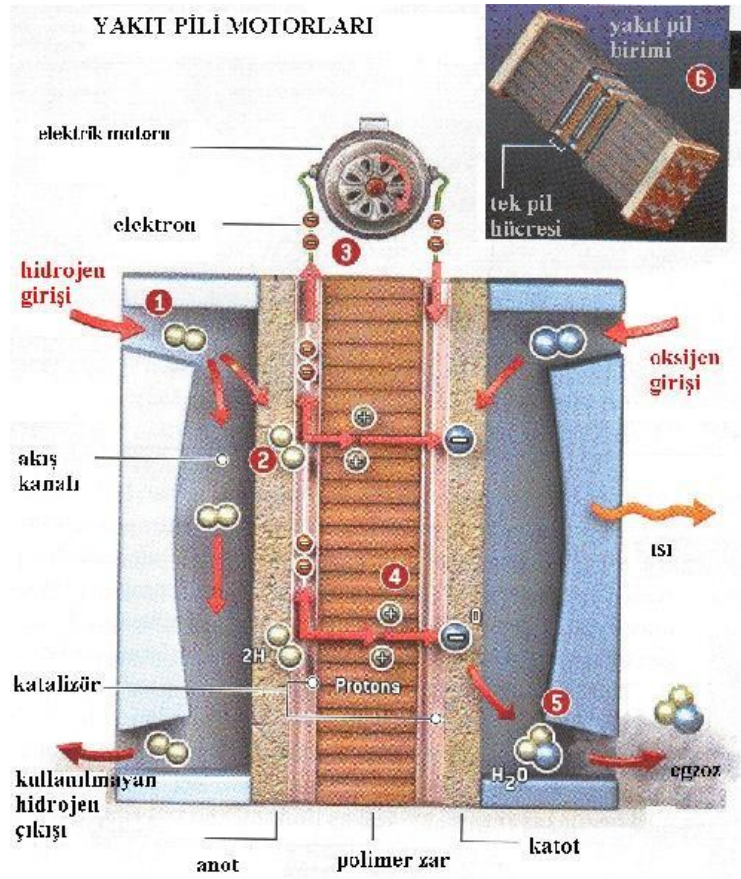


Şekil 2. 4: Bir silindirik yakıt hücresi yığını prensibi

2.4. Yakıt Hücresi Kurulumları

Yığına ilaveten, kullanışlı yakıt hücresi kurulumları birkaç diğer alt kurulum ve bileşene ihtiyaç duyarlar: Yığın ile birlikte Devre Dengeleyici (DD) yakıt hücresi kurulumunu oluşturur. DD nin kusursuz olarak düzenlenmesi, yakıt hücresi tipi, yakıt seçimi ve uygulama türüne bağlıdır. Ayrıca, bireysel hücre ve yığın tasarımlarının özel işletim koşul ve gereksinimleri, DD nin karakteristiğini belirler.

Yakıt hücrelerinde; saf hidrojen gibi yakıtların kullanıldığı durumlar dışında, genellikle kirleticilerin ayıklanması ve ısı şartlandırmayı da içine alan bazı yakıt hazırlama işlemlerine ihtiyaç duyulur. Saf hidrojen dışında bir yakıt kullanan birçok hücre, hidrojen açısından zengin bir anot besleme karışımı oluşturmak üzere yakıtın bir miktar oksidantla genellikle buhar ya da hava tepkimeye sokulması gibi bir yakıt iyileştirme işlemine ihtiyaç duyarlar. Hava gereksinimi için en pratik yakıt hücresi kurulumunda, hava filtreleri ve hava kompresörleri kullanılmaktadır. Bütün yakıt hücresi kurulumları özenli bir yakıt hücresi yığını sıcaklık yönetimine ihtiyaç duyarlar. Hücrede, suyun tamamen bir tepkime ürünü olmasına karşın, bazı kısımlarında suya ihtiyaç duyulur. Yakıt hücresi yığınları, yük için doğrudan kullanıma uygun olmayan değişken bir doğru gerilim üretileceğinden, elektrik gücü düzenlemesi yapılır. Dolayısıyla DD, çoğu yakıt hücresi kurulumunun ağırlık hacim ve maliyetinde belirgin bir yer tutar.



Şekil 2. 5: Yakıt hücresi enerji akışı prensibi

Şekil 2.5'te, bir yakıt hücresi enerji akışının prensibi gösterilmektedir [56]. Yakıt işleme ile başlanan, alışılagelmiş bir yakıt olan doğalgaz, diğer gazsal hidrokarbonlar,

metanol, gaz yağı, ya da kömür temizlendikten sonra hidrojen içeren bir gaza dönüştürülür. Enerji dönüşümü, DA gerilimi yığınlar ya da demetler halinde bir araya getirilmiş bireysel yakıt hücreleri yardımıyla üretilir. Değişken sayıdaki hücreler veya yığınlar, belirli bir güç uygulamasına göre ayarlanabilir. Sonuçta yariletken güç elektroniği düzenleriyle elektriksel güç doğru akımdan, tüketicinin kullanımını için düzenlenmiş bir başka değerdeki doğru akıma ya da alternatif akıma dönüştürülür.

2.5. Yakıt Hücresi Türleri

Yakıt hücrelerinin en yaygın sınıflandırılması hücrelerde kullanılan elektrolit tipine göre olanıdır ve şunları içerir 1) polimer elektrolit yakıt hücresi (PEYH), 2) Alkalın yakıt hücresi (AYH), 3) Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH), 4) Eriyik karbonat yakıt hücresi (EKYH) ve 5) Katı oksit yakıt hücresi (KOYH). Yaygın olarak, elektrolit seçimi, yakıt hücresinin çalışma sıcaklık aralığını belirler. Bir yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı ve kullanışlı ömrü, elektrotlar, elektrolit, ara-bağlantı, akım toplayıcı vb. gibi hücre bileşenlerinde kullanılan malzemelerin fizyokimyasal ve termomekanik özelliklerine bağlıdır. Sulu elektrotlar yüksek buhar basınçları ve yüksek sıcaklıklardaki çabuk bozulma eğilimlerinden dolayı yaklaşık 200°C ya da daha düşük sıcaklıklarla sınırlandırılırlar. Çalışma sıcaklığı, gereken yakıt işleme seviyesini belirlemede de önemli rol oynar. Düşük sıcaklıklı yakıt hücrelerinde, tüm yakıt, yakıt hücresine girmeden önce tamamen hidrojene çevrilmiş olmalıdır. Yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerinde CO ve hatta CH₄, içeride hidrojene dönüştürülebilir. Dolayısıyla doğrudan elektrokimyasal olarak oksidize edilebilir. Tablo 2.2. temel yakıt hücresi tiplerinin anahtar özelliklerini gösterilmektedir.

Tablo 2. 2: Temel Yakıt Hücresi Tiplerinin Anahtar Özellikleri

	PEYH	AYH	FAYH	EKYH	KOYH
Elektrolit	Sulu Polimerik İyon Değiştirici Zarlar	Asbest Yatak İçinde Hareketli veya Hareketsiz Potasyum Hidroksit	SİC İçinde Hareketsiz Sıvı Fosforik Asit	LiAlO ₂ İçindeki Hareketsiz Sıvı Eriyik Karbonat	Perovskitler (Seramikler)
Elektrodlar	Karbon	Dönüşüm Metalleri	Karbon	Nikel ve Nikel Oksit	Perovskite ve Perovskite Metal Sermet(=Seramik + Metal)
Katalist	Platinyum	Plantinyum	Plantinyum	Elektrod Malzemesi	Elektrod Malzemesi
Ar-bağlantı	Karbon veya Metal	Metal	Grafit	Paslanmaz Çelik veya Nikel	Nikel, Seramik veya Çelik
Çalışma Sıcaklığı	40-80°C	65-220°C	205°C	650°C	600-1000°C
Şarj Taşıyıcı	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Hidrokarbon Yakıtlar İçin Dış İyileştirici	Evet	Evet	Evet	Hayır, Bazı Yakıtlar İçin	Hayır, Bazı Yakıtlar ve Hücre Tasarımları İçin
CO' in Hidrojene Dönüşümünde Dış Değişiklik	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Temel Hücre Bileşenleri	Karbon-Esaslı	Karbon-Esaslı	Grafit-Esaslı	Paslanmaz-Esaslı	Seramik
Ürün Su Yönetimi	Buharlaştırarak	Buharlaştırarak	Buharlaştırarak	Gazlı Ürün	Gazlı Ürün
Ürün Isı Yönetimi	Gaz İşletimi +Sıvı Soğutma Ortamı	Gaz İşletimi +Elektrolit Dolaşımı	Gaz İşletimi+ Sıvı Soğutma Ortamı Veya Buhar Üretimi	İç İyileştirme+ Gaz İşletimi	İç İyileştirme+ Gaz İşletimi

Elektrolite göre sınıflandırmalara paralel olarak, bazı yakıt hücreleri kullanılan yakıt tipine göre sınıflandırılır. Doğrudan Alkol Yakıt Hücreleri (DAYH) veya daha yaygın hali ile, Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri (DMYH). Bu hücrelerde iyileştirilmemiş alkol kullanılır. Taşınabilir uygulamalarda metanol veya diğer bir alkolün doğrudan kullanıldığı hücreler, PEYH tipi yakıt hücresi prensibindedirler. Doğrudan Karbon Yakıt Hücrelerinde, ara gazlaştırma kademesi olmaksızın, katı

karbon muhtemelen kömür, tezek veya biyolojik esaslı bir yakıt doğrudan anod'da yakıt olarak kullanılır. DKYH'da tepkimelerin termodinamikleri çok yüksek etkinlikte dönüşüme izin verirler.

2.5.1. Polimer elektrolit yakıt hücresi (PEYH)

Bu yakıt hücresi içindeki elektrolit, çok iyi bir proton taşıyıcı olan bir iyon değiştirme zarı oluşturan florlu sülfonik asit polimeri veya benzeri bir polimerdir. Buradaki tek sıvı sudur; dolayısıyla korozyon sorunları en düşük seviyede olur. Hem anot hem de katot için, plantinyum elektrokatalistli karbon elektrotlar ya karbon yada metal ara-bağ lantılar ile birlikte kullanılırlar.

Performans açısından, zar içindeki su yönetimi önemlidir. Hücredeki zar, ıslak kalması gerektiğinden yan ürün olan suyun üretildiğinden daha hızlı buharlaşmaması gereken koşullarda çalıştırılır. Polimerin çalışma sıcaklığı sınırlarından dolayı hücrede, çok az seviyede veya hiç CO içermeyen bir H₂ zengini gaz kullanılır.

Sıcaklık değeri, genellikle 100°C'nin altında, 60°C ile 80°C arasındadır. Genelde, hem anot hem de katodun her ikisi için FAYH (Fosforik Asit Yakıt Hücresi)'de kullanılan daha yüksek katalist olan Pt kullanılır. CO'in, sülfür çeşitleri ve/veya halojenlerin az miktarında bile anot bozulduğundan, yakıtların işlenmesi önem kazanır.

PEYH'ler geniş alandaki uygulamalarda tercih edilirler. AYH (Alkalin Yakıt Hücresi)'lara ve hidrojene olan yüksek ilgi sonucunda, son on yılda PEYH' e yapılan yatırımlar diğer bütün kombine yakıt hücre tiplerine yapılanı geçmiştir. Her ne kadar sabit uygulamalar için PEYH geliştirilmekte ise de, günümüzde otomotiv ve taşınabilir uygulamalara yönelik çalışmalara hız verilmiştir.

Tablo 2.2'deki gibi yakıt hücreleri ile karşılaştırılmasından üstünlük olarak PEYH, gaz sızıntılarına karşı mükemmel geçirmezlik sağlayan katı bir elektrolite sahiptir. PEYH'lerin düşük çalışma sıcaklığı hızlı start yapmaya izin veriler ve korozif hücre bileşeni içermemesiyle, diğer yakıt hücresi tiplerinde, yığın yapısında ve DD'de gereken dış kaynaklı malzeme kullanımına ihtiyaç duyulmaz. Test sonuçları,

PEYH'de 2kW/l ve 2W/cm^2 'nin üzerinde ki yüksek güç yoğunluklarına çıkılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Özellikle, saf hidrojenin yakıt olarak kullanılabilirdiği durumlar için PEYH uygundur.

Olumsuz özellikler açısından; düşük ve sınırlı çalışma sıcaklığı aralığı özellikle çok yüksek akım yoğunluklarında ısıl sorunlar yaşanır. Isı yönetimi güçleşir ve atıl ısının çevrim içi kullanımı güçleşir. Elektrolit, yeterli sulamayı seviyeyi taşımadan dengelenmesi gerekir. Bu açıdan su yönetimi PEYH tasarımında bir diğer önemli sorundur. Ayrıca, PEYH'lerde CO, sülfür çeşitleri ve amonyak içeren kirleticiler den dolayı bozulma olasılığı bulunur. Bu dezavantajların birkaçı çalışma akım yoğunluğunu azaltarak ve katalizör yükünü artırarak ortadan kaldırılabilir, fakat her iki işlem de kurulumun maliyetini yükseltir. Eğer hidrokarbon yakıtlar kullanılırsa, kurulum boyutları, karmaşıklığı, etkinliği kurulum maliyetini olumsuz etkiler. Çünkü uzun bir yakıt işleme ihtiyacı duyulur. Sonuçta, PEYH'i için geliştirilecek hidrojen altyapısı ihtiyacı, ticarileşmeye bir engel oluşturabilir.

2.5.2. Alkalin yakıt hücresi (AYH)

Bu yakıt hücresindeki elektrolit, yüksek sıcaklıkta çalışan ($\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$) yakıt hücrelerinde KOYH (% 85 wt) veya düşük sıcaklıkta çalışan ($<120\text{ }^\circ\text{C}$)'larda ise KOH (% 35~50) olarak yoğunlaştırılarak elde edilir. Elektrolit bir yatak genellikle asbest içinde tutulur ve geniş aralıktaki Ni, Ag, metal oksitler, Mg ve Al oksitler ve soy metaller v.b. gibi elektro-katalistler kullanılabilir. Yakıt temini hidrojen dışındaki reaktif olmayan öğelerle sınırlandırılmıştır. CO bir bozucudur ve CO_2 , KOH'te K_2CO_3 'ü oluşturmak ve sonuçta elektroliti değiştirmek üzere tepkimeye girecektir. Havadaki az miktardaki CO_2 bile alkalin hücre için potansiyel bir bozucu olarak kabul edilir. Bazı doğrudan karbon yakıt hücreleri, alkalin elektrotlar kullansa da, genellikle hidrojen, AYH için tercih edilen yakıt olarak düşünülür.

AYH, 1960'da başlayarak, geliştirilen ilk modern yakıt hücrelerinden biridir. O zamanki uygulama, Apollo uzay aracına seyir halinde elektrik gücü sağlamaktı. AYH, uzay uygulamalarında dikkate değer başarı sağladı, fakat yeryüzü uygulamalarında CO_2 'ye olan hassasiyetiyle sorunlar yaşandı. Hala, ABD ve

Avrupa'daki bazı geliştiriciler, mobil ve kapalı kurulum uygulamaları için AYH'ni sürdürmektedirler.

Tablo 2.2'deki gibi yakıt hücreleri ile karşılaştırılmasından üstünlük olarak aktif O₂ elektrot kinetiklerine ve geniş bir yelpazedeki katalizör kullanma esnekliğine bağlı olarak yüksek performanslı olması ön plana çıkar.

Olumsuz özellikler açısından; elektrodun CO₂'ye olan hassasiyeti, yakıt olarak fazlasıyla saf H₂ kullanımını gerektirir. Buna bağlı olarak, iyileştirme açısından etkili bir CO ve CO₂ temizleme kurulumunu gerektirir. Ayrıca, atmosfer havası oksidant olarak kullanıldığında havadaki CO₂ yok edilir. Bu işlem teknik anlamda olarak üstesinden gelinmez değilse de, kurulumun boyut ve maliyetinde olumsuz bir etki yapacaktır.

2.5.3. Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)

Bu hücrede elektrolit olarak, tipik 150°C~220°C'ta çalışan, %100 yoğunlaştırılmış fosforik asit kullanılır. Düşük sıcaklıklarda, fosforik asit zayıf bir iyonik iletken ve anottaki Pt elektro-katalistinin CO tarafından bozulması ile durumu kötüleştirir. Yoğunlaştırılmış fosforik asidin bağlı dengesi diğer yaygın asitlerinkine göre yüksektir; Buna bağlı olarak, FAYH asit sıcaklık aralığının (100°C~220°C) üst sınırında çalışabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, yoğunlaştırılmış asit kullanımı su buharı basıncını en aza indirir. Dolayısıyla hücredeki su yönetimi zor değildir. Asidi tutmak için çok yaygın olarak kullanılan yatak, silikon karpit ve hem anottaki hem de katottaki elektro-katalist ise Pt'dir.

FAYH'lar en çok hareketsiz tüketici uygulamaları için geliştirilmektedir. Hem ABD'de hem Japonya'da yüzlerce FAYH sistemi üretilmiş olup saha testlerinde ve gösterimlerde kullanılmıştır. Günümüzde hala ticari olan birkaç yakıt hücresi kurulumundan biridir. PEYH' nin maliyet açısından daha iyi olduğundan, son 10 yılda FAYH'ın geliştirilmesi yavaşlamıştır. Bununla beraber, geliştirilmesine de devam edilmektedir.

Tablo 2.2'deki gibi yakıt hücreleri ile karşılaştırılırsa, FAYH'ler, PEYH ve AYH'lere göre CO'e daha az hassastırlar. FAYH' lar CO'nun yaklaşık % 1'ini seyreltici olarak tolere eder. Çalışma sıcaklığı, DD bileşenlerinde olduğu gibi, yaygın yapı malzemelerinin kullanımına izin verecek ölçüde düşüktür. Dolayısıyla ısı yönetim için dikkate değer bir tasarım esnekliği sağlar. FAYH'ler, birçok PEYH kurulumundan daha avantajlıdır, FAYH'nin atık ısı, hali hazırda çoğu ticari ve sanayi amaçlı yeniden değerlendirme uygulamalarında kullanılabilir.

Olumsuz özellikler açısından; katot-terafı oksijen düşüşü AYH'de olduğundan daha yavaştır ve Pt katalist kullanımını gerektirir. PEYH'den daha az karmaşık olmasına rağmen, FAYH'lar hala iyi performansa ulaşmak için, tipik olarak bir su-gaz değiştirici reaktörü de içeren kapsamlı bir yakıt işleme sürecine ihtiyaç duyarlar. Son olarak fosforik asidin yüksek aşındırıcı özelliğinden dolayı, yığınlarda grafik ayırıcı levhalar gibi pahalı malzemelerin kullanımını gerektirir.

2.5.4. Eriyik karbonat yakıt hücresi (EKYH)

Bu yakıt hücresindeki elektrolit genellikle, LiAlO_2 'den bir seramik yatak içinde tutulan bir alkali karbonat bileşimidir. Yakıt Hücresi alkali karbonatların, karbonat iyonları ile iyonik iletim sağlamak üzere, yüksek iletken bir eriyik tuz oluşturduğu 600°C 'den 700°C ' ye kadar olan bir sıcaklık aralığında çalışmaktadır. EKYH'lerdeki yüksek çalışma sıcaklıklarında, Ni (anod) ve Nikel oksit (katod) tepkimeyi başlatmak için yeterlidir. Çalışma için soy metaller gerektirmez ve birçok yaygın hidrokarbon yakıtlar içerik olarak iyileştirilebilir.

EKYH geliştirmede, bağıl geniş boyut, ağırlık ve yavaş devreye alma zamanının sorun olmayıp, daha kapsamlı durağan ve deniz uygulamaları hedeflenmektedir.. EKYH' lar bilinen ve yenilenebilir yakıtlar kullanılarak geliştirilmektedirler. EKYH benzeri teknoloji aynı zamanda DKYH için de ele alınmaktadır. FAYH'dan sonra, EKYH'ler de, geliştirilmekte ve tamamlanmış projelerle birlikte, yaygın olarak durağan uygulamalarda kullanılmaktadırlar. EKYH tipi sistemler üzerinde araştırma yapanların azalması ile birlikte geliştirme araştırma ve tasarımlar devam etmektedir.

Karşılaştırma sonucunda EKYH'nin, 650°C gibi bağıl yüksek çalışma sıcaklığına sahip olma üstünlüğü vardır. Nikel elektrotlar yeterli aktiviteyi sağlarken pahalı elektro-katalistlere ihtiyaç duyulmaz, ve hem CO hem de bazı hidrokarbonlar DD'yi basitleştirmek ve kurulum etkinliğini %45–50 aralığından %50–55 aralığına yükseltmek suretiyle yığın içinde hidrojene dönüştürülerek EKYH için yakıt oluştururlar. Ayrıca, yüksek sıcaklıktaki ısı çevrimi, kurulum etkinliğini 55-60 aralığından 60-65 aralığına yükseltebilir.

EKYH geliştiriciler için asıl sorun, grafitten daha ucuz fakat demir kökenli çelikten daha pahalı olan Nikel ve yüksek seviye paslanmaz çelik kullanım gerekliliğidir. Hücre donanımında kullanılan çelik, aşındırıcı ve hareketli elektrolit için kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklar, mekanik dengeye ve yığın ömrünü kısaltarak malzeme sorunları oluşturur. Ayrıca DD bileşenleri için, karbonat iyonu oluşturmak üzere katotta genellikle anot eksozundan geri elde edilen bir CO₂ kaynağına ihtiyaç duyulur. Yüksek temas direnci ve katot direnci, pratik çalışma gerilimlerinde güç yoğunluğunu 100-200 mW/cm² aralığında sınırlar.

2.5.5. Katı oksit yakıt hücresi (KOYH)

Bu yakıt hücresindeki elektrolit katı, gözeneksiz bir metal oksit olup genellikle Y₂O₃ ile dengelenmiş ZrO₂ dir. Hücre, iyonik iletimin oksijen iyonları ile yapıldığı 600-1000°C aralığında çalışır. Anot Co-ZrO₂ veya Ni-ZrO₂ sermet, ve katot ise Sr katkılı LaMnO₃ dür.

Önceden katı elektrolitlerin sınırlı iletkenlikleri 1000°C civarında hücre işletimi gerektirmekteyken, günümüzün geliştirilmiş katotlu ince elektrolit hücrelerinde çalışma sıcaklığı 650–850°C aralığına inilebilmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından KOYH çalışma sıcaklığı daha da aşağı çekilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Son 10 yıldır, düşük maliyetli yapı malzemelerinin kullanımıyla, titiz ve yüksek performanslı KOYH lar geliştirilmektedir.

Performans gelişiminin bir sonucu olarak, KOYH lerde performans arttırılması yapılarak, sabit tüketiciler, mobil araçlar için yardımcı güç ve özel uygulamaları da içeren, geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

Karşılaştırma sonucunda KOYH tipi hücreler AYH tipi hücrelerden önce 1950 sonlarında geliştirilmeye başlanmış ve üzerinde çalışmalar yapılan en uzun geliştirme periyotlu yakıt hücresidir. Bu hücrelerde kullanılan elektrolit, katı olduğundan, hücre tüpsel, düzlemsel dik yapıdaki şekillerde tasarlanabilir. Birim hücrenin katı seramik yapısı hücredeki aşınma problemlerini azaltır. Bununla birlikte, katı elektrolit 3 faz sınırlamasına olanak sağlar. Dolayısıyla, elektrolit hareketini veya elektrotlardaki taşmayı engeller. Hücre hareketleri bağıl olarak hızlıdır ve CO, EKYH' de olduğu gibi doğrudan kullanılabilir bir yakıttır. EKYH' de olduğu gibi katotta CO₂ ihtiyacı yoktur. KOYH'da kullanılan malzemelerin maliyeti yüksek değildir. İnce-elektrolit levha KOYH birim hücreler, FEYH ile elde edilen güç yoğunluklarına yakın değerler elde edilebilir. EKYH' de olduğu gibi, yüksek çalışma sıcaklıklarında, atık ısının çoğu yeniden kullanılabilir.

KOYH de yüksek sıcaklıklar olması bir dezavantajdır. Çünkü, malzemeler arasında ısıl genleşme uyumsuzlukları olabilir. Düzlemsel yapıli hücreler arası sızdırmazlık sağlamada zorluk yaşanır. Yüksek çalışma sıcaklığı, malzeme seçiminde kısıtlamalar getirerek üretim aşamasında zorluklar oluşur. Bazı tasarımlardaki ara bağlantılar gibi metal yığın bileşenleri aşınma sorunları oluşturur. Dolayısıyla tüm bu etkenler, yığın-seviye güç yoğunluğunu ve yığın ömrünü, FAYH ve EKYH tiplerine göre, önemli ölçüde sınırlar.

2.6. Yakıt Hücrelerinin Özellikleri

Yakıt hücreleri uygulamalarında başta gelen en önemli özellik, öncelikle yüksek etkinlik potansiyeli ve düşük çevresel etkisi açısından hiç asit gazı veya katı atık çıkışı olmamasıdır. Mevcut yakıt hücre tesislerinin etkinliği, yakıtın Düşük Isıtma Değeri (DID) açısından, % 30 ile % 55 arasındadır. % 70 DID'in üzerinde etkinlikler sunan hibrit yakıt hücresi, kojenerasyon gibi yeniden ısıtma gaz türbini çevrimleri şeklinde hücre performansını artırır.

Yakıt hücrelerinin diğer bir belirgin özelliği de performanslarının ve maliyetlerinin diğer güç teknolojilerine göre daha az parametreye bağlı olmasıdır.

Küçük yakıt hücre donanımı, eşdeğer düşük çıkış değerleri ve uygun maliyetleri ile büyük güçte tasarlananlar gibi etkin çalışırlar. Böylece, yaygın güç teknolojilerinin pratik olmadığı durumlarda yakıt hücreleri tercih edilebilir. Ayrıca, yakıt hücre donanımı oldukça sessiz çalıştıklarından sessiz jeneratör olarak tanımlanabilirler.

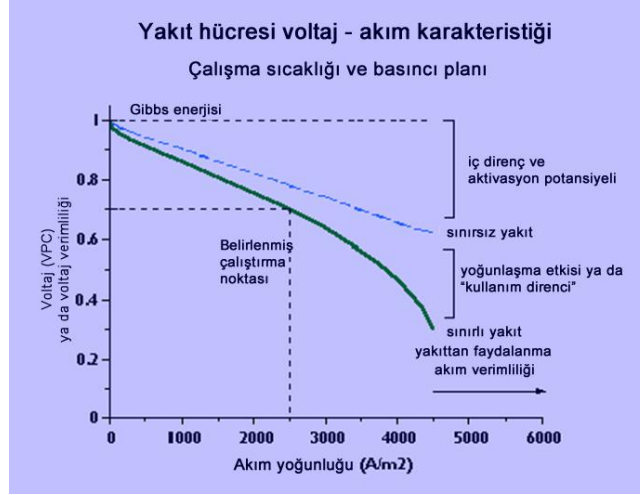
Yakıt hücresi ticarileşmesine günümüze dek başlıca engeller; yeteri kadar uzun olmayan ömürleri, güvenilirlik, yüksek maliyet ve piyasaların yakıt hücrelerine ilgisizliği sayılabilir. Hidrojen gibi özel yakıtlar gerektiren yakıt hücreleri için yakıt altyapısı eksikliği de ayrıca ticarileşmeyi sınırlamaktadır. Yakıt hücrelerinin genel özellikleri sıralanacak olursa;

- Doğrudan enerji dönüşümü yapabilmeleri,
- Enerji dönüştürücüde hareketli parçaların olmayışı,
- Sessiz çalışabilme olanakları,
- Daha düşük sıcaklık seviyelerinde dayanıklılık, güvenilirlik ve kullanılabilirlik,
- Konumlandırma kolaylığı,
- Yakıt esnekliği
- Tasarım dışı yük işletiminde iyi performans
- Yük ve büyüme güvenilirliğini karşılayan modüler uygulamalar ve uzaktan işletim
- Boyut esnekliği
- Hızlı yük takip kabiliyeti şeklinde tanımlanabilir.

Yakıt hücrelerinin olumsuz özellikleri ise;

- Pazar giriş maliyeti yüksekliği;
- Yüksek sıcaklık birimlerinde ispatlanmamış dayanıklılık ve güvenilirlik,
- Güç endüstrisi için alışılmadık bir teknoloji.
- Altyapı olmayışı olarak sıralanabilir.

Bir yakıt hücresinin ürettiği akım-gerilim özgeğrisi, Şekil 2.6' de gösterilmektedir. Birçok araştırma ve deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler, karmaşık bir matematiksel modeli olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.6: Bir yakıt hücresinin Akım-Gerilim özgeğrisi

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi, akımın sıfıra yakın olduğu, yani yük yok iken sabit bir gerilim üretilmektedir. Üretilen gerilimin, basınç ve kayıplar, yük yoğunluğu, sıcaklık, yakıt akış durumu ile tepkime konumuna bağlı olarak değişeceği açıktır. Yakıt akışının düşük olması durumunda, akım yoğunluğu da çok düşük olacaktır. Akım artmaya başladığında, gerilimde düşme olacaktır. Bunu belli oranda dengelemek için yakıt akışı ayarlanabilir. Dolayısıyla gerilim azalması akıma bağlı olarak doğrusal azalır. Yakıt akışı akımla orantılı olarak ayarlanırsa, verim yaklaşık sabit tutulabilir. Dolayısıyla düşük yüklerde gerilim yaklaşık sabit gibi tutulabileceğinden toplam verim yüksek olur. Yakıt kullanımı sınırlı olacağından maksimum hücre akımı sınırlı kalacaktır. Yakıtın hücre yüzeyinde belirli basınçla dağılımı sağlandığında gerilim kayıpları ihmal edilebilecek seviyeye çekilebilir. Teorik olarak böyle olmasına karşın, pratik uygulamalarda yüzeylerin tümünde düzgün akış sağlanamayabilir. Dolayısıyla gerilim-akım yoğunluğu değişimi doğrusal olmaz [56].

Yakıt hücrelerinde: işletme genelde maksimum güç için, bu özgeğrinin doğrusal bölgesinde gerçekleştirilir. Tam yük uygulamaları dışındaki düşük yüklerde, akımla orantılı olmak üzere farklı yakıt denetimleri uygulanır. Çünkü bu durumda kararlılık sorunları oluşabilir. Gerilim-akım özgeğrisi; işletme sıcaklığı ile yakıt kullanımına göre çıkartılır.

3. GEMİLER İÇİN YAKIT PİLİ

Bu bölümde doktora çalışmasının temeli olan, yakıt pillerinin savaş gemilerinde kullanımını için örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Mevcut ve kullanılan yakıt pili uygulamaları ile hedeflenen gemi uygulaması karşılaştırılmaktadır.

Hayatta olduğu gibi gemilerde de enerji, geminin hareketini gerçekleştirmek için üretilir. Gemide üretilen enerji, savaş yeteneğini sağlayan sistemin çalışmasını sağlayacak olan enerji türüne çevrilir. Motorlu gemilerde tahrik motorları dizel veya gaz türbinli olup yakıttan elde edilen enerji motorlarda kullanılarak geminin hareketi sağlanmaktadır.



Şekil 3. 1: Gemiler için enerji elde etme yöntemleri prensibi

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, yakın gelecekte enerjinin üretim ve kullanımı için, depolama sorunlarından dolayı, geleneksel yöntemlerden farklı sistemlerin kullanımı ve tasarım çalışmaları sürdürülecek görünümündedir. Özellikle savaş gemilerinde kullanılan silah sistemlerinin ortak özelliği yüksek oranda elektrik enerjisi gereksinimidir. Bu gereksinimlerin, gelişmiş elektrik enerjisi üretimi, depolanması ve kullanım yöntemleri ile karşılanacağı düşünülmektedir. Gerektiğinde savaş donanımını kısa sürede aktif hale getirecek tasarımlara gereksinim duyulacaktır. Su taşıtlarından denizaltılarda, savaş yeteneği ve özelliklerinin geliştirilmesi de sessiz

bir enerji kaynağına gereksinim duyulmasına başka bir nedendir. Bu gereksinimin karşılanabilme özelliği ile yakıt hücrelerinin uygulamaları, yakın gelecekte önem kazanacaktır.

Deniz taşıtları için gerekli elektriksel güç, dizel veya gaz yakıtlı jeneratörler vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Geleneksel enerji üretimi, günümüze kadar büyük oranda bu dizel veya gaz yakıtlı jeneratörler ile yapılmaktaydı. Bunun dışında nükleer enerji ile hareket enerjisi üreten sistemler dışında alternatif olarak yakıt pili sistemleri güvenli, sessiz, maliyeti düşük ve çevreci bir enerji üretim yöntemidir. Bazı olumsuz yönleri yanında gemilerde kullanılan yakıt pillerinin;

- Dizel jeneratörler ve gaz türbinlerine göre yüksek verimli ve hafif,
- Aynı güç seviyesinde daha az hareketli parça daha az ses izi olasılığı,
- Daha az kızılötesi ışınım, eksoz gazları ve titreşimi daha küçük gemi izi,
- Modüler birimler halinde küçük guruplar ve gemiye dengeli dağıtım ile isabet alma durumunda çalışma olasılığını maksimize etme,
- Aynı güç seviyesi için daha az miktarda CO₂, No_x, So_x yayılımı, dolayısıyla sera etkisine olumlu katkıları,
- Yüksek verimde elektrik üretim, (% 40 - %70),
- Aynı oranda güç için daha hafif olmaları,
- Sera etkisi veren gazların miktarlarında azalma, şeklinde avantajları sayılabilir.

Taşıtlar için gerekli ekonomik enerji üretimi alanında, karasal uygulamalarda olduğu gibi, deniz taşıtları ve gemilerde de güç üretimini iyileştirmek için araştırmalar yapılmaktadır. Bu üretim yöntemlerinde temel faktörler, sevk-denetim sistemi, yardımcı güç sistem yatırımları, işletme maliyetleri, yakıt maliyeti ile güç üretimi donanımının verimliliği ve güvenilirliğidir. Bu bakımdan, deniz taşıtları için enerji üretiminde kullanılması planlanan yakıt pillerinin; acil durum için güç sağlama, deniz veya limanda elektrik enerjisi üretimi, özel işletme durumlarında sessiz sevk yapılması için güç eldesi, gemi haberleşmesi için elektrik güç üretimi amacıyla kullanımı planlanmaktadır. Kullanım alanı olarak, su üstü ticari ve savaş gemileri sevk sistemlerinde 5-50 MW ve elektrik enerji kaynağı olarak <10 MW güç seviyeleri ile acil güç kaynağı olarak 0,1-1 MW güç seviyelerinde gereksinim vardır.

Denizaltılarda ise, tek sevk sistemi 2-5 MW, hibrid sevk sistemi 200-400 kW güç seviyelerinde gereksinim vardır.

Ticari gemilerde kullanılan elektrikli tahrik sistemleri; genişletilmiş işletme esnekliği, geliştirilmiş ayakta kalma gücü, personelin gereksiniminin azaltılması, iş verimi artışı, güvenilirlik, ses ve salınımlarda azalma şeklinde yararlar ön plana çıkmaktadır. Şekil 3.2.'de elektrik tahrikli bir gemi sistemi prensibi gösterilmekte, Şekil 3.3.'de elektrik tahrikli gemi yol verme sistemi gösterilmekte, Şekil 3.4.'de elektrik tahrikli gemi sistemi güç sistemi Şekil 3.5.'de elektrik tahrikli gemi sisteminin elektrik donanım ve kontrolü prensip olarak gösterilmiştir [57].

Bilindiği gibi elektrik tahrik sistemni çekici hale getiren; daha iyi manevra kabiliyeti, enerji tasarrufu, daha az bakım ve bakım maliyeti, arttırılmış sistem güvenliği, konfor ve çevrecilik, esneklik gibi bazı üstün özellikleri bulunmaktadır. Manevra kabiliyeti kazandırma açısından, elektrik motorlarının moment-devir özeğrileri, dizel makinelerden oldukça farklıdır. Dizel makineler maksimum momentini sadece belli bir hız aralığında verebilmektedir. Özellikle düşük hızlarda dizel makinelerin momentleri oldukça düşüktür. Elektrik motorları ise sıfırdan nominal hıza kadar nominal momenti sağlayabilmekte, motorun hızı ise bu aralıkta kademesiz olarak kontrol edilebilmektedir. Sonuçta özellikle düşük hızlı manevralarda geminin çok daha hızlı tepki vermesini sağlar [57].

Enerji tasarrufu açısından elektrikle tahrik sisteminde, hem enerji üretim noktasında hem de tüketim noktası olan pervanelerde önemli oranda enerji tasarrufu sağlanabilir. Enerjinin üretildiği dizel makineler yakıt tüketimi açısından optimum noktada çalıştırılırlar. Yük tarafındaki tasarruf ise, pervanenin yük karakteristiğinden kaynaklanır. Pervane karesel tork karakteristiğine sahip bir yüküdür. Dolayısıyla hızın değişimi, hızın küpü oranında çekilen gücün azalmasıyla sonuçlanır. Böylece özellikle düşük hızlarda daha az jeneratör ile geminin güç ihtiyacı karşılanabilir. Ayrıca jeneratörler maksimum veriminde çalıştırılabilir [57].

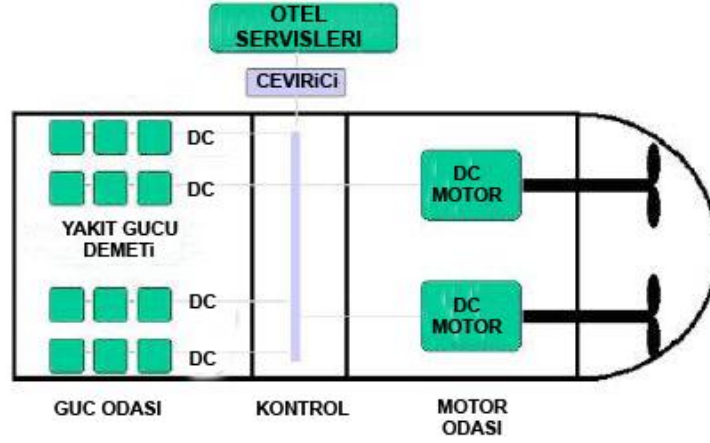
Bakım ve bakım maliyeti açısından jeneratörlerin optimum hızlarda çalışması, zorlanmayı ve yıpranmayı önler. Böylece bakım masrafları ve duruş süreleri kısalmış

olur. Planlı bakımlar da sistem güvenliğini tehlikeye düşürmeden gerçekleştirilebilir. Mekanik bağlantı olmadığı için gerektiğinde jeneratörler yedekleriyle değiştirilebilir. Ana tahrik elektrik motorları ise 24 saat/365 gün kullanım için tasarlanmış olan bakım gerektirmeyen birimlerdir. Hidrolik donanımlı açısı ayarlanabilir pervane sistemleri yerine, dayanıklı ve basit sabit kanatlı pervaneler kullanıldığından, arıza olasılığı yüksek ve bakım gerektiren malzemeler elimine edilmiş olur. Daha az mekanik donanım daha az arıza daha az bakım maliyeti demektir [57].

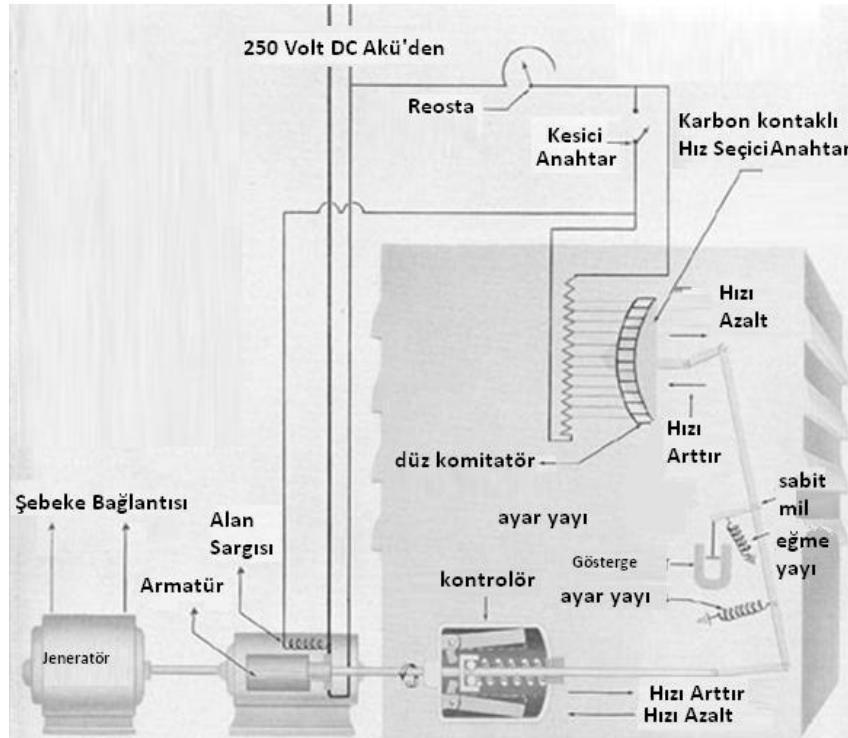
Güvenlik açısından da, konvansiyonel dizel tahrikli değişken kanatlı (CPP) pervane kullanımı yerine, elektrik tahrik sistemli sabit kanatlı pervane'nin kullanımıyla toplam sistem MTBF'i (iki arıza arasındaki ortalama süre) büyük ölçüde artmaktadır. Elektrik tahrik sistemi, yedekleme olanakları ve koruma imkânları dolayısıyla geminin emniyetine katkıda bulunur. Geliştirilecek modüler ve yedeklemeli sistemler, tüm pervane gücünün kaybı olasılığını minimuma indirir. Dolayısıyla bu sistemlerde hareketli mekanik parça adedinde önemli bir azalma sağlanır [57].

Konfor ve çevrecilik açısından, dizel makinelerin pervaneyle arasında şaft bağlantısı olmadığı için gövdeden tamamiyle yalıtılabilirler. Elektrik motoru dizele göre çok daha karmaşık bir yapıda olduğundan çok daha kısa şaft ve daha az yataklama kullanılabilir. Dizel makineler aşırı yüklenmeyeceğinden, daha az gürültü, titreşim ve daha az emisyonla çalışırlar. Esneklik bakımından elektrikle tahrik sisteminde dizel makine hızı ve gücü pervaneden tamamen bağımsız olduğu için, istenilen devirde ve güçte dizel makineler kullanılabilir. Yedeklemeyi arttırmak için çok sayıda düşük güçlü makine kullanılabilir, büyük iki makine veya farklı güçlerdeki makinelerin kombinasyonu yapılabilir. İtişi sağlayan moment elektrik motorunda üretildiği için, dizel makine düşük devir yerine yüksek devirli daha ekonomik modellerden seçilebilir. Diğer taraftan, elektrik tahrik sistemli bir gemide, ağır ve hacimli malzemelerin yerleşiminin daha esnek bir biçimde planlanabilmesidir. Böylece alanların daha iyi kullanımı sağlanmaktadır. Ana makineler geminin herhangi bir bölgesine yerleştirilebilirler. Aradaki bağlantılar tamamen kablolarla yapıldığı için gemi tasarımında yeni fikirler uygulanabilir. Elektrikle tahrik sistemi modüler bir sistemdir ve komponentler arası tüm bağlantılar kablolar ile yapılmaktadır. Bu modülerlik, gemi inşa takviminde de büyük kolaylıklar getirmektedir [57].

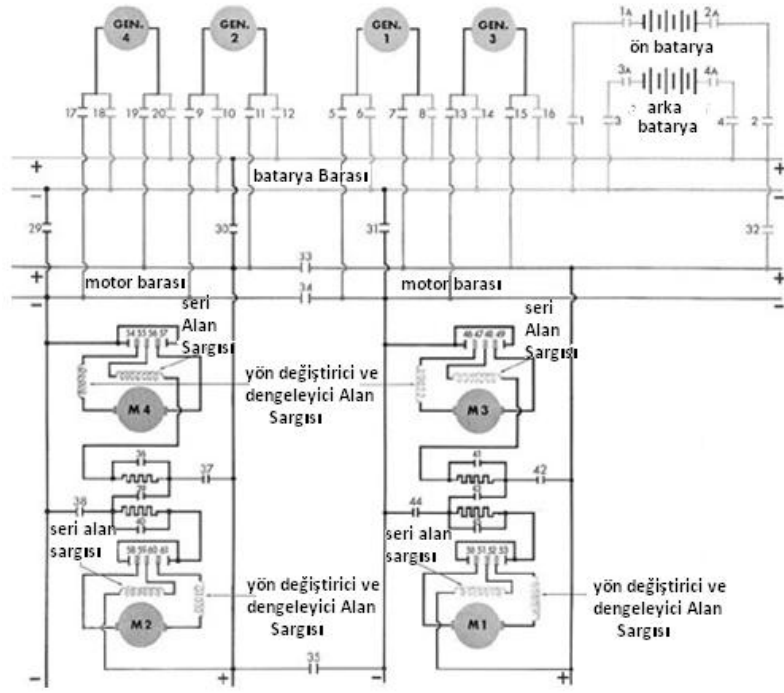
Savaş gemilerinde ise; düşük iz ve akustik, kızılötesi yayılım, yüksek direnç ve dayanma gücü gibi amaçlarla elektrik enerjisi üretiminde yakıt hücresi kullanımı alternatif bir yöntem olarak araştırılmaktadır.



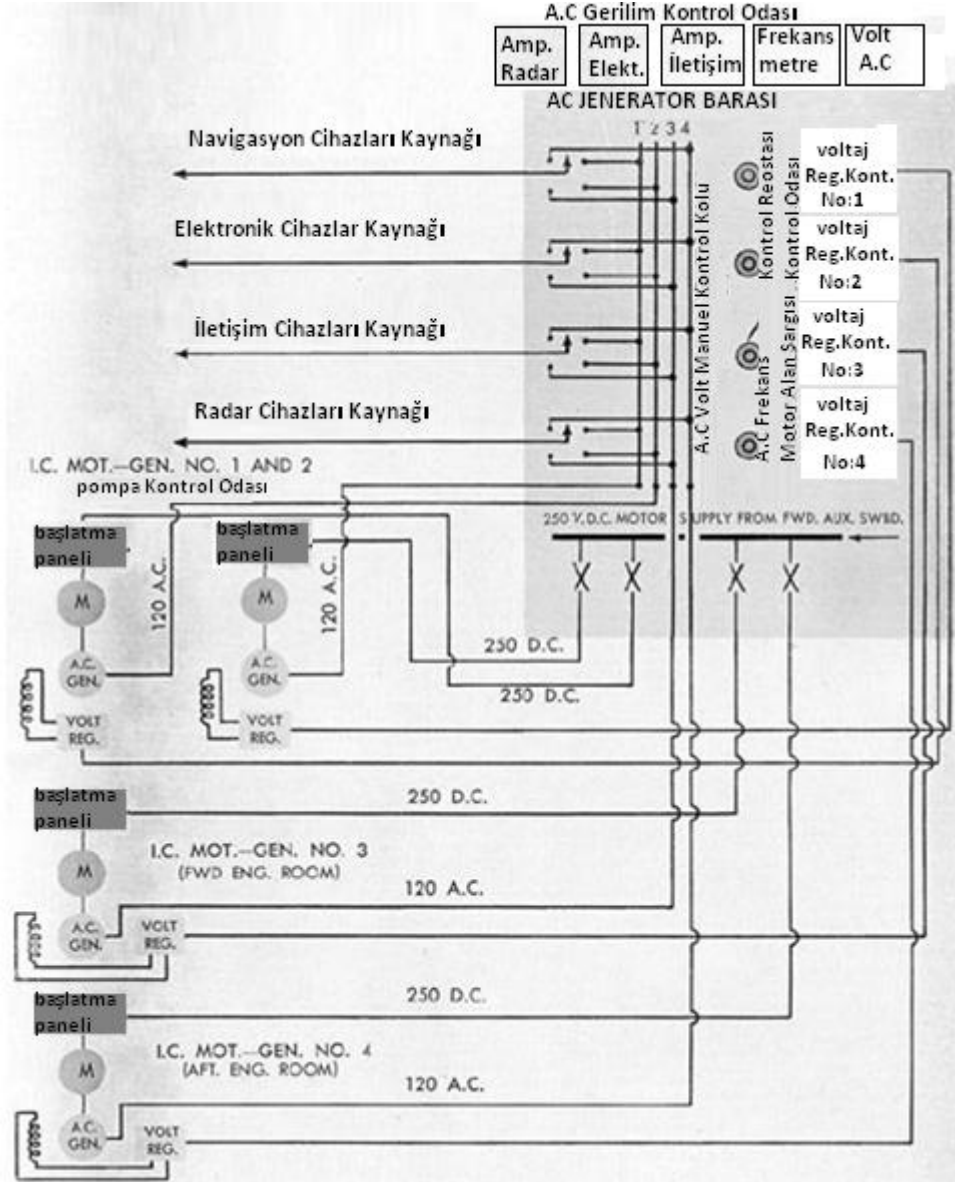
Şekil 3.2: Elektrik tahrikli gemi prensibi



Şekil 3.3: Elektrik tahrikli gemi yol verme sistemi



Şekil 3.4: Elektrik tahrikli gemi güç sistemi



Şekil 3. 5:Elektrik tahrikli gemi sisteminin elektrik donanım ve kontrolü

3.1. Yakıt Pillerinin Matematiksel Modeli

Oldukça karmaşık bir matematiksel modele sahip yakıt pilleri modellenmesinde kimyasal ve mekanik parametreler belirlenerek sonuca ulaşılır [17]. Kimyasal tepkime bağıntıları ve buna karşılık gelen stokiyometrik katsayılar tanımlanır.



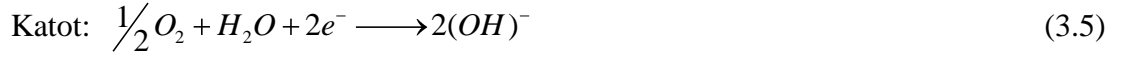
şeklinde genel bir denklemle tanımlanabilir. Kimyasal tepkimeler için;



yazılabilir. Burada:

$$v_{H_2} = 1, v_{O_2} = \frac{1}{2}, v_{H_2O} = 1. \quad (3.3)$$

şeklindedir. Anot, katot ve valans'taki (z) yarı tepkimedir. Örneğin, alkalın yakıt pili için;



şeklinde tanımlanabilir. Burada: $e^- = z = 2$ şeklindedir. Sonrasında, çalışma sıcaklığı T, ve tepkime bileşenlerinin kısmi basınçları, $p_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O}$ saptanır. Çalışma sıcaklığındaki eşitlik sabiti K için;

$$\ln K^{(T)} = \frac{(p_{H_2O})(p^{(T)})^{1/2}}{(p_{H_2})(p_{O_2})^{1/2}} \quad (3.6)$$

tanımlanabilir. Standart yakıt pilinde p=1 atm değerindeki basınç için elektromotor (electromotor force: emf) kuvveti emk, ;

$$emf^0 = \frac{\Delta G^0}{zF} = \frac{RT}{zF} \ln K^{(T)} \quad (3.7)$$

ile tanımlanabilir. Burada, ΔG^0 , standart sıcaklık ve basınçta serbest enerjiyi, R ideal gaz sabitini ve F ise elektrolitik sistemlerde elektrot yüzeyinde toplanan kimyasal madde miktarını hesaplamada kullanılan ve avagadro sayısı N_A ile elektron yükü q'nun çarpımı olarak,

$$F = N_A \cdot q = 96484 \text{ Cb/mol} \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanabilen Faraday sabitini göstermektedir. Kısmi basınç değeri için emk;

$$emf = emf^0 - \frac{RT}{zF} \ln \frac{P_{H_2O}^{v_{H_2O}}}{P_{H_2}^{v_{H_2}} \cdot P_{O_2}^{v_{O_2}}} \quad (3.9)$$

$$emf = \frac{RT}{zF} \left(\ln K^{(T)} - \ln \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (3.10)$$

olarak tanımlanabilir. Mevcut yakıt oranı;

$$n_c(\text{gm-mol/saniye}) = 1000H_2(\text{kg} / \text{s}) / 2. \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanabilir. Pil akımı için de;

$$I = n_c zF = 192970 n_c \quad (3.12)$$

yazılabilir. Gerilim-akım özdeşliğinden kapalı devre gerilimi bulunur. Pildeki DA gücü;

$$P_{dc}(\text{Watts}) = IV_c \quad (3.13)$$

olarak hesaplanır. DA/AA dönüştürücü olan evirici de göz önüne alınarak AA güç verimi;

$$P_{ac}(\text{Watts}) = \eta_{ac} P_{dc} \quad (3.14)$$

denklemden hesaplanır. Burada; η_{ac} dönüştürücü etkinliğini göstermektedir. Pildeki maksimum çalışma verimi;

$$W = -m\Delta G^0 \quad (3.15)$$

olarak hesaplanır. Yakıt pili sıcaklık verimi ise;

$$Q_p = m(\Delta h) \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır. Burada Δh , açık sisteme doğru ilerledikçe çalışan yakıtın entalpisindeki değişimi göstermektedir. Yakıt pili ısıl etkinliği;

$$\eta_{th} = W / Q_p \quad (3.17)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $Q_p = H_p - H_R$ entalpi formasyonundaki değişimdir.

Yakıt dönüşüm etkinliği;

$$\eta_{fc} = \eta_{th} \eta_I V_c / emf \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanır. Burada η_I akım etkinliği ve $\eta_v = V_c / emf$ gerilim etkinliğidir.

Yeni etkinlik;

$$\eta_{ref} = LHV_{prod} / LHV_{feed}, \quad (3.19)$$

ile hesaplanır. Burada LHV düşük ısı değerini göstermektedir. Net ısı ihracı;

$$Q_{net} = Q_{fc} - Q_{ref} - Q_{proc} \quad (3.20)$$

ile hesaplanır. Burada Q_{ref} yeni etkinlik için gereken ısıyı ve Q_{proc} ise yakıt pili sisteminde diğer süreçler için gereken ısıyı göstermektedir.

3.2. Yakıt Pillerinin Denizaltı Uygulaması

Denizaltı taşıtları savaş sırasında hem sessiz ve hem de uzun süreli su altında kalması gereken savaş taşıtlarıdır. Hareket ve diğer enerjilerinin sağlanması için dizel yakıtlı jeneratörler hem gürültülü ve hem de yakıtın yakılması zorunludur. Bu taşıtlarda yakıt hücresi gelecekte büyük savaş üstünlükleri sağlama potansiyeli taşımaktadır. Denizaltılar için tasarlanıp kullanılacak yakıt pilleri; yüksek verim, sessiz enerji üretim süreci, düşük kızılötesi yayılım izi, düşük bakım gibi avantajlar içerirler. Taşıtlarda hareket enerjisini üreten güç kaynaklarının havadan bağımsız işletilebilmesi ile gelecekte klasik denizaltıların, nükleer denizaltılara karşı etkili bir alternatif konumda yer almalarını sağlayacaktır [18].

Geleneksel dizel-elektrik denizaltılarda, dalmış durumda, hayat destek sistemleri ile sevk sistemlerine elektrik gücü sağlamak için kurşun asit piller kullanırlar. Taşıttaki bu piller, alçak sürat seyir şartlarında iki-üç günlük enerji sağlamalarına rağmen, toplam hacminin %20'sine yakın yer işgal ederler. Bu yüzden geleneksel dizel-elektrik denizaltılar belirli aralıklarla su yüzeyinin hemen altına gelip, şnorkel direklerini çıkararak pillerini şarj etmek için dizellerini çalıştırmak zorundadır.

Şnorkel için geçen zamanın seyir süresine olan oranı, iki şnokel arasında geçen zaman; sürat ve servis yüküne bağlı olarak %10-25 arasında değişebilir. Bu zaman zarfında geleneksel dizel-elektrik denizaltılar; radar, gürültü parmak izi, ısısal parmak izi, fiziksel olarak tespit, yüzey bozulması veya şnorkel direği vasıtasıyla tespit edilme riski taşırlar. Dolayısıyla, ikinci dünya savaşından beri denizaltıların dalma sürelerini arttırmak için çok çeşitli havadan bağımsız denizaltı sistemleri araştırılmaktadır.

Yakıt pillerinde transformator ve jeneratöre ihtiyaç duyulmadığından elektrik ve mekanik kayıpları yoktur. Sistemde kullanılan hidrojen ve oksijen gazı dayanıklı tanklarda taşınır. Nitrojen gazı inert gaz olup güvenlik amacıyla gemi içinde depolanır. Uzun zamandır, derin sualtı kurtarma araçlarında ve uzay programında kullanılmaktadırlar. Yakıt pili sistemi bağımsız bir tahrik sistemi olarak, batarya sistemi ile birlikte veya bataryayı şarj etme amaçlı kullanılabilir.

Yakıt hücresi teknolojisi U-1 denizaltısında 1989-1991 arasında Alman Donanması tarafından test edilmiştir. Bu gemide bulunan 16 yakıt hücresi ile toplam 400 kW'lık elektriksel güç üretilmekteydi. Bu sistemde piller 50 dakika içinde şarj edilebilmekteydi. Bu denemelerin sonucunda, Alman denizaltılarının bir sonraki sınıfı olan Tip 212'lerin standart olarak birer yakıt hücresine sahip olmaları kararlaştırıldı. Hibrit tipte olan olan 212 sınıfları, havadan bağımsız sisteme ek olarak yüksek hızlarda kullanmak üzere klasik dizel-elektrik sistem de bulunmaktadır. Deniz denemelerinde 212 sınıfı denizaltı 4 knot ile 3000 Mil intikal edebilmiştir.

Klasik(Dizelli) denizaltının itici gücü 1890larda geliştirilmiş Ward-Leonard sistemine dayanır-AA Motor-Jeneratör-DA Motor, bu sistemin orijinal halidir. Sistem motor verimindeki en az kayıp üzerine kurulmuştur. Denizaltıda uygulananı; Dizel-jeneratör-batarya-DA elektrik motoru şeklindedir. Batarya aradan çıkartılıp Dizel-jeneratör-DA elektrik motoru şeklinde su üstü seyirlerinde uygulanmaktadır. Bataryalar; tasarıma göre değişen çok sayıdaki pilden oluşur.Öyle ki bazı dizaynlarda; dalmış tonajının üçte birini bataryalar oluşturmaktadır. Şarjın son dönemlerinde veya aşırı akım çekilir iken, piller hidrojen gazı çıkarmaya başlarlar. Asitli sıvı içine hava girişinden hava pompalanarak karıştırılır ve hidrojen

baloncukları hava çıkışından denizaltı içindeki atmosfere dağılır. Dalışta satıhta devamlı kontrol altında tutulması gereken tehlikeli bir gazdır.

Günümüzde nükleer olmayan denizaltılar için pratik ve güvenilir bir havadan bağımsız tahrik özelliği en son üretilen klasik denizaltı tasarımlarında kullanılmıştır. Klasik denizaltılar dizel-elektrikli tahrik sistemi ile teçhiz edilmişlerdir. Bu yöntemle üretilen enerji asitli kurşun bataryalara yüklenmekte ve denizaltının dalma operasyonu ve personelin ihtiyaç karşılamaktadır. Denizaltının su altında kalma zamanını bataryaların kapasitesi ile sınırlı olup su üstü (şnorkel) operasyonu ile dizel jeneratörle bataryaların tekrar şarj edilmesi sağlanmaktadır. Denizaltının su üstü periyodunda iken düşman tarafından tespit edilme riski oldukça yüksektir. Bütün bu nedenlerden dolayı denizaltı sistemlerinin su üstü periyoduna geçmeden atmosfere kapalı bir tahrik sistemi ile teçhiz edilmesi ve daha fazla su altında kalması araştırılmıştır.

Bu hedefe ulaşmak için kapalı devre dizel motoru, stirling motoru, kapalı çevrimli gaz ve buhar türbinleri ve Yakıt Hücreli Sistem(YHS)leri gibi tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Fakat YHS'lerinin diğer sistemlere göre;

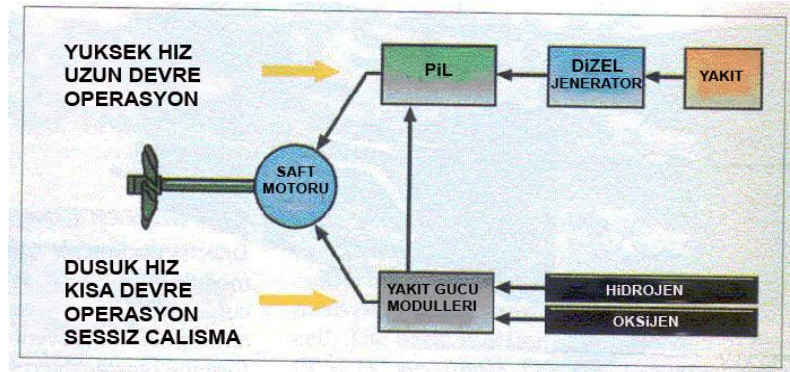
- Uzun periyotlarda su yüzeyine çıkmadan çalışma sağladığı,
- Çalışırken düşük ses seviyense sahip olduğu,
- Düşük manyetik özelliğe sahip oldukları için,
- Deniz suyuna az miktarda ısı transferi sağlaması gibi daha avantajlı yanlarının olmasından dolayı diğer enerji kaynaklarına göre daha çok tercih edilmektedir.

Yapılan araştırmalarda Polimer elektrolitli YHS'lerinin denizaltı sistemlere uygulanması ile ilgili büyük gelişme kaydedilmiştir. Daha sonra Siemens tarafından 16 modülden oluşan 6.2 kW'lık YHS geliştirilmiştir.

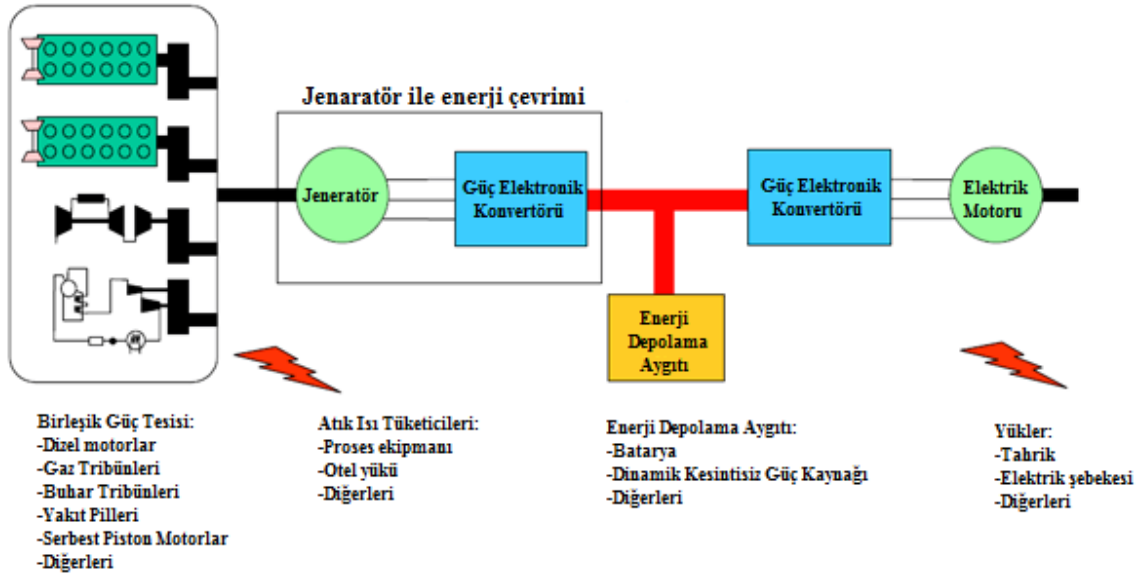
3.3. Gemilerde Hibrit Tahrik Sistemi

Hibrit tahrik sistemleri, birden fazla sistem içerirler. Genelde biri geleneksel sistem olup ikinci veya daha fazla tahrik sistemleri de yeni ve alternatif sistemler olur. Geleneksel sistemlerin başında dizel-elektrik tahrik sistemi gelir. Alternatif tahrik

sistemleri ise akü ile beslenen elektrikli tahrik sistemi veya yakıt pili gibi geliştirmekte olan tahrik sistemlerinden biri veya birkaçı olabilmektedir. Hibrit sisteminin blok diyagramı Şekil 3.6’da Hibrit tahrik sisteminin oluşumu Şekil 3.7’ de sunulmuştur. Hibrit sistem, bir tarafta dizel jeneratör ve pilli geleneksel tahrik sistemi ile diğer tarafta yakıt pil sisteminin paralel çalışmasından oluşur. Her ikisi beraber, ana motor, şaft ve pervane ile tahrik sistemini oluşturur [57].



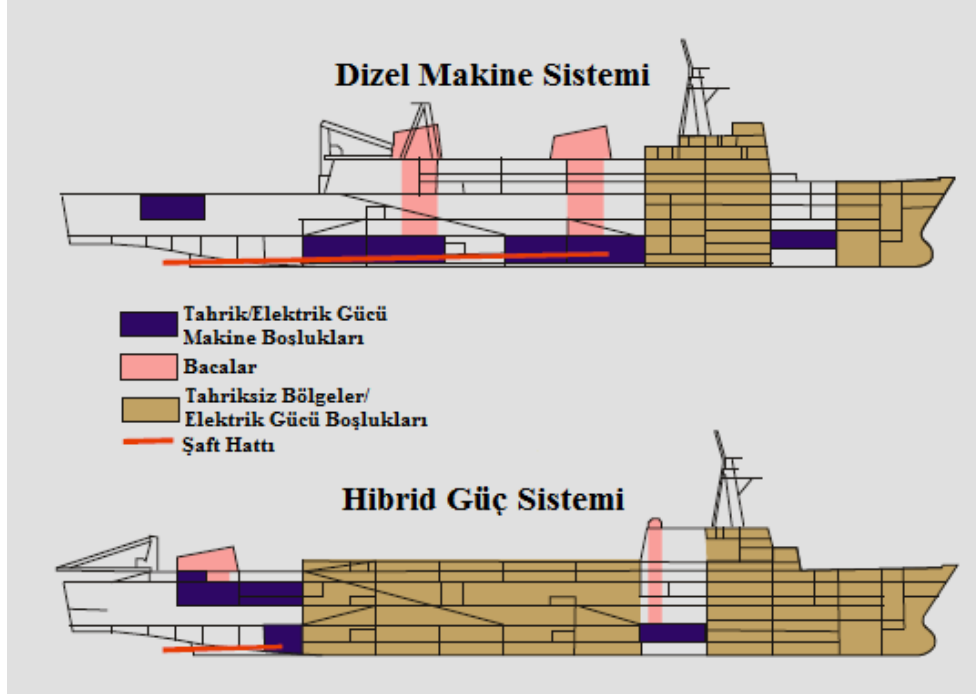
Şekil 3.6: Hibrit tahrik sistemi blok diyagramı



Şekil 3.7: Hibrit tahrikli güç sisteminin oluşumu

Yakıt pili sistemi pervaneye giden gücü üretirken aynı zamanda dizel jeneratörünün yaptığı görev gibi pilleri de besler. Bu sistem denizaltıya tamamen havadan bağımsız olarak şnorkel veya şarj etmeye gerek duyulmaksızın birkaç haftadan daha fazla sürekli dalışta görev yapma olanağı verir.

Hibrit tahrik ile geleneksel tahrik sistemi arasındaki fark Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, hibrid güç uygulanmış taşıt sisteminde elektriksel güç için kullanılan alan dışı boşlukları daha büyüktür. Dolayısıyla taşıt kapasitesi artmıştır.

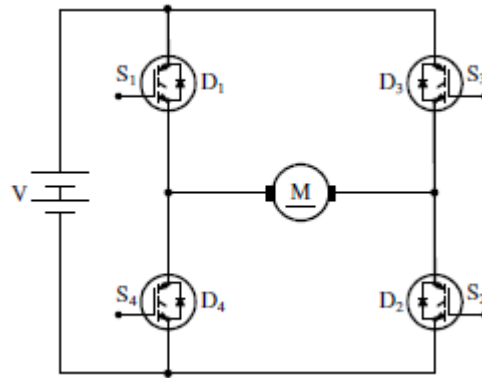


Şekil 3.8: Geleneksel tahrik sistemi ile hibrit tahrik sistem uygulaması

Yarıiletken teknolojisinde meydana gelen son gelişmeler daha küçük, daha hızlı ve daha az maliyetli mikro denetleyici ve güç anahtarlama elemanlarının üretilmesine olanak sağlayarak AA ve DA motor sürücü sistemlerinin kontrolünde önemli yeniliklere öncülük etmiştir. DA motor sürücüleri basit yapıda ve ucuz olmalarından dolayı sıkça kalkış, durma, frenleme ve devir yönü değişimi gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalarda hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca DA motor sürücüsünün hız ve moment kontrolü indüksiyon motor sürücüsüne göre daha basit olduğundan, endüstride kullanımı önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle, ucuz bir denetleyiciyle arzu edilen kontrol kolayca gerçekleştirilebilir. DA motor sürücüsü ile anma hızın altındaki hızlarda çalışmak için armatür gerilimi kontrol edilirken, anma hızın üzerindeki hızlarda ise manyetik alan zayıflatması yapılır. Sıkça kalkış, devir yönü değişimi, frenleme ve hızlanma gerektiren uygulamalarda dört-bölgeli DA motor sürücü sistemine gereksinim vardır.

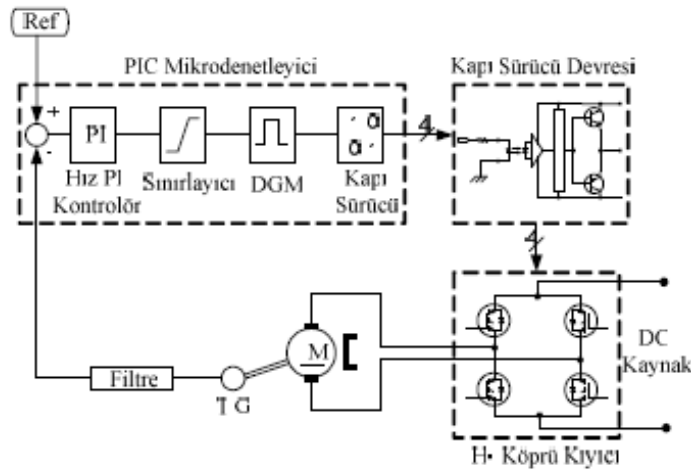
Böyle bir sürücü devresi ile yapılan hız ayarı ve frenleme çalışmaları diğer devrelerinkine göre daha verimli ve daha ekonomik olur.

Sekil 3.9'da gösterilen ve bir DA motoru besleyen dört-bölgeli H-köprü DA-DA çevirici güç devresi dört adet IGBT yarıiletken anahtar eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Yarıiletken anahtarlar uygun bir şekilde edilerek çıkış gerilimi ve akımı ortalama değerlerinin yanı sıra polariteleri de ayarlanabilir. Böylece, kırıyıcının bir DA motoru beslemesi durumunda dört-bölgeli çalışma elde edilebilir.



Şekil 3.9: Dört-bölgeli DA kırıyıcı güç devresi.

Sürücü sistemin komple seması Sekil 3.10' da görülmektedir. Sistem; güç devresi, kontrol ünitesi, yük olarak üzerinde hız algılayıcısı bulunan DA motor ve izoleli sürme devresinden oluşmaktadır.



Şekil 3.10: Kapalı-çevrim kontrollü ve dört-bölgeli DA motor sürücü sistemi

3.4. Bataryalar

Bataryalar kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkan enerjiyi elektrik enerjisi olarak depolayabilen donanım olarak tanımlanabilir. Birim hücrelerden oluşur ve bu hücreler elektrik enerjisine dönüşebilen kimyasal enerji içerirler. Bu elektrolitik hücrelerden bir ya da birden fazlası seri bağlanarak bataryayı oluşturur. Gruplanmış hücreler birbirlerine eklenerek batarya modülünü oluştururlar. Batarya takımı ise, elektronik sürücü sistemine enerji verebilmek için, seri ya da paralel kombinasyonlar şeklinde birleştirilmiş batarya modüllerinin bir araya gelmesinden oluşur [19].

Elektriksel akımın üretilmesini sağlayan aktif maddeye pozitif elektrot denir. Deşarj esnasında azalabilen, oksit, sülfür veya herhangi bir bileşikten oluşan bir elektrottur. Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devreden elektronlar alır. Kurşun-oksit ve nikel-oksit-hidroksit pozitif elektrotlara örnektir. Elektrot malzemeleri katı haldedir [20].

Elektriksel akımın üretimini sağlayan diğer aktif madde ise negatif elektrotur. Deşarj esnasında, oksitlenebilen metal veya alaşımdan oluşur. Bu elektrot batarya deşarj olurken, dış devreye elektron verir. Kurşun ve kadmiyum negatif elektrotlara örnektir. Negatif elektrot malzemeleri de batarya hücresinde katı halde bulunur. Bazı Lityum iyon bataryaların negatif elektrotları oksitlenmeyi önlemek için alüminyumdan üretilirler.

Elektriksel akımı iletebilen ve hareket edebilen yüklü parçacıklardan oluşan çözeltiliye elektrolit denir. Elektrolit, elektrot tepkimelerinde yer alan iyonlar için yüksek ve seçici iletkenlikte olmalıdır. Fakat deşarjı engelleyebilmek için elektronları iletmemelidir. Elektrolitler sıvı, jel veya katı maddelerden oluşurlar. Ayrıca bataryanın tipine göre asidik veya alkalın olabilirler. Kurşun asit ya da nikel-kadmiyum gibi geleneksel bataryalarda sıvı elektrolitler kullanılır [21]. Kurşun asit bataryalarda elektrolit, sülfirik asitin sıvı formundadır. Nikel metal-hidrit ve Lityum iyon gibi geliştirilmiş bataryalarda jel, macun veya rezin/reçine şeklinde elektrolit kullanılmaktadır. Lityum polimer bataryalarda ise katı halde elektrolitler kullanılır.

Farklı kutuplardaki elektrotları fiziksel olarak ayıran, elektriksel olarak yalıtıcı tabakaya ayırıcı denir. Ayırıcılar, elektrolitlerin iyonlarını geçirmeli ve elektroliti

saklayıp hareketsiz tutabilecek fonksiyona sahip olmalıdır. Bugün kullanılan ayırıcılar sentetik polimerlerden yapılmaktadır [21].

Bataryada saklanan enerji, bataryanın şarj ve deşarj olduğu durumlar arasındaki kimyasal enerji bileşenlerinin farkıdır. Bir hücredeki kimyasal enerji talebe bağlı olarak elektrik enerjisine dönüştürülür. Dönüştürme işlemi, birim hücredeki temel elemanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Elektrotların pozitif ya da negatif olanlarının elektro-kimyasal anlamda aktif olanlarına aktif madde denir. Elektrotlarda, ayrılan elektronlar nedeniyle kimyasal oksitlenme oluşur. Elektrotlar iletken olmalı, bir ayırıcı ile ayrılmalı ve üzerlerine yapılan temas bağlantıları (kontaklar) sağlam olmalıdır. Batarya çalışırken, elektrotlardaki kimyasal tepkimeler elektronların bir elektrottan diğerine akmasına neden olur. Bunun yanı sıra, kimyasal tepkime sırasında oluşan elektronlar iki elektrotu birbirine dıştan bağlayan bir elektrik devresinde akabiliyorsa hücre içindeki elektron akış dayanıklılığını gösterir. Elektrotlar ve dış elektrik devresi arasındaki bağlantı noktalarına batarya terminalleri denir. Dış elektrik devresi, depolanan kimyasal enerjinin elektrik enerjisinden faydalandığını gösterir [22]. İdeal bataryada, sadece elektrotlar arasındaki devre dıştan bir elektrik devresi olarak tamamlandığı zaman, akım üretilir. Fakat pek çok batarya, difüzyon etkisiyle yavaş da olsa deşarj olmaktadır. Bu durum “yavaş deşarj” (self deşarj) olarak bilinir ve batarya kalitesini tanımlamada kullanılır. Bu nedenle çok uzun süreli enerji saklanması için pek uygun değildir. Bataryalar iki temel işlevi yerine getirirler. Bunlardan ilki ve en önemlisi taşınabilir güç kaynakları olmalarıdır. Bilinen modern örnekler, elektrikli saatlerde kullanılan küçük pillerden içten yanmalı motorlu taşıtlarda marş, aydınlatma ve ateşleme için kullanılan Kurşun asit bataryalara kadar değişmektedir. Son yirmi yıl boyunca önemi artmış olan ikinci işlevi ise, belirli elektrokimyasal sistemin bir dış kaynaktan sağlanan elektrik enerjisini depolayabilmesi üzerine kurulmuştur. Bu bataryalar elektrikli taşıtları sürmede, acil durum güç kaynaklarında ve ana elektrik kaynağı sisteminin bir parçası olarak kısa süreli talep artışlarını karşılamak (yük dengesi) için veya güneş, rüzgar ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile de beraber kullanılabilirler [23]. İlk olarak bir elektrokimyasal bataryanın tanımlanması 1800 yılında, Fizik Profesörü Alessandro Volta tarafından yapılmıştır. Bu keşif 1830’lu yıllarda önemli kullanım alanları bulunan telgraf sistemleri için başlangıç olmuştur. Bu sayede hücre

geriliminde önemli bir kayıp olmaksızın yeterli akım sağlayan, güvenli ticari bataryaların gelişimi hızlanmıştır. İlk yüksek akım elektro-kaplama batarya 1840 yılında geliştirilmiş ve bir sonraki 20 yıl boyunca elektro-kaplama, elektrikle şekil verme gibi tekniklerin kullanımı, pratik elektrik motorlarıyla birlikte yavaş yavaş yaygınlaşmıştır. 1870'lerde ev, ofis ve oteller için elektrik zil devrelerinin üretimi ile bataryalara daha genel tüketici piyasası oluşturulmuştur. El feneri, Edison'un akkor flamanlı ampülü keşfinden 20 yıl sonra bulunmuştur. 1870'lerde yanmalı motorlar tarafından sürülen dinamolar ve elektrik jeneratörleri sayesinde elektrik enerjisi bugün dahi kabul edilen ve dünya çapında endüstriyel ve evsel enerji ihtiyacını karşılayan şebeke elektriği halini almış ve bu sayede çok daha geniş dağıtım olanağı bulmuştur. Elektrik enerjisinin her an hazır bulunması ikincil batarya denilen batarya tipinin gelişiminde ana rolü oynamış, hemen sonrasında da gelişen motorlu taşıt sanayisinin talepleri sayesinde daha da canlanmıştır.

1920'lerde evlerde kullanılan radyo alıcılarının bulunması ticari bataryaların gelişimi için yeni bir teşvik olmuştur ve eşdeğer bir ilerleme bir sonraki 30 yıl boyunca mikro-elektroniklere dayalı cihazların geliştirilmesi ile gerçekleşmiştir. Günümüzde tüm batarya çeşitleri göz önüne alındığında dünyadaki pazar maliyeti milyar dolar mertebesindedir. Bu toplamın yarısından fazlasını, özellikle araçlarda marş, aydınlatma ve ateşlemede, ayrıca endüstride izleme ve bekleme enerjisini karşılamak için kullanılan Kurşun asit bataryalar oluşturmaktadır [24].

3.4.1. Birincil (şarjsız) bataryalar

Elektrokimyasal bataryalar elektriksel olarak şarj olabilme yeteneklerine göre birincil (şarj edilemez=şarjsız) ve ikincil (şarj edilebilir=şarjlı) bataryalar olmak üzere iki sınıfta incelenebilir [32]. Birincil tip bataryalar şarj-edilemez olduklarından bir kez deşarj olduktan sonra bir daha kullanılamazlar. Emici ve ayırıcı madde içeren elektrolit içerisindeki birincil hücreler kuru hücre olarak adlandırılır. Birincil bataryalar genelde ucuz olmakla beraber, taşınabilir elektronik ve elektrik cihazları için paketlenmiş hafif güç kaynağı olarak, aydınlatma, fotografik cihazlar, oyuncaklar, yedek bellekler ve diğer pek çok alanda kullanılabilirler. Birincil bataryaların; ulaşılmasının kolay olması, basit kullanımı, gerek varsa bile az miktarda bakıma ihtiyaç duyması ve kullanım alanı ile bağlantılı olarak

şekillendirilebilmeleri avantajlarıdır. Diğer genel avantajları ise iyi raf ömürleri, makul enerji ve güç yoğunlukları, güvenilir ve kabul edilebilir maliyete sahip olmalıdır.

Birincil bataryalar yaklaşık olarak yüz yıldır var olmalarına rağmen, 1940'lara kadar tek yaygın olarak kullanılanı çinko-karbon hücrelerdi. II. Dünya Savaşı sırasında ve savaş sonrası dönemde, sadece çinko-karbon sistemlerinde değil, yeni ve yüksek kalitede batarya tiplerinde önemli gelişmeler gerçekleşmiştir. İlk başlarda çinko-karbon hücreler ile elde edilen kapasite 50 Wh/kg'dan az iken şimdi lityum hücreler ile elde edilen kapasite 500 Wh/kg'ı geçmektedir. II. Dünya Savaşı sırasında ortalama sıcaklıklarda saklandığında hücrelerin raf ömürleri yaklaşık 1 yıl ile sınırlıydı. Bugün ise bu süre 2 ile 5 yıl arasında değişmektedir. 70 °C gibi yüksek sıcaklıklarda bile depolama yeteneği ile en yeni lityum pillerinin raf ömürleri ise 10 yıl kadar uzun bir süre olabilmektedir. Düşük-sıcaklıkta çalışma 0°C'den -40, -55°C'ye indirilmiş ve güç yoğunluğu artırılmıştır. Katı bir elektrolit kullanan özel yavaş-akış bataryaların ise raf ömürleri 20 yılı aşmaktadır. Bu gelişmiş özellikler sayesinde birincil bataryaların kullanım alanları da genişlemiştir. Yüksek enerji yoğunluğu ile birlikte batarya aşırılığı ve boyutu da azaltılmıştır. Böylece, elektronik teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte düşünüldüğünde, yeni taşınabilir radyo, pratik iletişim ve elektronik cihazları da yapılabilmektedir. Daha yüksek güç yoğunluğu ise bilgisayar, cep telefonları, askeri gözetim sistemleri ve diğer yüksek güç uygulamalarında kullanılan cihazların tasarımında kolaylık sağlamıştır. Şu an pek çok birincil batarya uzun raf ömrüne sahip olduğundan dolayı tıbbi elektronik cihazlar, yedek bellekler vb. uygulamalar gibi yeni alanlarda kullanılmaktadır. Dünyadaki birincil batarya pazarı her yıl % 10 artış göstererek yıllık 40 milyar doları aşmıştır. Bu bataryalar 20 Ah kapasitenin altındaki bilinen silindirik ve yassı pillerdir. 1000 Ah'den fazla kapasiteye çıkabilen daha büyük boyuttaki birincil bataryalar ise yedek güç kaynağı olarak ve diğer askeri ve özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

3.4.2. İkincil (şarjlı) bataryalar

İkincil veya şarjlı bataryaların kullanım alanları oldukça geniştir. En çok bilinenleri; otomotiv endüstrisinde marş, aydınlatma ve ateşleme sistemleri, acil durum ve yedek

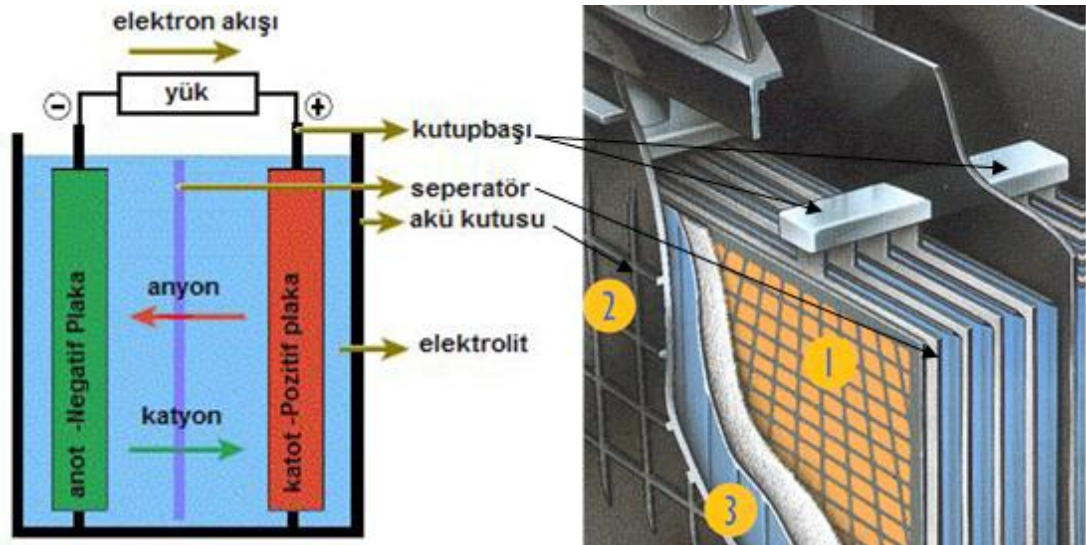
güç sistemleridir. Küçük ikincil bataryalar ayrıca oyuncaklar, aydınlatma, fotoğrafçılık, radyo gibi taşınabilir güç kaynaklarında ve bilgisayar, cep telefonları gibi elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. İkincil bataryaların uygulama alanları iki ana grupta incelenebilir. Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan endüstriyel uygulamalarda, genelde asıl bir enerji kaynağı ile elektriksel olarak bağlı bulunmakta ve bu kaynak tarafından şarj edilmektedir. Bu uygulamalara, otomotiv ve uçak sistemleri, acil ve yedek güç kaynakları, yük dengeleme için durağan enerji depolama sistemleri örnek olarak verilebilir. İkincil bataryaların diğer uygulamalarında ise batarya birincil batarya gibi kullanılır, ancak kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilir. Ekonomik olması açısından taşınabilir elektronik ve elektrik cihazlar ve bazı durağan batarya uygulamaları bu gruba örnek olarak verilebilir. Böylece yeni bir batarya yerine tekrar eskisi kullanılabilir. İkincil bataryalar şarj edilebilir olmalarıyla beraber yüksek güç yoğunluğu, yüksek deşarj hızı, tam deşarj profili ve düşük sıcaklıktaki iyi performanslar gösterebilir. Ancak birincil bataryalara göre enerji yoğunlukları genelde daha düşük ve şarj tutma yetenekleri daha zayıftır. Şarjlı bataryalar negatif aktif malzeme olarak lityumun kullanılmasıyla daha yüksek enerji yoğunluklarına daha iyi şarj tutma yeteneklerine ve bu yüksek enerjili malzemenin diğer performans artırıcı özelliklerine sahip olmuşlardır.

İkincil bataryaların varlığı yaklaşık 100 yıl öncesine dayanmaktadır. Kurşun asit batarya 1859 yılında Plante tarafından geliştirilmiştir. Tasarım değişikliklerine rağmen hala en yaygın olarak kullanılan batarya çeşididir. En baskın olarak otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Nikel-demir alkaline batarya Edison tarafından 1908 yılında ömrü uzun olmayan bir elektrik arabası için güç kaynağı olarak bulunmuştur. Bu tip bataryalar, endüstriyel araçlarda, yeraltı iş araçlarında, demiryolu taşıtlarında ve durağan uygulamalarda yer almıştır. Dayanıklı ve uzun ömürlü olması gibi avantajlarına rağmen yüksek maliyeti, bakım şartları ve daha düşük spesifik enerjileri nedeniyle dünya pazarındaki yerini kaybetmiştir. İnce-levhali nikel-kadmiyum batarya 1909 yılından beri üretilmekte ve genel olarak sanayide uygulama alanı bulmaktadır. Güç kapasitesi ve enerji yoğunluğunu arttıran sinterlenmiş levhali tipi 1950'lerde uçak motorları ve iletişim uygulamalarında yer almıştır. Daha sonra kapalı tip nikel-kadmiyum bataryanın geliştirilmesi taşınabilir cihazlar ve diğer alanlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Son gelişmelerle, ikincil bataryalarda

önemli performans gelişmeleri sağlanmaktadır. Bu bataryaların başında, nikel-çinko, hidrojen, lityum halojen tipleri gelmektedir. Dolayısıyla, taşınabilir elektronik uygulamalar ve elektrik araçları için yüksek-performans batarya ihtiyacını karşılamak için kullanmaya başlamıştır. Dünyadaki ikincil batarya pazarı günümüzde yıllık 10 milyar doları aşmıştır. Kurşun asit bataryalar bu pazarın çoğunluğuna sahiptir. Bu durum diğer batarya çeşitlerinin kullanım alanına girmeğe başlamasıyla yavaş yavaş değişmektedir. Küçük ikincil bataryalar için otomotiv dışı uygulamalar yeni gelişen bir alan olmuştur.

3.4.3. İkincil kurşun asit ve lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar

Kurşun asit bataryalar enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan batarya tipleridir. Sıradan bir otomobil bataryası Kurşun asit tip batarya olup özel kullanımlar için güvenilirlik ve düşük maliyet gibi özelliklere sahip olabilmesi için uzun zamandan beri geliştirilmektedirler. Diğer Kurşun asit bataryalar kaldırma makinaları, forklift ve golf arabaları gibi elektrikli araçlarda, yedek batarya olarak telefon sistemlerinde ve kesintisiz güç kaynaklarında kullanılmaktadırlar. Şekil 3.11'de kurşun asit bir bataryanın çalışma prensibi gösterilmiştir [59]. Kurşun plakalar anot ve katot olarak elektroliz sıvısının içinde bulunurlar. Aralarında yalıtkan ve özel malzemedan yapılmış seperatör denen ayırıcı plakalar vardır. Kurşun plakalar iki grupta toplanarak pozitif ve negatif akü uçları şeklinde dış bağlantı yapılarak kutu dışına alınır.

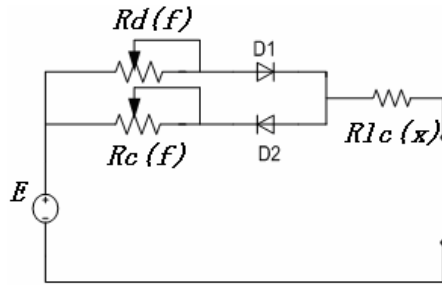


Şekil 3.11: Kurşun Akü çalışma prensibi ve kurşun plakaların yerleştirilmesi

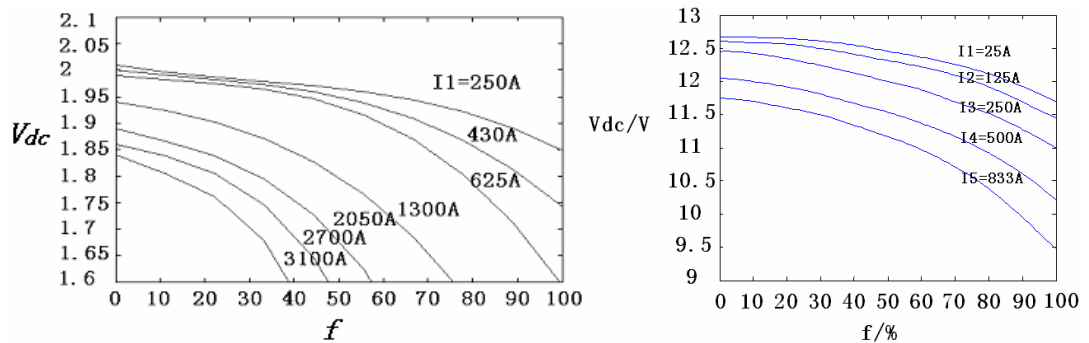
Kurşun asit bataryalarda elektrot olarak kurşun ve bileşikleri, elektrolit olarak sulandırılmış sülfürik asit kullanılmaktadır. Kapasitesinin büyüklüğüne göre elektrotların büyüklüğü değişir. Kullanım amacına bağlı olarak elektrotlardaki plaka sayısı artırılıp azaltılır veya büyüklükleri değiştirilir.

Kurşun asit bataryaya bir yük bağlanarak akım çekildiğinde, kurşun oksit kaplı pozitif levha elektrolitin içindeki sülfürik asit ile reaksiyona girerek kurşun sülfata dönüşür. Negatif kurşun levha da aynı şekilde kurşun sülfata dönüşür.

Bataryada deşarj yolu ile elektrik enerjisine dönüşen toplam miktara kapasite denir. Kurşun asit bataryalarda kapasite, elektrotların özelliklerine, aktif maddeye, elektrolit yoğunluğuna, aktif maddenin dönüşüm yüzdesine, boşalma akım değerine, sıcaklığa ve boşaldığı kabul edilen minimum gerilime göre değişir. Aktif maddenin yüzey ölçüsü ve gözenekliliği de kapasiteyi etkiler. Şekil.3.12□ de kurşun asit akü için eşdeğer devre gösterilmektedir. Eşdeğer devredeki seri bağlı direnç ve diyot tan oluşan paralel kollar, sabit deşarj akımında diyotsuz bir tek kol olarak alınabilir. Çünkü deşarj akımı aküden dışarı doğru akar. Şekil.3.13□ de akünün uç geriliminin değişimi farklı deşarj akımları için çıkartılmıştır. Görüldüğü gibi deşarj akımı arttıkça uç gerilimi küçülmektedir. Yani ters orantılı olarak değişir.



Şekil 3.12: Kurşun asit akü eşdeğer devresi

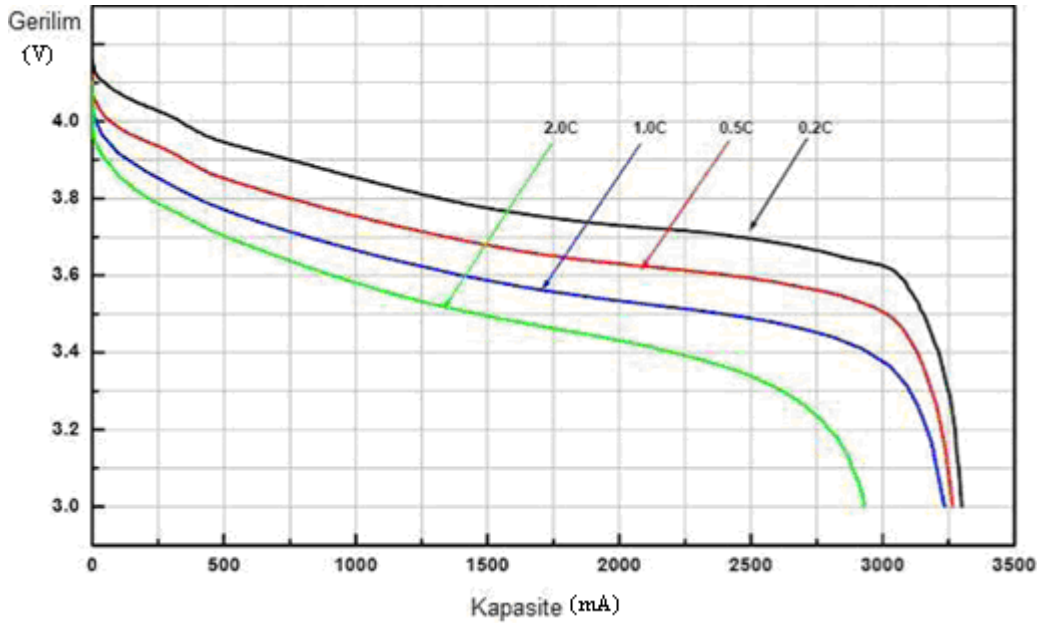


Şekil 3.13: Akünün uç geriliminin değişimi farklı deşarj akımlarına göre değişimi

En bilinen ve en kolay bulunabilir Kurşun asit bataryalar olarak otomobil bataryaları göz önüne alınırsa; önemli bir amaç için tasarlandıkları görülür. Bu bataryalar, çok kısa bir zaman için çok yüksek akım vererek otomobilde başlatma işlemini uygun koşullarda gerçekleştirebilmek üzere tasarlanmıştır. Kurşun levhalar veya pozitif ve negatif elektrotlar ince olduğundan küçük bir alana çok sayıda levha yerleştirilebilir. Plakalardaki bu büyük aktif yüzey alanı bataryaya zarar vermeyecek kadar kısa zamanda 200 A veya fazlası akımın alınabilmesine olanak sağlar. Otomobil çalıştıktan sonra alternatör, elektriksel gereksinimlerinin tamamını karşılar ve bataryayı bir dahaki başlatma için doldurur. Eğer aracın elektrik sistemi düzgün çalışıyorsa batarya daha fazla kullanılmaz. Şayet taşıttaki alternatör bozulur yada bataryayı şarj etmezse batarya bir süre sonra tamamen deşarj olur. Genelde yeniden şarj edilerek düzgün çalışmaya devam eder. Ancak bu olay ne zaman gerçekleşirse bataryaya küçük de olsa kalıcı bir zarar verilmiş olur. Normal otomobil bataryası kullanışsız hale gelmeden önce 20 ya da daha fazla derin deşarj çevrimine kadar kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu bataryaların ömürleri en fazla 5 yıldır [36]. En yeni otomobil bataryalarında hücreler kapalı (sealed) tiptedir. Sadece bir tane küçük hava deliği vardır ve su için kapak yoktur. Kurşun asit bataryalar çalışma esnasında bir miktar H₂ ve O₂ gazı çıkartırlar. Çıkan gazların hücre içindeki basıncı belirli bir seviyenin üzerine çıkmaması gerekir. Aksi takdirde aşırı basınç sonucu batarya patlayabilir. Kapalı tip bataryalarda plakaları daha kararlı hale getirmek için kurşun-kalsiyum alaşımı kullanılabilir. Ayrıca bir kataliz yardımıyla gazlanmayı minimize eden veya çıkan gazların önemli bir kısmının yeniden suya dönüşümü sağlanabilir. Bu tür bakım gerektirmeyen bataryalarda yeni bir tasarım ile bütün hücrelerin merkezi gaz bağlantısı sağlanır ve bir çıkış düzeneği konulur. Fazla gaz basıncı oluştuğunda buradan atılır. Eğer bir güneş pili dizisinde bir seri otomobil bataryası kullanılıyorsa uzun bulutlu bir günde bunlar kapasitelerinin % 75-80'ine kadar deşarj olabilirler. Bu şekilde oluşacak birkaç deşarj sonucunda batarya sistemi kullanılamaz hale gelebilir. Bu nedenle, güneş hücreleriyle daha farklı tipte bir bataryanın kullanılması gerekebilir. Forklift ve golf arabalarında kullanılan yüksek kapasiteli derin deşarj bataryaların ömürleri uzun ve deşarj çevrimleri fazladır. Bu çekici bataryalar kalın kurşun plakalara ve daha yüksek elektrolit kapasitesine sahip olduklarından güç işletim koşulları altında güvenilir dolayısıyla da aşırı ve pahalıdırlar. Bu tipte bir seri batarya güneş pili uygulamalarında yıllar boyunca

tatmin edici şekilde çalıştırılabilir. Kurşun asit bataryaların bir diğer uygulama alanı acil durum yedek güç sistemleridir. Bu sabit tesis bataryaları, küçük bir akımla şarj ve deşarj olurlar. En önemli özellikleri uzun ömürlü olmalarıdır. Güneş pilleri uygulamalarında kesintisiz güç gerektiren yerlerde kullanılırlar. Fotovoltaik güç sistemleri için özel şekilde tasarlanmış bataryalara örnek olarak Delco 2000 Fotovoltaik Batarya verilebilir. Buna benzer Gould ve Exide gibi bataryalar da üretilmektedir [35].

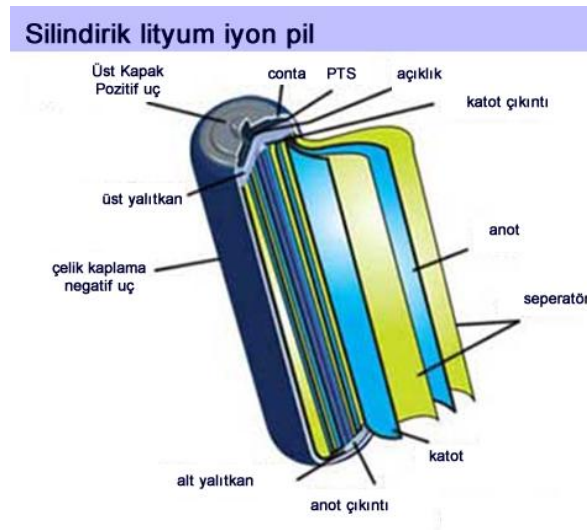
Ancak, malzeme ve mühendislik alanındaki teknolojilerin gelişmesi ile birlikte yeni ve etkin enerji kaynakları daha güvenilir hale gelmiştir. Bunların arasında pek çok avantaja sahip elektrokimyasal sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. İleri teknoloji, yüksek enerjili elektrokimyasal sistemler daha verimli ve daha az kirliliğe yol açan işletimleri nedeniyle geleneksel bataryaların yerini alabilirler.



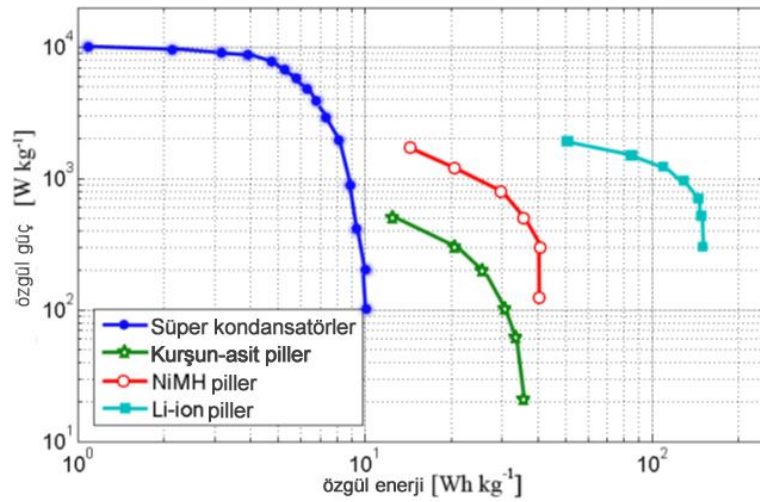
Şekil 3.14: Akü şarj deşarj grafiği

Günümüzde uzun mesafelere ulaşabilen elektrikli araçların gelişimi için büyük hacimli kurşun asit bataryalar yerine yüksek enerji yoğunluğuna sahip şarjlı bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır. Nikel-kadmiyum ya da çinko karbon kuru bataryalar yerine ileri teknoloji ve çevreci bataryalar tasarım çalışmaları yapılmaktadır.

Bu ileri teknoloji ve çevreci bataryalardan biri de uzun ömrü ve yüksek enerji yoğunluğu ile bilinen ve Şekil 3.15' de silindirik yapısı gösterilmekte olan, Lityum iyon bataryalardır [61]. Lityum iyon bataryalarda yüksek-gerilim sağlayan, hafif ve iyi derecede iletken olan aktif lityum metali anot olarak kullanılır. Bu özelliklerinden dolayı Lityum iyon bataryalar şarjsız veya şarjlı olarak üretilebilirler. Şekil 3.16'da bir lityum polimer akü hücresinin değişik şarj-deşarj akımları için kapasite değişimi görülmektedir. Sıcaklık düştükçe, gerilim ve kapasite de düşmektedir. Yani her ilisi de sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmektedirler [62].

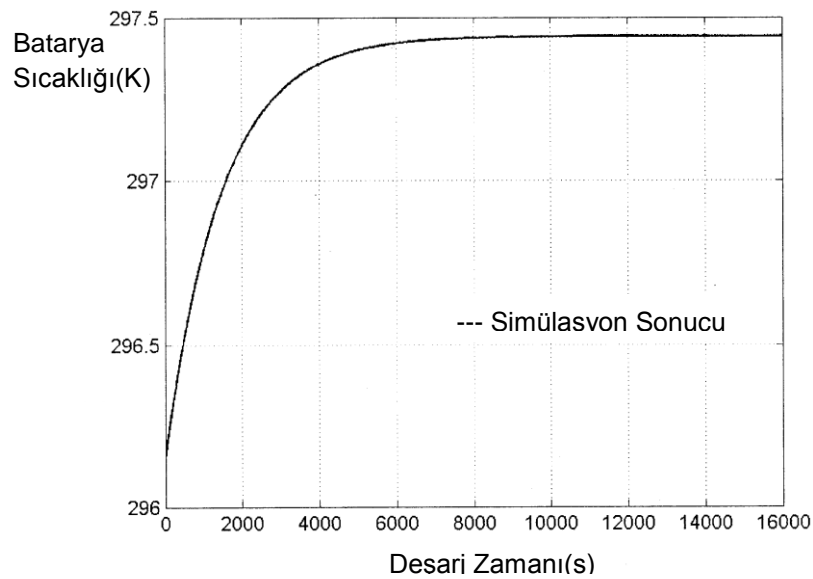


Şekil 3.15: Silindirik bir Li-iyon batarya yapısının fiziksel şekli



Şekil 3.16: Li-iyon ve diğer batarya türlerinde enerji-güç değişim sınırları

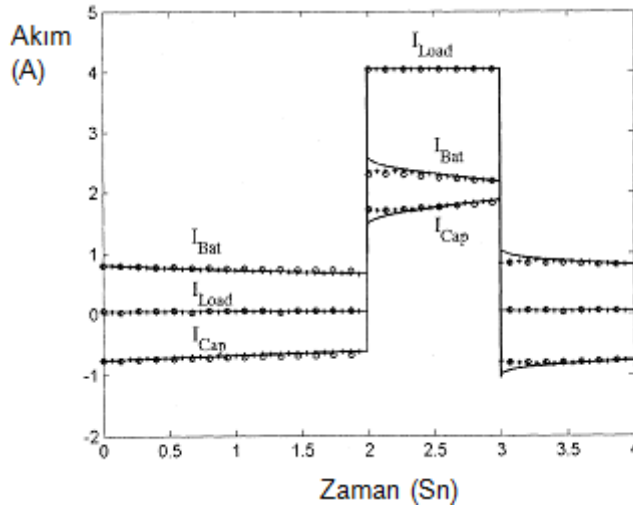
Lityum metali neme karşı çok duyarlı olduğundan lityum tuzu içeren polar organik sıvılar, susuz elektrolit olarak kullanılır. Birincil lityum bataryalarda genellikle pozitif aktif malzeme olarak inorganik oksit ya da sülfid, bazen polikarbon florit kullanılır. İkincil lityum hücrelerin tasarımı, birincil hücrelere göre daha karmaşık ve zordur. Ancak 1990'lerden bu yana grafit negatif elektrotlu Lityum iyon tipi hücreler ticari olarak üretilmektedir. Lityum iyon bataryaların keşfi 1970'lerin sonunda Oxford Üniversitesi'nde lityum-kobalt oksit (LiCoO_2) ve lityum-nikel oksit (LiNiO_2) bileşikleri üzerinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Bu oksit elektrotlar metalik lityum negatif elektrotuna karşı pozitif elektrot olarak organik bir elektrolitin içinde kullanıldığında 4 V'luk bir hücre elde edilmiştir. İki elektrot arasında Li-iyonlarının gidip gelmesi ile bu kadar yüksek bir hücre geriliminin oluşabileceğinin anlaşılmasıyla, 1991 yılında Lityum iyon hücresi geliştirildi (Sony). Bu hücre hiç lityum metali içermediğinden şarj edilirken güvenliydi. Negatif elektrot olarak emici (intercalation) bir bileşiğin kullanılmasıyla hücre geriliminin miktarı, elektrotta bozulan lityumun serbest enerjisine karşılık, daha küçülmektedir. Buna rağmen, negatif elektrottaki 1 V kaybına rağmen hücre gerilimi 3 V olur. Daha sonra negatif elektrot olarak yüksek yüzey alanına sahip kömür gibi amorf bir madde ya da grafit formunda karbon kullanımı tercih edilmeye başlandı. Farklı batarya türlerinde enerji-güç değişim sınırlarını gösteren değişimler Şekil 3.14' de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, Li-iyon bataryalar diğerlerinden daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 3.17: Sıcaklığa bağlı akü deşarj zamanı

Yapılan deneylerle, lityumun grafit sayesinde LiC_6 bileşiğine dönüşebilir. Lityum referans elektrotuna göre gerilim, sıfırdan +1 V'a kadar değişir. Karbonun kullanımı iki durumda idealdi. Birincisi; karbon kolayca bulunabilir ve düşük ağırlıkta ucuz bir maddedir. İkincisi; karbon lityumun önemli bir oranını işe yarar bir gerilimle alır, böylece pozitif elektrotta bir geçiş metal oksidi ile eşleştğinde hücrede tam şarjlı durumda 4 V'dan başlayan ve deşarj süresince 3 V'a düşen bir gerilim oluşturur. Şekil 3.17' de sıcaklığa bağlı deşarj süresi gösterilmektedir. Anlaşılacağı gibi, sıcaklık arttıkça deşarj süresi de uzamaktadır. Ancak malzemelerin ve kimyasalların dayanım sınırları aşılmamalıdır.

Negatif elektrotlar için karbona alternatif olarak hafif metal alaşımları araştırılmaya başlanmıştır [25]. Şekil 3.18' de batarya içeren hibrit bir güç kaynağı için akımın geçici durum değişimi gösterilmektedir. Şekildeki dairelerle gösterilen değişim deneysel sonucu göstermektedir. Dolu çizgi ile gösterilen değişim ise etkin kondansatör bağlı konum içindir. Kondansatör varken akım en düşük durumdadır.

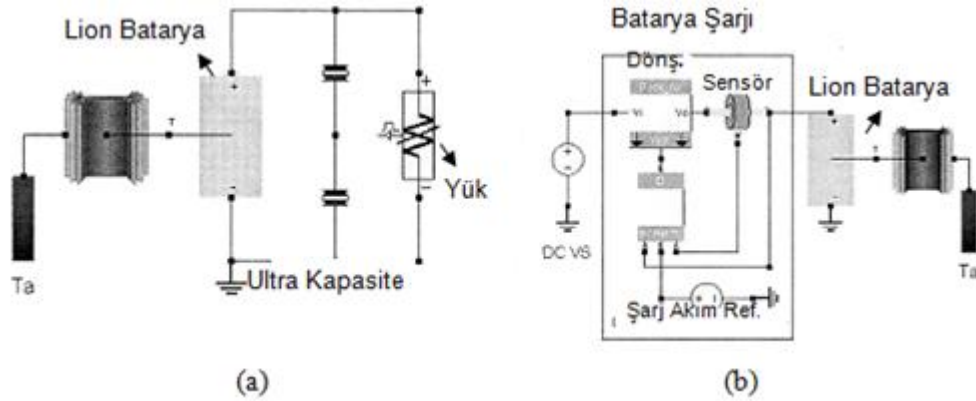


Şekil 3.18: Batarya içeren hibrit bir güç kaynağında akımın durum değişimi. Dairesel değişim deneysel, dolu çizgi ise etkin kondansatör bağlı konum içindir

Karbon; grafit, petrol kömürü ve pirolün iletken polimerler gibi farklı kaynaklardan elde edilebilir. Karbon kaynakları Li-iyonlarını emebilmesine göre değişir. Emiş sırasında elektrolit, grafitin genişmesi ve pullar şeklinde dökülerek kısmi bozunmaya uğrar. Kömür elektrotlar, grafitte göre daha düşük kapasiteye sahip olmalarına rağmen elektrolite karşı daha az duyarlı olduklarından yüksek iletkenlikte

elektrolit kullanımına olanak verirler. Yine de Lityum iyon hücrelerin çoğunluğunda daha düz bir deşarj eğrisi verdikleri için grafit elektrotlar kullanılır.

Lityum iyon hücreler ilk kez Sony şirketi tarafından ticari olarak piyasaya sürüldükten kısa bir süre sonra, başka firmalar da üreterek piyasaya girdi. Satışlarda büyük artış görüldü. 1998'e gelindiğinde yalnızca Japonya'da yılda 2,1 milyar dolar değerinde 190 milyon Lityum iyon hücre üretilmekteydi. Üretilen bu hücreler temelde mobil telefonlar, taşınabilir bilgisayarlar ve kameralarda kullanım içindir. Günümüzde Lityum iyon hücreler değişik ülkelerde üretilmektedir ve yıllık üretim yaklaşık 500 milyon birimdir. Şekil 3.19' da hibrit bir güç kaynağında batarya-kondansatör benzetim devresi ve Li-iyon batarya şarj özeğrisi oluşturmak için kullanılan devre düzeneğİ prensibi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi Li-iyon bataryalarda ısı, bir soğutucu ile T_a sıcaklığındaki ortama aktarılmaktadır. Bataryaya paralel bağılı nitelikleri üstün olan kondansatörler, Şekil 3.18' de gösterildiği gibi, yük akımını destekleyerek bataryaya olumlu katkı sağlarlar.



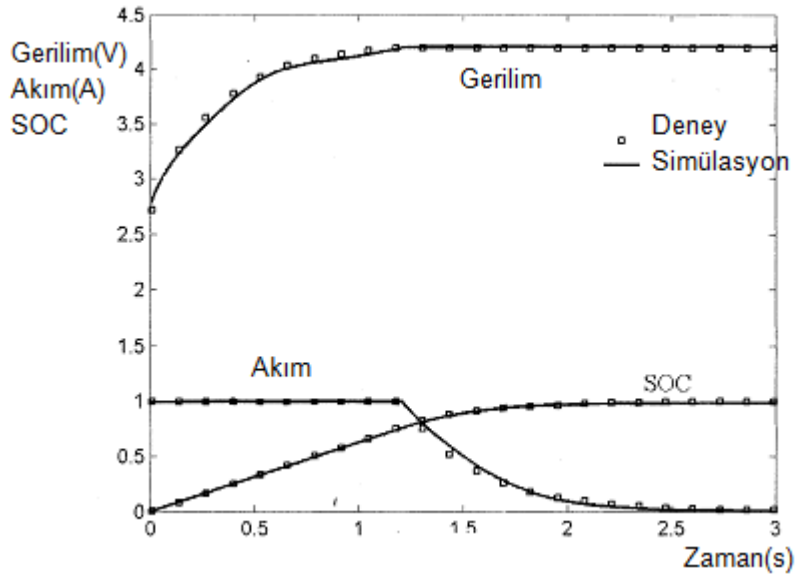
Şekil 3. 19: Hibrit bir güç kaynağında batarya-kondansatör benzetim devresi ve Li-iyon batarya şarj özeğrisi oluşturma devresi

Lityum-iyon bataryalar, taşınabilir elektronik donanım pazarının hızla genişlemesi ile popüler ve avantajlı konuma gelmiştir. Bataryanın birçok uygulamada aranan ölçütlere sahip olması ve genel özellikleri olan[26];

- Yüksek enerji: gravimetrik enerji yoğunluğu; yaklaşık 202 Wh/kg; volumetrik enerji yoğunluğu yaklaşık 300 Wh/dm³.
- Yüksek ortalama çalışma gerilimi (3,6 V).
- Şarj-deşarj özelliklerinin iyi olması, bunun yanı sıra 500 çevrimden fazla şarj-deşarja olanak tanımaları.
- Bekleme durumunda kabul edilebilir derecede düşük self-deşarj (<% 10/ay).

- Ni-Cd bataryalarda bulunan hafıza etkisinin olmaması.
- Kalan kapasitenin bataryanın deşarj eğrisinin incelenerek kolay bir şekilde tanımlanabilmesi
- Lityum metali kullanan denk hücrelerden daha güvenli olması, özel taşıma düzenekleri gerektirmemesi.
- Hızlı şarj olanağı (2-3 saat).

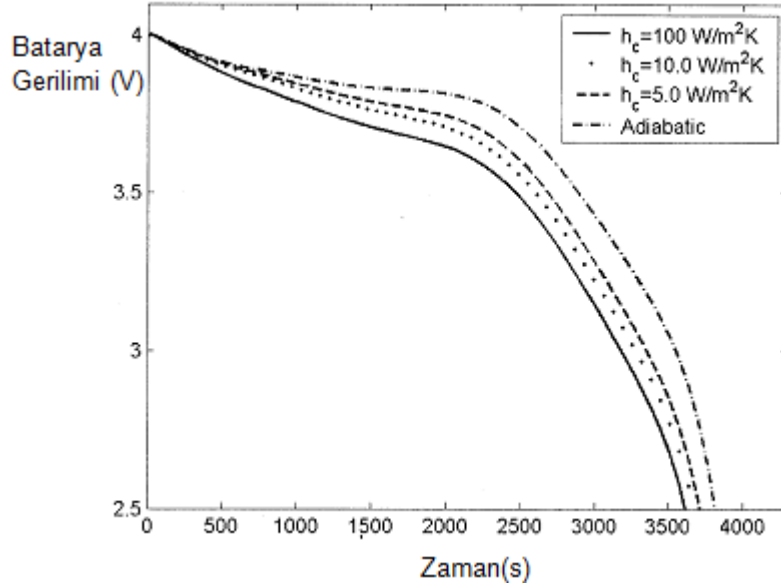
Avantajlara sahip olması şeklinde tanımlanabilir. Tüm bataryalarda olduğu gibi, bu tip bataryalarda da bazı istenmeyen özellikler bulunmaktadır. Örneğin, negatif elektrotta lityum metalinin LiC_6 ile yer değıştirmesi ile önemli bir miktar enerjinin kaybolmasına yol açar. Dolayısıyla, şarj düzenleri daha karmaşık olup bu sorunlardan dolayı da daha güvenli tasarlanması gerekir. Bu nedenlerle şarj gerilimleri belli değerlerde sınırlandırılır.



Şekil 3.20: Deneysel ve benzetim durumlarında batarya şarj özeğrileri, 23°C ve 1A yük akımında SOC: Şarj durumu (State of Charge).

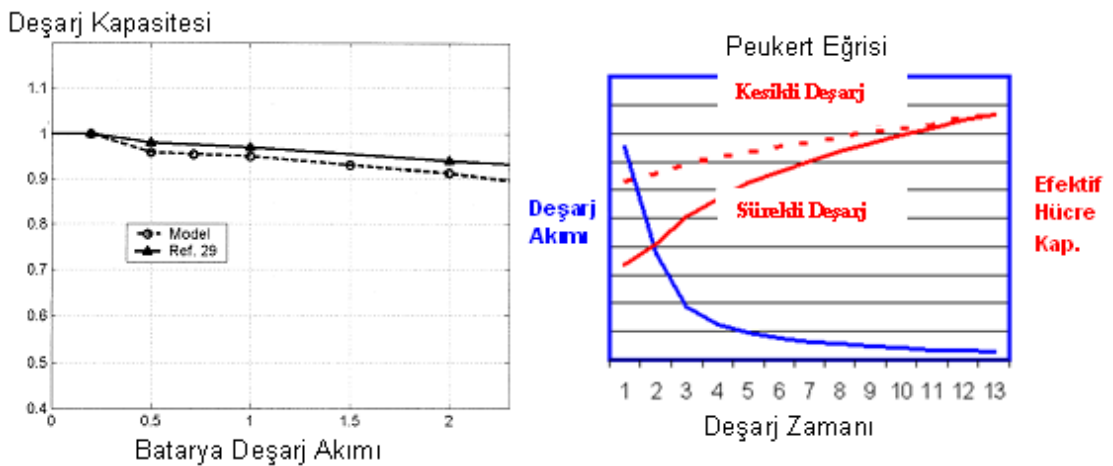
Yapılan denemelerden, $LiCoO_2$ için 4,2 V ve $LiNiO_2$ için ise 4,1 V sınır değerlerden büyük şarj gerilimleri kullanılmamalıdır. Bir diğer sorun da 100 °C'nin üstünde ısıtılması veya aşırı-şarj edilmesi durumunda şarj edilmiş pozitif elektrotların oksijen gazı çıkışı ile bozunmasıdır. Şekil 3.20'de akım ve gerilimin zamana bağlı değişimlerinin oluşturduğu batarya özeğrileri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, 2 saatlik süre sonunda şarj durumu sabitlenerek akım sıfıra inmekte ve gerilim ise 4,1V sınırında sabitlenmektedir.

Şekil 3.21' de bir bataryada farklı soğutma koşullarında gerilim değişimleri gösterilmektedir. Soğutucu değişimi ile batarya geriliminin değişimi de farklılaşmaktadır. İyi soğutma yapılan sistemlerde gerilim değeri daha az düşmektedir.



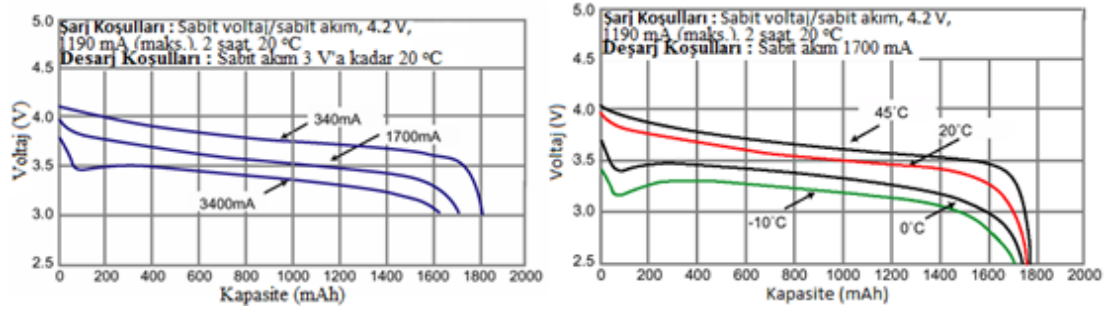
Şekil 3.21: Bataryada farklı soğutma koşullarında gerilim değişimleri

Şekil 3.22'de Li-iyon bataryada deşarj kapasitesinin deşarj akımına bağlı değişimleri gösterilmektedir. Şekildeki çemberli hat batarya modelinden teorik olarak hesaplanmış, üçgenli hat ise deneysel olarak ölçülerek çıkartılmıştır [58]. Akım arttıkça deşarj kapasitesinde çok az azalma görülmektedir. Bu azalmanın küçük değerlerde kalması halinde, deşarj kapasitesinin %90 oranında değişmediği yani yaklaşık olarak sabit kaldığı söylenebilir.

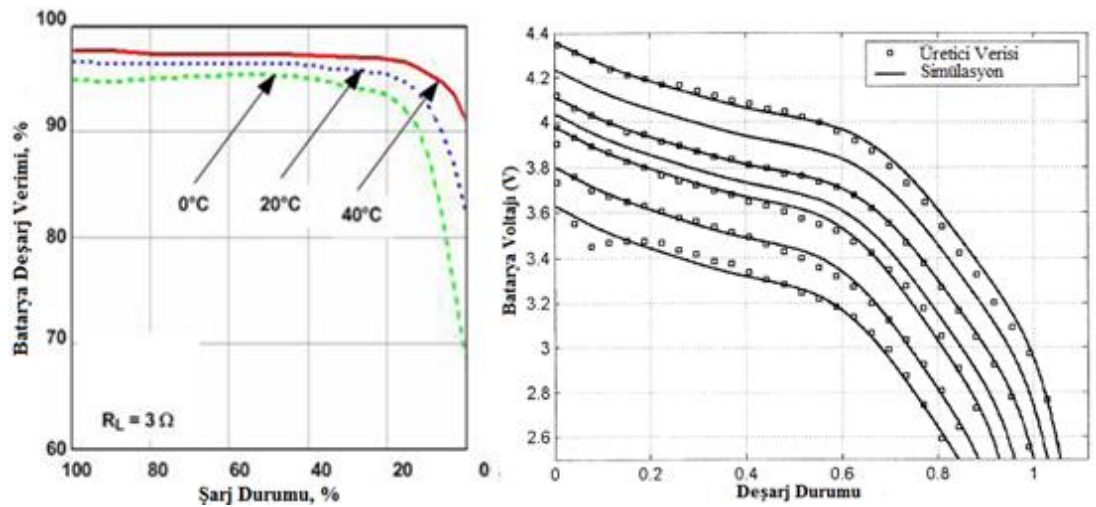


Şekil 3.22: Li-iyon bataryada deşarj kapasitesinin deşarj akımına bağlı (çemberli hat modelden teorik, üçgenli hat deneysel) değişimleri ve Peukert eğrisi ile batarya deşarj akımının deşarj zamanına bağlı değişimi

Şekil 3.23.a'da batarya deşarjının farklı yük-deşarj akımı oranlarında iken gerilim değişimlerini gösteren özeğriler verilmiştir. Deşarj akım oranı arttıkça gerilim azalır. Daha küçük akımlarda ise daha büyük gerilim elde edilmektedir. Akım ile ters orantılı gerilimler elde edilir. (b) de ise batarya deşarjının farklı sıcaklıklardaki özeğrileri gösterilmektedir. Sıcaklık düştükçe gerilim azalır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise daha büyük gerilim elde edilmektedir. Sıcaklık artışı ile ters orantılı gerilimler oluşur. (c) de ise batarya deşarj veriminin farklı sıcaklıklardaki eğrileri gösterilmektedir. Sıcaklık düştükçe verimin de düştüğü görülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise daha iyi verim elde edilmektedir. Sıcaklık artışı ile doğru orantılı verim oluşur. (d) de ise batarya üretici verilerine göre sayısal bir örnek gösterilmiştir. Batarya gerilimine bağlı deşarj durumları 0,7A deşarj oranında gösterilmektedir. Görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda, üstteki 45°C sıcaklıktaki deşarj durumunda 4.4V gerilime karşılık en alttaki -20°C deki deşarj durumunda 3,6V luk gerilim seviyesi oluşmaktadır. Yani sıcaklıkla doğru orantılı gerilim artışı olur.



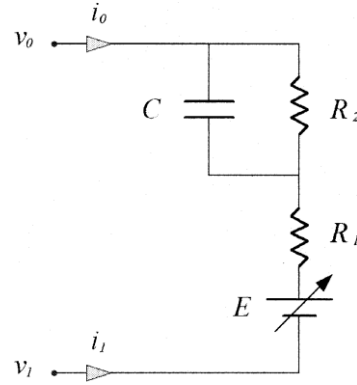
(a)Farklı deşarj oranlarında deşarj özeğrileri (b)Farklı sıcaklıklarda deşarj özeğrileri



(c) Farklı sıcaklıklarda deşarj verim eğrileri[63] (d)Farklı sıcaklıklarda deşarj özeğrileri

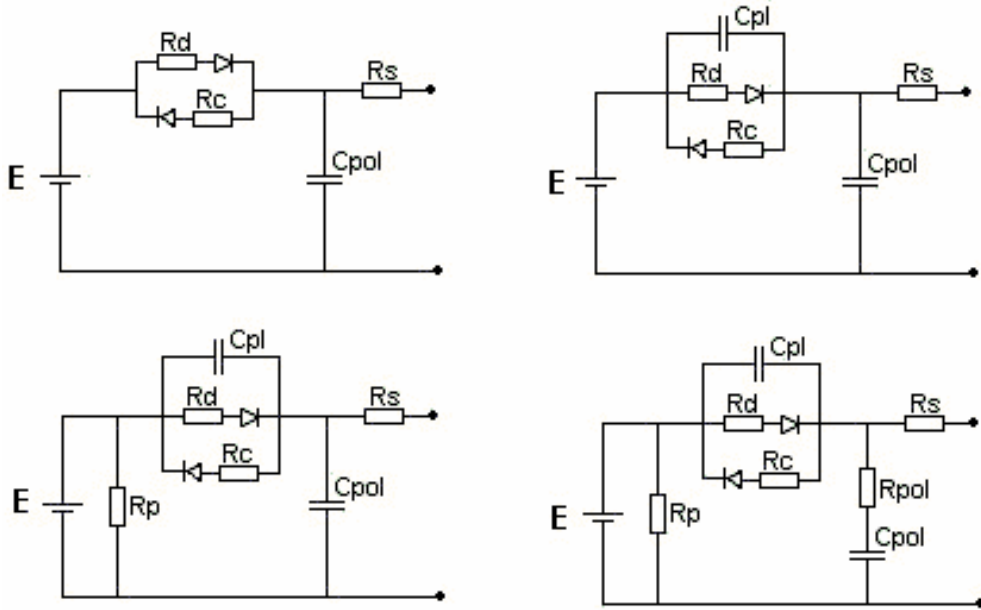
Şekil 3. 23: Li-iyon bataryada (a)Farklı deşarj oranlarında, (b)Farklı sıcaklıklarda, (c)0,7A deşarj oranında batarya gerilimine bağlı deşarj özeğrileri (Üstten alta 45°C, 34°C, 23°C, 10°C, 0°C, -10°C ve -20°C de)

Şekil 3.24'de Li-iyon batarya elektriksel eşdeğer devresi gösterilmektedir. Bir ayarlı DA gerilim kaynağı, iki omik direnç ve bir kondansatörden oluşan elektriksel eşdeğer devrenin giriş gerilimi şarj sırasında uygulanan gerilimdir. Çıkış gerilimi de yük bağlandığında oluşan deşarj veya yük gerilimidir.



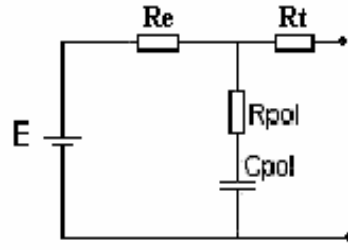
Şekil 3. 24: Li-iyon Batarya Elektriksel Eşdeğer Devresi

Şekil 3.25'de farklı topolojide Li-iyon bataryanın genişletilmiş Thevenin eşdeğer devreleri gösterilmektedir. İyi bir eşdeğer model olan birinci topolojide R_p ve C_{pl} bağlanarak diğer farklı topolojiler oluşturulabilir.



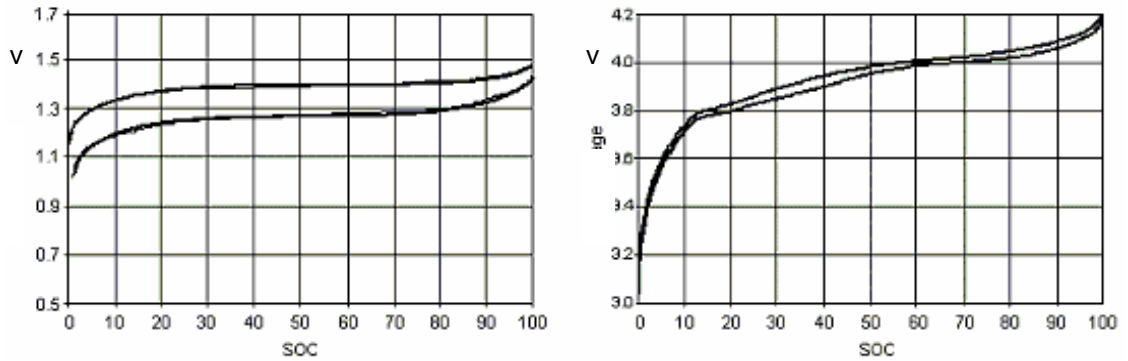
Şekil 3.25: Li-iyon Batarya Topolojisinde genişletilmiş Thevenin eşdeğer devreleri

Şekil 3.26' da Li-iyon batarya basit eşdeğer devresi gösterilmektedir. Bataryalar şarj durumunun %20 ile %80'i arasında doğrusal kabul edilebilir.



Şekil 3.26: Li-iyon batarya basit eşdeğer devresi

Bataryaların modellenmesinde bazı sorunlar da bulunur. Bunların başında elektrokimyasal özellikler gelir. Modelde bataryanın histeresiz etkisi ihmal edilmiştir. Matlab/Simulinkte bloklar ile gösterimde çok giriş-çıkışlı olarak s fonksiyonu ile gösterilebilir. Batarya modeli ile çalışılırken düşük sıcaklıklarda sorunlar daha azdır. Bataryanın histeresiz etkisi, Şekil 3.27’ de gösterilmektedir. Anlaşılacağı gibi, sıcaklık arttıkça deşarj süresi de uzamaktadır. Ancak malzemelerin ve kimyasalların dayanım sınırları aşılmamalıdır. Bu histeresiz etkisi açısından modelde kullanılan iki dirençten biri şarj ve diğeri deşarj durumu için kullanılmaktadır.



Şekil 3.27: Farklı gerilimlerde NiMH tipi ve Li-iyon tipi bataryalarda histeresiz etkisi

Lityum iyon hücrelerin üretiminde 4,2 V’ta oksidasyona karşı kararlı olan bir elektrolitin kullanılması gerekir. Pozitif ve negatif aktif maddeler ince metal yaprakların (alüminyum ve bakır) her iki tarafına aynı şekilde uygulanır. Ayırıcı olarak mikro gözenekli polimer levha kullanılır. Hücrede hiç su olmadığından emin olmak için işlem tamamen kuru bir ortamda gerçekleştirilir. Hücrenin en tepesinde önceden belirlenmiş bir sınır basınç değerinde açılmak üzere konulmuş bir güvenlik deliği konur. Aşırı şarj durumunda şarj akımını kesmesi için güvenlik denetimi bulunur. Hücreler deşarj durumunda birleştirilir ve servise sunulmadan önce mutlaka şarj edilirler.

Lityum iyon hücrelerin şarj edilmesi, şarj geriliminin maksimum değeri şarj kapasitesinin % 80'ine ulaşıncaya kadar sabit akımda gerçekleştirilir. Sonrasında sabit gerilimde akım, küçük bir değere düşünceye kadar devam eder. Hücre 2 veya 3 saatte tamamen şarj olur. Şarj işlemi 0°C ile 40°C arasında yapılır. Bataryada seri veya paralel kombinasyonlar halinde kullanılan Li-iyon hücreler, aşırı şarj durumu veya hücrenin ters bağlanması gibi güvenlik problemleri nedeniyle özel bakıma ihtiyaç duyar. Batarya koruma devreleri üreticilerin önerdiği gibi batarya kılıfının içine yerleştirilir. Tipik olarak, eğer herhangi bir hücrenin şarj gerilimi 4,3 V'a ulaşırsa, alan etkili bir tranzistör (FET) sürülerek iletme girer. Hücre sıcaklığı çok yükselirse sigorta aktif duruma geçerek devreyi açar. Güvenli basınç eşik değeri aşılsa, basınç anahtarı şarj akımını keser. Birçok üretici, ticari alanda Li-iyon hücreleri ayrı ayrı birimler halinde tasarlamazlar, dolayısıyla tam bir koruma devreli batarya paketleri halinde hazırlarlar.

Li-iyon bataryalar, küçük silindir, prizma ve düşey hücreler şekilde üretilirler. Silindirik hücreler standart AA boyutunda, 580 mAh nominal kapasiteye sahiptirler ve profesyonel kullanım için uygun olan 750, 900 ve 1350 mAh kapasiteye sahip tipleri vardır. Bataryaların çoğu, % 20-30 kapasite kaybı ile 500 çevrim yapabilen Li-iyon hücrelerdir. Li-iyon hücreler ayrıca geniş sıcaklık aralıklarında çalıştırılabilirler. Bu düşük kapasiteli Li-iyon hücrelerin yanı sıra daha büyükleri de üretilmektedir. AGM Bataryaları (UK-Japon şirketi) 4,5 Ah (D-size) gibi daha büyük kapasitede hücreleri üretmektedir. 6,5 ve 13 Ah ve 44 Ah 'yüksek kapasiteli' hücreler SAFT firması tarafından yapılmaktadır. Bu bataryaların hücrelerinde pozitif elektrot olarak nikel oksit (LiNiO_2) kullanılır. Bu bataryaların önerilen sıcaklık aralığı -10 ile +45 °C arasında ve gerilim sınırları şarj konumunda 3,9 V iken deşarj konumunda 2,1 V'tur [27].

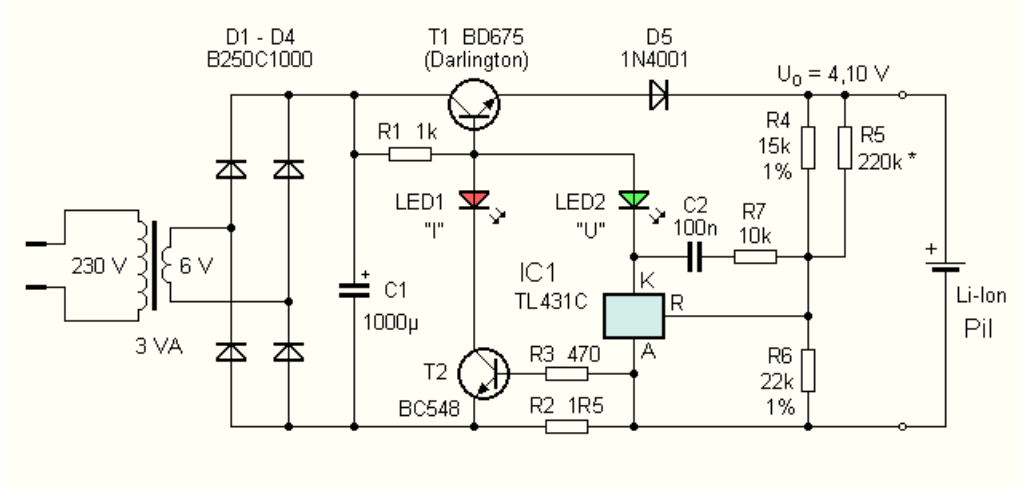
3.4.4. İkincil tip bataryalar

Şarjlı bataryaların şarji, kimyasal tepkimelerle DA üretme ve/veya depolama işlemidir. Şarj ve deşarj fonksiyonu, Faraday Kanunları'na uygun olarak, kimyasal işlemlerle üretilen ve yük bağlandığında çekilen akıma bağlı olarak tüketilen güç miktarı ile orantılıdır. Bataryaların boyutu Ah (Amper-Saat) olarak verilir.

Bataryanın kapasitesi, deşarj akımına ve deşarj süresine bağlı olup değişkindir. Bu nedenle çeşitli batarya üreticileri farklı uygulamalar için değişik nominal değerler belirlerler. Örnek olarak bir elektrikli taşıt bataryası için 5 saatlik deşarj süresi (C5) belirlenirken, küçük boyutlu bir kuru tip kurşun asit batarya için 10 saatlik deşarj süreleri (C10) billirler. C5 = 100 Ah'ın anlamı bataryanın 5 saat sabit akımla deşarj edildiği durumda 100 Ah'lık nominal kapasiteye sahip olacağı anlamına gelir. Bu durumda deşarj akımın $I_5 = 100/5 = 20$ A olur. Deşarj akımı aynı zamanda şarj akımı için de bir ölçü oluşturur. Bu örnekte $I_5 = 20$ A dir. Şarj akımı $2 \times I_5$ olarak belirtilmiş ise batarya 40 A ile şarj edilmektedir. Her şarj sürecinde uygulanan enerjinin bir kısmı bataryanın içerisindeki kimyasal ve elektriksel süreçlerde kaybolur. Bataryayı tam şarj etmek için gerekli olan akımın çekilen akıma oranına şarj katsayısı denir. Şarj katsayısı 1,2 olan, 125 Ah'lık bir batarya % 80 deşarj edildiğinde (100 Ah kullanıldığında), tekrar tam dolu olabilmesi için $1,2 \times 100 = 120$ Ah uygulanması gerekir [28].

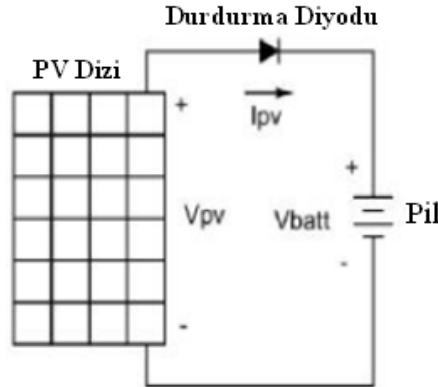
3.4.5. Batarya şarj sistemleri

Bataryalar doğru akım kaynakları olduğu için, doğru akım ile şarj edilirler. Bu nedenle, şebeke gibi alternatif akım kaynaklarından beslenen bataryaların öncelikle besleme gerilimleri doğrultulur. Fotovoltaik sistemlerde üretilen gerilim DA gerilim olduğundan ayrıca doğrultucu bir devreye ihtiyaç duyulmaz [29]. Şarjlı bataryalarda şarj işlemi; doğrudan şarj ve kontrollü şarj olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Şarj sırasında ilk önemli amaç, bataryalarda aşırı şarjın önlenmesidir. Uygulamada, şarj durumunu belirli seviyelerde tutacak, bataryaların ömrünü ve uygun çalışma seviyelerini de gözlemleyecek sistemler tasarlanır. Şekil.3.28□ de genel amaçlı bir Li-iyon batarya şarj devresi gösterilmektedir. AA şebekeden bir düşürücü transformator üzerinden köprü diyot devresi ile tam dalga doğrultulmuş gerilim uygulanır. Bir denetimli yarıiletken anahtar olan transistor ile şarj akımı denetlenirken, tranzistörlerin base uçlarında bulunan LED ileterek kırmızı renkli “şarj devam ediyor” uyarısı oluşturur. Batarya şarj gerilimi istenilen değere ulaşınca diğer LED ileterek yeşil renkli “şarj tamamlandı” mesajı oluşturarak tranzistörlerin kesime girerek şarjı durdurmasını sağlar.



Şekil 3.28: Li-iyon batarya için genel amaçlı örnek bir şarj devresi prensibi.

Doğrudan şarj sistemlerinden olan fotovoltaik (PV) bir sistemle doğrudan şarj düzeneği Şekil 3.29'da gösterilmektedir. Devrede besleme kaynağı olarak görülen PV gerilimi, bataryalar ve diyotun gerilim düşümünden daha büyük olması gerekir. Kullanılan diyot, PV sisteminin geriliminde düşüş olduğu zaman akülerden PV sisteme doğru akım akmasını engeller. PV sistem gibi gerilim seviyesi sıklıkla değişen doğru akım kaynaklarında genelde bir diyot kullanılır [30].



Şekil 3.29: Güneş panelinden doğrudan şarj sistemi-engelleme diyotlu.

Diyot üzerine düşen gerilim, sistem geriliminden çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Dolayısıyla akım-gerilim şarj özelliği değişimi, DA kaynağı belirler. Görüleceği gibi, böyle bir sistemde batarya gerilimi kaynağın açık devre geriliminden oldukça küçüktür. Sistemdeki kaynak, akım kaynağı gibi çalışmakta, dolayısıyla akülere giden akım kısa devre akımına yaklaşılmaktadır. Dolayısıyla, kaynağın maksimum güç noktasında çalışmadığı görülür.

Sistemde batarya gerilimi yükseldiğinde veya besleme gerilimi düştüğünde maksimum güç noktasına yaklaşılr. Böyle sistemlerde, kaynağın açık devre gerilimi bataryaların geriliminden düşük olduğu durumda engelleyici diyot akımı keser. Dolayısıyla kaynakta güç üretme potansiyeli olmasına karşın bataryalar şarj edilemez. Oysa ideal olarak besleme ve batarya gerilimlerinin sabit olması istenir. Ancak piyasadaki tüm bataryalarda uç gerilimleri yük, şarj durumu, sıcaklık vb. etkilerle değişir. PV sistemler gibi gücün değiştiği kaynaklarda bu nedenlerden dolayı kontrollü şarj sistemleri gerekir [34].

Kontrollü şarj donanımında asıl amaç kaynağın gerilim seviyesini, güç elektroniği devreleri yardımıyla, bataryaları şarj edecek seviyede tutmaktır. Devre üzerinden, şarj sırasında maksimum güç noktasında kaynaktan gelen enerji bataryalara aktarılır. Sistemde şarj kontrolü, DA-DA dönüştürücü devrelerle gerçekleştirilir. Denetimli birçok DA-DA dönüştürücü devre kullanılmaktadır. Genel olarak Düşürücü Tip (Buck), Yükseltici Tip (Boost) ve Düşürücü-Yükseltici Tip (Buck-Boost) olarak guruplandırılabilirler [31]. Bu devreler temelde bir endüktans, bir kapasite ve aynı anda kapalı olmayan ve genelde transistor veya bazen de tristör yarıiletken anahtar içerirler. Devrelerden güç akışı, kaynaktan bataryalara veya bataryalardan kaynağa iki yönlü olabileceği göz önüne alınarak tasarım yapılır. Bataryalardan kaynağa güç akışını engellemek için tek yönlü anahtar olarak görev yapacak güç diyotları kullanılır.

Tezdeki sistem deneysel çalışması ve benzetiminde akım-gerilim kontrollü şarj kontrol algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, şarj vedeşarj için izin verilen sınır gerilim değerleri arasında anahtarlama yaparak batarya şarjını kontrol etmektedir.

3.4.6. Yükler

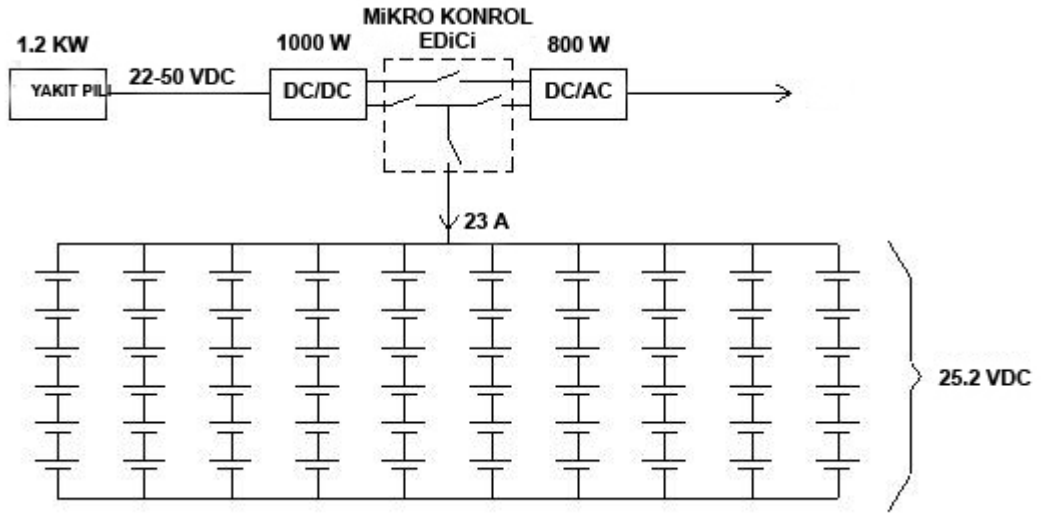
Lityum iyon ve Kurşun asit bataryalar, batarya modeli performans testleri için sabit akımla şarj vedeşarj edilmiştir. Sonuçlarının batarya üreticisi tarafından yayınlanan batarya karakteristik sonuçları ile doğrulandığını görebilmek için bu kabul önerilmiştir. Model doğrulamada kullanılan Kurşun asit batarya 1,3 Ah, Li-iyon batarya ise 1,050Ah kapasiteye sahiptir. Üretici firma şarj-deşarj karakteristik

bilgileri kullanılarak Kurşun asit ve Li-iyon batarya 550 mA sabit akımda (C/2) deşarj edilmiştir. Şarj sırasında yine batarya üreticisi bilgileri kullanılarak Kurşun asit batarya 325 mA (C/4) sabit akım, Li-iyon batarya 530 mA (C/2) sabit akım ile şarj edilmiştir [32, 33].

4. DENEYSEL SİSTEM VE SONUÇLARI

Bu bölümde, yakıt pili ile Li-iyon piller gurubu desteği ile bir değişken ve darbeli yükü besleme sistemi tasarlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışma donanımı ile sonuçları irdelenmektedir.

Çalışmanın özünü oluşturan devrenin genel prensip şeması Şekil 4.1’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi, polimer elektrolit yakıt hücresi yakıt pilli hibrit besleme ile yük beslemesi yapılmaktadır [37].

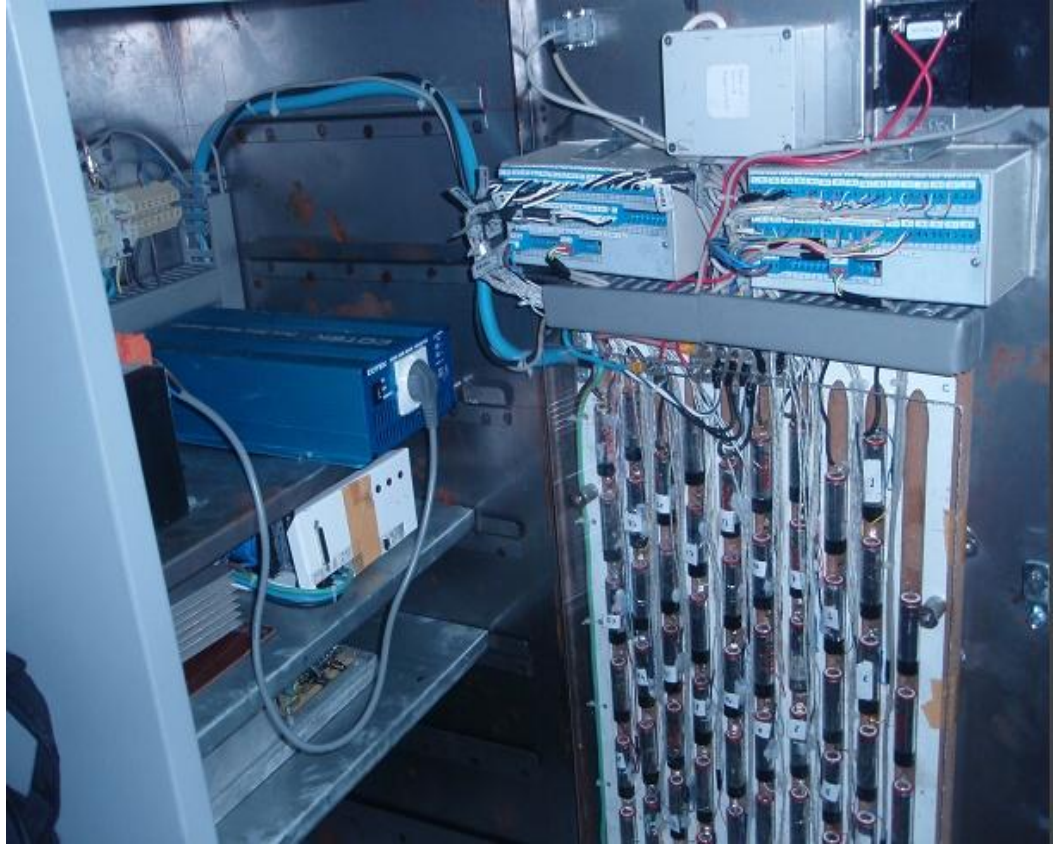


Şekil 4. 1: 1000W nominal gücünde Li-iyon pil destekli yakıt pili sistem prensibi

Bu çalışma için tasarlanan, Li-iyon pil destekli yakıt pili sisteminin deneysel donanımı Şekil 4.2’de ve iç yapısı Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4. 2: Li-iyon pil destekli yakıt pili sisteminin fotoğrafı



Şekil 4.3:Li-iyon pil destekli yakıt pili sisteminin iç fotoğrafı

4.1. Li-iyon Pil Grubu

Genel anlamda bir pil için özdeğerler belirlenirken; enerji performansı, güç performansı ve pil ömrü göz önüne alınır. Bu faktörlerin birinin artırılması diğerinin azalmasına sebep olmaktadır. Güç yoğunluğunu artırmak için akım kolektörünün artırılması aktif elektrot için gerekli olan alanın azalmasına neden olur. Dolayısıyla enerji yoğunluğu azalır. Burada asıl amaç, gerekli ve ihtiyaca cevap verebilecek uygun çözüme ulaşmaktır. Bu çalışmada Li-iyon pilinin seçilmesinin en önemli nedeni, bu pilin diğer pillere göre daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olmasıdır [38].

Günümüz teknolojik olanaklarıyla, Li-iyon pilinin enerji yoğunluğu 200 Wh/L, güç yoğunluğu ≤ 1000 W/kg dır. Kurşun asit pilinin enerji yoğunluğu ise 70 Wh/L güç yoğunluğu 100-150 W/kg dır. Li-iyon pillerde birçok avantaj yanında, en önemli sorun, hala güç üretiminin henüz istenilen seviyeye getirilememesidir. Li-iyon piller, küçük hacimlerde benzerlerine göre daha fazla enerji sağlar. Böylece fiziksel boyutlar küçülür. Kapladığı yer minimum olması istenen uzay çalışmalarında ve elektrikli araçlarda kullanılmaktadır [38].

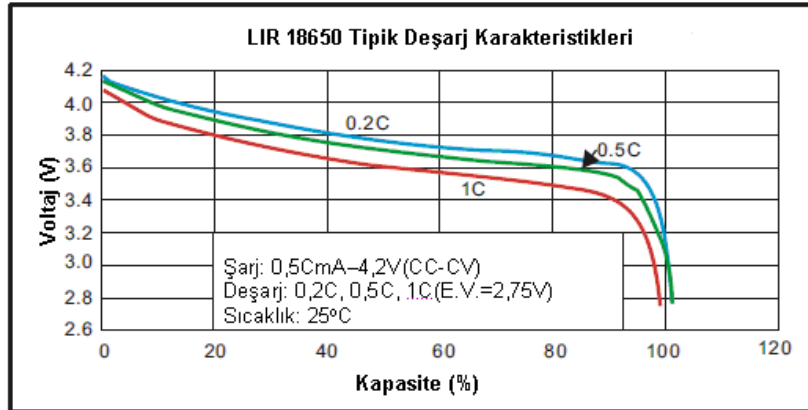
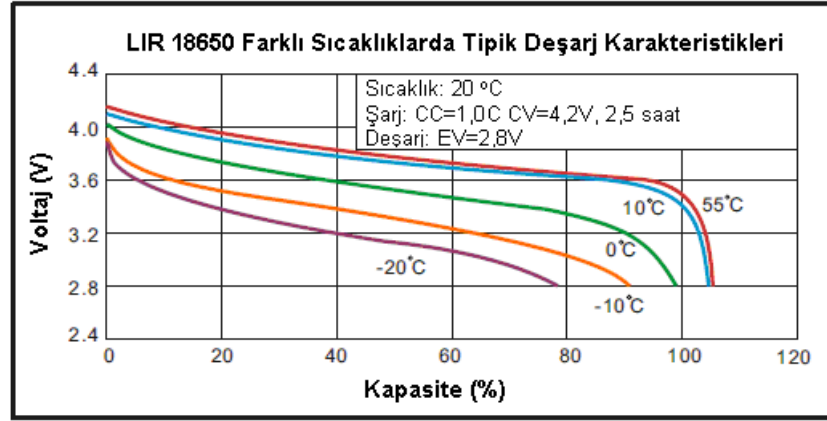
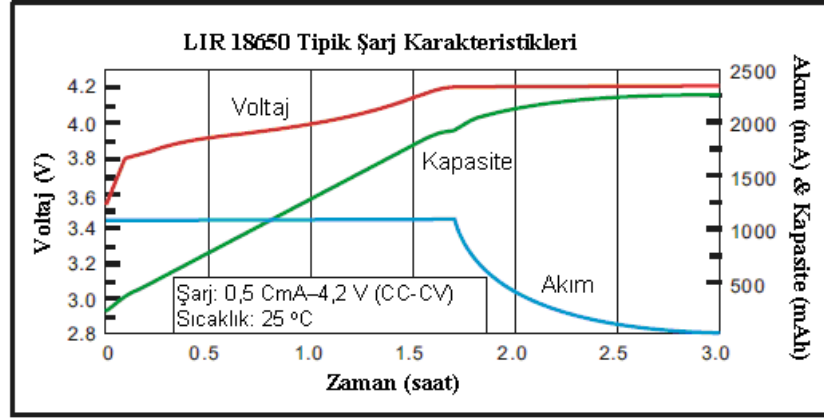
Li-iyon pillerin şarjı ve deşarjı diğer pillerden farklılıklar gösterir. Bu piller önce sabit akım daha sonra sabit gerilim ile şarj edilirler. Deşarj işlemi yapılırken nominal gerilimin altında deşarj edilmeleri pilin ömrü açısından olumlu sonuç verir. Çevre sıcaklığına bağlı olarak performansı değişir. Yakıt pilleri ilk çalışma anında bir enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla sistemin gereksinimi olan akım miktarı, yakıt pillinden sağlanan akımdan fazla olması durumunda gerekli olan bu akım pillerden sağlanır.

Li-iyon pillerin nominal gerilimi $3.6V_{DA}$, nominal akımı 2 Ah'dir. İstenilen akım ve gerilim için piller uygun seri-paralel bağlantılarla bir gurup oluşturulur. Gurubu oluşturan pillerin her birinin öz direnci birbirinden farklıdır. Dolayısıyla pil ömrü için şarj edildikten sonra nominal gerilimlerin birbirine eşit olması gerekir [39]. Bu açıdan şarj devrelerinde aranan koşullar belirlenir. Bir Li-iyon pil şarj donanımında; şarj devresi güç anahtarlama elemanları, şarj kontrolü, şarjın izlenmesi, güvenlik

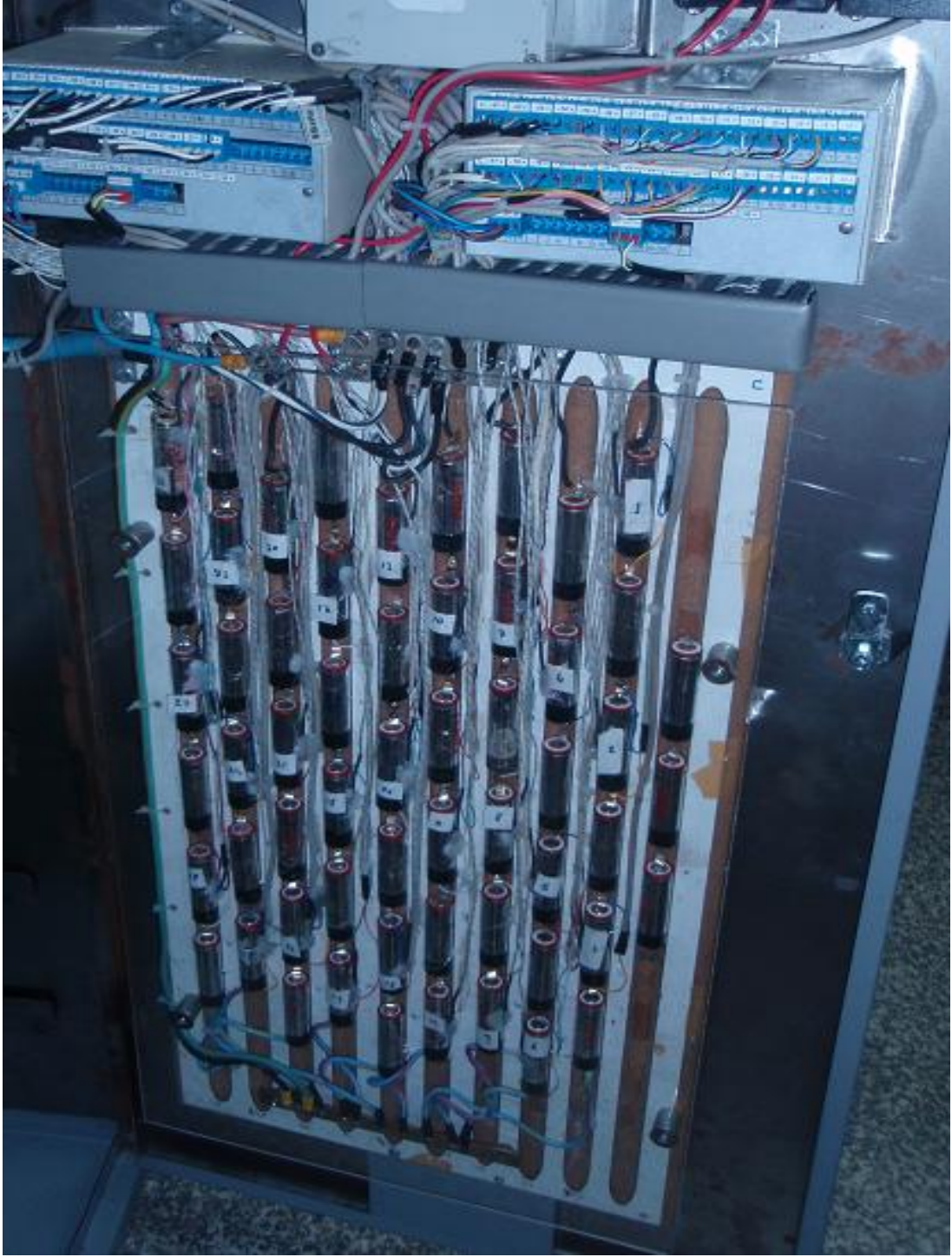
korumaları v.b. gibi özellikler bulunması gerekir. Deneysel çalışmada, yakıt pili sistemine destek güç için 6 şarj seri bağlı 9 adet paralel Li-iyon pil grubu oluşturulmuştur. Tablo 4.1 ve Şekil 4.4'te gösterildiği gibi farklı sıcaklık ve şarj-deşarj durumlarında, farklı davranışlar göstermektedirler. Pillerde uç gerilimi $25.2V_{DA}$ 20 Ah ve maksimum $25.2 V_{DA}$ çıkış gerilimli pil grubu elde edilmiştir. Pil gruplarının gerçek fiziksel görüntüsü Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 1: Li-iyon pilin öz değer tablosu

Nominal Gerilim		3.7V
Nominal Kapasite	Tipik	2200mAh (0.2C deşarj)
	Minimum	2150mAh (0.2C deşarj)
Şarj Yöntemi		SA/SV (Sabit Akım-Sabit gerilim) Akım=0.5C, Voltaj=4.2V
Yükleme Gerilimi		4.20V \pm 0.05V
Standart Doldurma Akımı		1100mA
Maksimum Akım	Şarj	1760mA
	Deşarj	2C
Ortam sıcaklığı	Standart Şarj	-20 °C'den 45 °C'ye
	Deşarj	-20 °C'den 60 °C'ye
	Depolama	-5 °C'den 35 °C'ye
Deşarj Kesim Gerilimi		2.75V
İç Empedans		<80m Ω
Ömrü		>300 devir (>%80 kapasite)
Normal Ağırlık		Yaklaşık 47g



Şekil 4. 4: Li-on pilin şarj ve deşarj özgeçirileri

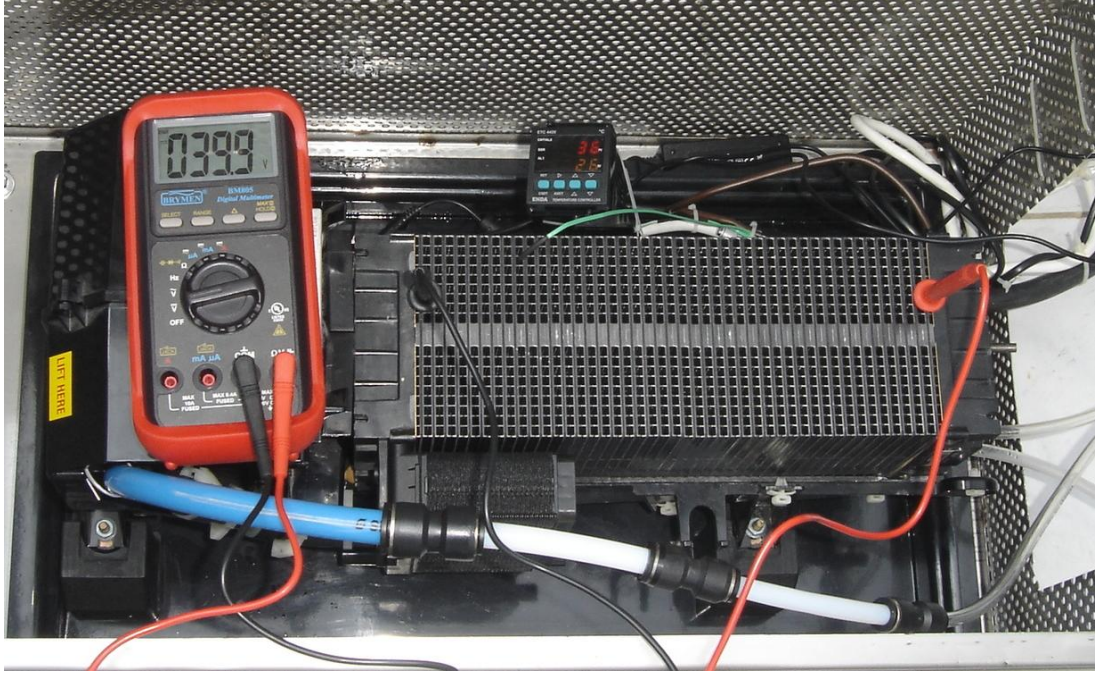


Şekil 4.5: Deneysel çalışma için tasarlanan Li-iyon pil grubu görüntüsü

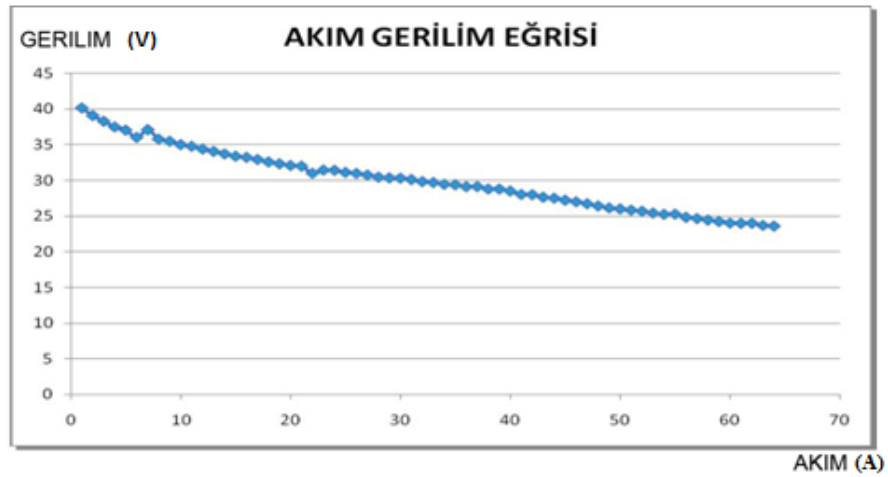
4.2. Polimer Elektrolit Yakıt Pili

1000 W çıkış gücüne sahip TÜBİTAK-MAM tarafından üretilen yakıt pili Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Li-iyon pil destekli güç sistemi için gerekli olan enerjinin DA-DA çevirici vasıtasıyla sağlanmaktadır. Yakıt pili ve batarya grubunu ile desteklenen

sistemin çıkışından AA şebekeye güç aktarımı için DA/AA dönüştürücü donanımı olan evirici kullanılmaktadır. Yakıt pilinin akım gerilim özegrisi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Polimer elektrolit yakıt pilline bağlı olarak DA-DA dönüştürücü tasarımı yapılmıştır.



Şekil 4.6: Polimer Elektrolit yakıt pilinin görünümü



Şekil 4.7: Polimer elektrolit yakıt pilinin akım-gerilim değışimi

Çalışmada tasarlanan sisteme göre, şarj, deşarj ve diğeri işlemler mikrodnetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Böylece şarj işleminin başlatılması ve durdurulması, geçici şarj

elde etme, hücresel gerilim ve denge kontrolü, şarj durumunun gösterilmesi ve oluşturabilecek hataların bir ekranda görsel olarak gerçekleştirilmiştir.

4.3. DA-DA Dönüştürücüler

Güç elektroniğinin temelleri, daha elektronik sözcüğünün yaygın olarak kullanılmaya başlamasından önce, 20.yüzyılın başlarında atılmıştır [40]. Günümüzde kullanılan güç dönüştürücülerinin çoğu o yıllarda geliştirilmiş devrelerdir. Güç elektroniği dalındaki ilk çalışmalar alternatif akımdan doğru akım elde edebilmek için yapılmıştır. Bu amaçla önce mekanik dönüştürücüler kullanılmış ve daha sonraları, cıva buharlı doğrultucuların bulunması ve geliştirilmesi ile mekanik doğrultuculardan statik doğrultuculara doğru bir değişim başlamıştır. 1920'li yılların başında geliştirilen ızgara denetimli cıva buharlı tüplerle DA çıkış gerilimi kontrol edilebilmiştir. Bu amaçla geliştirilen devreler, günümüzde kullanılan devrelerin temelini oluşturmuşlardır.

İlk yarıiletken doğrultucu bakır oksitli olup, 1920'li yılların sonlarında kullanılmaya başlamış. 1930'larda ise selenyum doğrultucular ortaya çıkmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra katı hal fiziğinde önemli gelişmeler olmuş ve 1950'lerde üretilen yarıiletken diyotları, 1957 yılında General Electric firmasının geliştirdiği tristörler izlemiştir [41]. Bu yarıiletkenler, güç elektroniği alanında devrim sayılacak gelişmeler başlatmıştır. Küçük ve sağlam yapısı, çalışma koşullarından etkilenmemesi gibi özellikleri dolayısıyla güç elektroniği uygulama alanını genişletmiştir.

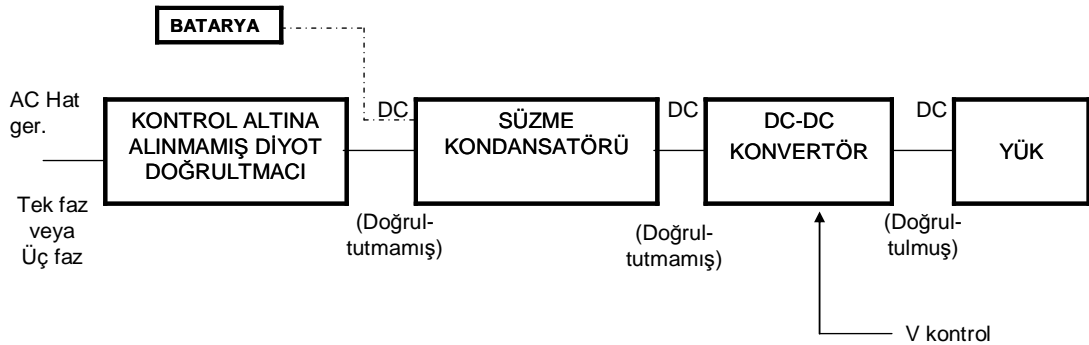
Güç elektroniğinin evrimini hızlandıran ve uygulama alanlarını daha da genişleten bir diğer etken de yakın geçmişte yaşanan enerji krizi olmuştur [42]. Enerji tasarrufu zorunluluğu, asenkron motorları daha verimli bir şekilde çalıştırabilmeyi sağlayacak yeni güç elektroniği devrelerinin geliştirilmesini sağlamıştır.

Tristörün geliştirilmesi gibi bir devrim de, 1974 yılında, ilk mikroişlemcinin piyasaya sürülmesiyle yaşanmıştır. Mikroişlemciler, çok sayıda ayrık ve tümleşik devre elemanlarının yerini alabilme özellikleri ile güç elektroniği devre tasarımcılarının önünde yeni ufuklar açmıştır. Yakın zamana kadar karmaşık yapıları ve maliyetlerinin yüksek olmamaları gibi nedenlerle ancak özel durumlarda

kullanılan güç elektroniği ve denetim yöntemlerini daha çekici duruma getirmiştir [43]. Asenkron motorların, basit ve ucuz tasarlanabilen sistemlerde, doğru akım motorları kadar kolay ve hassas bir şekilde denetlenebilme olanağı doğmuştur. Fırça, komütatör gibi elektriksel sürtünen parçalarının olmayışı v.b. gibi problemleri ile bakım zorlukları olmadığından, DA motor sürücü sistemlerine ekonomik alternatif oluşturmuşlardır. Güç elektroniği uygulama alanları özellikle son yıllarda hızla artmış ve iletişim, savunma, endüstriyel süreçler, güç üretimi, iletimi-dağıtımı, enerji dönüşümü, ulaşım ve tüketici elektroniği gibi çok geniş bir alana yayılmıştır.

Çoğu endüstriyel uygulamalarda, sabit gerilimli DA kaynağın, değişken gerilimli başka bir DA kaynağa dönüştürülür. DA/DA dönüştürücüler olarak da bilinen bir DA kıyıcı veya DA ayarlayıcılarla, DA doğrudan başka değerli bir DA kaynağına dönüştürülür. Bir dönüştürücü, AA devrelerindeki oto transformatörüne benzetilebilir. Oto transformatörüyle AA gerilim değiştirildiği gibi DA/DA dönüştürücü ile çıkış DA gerilimi değiştirilebilir [44], [65].

DA dönüştürücüler; elektrikli otomobil, küçük güç yük asansörleri, kaldırma makinaları, taşıt başlatma sistemleri, maden ocağı çekicileri, el ve ev aletleri kontrolü için sık kullanılır. Motor hız denetiminde yumuşak anahtarlama ve kayıpların azaltılabilmesi, yüksek verim ve dinamik tepki gibi avantajları DA/DA dönüştürücülerin kullanımını arttırmıştır. Enerji geri kazanımı için motorların aktif frenlenmesinde de kullanılmaktadır. Özellikle sık durup-çalışmalı aktarım sistemlerinde enerji tasarrufu sağlarlar. Bir DA/DA dönüştürücünün çalışma prensibi ise Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8: DA/DA Dönüştürücü prensibi

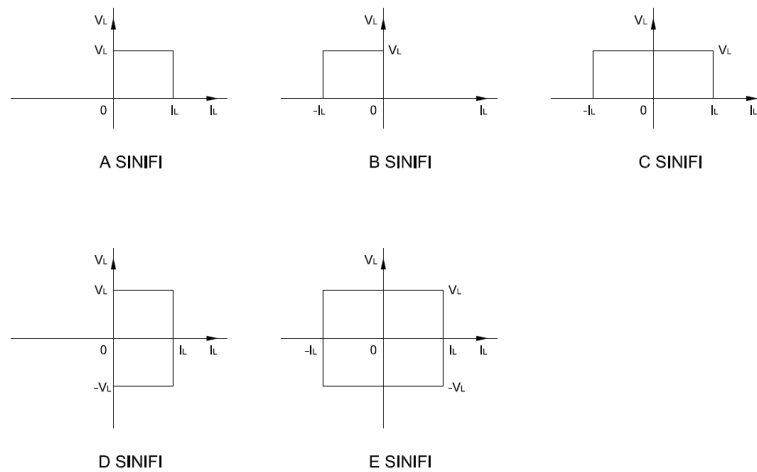
4.3.1. DA-DA Dönüştürücülerin Sınıflandırılması

DA/DA dönüştürücüler, yükü beslemeleri sırasında güç akışı ile bağımlı olarak farklı davranışlar gösterirler. Bazen yüke güç aktarılırken, bazen de yükün ürettiği gücü kaynağa aktarırlar. Her iki yönde güç aktarımı yapan dönüştürücüler de tasarlanmaktadır. Akım ve gerilim yönüne göre DA/DA dönüştürücüler 5 farklı grupta sınıflandırılabilir [45].

- A Sınıfı Dönüştürücüler
- B Sınıfı Dönüştürücüler
- C Sınıfı Dönüştürücüler
- D Sınıfı Dönüştürücüler
- E Sınıfı Dönüştürücüler

4.3.1.1. A sınıfı dönüştürücü

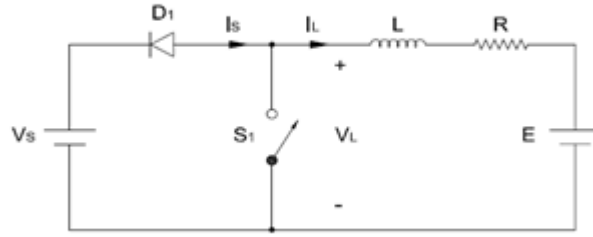
Bu gruptaki dönüştürücülerde akım yüke doğru akar. Şekil 4.9.a 'da gösterildiği gibi yük gerilimi de yük akımı da pozitifdir. Eksenleri I_L , V_L 'den oluşan bir düzlemin tek bölgesinde çalışıldığı için tek çalışma bölgesi dönüştürücü olarak tanımlanırlar [46].



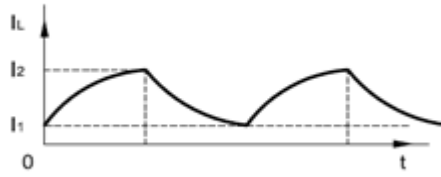
Şekil 4.9: DA/DA Dönüştürücülerin Çalışma Bölgelerine Göre Sınıflandırılması

4.3.1.2. B sınıfı dönüştürücü

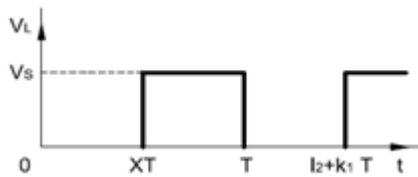
Dönüştürücünün aktardığı güç negatif işaretli olup, akımı yükten dışarı doğru akar. Şekil 4.9' de gösterildiği gibi yük gerilimi pozitif fakat yük akımı negatiftir. B sınıfı dönüştürücü de A sınıfı dönüştürücü gibi tek çalışma bölgesidir. İkinci çalışma bölgesinde aktif olan dönüştürücü tipidir [47]. Yani, ikinci çalışma bölgesinde bir evirici (inverter) olarak da kullanılabilir. Bu tip dönüştürücü devresinin prensibi ve çıkış büyüklüklerinin değişimi, Şekil 4.10' da gösterilmektedir. Şekildeki E bataryası yükte bulunan DA motorun üreteceği zıt EMK olarak gösterilmektedir. S_1 anahtarı kapatıldığında E bataryasından dolayı L bobininden bir akım geçer. Yük gerilimi V_L ve yük akımı I_L Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de gösterilmiştir.



Şekil 4.10: B sınıfı dönüştürücünün prensip devresi



Şekil 4.11: B sınıfı dönüştürücünün yük akımı I_L



Şekil 4.12: B sınıfı dönüştürücünün yük gerilimi V_L değişimi

Şekil 4.10 'daki devrede S₁ anahtarı kapatıldığında

$$0 = L \frac{dI_L}{dt} + RiL + E \quad (4.1)$$

$I_L(t=0) = I_1$ olduğunda,

$$I_L = I_1 e^{-(R/L)t} - \frac{E}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) \quad (4.2)$$

Burada $0 \leq t \leq kT$ aralığında $AT.t = t_1$, ve $I_L(t = t_1 = kT) = I_2$ olur.

S₁ anahtarı açıldığında, L bobininde depolanmış enerji, D₁ diyotu üzerinden V_s kaynağına geri verilir. Yük akımı i_L azalır. Bu durumda devre denklemi;

$$V_s = L \frac{dI_L}{dt} + RiL + E, \quad i(t=t_2) = I_2 \quad (4.3)$$

Buradan yük akımı;

$$I_L = I_2 e^{-(R/L)t} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) \quad (4.4)$$

Şeklinde tanımlanabilir. $0 \leq t \leq t_2$ aralığında, $t_2 = (1-k).T$, $t = t_2$ 'de Kararlı hal sürekli akımı için;

$$I_L(t = t_2) = I_1, \quad (4.5)$$

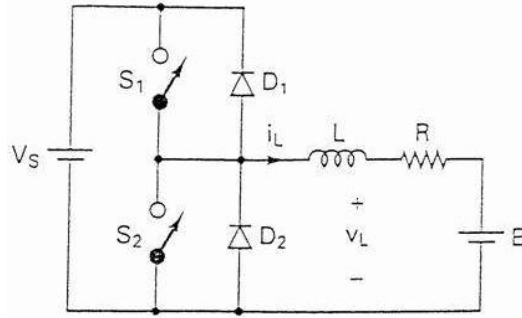
Şeklinde tanımlanabilir. Kararlı hal süreksiz akımı için;

$$I_L(t = t_2) = 0, \quad (4.6)$$

Olarak tanımlanabilir.

4.3.1.3. C sınıfı dönüştürücü

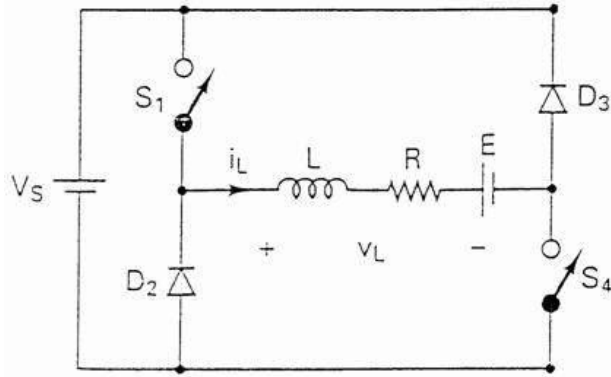
Şekil 4.9' da gösterildiği gibi yük akımı hem pozitif hem negatif olabilmektedir. Fakat yük gerilimi her zaman pozitifdir. Şekil 4.13'de gösterilen ve iki çalışma bölgesi tip dönüştürücü olarak bilinen C sınıfı dönüştürücü, A ve B tip dönüştürücülerin birleştirilmesinden oluşur. S1 ve D2, A sınıfı; S2 ve D1 B sınıfı dönüştürücü görevi yapar. S1 ve S2 aynı anda kapatılmadığı sürece C sınıfı dönüştürücü hem doğrultucu hem de evirici olarak kullanılabilir [48].



Şekil 4.13: C sınıfı dönüştürücü prensip devresi

4.3.1.4. D sınıfı dönüştürücü

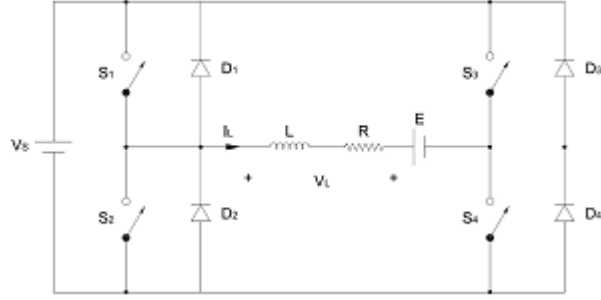
Bu tip dönüştürücüde, yük akımı devamlı pozitifdir. Şekil 4.9 'da gösterildiği gibi yük gerilimi hem pozitif hem de negatif olabilir. Şekil 4.14'deki bu devre, doğrultucu veya evirici olarak kullanılabilir. S_1 ve S_4 anahtarları kapatılırsa V_L ve I_L pozitif olur. S_1 ve S_4 anahtarları açıldığında yük akımı I_L pozitif olur ve endüktif bir yük için akmaya devam eder. D_2 ve D_3 yoluyla, yük akımı ve V_L ters çevrilir [49].



Şekil 4.14: D Sınıfı Dönüştürücü

4.3.1.5. E sınıfı dönüştürücü

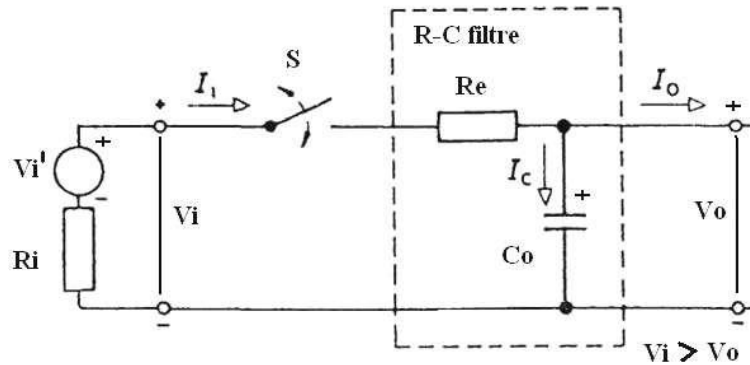
Şekil 4.9' da gösterildiği gibi, hem yük akımı ve hem de yük gerilimi, hem pozitif hem negatif olabilmektedir. Şekil 4.15. 'de gösterilen ve 4 katran tip Dönüştürücü olarak da adlandırılabilen E sınıfı Dönüştürücü, 2 tane C sınıfı Dönüştürücünün birleştirilmesinden oluşur [50].



Şekil 4.15: E Sınıfı Dönüştürücü

4.3.1.6. Düşürücü tip (buck) dönüştürücüler

Düşürücü tip dönüştürücüde gerilim ayarı yapmak için, bir kondansatör periyodik olarak ohmik bir direnç tarafından şarj edilir. Şekil 4.16' da görüldüğü gibi transistor gibi bir denetimli yarıiletken olan S anahtarı açık iken, çıkışa bağlanacak olan RL yükünü C_o çıkış kondansatörü besler. S anahtarı kapalı olduğunda, yükü C_o çıkış kondansatörü yerine, R_e akım sınırlayıcı direnç üzerinden V_i giriş kaynağı besleyerek akım akıtır. Ortalama çıkış gerilimi, anahtarın kapalı veya açık olduğunu belirleyen doluluk oranına (duty cycle) göre belirlenir.



Şekil 4.16: Düşürücü tip bir DA/DA dönüştürücü prensip devresi

Böyle bir düşürücü DA/DA dönüştürücü ile beslenen yükte, yakıt hücresi enerji üretirken bataryalar da şarj edilir. Şarj darbeleri süresince, anahtarlama akımı belirlenen sınırdan tutulur. Bu amaçla kullanılan R_e direnci aynı zamanda alçak geçiren süzgeç devresinde de görev yapar. Şekil 4.17' de endüktif şarj devresi de denen düzenek için devre şeması ile sürekli ve süreksiz akımda gerilim-akım değişimleri gösterilmektedir. Paralel kondansatör, L endüktansı tarafından şarj edilir. Transistör ilettiğinde endüktans ve çıkış kondansatörü şarj olur. İletim süresince, endüktans akımı;

$$\Delta I_L = \left[\frac{V_i - V_0}{L} \right] t_{on} \quad (4.7)$$

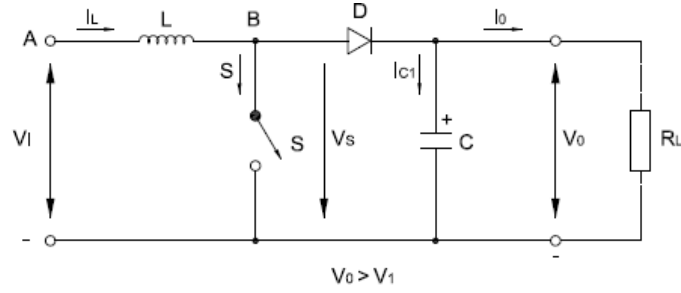
Kadar artar. Burada; L öz endüktans katsayısı [H], $\gamma = t_{on}/T$ doluluk oranını göstermektedir. Transistör kesime girdiğinde, endüktans geriliminin işareti ters yönde oluşarak depolanan magnetik enerji D diyodu üzerinden yüke aktarılır. Bu süre içinde endüktans akımı;

$$\Delta I_L = \left[\frac{V_L}{L} T \right] (-\lambda) \quad (4.8)$$

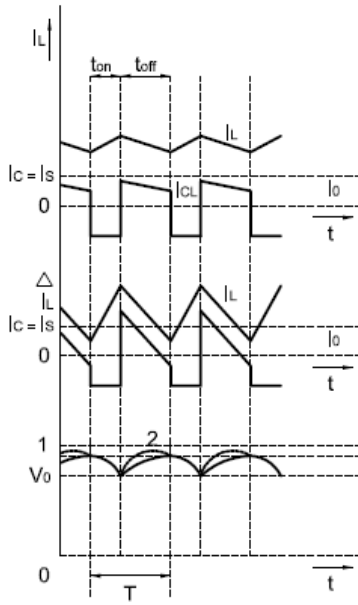
kadar azalır. Çıkış gerilimi ise;

$$V_0 = \lambda \times V_i \quad (4.9)$$

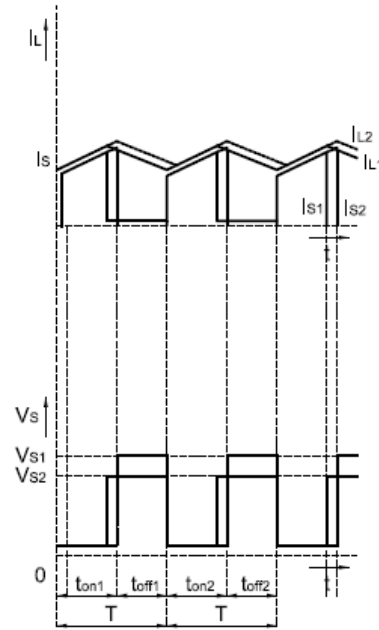
olur. Dönüştürücüde doluluk oranına bağlı olarak farklı çıkış gerilimleri elde edilir. Doluluk oranı 1 den küçük değerlerde çıkış gerilimi giriş değerinden küçük olur. L endüktansı ile C kondansatörü alçak geçiren bir süzgeç devresi gibi davranır. L endüktansı aynı zamanda akım sınırlayıcı tıkaç görevi yapar.



a)



b)



c)

Şekil 4.18: Yükseltici tip DA/DA dönüştürücünün, devre şeması, akım-gerilim değişimleri

Mekanik anahtar yerinde kullanılacak yarıiletken güç anahtarlama elemanı iletime sürüldüğünde, endüktan akımı minimumdan, maksimuma doğrusal olarak ton zamanı boyunca artarak değişir. İletim süresince D diyotu, yükü besleyen kondansatörün deşarjını önler. Anahtar elemanı kesime girdiğinde endüktans akımı, maksimumdan azalarak toff zamanı boyunca minimuma iner. Endüktansta depolanan enerjinin etkisiyle A noktasında B noktasına göre daha büyük bir gerilim oluşmasına neden olur. Dolayısıyla yük üzerinden akım akıtılarak çıkış gerilimi yükseltilir. Yarıiletken anahtar ilettiğinde, giriş geriliminin tümü endüktansa uygulanır.

Endüktansta;

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (4.10)$$

gerilimi endüklenir. Endüktans akımı;

$$i_L = i_{L\min} = \frac{V_i}{L} t \quad (4.11)$$

olur ve $t=t_{on}$ değerinde maksimum değerine ulaşır. Dolayısıyla;

$$i_L = i_{L\min} = \frac{V_i}{L} t_{on} \quad (4.12)$$

olur. Anahtarlama elemanının kesim süresi t_{off} zamanında,

$$V_i - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanabilir. Buradan endüktans akımı,

$$i_L = V_i - \frac{V_0}{L} t + i_{L\min} \quad (4.14)$$

olarak yazılabilir. Akım değeri $t=t_{off}$ değerinde minimuma iner. Dolayısıyla;

$$i_{L\min} = V_i - \frac{V_0}{L} t_{off} + i_{L\max} \quad (4.15)$$

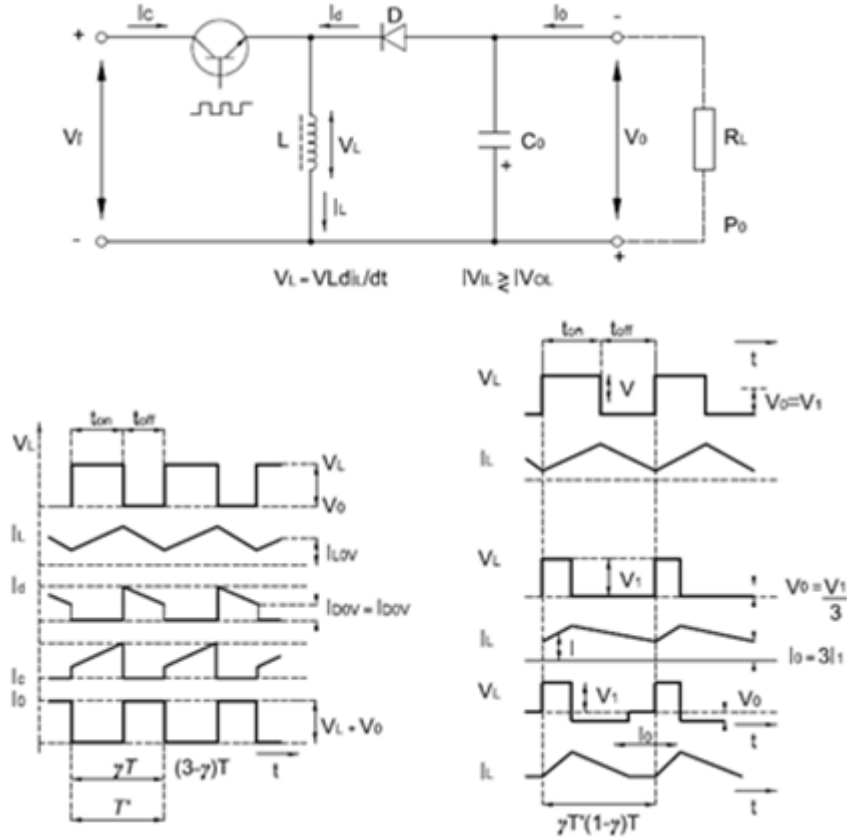
şeklinde tanımlanabilir. Buradan çıkış gerilimi yazılırsa;

$$V_0 = V_i \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) = \frac{V_i}{1 - \lambda} \quad (4.16)$$

şeklinde bir denklem elde edilir. Görüldüğü gibi, sıfırdan farklı doluluk oranlarında çıkış gerilimleri giriş gerilimlerinden daima büyük olacaktır.

4.3.1.8. Ters kutuplayan DA/DA dönüştürücü

Endüstriyel uygulamalarda gereksinim duyulan ters kutuplu gerilimler için tasarlanmış dönüştürücülerdir. Çıkışında girişinden yüksek veya düşük ters kutuplu bir gerilim elde edilen devre şeması Şekil 4.19' da gösterilmektedir.



Şekil 4.19: Ters kutuplayan DA/DA dönüştürücü devre şeması, akım-gerilim değişimleri ve doluluk oranının farklı derleri için akım-gerilim değişimleri

Şekil 4.19' da güç yarıiletken anahtar olarak kullanılan transistör ilettime sürülünce, giriş gerilimini endüktansa uygulanır. Endüktans akımı doğrusal olarak artarak maksimum değerine yükselir. Bu süre boyunca D diyotu kesime kutupludur. Transistör kesime girdiğinde, endüktansta depolanan magnetik enerjinin oluşturduğu gerilim etkisiyle D diyotu ilettime girer. Endüktans enerjisi çıkış kondansatörü ve/veya yüke aktarılır. Bu tip dönüştürücüde, çıkışa aktarılan gücün tümü, endüktansta depolanan enerjiden aktarılır. Dolayısıyla güç seviyesi küçük olacağından, bu tip dönüştürücüler, küçük güç gereksinimi olan uygulamalarda kullanılırlar. Daha çok, yüksek gerilim değerinde düşük güçlü uygulamalarda kullanılırlar. Anahtar kapalı, yani yarıiletken güç elemanı iletimde iken güç aktarımı

gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, geri yansımali (flyback) dönüştürücülere benzerler. Anahtar iletimdeyken endüktans akımı;

$$\Delta I_{L_i} = \frac{V_i}{L} t_{on} = \frac{V_i}{L} \gamma T \quad (4.17)$$

şeklinde artar. Anahtar kesime girdiğinde, D dyotu ilettime geçer ve endüktans akımı kesilmeden,

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_o}{L} t_{off} = \frac{V_o}{L} (1 - \gamma) T \quad (4.18)$$

şeklinde azalarak çıkışa doğru akmaya devam eder. Giriş akımı çıkış akımına eşit olduğunda kalıcı durum oluşur. Dolayısıyla,

$$\frac{V_i}{L} \gamma T = \frac{V_o}{L} (1 - \gamma) T \quad (4.19)$$

eşitliğinden çıkış gerilimi çekilirse,

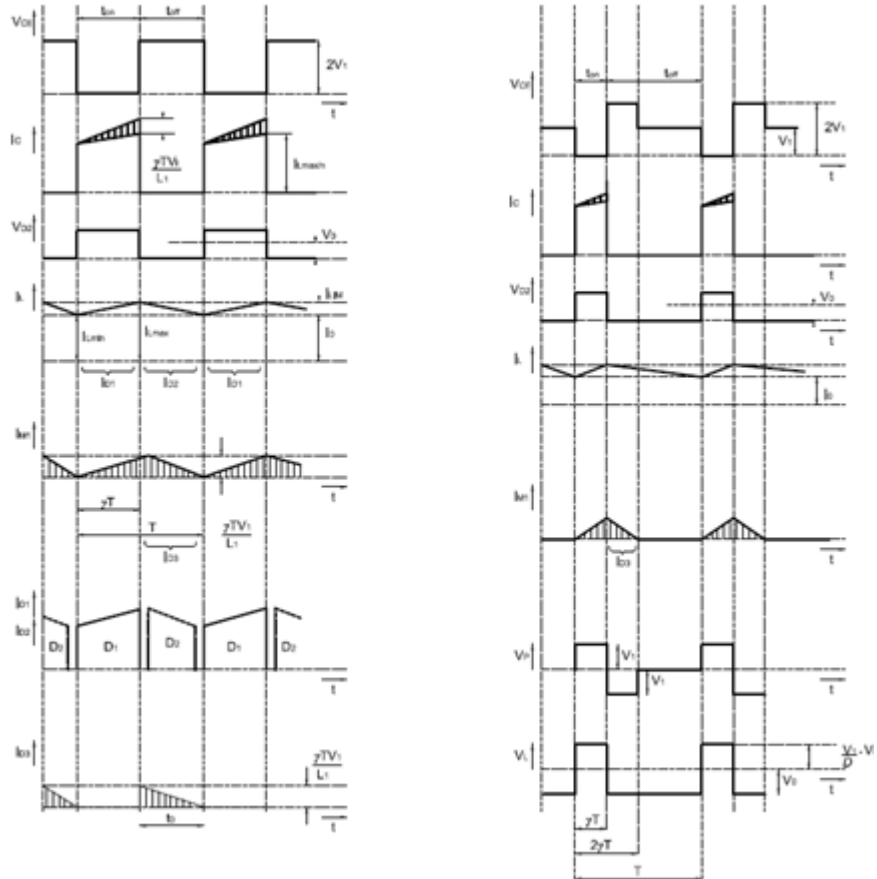
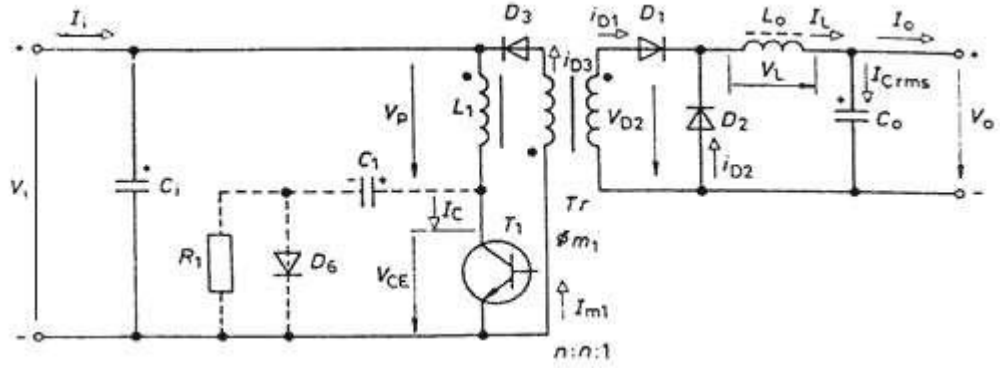
$$V_o = \frac{\gamma V_i}{1 - \gamma} \quad (4.20)$$

denklemleri elde edilir. Görüldüğü gibi, değişken giriş ve doluluk oranına bağlı olarak sabit bir çıkış gerilimi elde edilebilir. Çıkışı girişinden elektriksel olarak yalıtılmış enerji aktarım devreleri ileri (forward), geri yansımali (flyback) ve push-pull olarak tanımlanırlar.

4.3.1.9. İleri DA/DA dönüştürücü

Giriş devresindeki anahtarın iletimi ile çıkışa enerji aktaran devrelere ileri tip DA/DA dönüştürücü denir. Şekil 4.20' de tek anahtarlı ileri enerji aktaran DA/DA dönüştürücü devresi ile akım-gerilim değişimleri gösterilmektedir. Bu dönüştürücülerde yarıiletken güç anahtarını ilettime sürüldüğünde çıkıştaki yük beslenerek enerji aktarımı yapılır. Co kondansatörü, Di diyotu ve Lo endüktansı üzerinden şarj olur. Yarıiletken anahtar kesime girdiğinde, Lo üzerinde depolanan

enerji, D2 serbest geçiş diyodu üzerinden kondansatörü şarj eder. Lo endüktansı enerji depolar ve aynı zamanda Co kondansatörü ile bir LC alçak geçiren süzgeci görevi yapar. İleri tip DA/DA dönüştürücü devresindeki transformator; giriş-çıkış arasında yalıtım sağlamak, giriş gerilimini istenilen değere yükseltmek ve ayrıca ek bir sargı ve D3 diyodu vasıtasıyla depolanan enerjiyi kaynağa geri iletme görevlerini yerine getirir.



Şekil 4.20: İleri enerji aktaran transfer devresi DA/DA dönüştürücü devre şeması, açık ve kapalı konum süreleri konumu için akım-gerilim değişimleri ve anahtarın iletim süresi yarıya indirilmiş durumda akım-gerilim değişimleri

Anahtarın iletim durumunda, L_o endüktans akımı doğrusal olarak;

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{V_0} L_s \quad (4.21)$$

şeklinde değişir. Yarıiletken anahtar kesime girdiğinde L_o endüktansı akımı azalarak;

$$-\frac{di}{dt} = \frac{V_0}{L_s} \quad (4.22)$$

ile değişir. Dönüştürücü çıkış gerilimi;

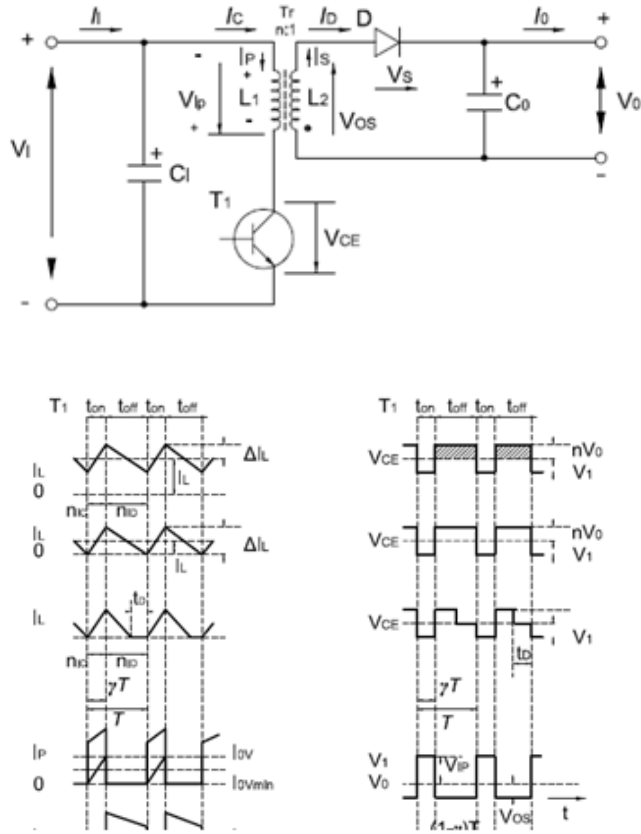
$$\frac{V_s \cdot t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (4.23)$$

olur. Burada; V_s sekonder gerilimini, t_{on} ise T_1 tranzistörünün iletim süresini göstermektedir. Bu ileri güç aktaran dönüştürücüler geri yansımali dönüştürücülere göre; transformatörün endüktans değerinin daha küçük olmasından dolayı bakır kayıpları daha azdır. Dolayısıyla daha küçük boyutlarda transformatör kullanılabilir. Sekonder akımındaki dalgacıklar daha küçük olan dönüştürücülerde çıkış endüktansı ve serbest geçiş diyodu vasıtasıyla akan akım sınırlıdır. Dolayısıyla çıkış kondansatörü küçük seçilebilir. Çıkış akımı dalgacıklarının küçük olması, çıkış gerilim dalgalanmaları sınırlı kalır. Ayrıca primer devredeki yarıiletken anahtar tepe akımı daha küçüktür.

4.3.1.10. Geri yansımali (flyback) DA/DA dönüştürücü

Birçok farklı tip geri yansımali DA/DA dönüştürücü tasarlanmaktadır. Tek anahtar ve evreli bir geri yansımali DA/DA dönüştürücü akım-gerilim değişimleri Şekil 4.21' de verilmiştir. Yarıiletken güç anahtarlama elemanı olan tranzistör iletme

sürüldüğünde, endüktans akımı doğrusal şekilde artar ve diyot ters gerilimle kutuplanır. Depolanan enerji, tranzistör kesime gittiğinde, diyodun ilettime girmesiyle çıkış yükü ve Co kondansatörüne aktarılır. Tranzistör iletimde olduğu sürece, çıkış yükü kondansatör tarafından beslenir. Çıkış geriliminde olası büyük genlikli dalgalıkları engellemek için çıkış kondansatörünün seçimi önemlidir.



Şekil 4.21: Geri yansmalı DA/DA dönüştürücü devre şeması, endüktansın enerjisiz kalmadığı, endüktans enerjisinin sıfıra indiği, endüktansın enerjisiz durumu, primer ve sekonder akımları ve V_o/V_i 'nin değişimleri

Geriyansmalı DA/DA dönüştürücü ile enerji aktarımı yapılırken tek endüktif eleman kullanılır. Dolayısıyla devrenin dinamik davranışlarına olumlu katkı sağlanmış olur. Diğer dönüştürücü devrelerde en az iki endüktif eleman bulunur.

Anahtarın iletimi sırasında primer akımı;

$$V_o = \frac{di_p}{dt} = \frac{V_{cc}}{L_s} \quad (4.24)$$

şeklinde artar.

Anahtar açıldığında sekonder akımı;

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{V_s}{L_s} \quad (4.25)$$

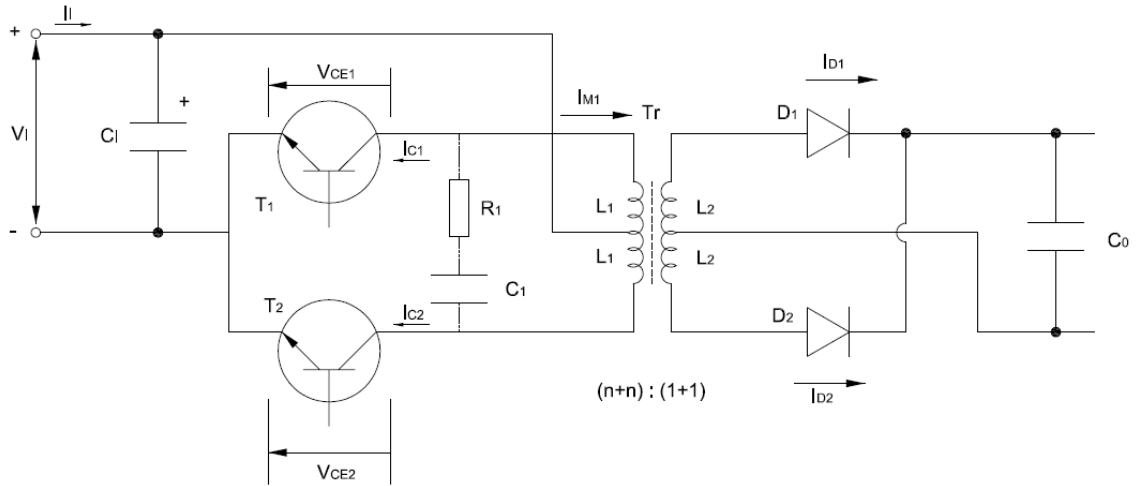
şeklinde değişir. Dönüştürücü çıkış gerilimi ise;

$$V_0 = \frac{V_i \cdot \gamma}{n(1-\gamma)} \quad (4.26)$$

olur.

4.3.1.11. Push-pull tipi DA/DA dönüştürücü

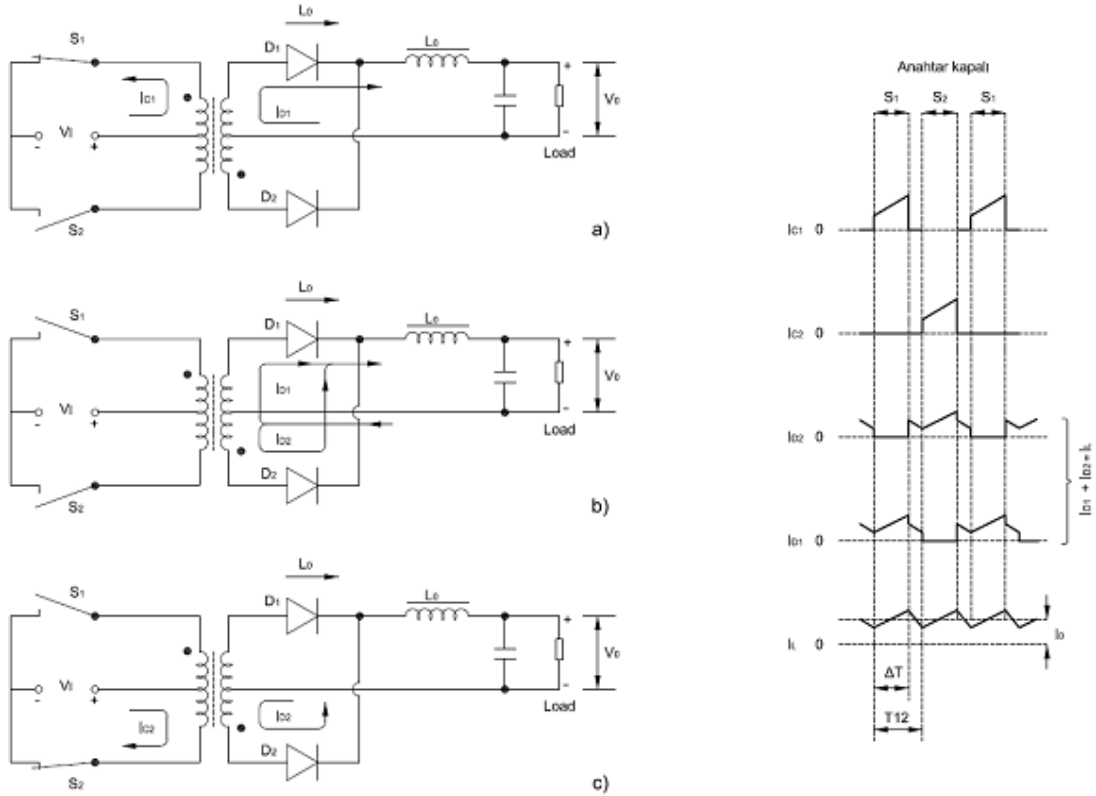
İleri tip DA/DA dönüştürücülerin kombinasyonundan elde edilen bu tip dönüştürücüler, diğerlerinden bazı farklılıklar gösterir. Şekil 4.22' de gösterilen push-pull tipi DA/DA dönüştürücü devresi, iki adet ileri tip DA/DA dönüştürücü devrenin paralel bağlanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.22: Orta uçlu ve iki güç anahtarlı push-pull tipi DA/DA dönüştürücü devresi

T1 ve T2 anahtarlarının farklı zamanlarda iletmesiyle oluşan alternatif gerilimi D1 ve D2 diyotları çıkışa aktarır. Devrenin çalışmasında çıkış geriliminin dalgacık frekansı artar. Tasarlanacak olan bir LC süzgeç devresinde bu dalgacık salınımlar sınırlandırılır, Bu dönüştürücülerde çıkış gerilimi salınımları küçük değerlerdedir.

T1 anahtarı iletime sürüldüğünde, D1 diyodu ileterek L_o endüktansı üzerinden çıkış yüküne ve C_o kondansatörüne enerji aktarılır. T1 anahtarı kesime gittiğinde anahtarlar üzerinden akım akmaz. Endüktans üzerindeki enerji D1 ve D2 diyotlarıyla yüke aktarılır. Diğer yarım peryotta da T2 ve D2 elemanları akım akıtır ve sonra kesime girer. Bu elemanların iletim-kesimi de birinci yarı peryottaki anahtarlama elemanlarının çalışması gibidir. Şekil 4.23' de push-pull tipi dönüştürücünün periyodik çalışma süreleri ve bu sürelerdeki akım-gerilim değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.23: Orta uçlu ve iki güç anahtarlı push-pull tipi DA/DA dönüştürücü devresi
a) S_1 anahtarı kapalıyken T_1 tanzistörü iletimde eşdeğer devre, b) S_1 ve S_2 anahtarlarının her ikisi de açık durumdaki diyotların ilettiği eşdeğer devre c) S_2 anahtarı kapalıyken T_2 tanzistörü iletimde eşdeğer devre ve akımların

Bu tip DA/DA dönüştürücülerde yarıiletken anahtarlar üzerinde giriş geriliminin iki katı kadar bir gerilim uygulanmış olur. Transistörlerin doluluk oranı maksimum % 50 olabilir. Güç kayıpları ihmal edilirse push-pull dönüştürücüde çıkış gerilimi;

$$V_o = V_i \cdot \frac{\gamma}{n} \quad (4.27)$$

olarak tanımlanabilir. Bu dönüştürücü devresinde, primer sargıya yarıiletken anahtarlarla uygulanan pozitif ve negatif darbe süreleri eşit olmalıdır. Aksi halde,

transformatör akı yoğunluğu yavaş artarak transformatörü doyuma götürür. Benzer söylem, sekonder devredeki diyotların dengesiz iletimi için de geçerlidir.

4.4. Eviriciler

Genel anlamda evirici, DA/AA dönüştürücü veya doğru akım kaynağından alternatif akım ile beslenen bir yüke veya bir alternatif akım şebekesine güç aktarımı yapan devredir. DA'dan AA'a dönüşüm yapan bu düzenlere (DC to AC converters, DC/AC converters, Inverters) özellikle DA kaynaktan sürekli beslenmesi gereken yükler, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma, ve frekans ayarı gereken motor denetimi uygulamalarda ihtiyaç duyulur. Girişe akü, yakıt hücresi, güneş veya rüzgar generatörü gibi yenilenebilir bir kaynak uygulanır. Devreler, girişindeki DA gerilimi çıkışında istenen genlik ve frekanstaki AA gerilime dönüştürürler. Çıkış gerilimi sabit veya değişken frekanslı olarak elde edilebilir. Çıkışta değişken bir gerilim elde edilmek istenirse, giriş DA gerilimi değiştirilebilir. Böylece evirici sabiti veya kazancı olarak tanımlanan bir değer oluşur. Girişteki DA gerilim denetlenebilir bir gerilim değil ve değiştirilemiyorsa, çıkış gerilimi, eviricinin kazancının DGA darbe genişlik ayarı (DGA=PWM: Pulse Width Modulation) gibi bir yöntemle değiştirilmesiyle ayarlanarak değiştirilebilir. Evirici kazancı, çıkış AA geriliminin giriş DA gerilimine oranı olarak tanımlanabilir [66].

Normal bir işletme ortamında evirici çıkış geriliminin sinüzoidal olması gerekir. Ancak uygulamada salınım bileşenlerin etkisinden dolayı bu ideal sinüzoidal şekilde bozulmalar oluşur. Küçük ve orta büyüklükteki güçlerin denetiminde, evirici çıkış geriliminin şekli kare dalga veya kare dalgaya benzer bir şekilde olması kabul edilebilir. Büyük güçlerin denetiminde, bu şeklin sinüzoidale yakın olması istenir. Çıkış gerilimindeki salınımlar, hızlı yarıiletkenlerin kullanımıyla yapılacak anahtarlama teknikleriyle, azaltılarak yok edilmeye çalışılır. AA çıkışı anahtarlama işlemleri ile elde edildiğinden, çıkış dalga şekli gerilim parçacıklarından oluşur. Bu parçacıkların anlık değerleri pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Ancak, genelde çıkışın sadece bir adet sıfır olmayan genliği olur [66].

Eviriciler genel anlamda Tek fazlı ve Çok (iki-üç) fazlı eviriciler olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Bu eviriciler de tristör ve tranzistörlü olarak tasarlanmasına göre

ve tristör söndürme tekniği göz önüne alınarak alt guruplara ayrılabilir. Bununla beraber son zamanlarda bunların birkaçına benzeyen ortak özellikli veya çok özel eviriciler de geliştirilmektedir. Giriş ve çıkış gerilim-akım durumlarına göre ise; Giriş gerilimi sabit ise, gerilim beslemeli evirici (GBE=VFI: voltage-fed inverter), Giriş akımı sabit bir kaynaktan sağlanıyor ise, akım beslemeli evirici (ABE=CFI: current-fed inverter), giriş gerilimi denetlenebilir ise, DA hatlı evirici (DAHE=DCLI: dc linked inverter) olarak tanımlanmaktadır. Direnç yüklü tek fazlı bir eviricinin çıkış yük geriliminin etkin değeri;

$$v_Y = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_K^2 dt} = V_K \quad (4.28)$$

şeklinde hesaplanabilir. Yük geriliminin anlık değeri $v_Y=V_K$ Fourier serisine açılırsa, serinin genel terimi;

$$v_{Y(t)} = a_0 + \sum_{n=1,2,\dots}^k [a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t] \quad (4.29)$$

idi. Burada a_0 , a_n ve b_n katsayıları ise,

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_Y(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_Y(\omega t) d(\omega t) \quad (4.30)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T v_Y(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_Y(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.31)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T v_Y(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_Y(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (4.32)$$

Parametrik dönüşümle;

$$\sin \phi = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \text{ den } a_n = \sin \phi_n \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{ve}$$

$$\cos \phi_n = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad \text{den } b_n = \cos \phi_n \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.33)$$

olarak bulunur. Burada;

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad \text{ve} \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.34)$$

olarak tanımlanabilir. Denklem (4.33) deki a_n ve b_n , Denklem (4.34) deki c_n katsayıları, Denklem (4.29) da yerine konarak;

$$a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \underbrace{\left[\sin \phi_n \cos n\omega t + \cos \phi_n \sin n\omega t \right]}_{\sin(n\omega t + \phi_n)} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \sin(n\omega t + \phi_n)$$

denklemini elde edilir. Dolayısıyla Denklem (4.29) daki evirici çıkış veya yük gerilimi;

$$v_{Y(t)} = a_0 + \sum_{n=1,2,\dots}^k c_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.35)$$

olarak tanımlanabilir. Buradaki c_n , çıkış gerilimi v_Y 'nin n 'inci salınımının

büyükliğüne ve ϕ_n ise gecikme açısına bağlı parametrelerdir. Çıkış gerilimi v_Y 'nin yarım periyot simetrisi varsa, tam periyot boyunca entegralli terimler azalır. Yani çıkış gerilimi,

$$v_{Y(\omega t)} = \begin{cases} V_s & 0 \leq \omega t < \pi \\ -V_s & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.36)$$

şeklinde tanımlanırsa, salınımlar tüm katsayılı bileşenleri içermez. Yani çift katsayılı salınım bileşenleri (n=2, 4, 6, 8,...) sıfır olup salınım sadece tek katsayılı (n=1, 3, 5, 7,...) bileşenleri içerir. Bu durumda, (4.30), (4.31), (4.32) ve (4.35) denklemleri; $a_0=0$ ve

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_Y(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_Y(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad n = 1,3,5,\dots \quad (4.37)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v_Y(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_Y(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad n = 1,3,5,\dots \quad (4.38)$$

$$v_{Y(t)} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^k c_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.39)$$

olacaktır. Evirici çıkışı simetrik yarı periyotlardan oluştuğu göz önüne alınırsa yük uygulanan çıkış gerilimi;

$$v_{Y(t)} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^k \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \quad (4.40)$$

$n=2, 4, \dots$ gibi çift sayılar için $v_Y=0$ olur. Yük geriliminin temel bileşeni, $n=1$ için,

Denklem (5.40) tan;

$$v_Y = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0,903 V_s \quad (4.41)$$

olarak bulunur [66]. Direnç-İndüktans Yüklü evirici çıkışına, omik-indüktif bileşenli

bir yük bağlandığında yük akımı çıkış gerilimi gibi aniden değişim göstermez. Buna rağmen, devredeki yükün indüktif özelliğinden dolayı, iY akımı bir süre daha pozitif olarak devam etmek ister. Tranzistörlerden ters yönlü bir akım akmayacağından, anahtar olarak tek başına bir tranzistör kullanılamaz. Ters yöndeki akımı iletebilecek paralel bir diyot kullanılması gerekir. Dolayısıyla gerilimin yönü değişmesine karşın akım bir süre daha devam eder, iY akımının yönü hemen değişmez. Ancak akım yine yük, diyotlar ve VS kaynak gerilimi üzerinden akarak bir miktar daha aynı yönde devam eder. Devrede diyotlar iletince, enerji yükün indüktif bileşeninden kaynağa geri akar. Dolayısıyla bu diyotlara da geri besleme diyotları denir. (veya 90°) iletimde kalırlar. Yük akımı akarken;

$$\pm v_s = R i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (4.42)$$

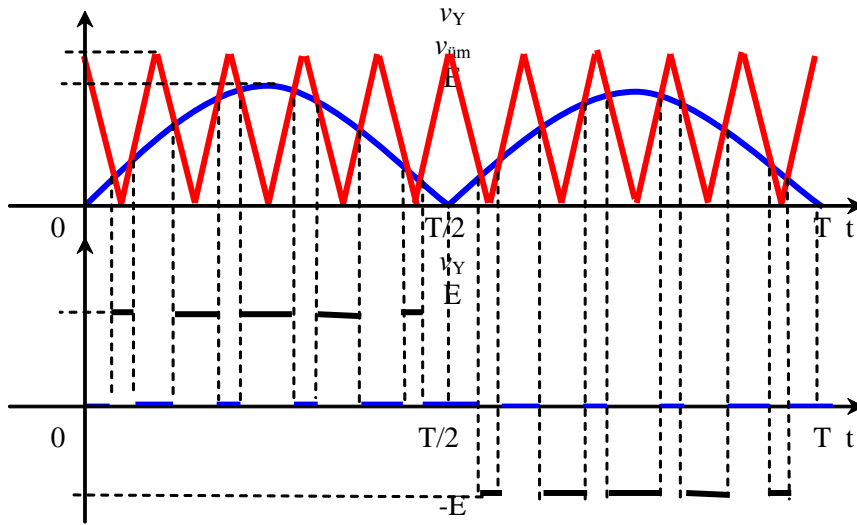
ile tanımlanan bir gerilim denklemi yazılabilir.

Köprü evirici yarıiletken anahtarları tasarlanırken sürücü veya tetikleme devreleri elektriksel olarak kaynaktan yalıtılır. Bunun için magnetik bağlantı gerçekleştiren tetikleme darbe transformatoru veya ışık yalıtım gerçekleştiren ışık ikililer kullanılır. Eviricinin çıkışındaki gerilim, besleyeceği yükün özelliklerine uygun olacak şekilde denetimi yapılır. Evirici devrelerinde, anahtarların açık ve kapalı kalma süreleri değiştirilerek çıkış frekansı denetlenir. Çıkıştaki beslenen yükün özelliğine göre salınımlar oluşur. Dolayısıyla çıkış geriliminin ayarlanması gerekebilir. Çıkış geriliminin genliği, salınım bileşenlerinden bağımsız veya biri birine bağlı olabilir. Ayar yöntemi de buna bağlı olarak farklılık gösterir [66].

Evirici çıkış geriliminin her alternansında anahtarlama sayısı artırılarak salınım denetimi yapılır. Bunun için de her alternanstaki anahtarlama darbesi sayısı artırılmış ve aynı zamanda darbe süreleri denetlenmiş olur. Darbe sürelerinin denetimi darbelerin genişlik denetimi olarak tanımlanır. DGA (PWM) olarak tanımlanan bu işleme, darbe genişlik ayarı (DGA) veya darbe genişlik denetimi (DGD) de denir. DGA yapılırken, her yarı periyottaki darbeler, periyodun ortasına simetrik olarak gerçekleştirilir. DGA gerçekleştirilirken, fonksiyonun Fourier

açılımında çift sayılı salınımlar bulunmaz. Yani kosinüslü tüm terimlerin katsayıları sıfır olur [66].

DGA ile yapılan denetimde, evirici çıkışındaki alternatif geriliminin genliği denetlenebilir. Aynı zamanda çıkıştaki bir veya daha fazla salınım bileşenlerinin büyüklüğü azaltılmış olur. Bunun için kullanılan denetim yöntemlerinden biri, her yarı periyotta eşit sayıda ve aynı genişliğe sahip darbeler üretmektir. Bazı eviricilerde, 9. ve 11. salınımların değerleri bile, temel dalganın genliğine oranla oldukça büyük olabilir. Bu büyük genlikli salınım bileşenleri, yarım periyottaki 5 darbe ile sıfırlanamazsa, süzme yapılmadığında, yarım periyottaki darbe sayısının artırılması gerekir. Böylece anahtarlama sonucu oluşan yüksek dereceli salınımlar süzülerek yok edilebilir [66].

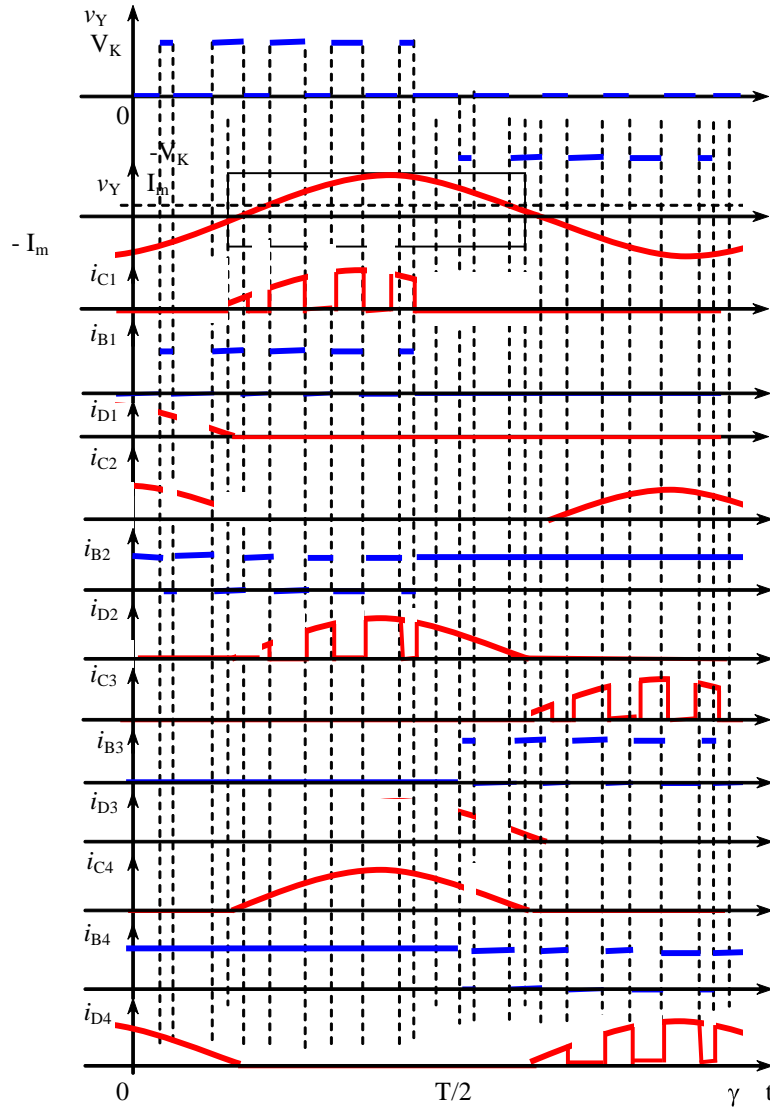


Şekil 4.24: Sinüsoidal DGA için evirici çıkışında kullanılan üçgen ve sinüs eğrileri.

DGA ile anahtarlama yapılırken, analog ve sayısal yöntemlerinin her ikisi de kullanılabilir. Bir analog işlem, istenilen frekansın sinüs seviyesini ve istenilen genliği üretmekle birlikte, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi, $2k$ frekanslı evirici çıkışında kullanılan üçgen bir dalga üretmede de kullanılabilir [66].

Sinüsoidal DGA ile anahtarlama, üçgen dalganın negatif eğimi ile sinüs dalgasının kesiştiği yerde darbe başlar. Üçgen dalganın pozitif eğimi ile sinüs dalgasının

kesiştği yerde biter. Her darbenin uzunluğu, Şekil 4.24’de görüldüğü gibi, sinüs dalgasının genliğine bağlıdır. Denetim devresiyle, sinüzoidal sinyalin her yarım alternansı sonunda çıkış geriliminin kutuplaması değiştirilir. Bu DGA ile anahtarlama, Şekil 4.25’de görülen çıkış şeklini elde etmek için, her anahtar uygun zamanlamalı olarak açılıp kapanması gerekir [66].



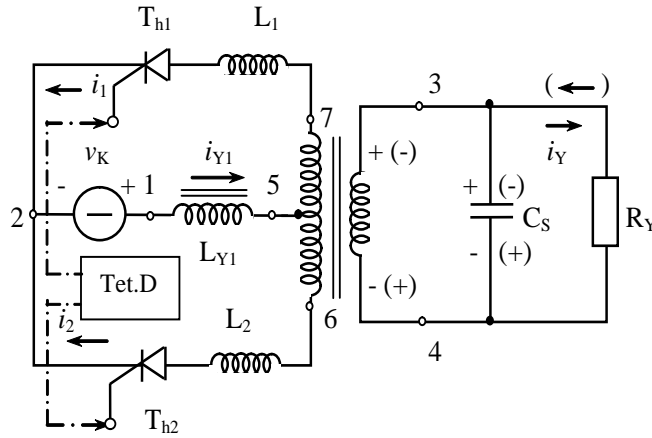
Şekil 4.25: Dört tranzistörlü köprü evirici çıkış sinyalleri değişimleri

Şekil 4.25’de, tranzistör kollektör akımları, diyot akımları ve denetim için gerekli tranzistör beyz akımlarının çıkış şekilleri gösterilen eviricide, DGA ile denetim yapılırken, her yarım periyottaki beş adet darbe ve ayrıca DGA ile denetlenen çıkış şeklini göstermektedir. Şekilde çıkış akımı yaklaşık sinüzoidal olarak gösterilmiştir. Oysa gerçek akım, yüksek dereceli salınım bileşenleri içerir. Şekil 4.23’de aynı zamanda, tranzistörün kollektör akımları, diyot akımları ve gereken tranzistör beyz

akımları görülmektedir. Herhangi bir andaki yük akımının yönü bilinmediğinden, paralel diyot iletimi sağlayabildiği halde, istenilen aralıklarda beyz akımları devam ettirilir [66].

Tristörlerin kullanıldığı tek fazlı eviricilerin prensip devresi, R_Y , L_Y , C_Y bileşenlerinden oluşan bir yükü beslerken, Şekil 4.26'da gösterildiği gibi, iki anahtarla tasarlanabilir. Peryodik olarak çalışan devrede, yarım periyot boyunca T_{h1} , diğer yarım periyot boyunca ise T_{h2} tristörü iletimdedir. Devredeki C_S ve L_S elemanları akım ve gerilimin ani değişimlerini önlemek üzere konmuş yardımcı elemanlardır. Çıkıştaki R_Y yüküne paralel bağlı olan C_Y kondansatörünün akımı $+i_Y$ den $-i_Y$ değerine kadar değişir. Kondansatör gerilimi ise $2v_Y$ değerinde olacağından, bu sınırlara dayanabilecek değerlerde seçilir [66].

Tristörlerle birlikte orta uçlu tek fazlı bir transformator kullanılarak DA gerilimin evirilmesinde daha düzgün bir AA gerilim sağlanması ve tristörlerin kolayca kesime girmesine yardımcı olur [66].

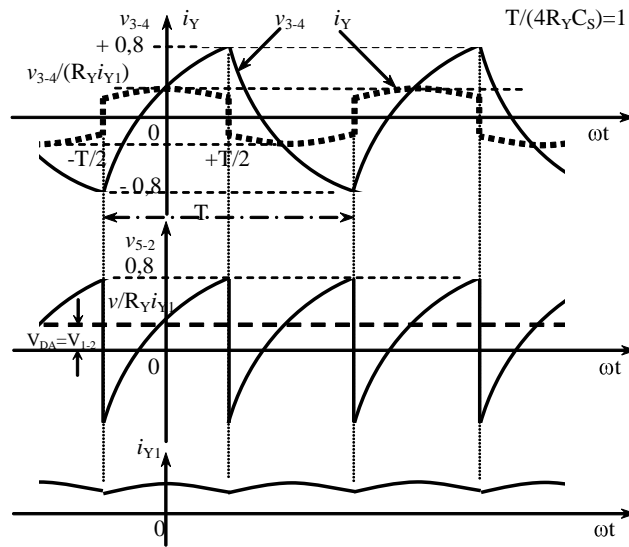


Şekil 4.26: İki tristörlü tek fazlı evirici devresi

Dönüştürme oranı 1:1 olan transformator çıkışında yüke paralel bağlanmış kondansatör, yük gerilimine dayanıklı olup çıkış sinyali değişimlerinde görev yapar. T_{h1} tristörü iletime girince v_K kaynak geriliminden L_{Y1} bobini ve transformator primerinin üst yarısı 5-7 arasından, L_1 üzerinden $i_1=i_{Y1}$ akımı akarak sekonder devre çıkışında bir pozitif gerilim oluşturur. Bu gerilim yükten bir i_Y akımı akmasına ve C_S kondansatörünü kutuplu olarak dolmasını sağlar. Yüke pozitif bir gerilim uygulanmış olan bu yarı periyot boyunca T_{h2} tristörü kesimde olur. Diğer tristör üzerinden bir akım akarak alternatif akımın pozitif yarı periyodunu oluşturur [66].

Yarı peryot sonunda T_{h2} tristörü tetiklenerek i_{Y1} akımı L_{Y1} bobini, 5-6 arasından transformator primerinin alt yarısı 5-7 arasından, L_2 üzerinden akar. $i_2=i_{Y1}$ akımı akmasıyla sekonder devre çıkışında bir negatif gerilim oluşturur. Ancak sekonderde T_{h1} tristörünün akıttığı akımın oluşturduğu pozitif gerilimin etkisi, oluşan bu gerilim ile yok edileceğinden kutuplu olan kondansatör bu devreden ani olarak boşalmak ister. Transformatorun birincil devresinde oluşan ve T_{h1} tristörünü kesime zorlayacak ters bir gerilim oluşturarak T_{h1} tristörünü kesime zorlayacağından bu tristör kesimde kalır [66].

Bu nedenle, böyle yük tarafının etkisiyle kesimi gerçekleştirilen eviricilere yük denetimli eviriciler denir. Akacak ters akımın etkisiyle kondansatör ilk konumun tersi kutuplu olarak dolmaya başlayacağından ilk kutuplu konum gerilimi önce sıfıra ve daha sonra parantez içinde gösterilen kutuplama yönünde dolmaya başlayarak negatif yarı peryodun sonu olan T_{h1} tristörünün tekrar ilettime girmesine kadar dolacaktır [66].



Şekil 4.27: Şekil 4.26'da gösterilen devre için akım ve gerilimlerin değişimi ($T/(4R_Y C_S)=1$ için) [66]

Benzer şekilde yarı peryot süre sonunda tekrar T_{h1} tristörü tetikleneceğinden bu kez başlangıçtaki gibi, birincil akım L_{Y1} bobini ve transformator primerinin üst yarısı 5-7 arasından, L_1 üzerinden $i_1=i_{Y1}$ akımı olarak akar. Sekonder devre çıkışında bir pozitif gerilim oluşturur. Bu gerilim yükten yine bir i_Y akımı akmasına ve C_S

kondansatörünün, başlangıçtaki gibi kutuplu olarak, dolmasını sağlar. Yüke ikinci bir pozitif gerilim uygulanmış olan bu yarı peryot boyunca yine T_{h2} tristörü kesimde kalır. C_S kondansatörü, yük direnciyle paralel bağlandığı için, çıkış yük gerilimi de, Şekil 4.27’de gösterildiği gibi, kondansatör gerilimi ile benzer şekilde değişir [66]. Kondansatör üzerindeki gerilim, AA ile beslenen yük gerilimi olan v_{3-4} gerilimi;

$$v_{3-4} = R_Y \cdot I_Y + K e^{-\frac{t}{R_Y \cdot C_S}} \quad (4.43)$$

ile aynı olur. Şekil 4.25’ten görüldüğü gibi $t=+T/2$ anındaki değeri ile $t=-T/2$ anındaki değerleri biri birine eşit fakat ters işaretlidir. Bu eşitlik kullanılarak,

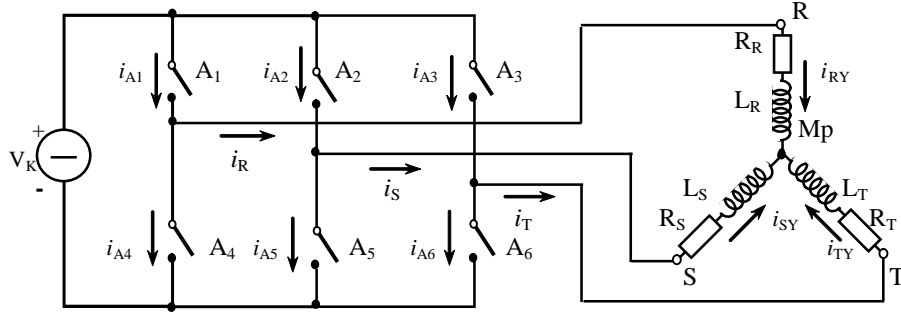
$$\left(\frac{v_{3-4}}{V_{DA}/a} \right)_{maks} = \frac{1 - \frac{1}{\cosh 2} \cdot e^{-2}}{1 - 0,5 \cdot \tanh 2} \Rightarrow v_{3-4maks} = 1,86 \frac{V_{DA}}{a} \quad (4.44)$$

den serbest kalma zamanı;

$$t_F = \frac{T}{4} \left[1 + \frac{4R_Y C_S}{T} \cdot \ln \left(\frac{1}{\cosh(T/4R_Y C_S)} \right) \right] \quad (4.45)$$

şeklinde elde edilir [66]. Üç fazlı evirici, her fazı için tek fazlı köprü tipi bir evirici kullanılan devredir. Eviricide kullanılan altı adet anahtar ile istenilen çıkış dalga şeklini elde etmek için periyodik olarak açılıp-kapatılır. Anahtarlamaların şekil ve süreleri ile orantılı olarak, evirici çıkış frekans, gerilim ve salınımler denetimi yapılabilir. Şekil 4.20’deki üç fazlı evirici devresi, gerilim kaynaklı evirici olarak tanımlanır. İdeal bir doğrultucunun çıkışında kullanılacak bir kondansatör, çıkışın süzgeçlenmesi amacıyla kullanılır. Akım kaynağı kullanılan evirici de tasarlanan diğer bir devredir. Bu tip eviricilerde, gerilim kaynağı yerinde bir akım kaynağı olarak tanımlanabilen büyük değerli bir bobin ile seri bağlı denetimli bir

doğrultucudur. Bu seri bağlı bobin, evirme işlemi sırasında akımı sabit tutar. Şekil 4.28’de, üç fazlı bir evirici devresi gösterilmiştir [66].



Şekil 4.28: Üç fazlı evirici prensip devresi

Evirici çıkış denetiminde, çıkış dalgasının 180° 'si (yarım periyodu) için anahtarlar kapalı, geriye kalan 180° (diğer yarım periyodunda) boyunca açık kalarak evirme yapılabilir. Aralarında 120° faz farkı bulunan üç fazlı bir çıkış elde etmek için, A_1 - A_6 arasındaki anahtarlar uygun sırayla periyodik olarak kapatılıp açılır. A_2 , A_1 'den 120° sonra kapatılır. Benzer şekilde A_3 de A_2 'den 120° sonra ve A_4 , A_1 'den 180° sonra kapatılır. A_2 ve A_3 ' den 180° sonra sırasıyla A_5 ve A_6 kapatılır. Anahtarlama işlemi her 60° 'de bir gerçekleştirilmiş olur. Evirici çıkışı, altı adımlı olarak, Tablo 4.2'de gösterilmektedir [66].

Tablo 4.2: Üç fazlı eviricide anahtarlama aralık ve adları

Bir periyot boyunca Anahtarlama aralığı [$^\circ$]	Kapalı anahtarlar (A)
0-60	1-3-5
60-120	1-5-6
120-180	1-2-6
180-240	2-4-6
240-300	2-3-4
300-360	3-4-5

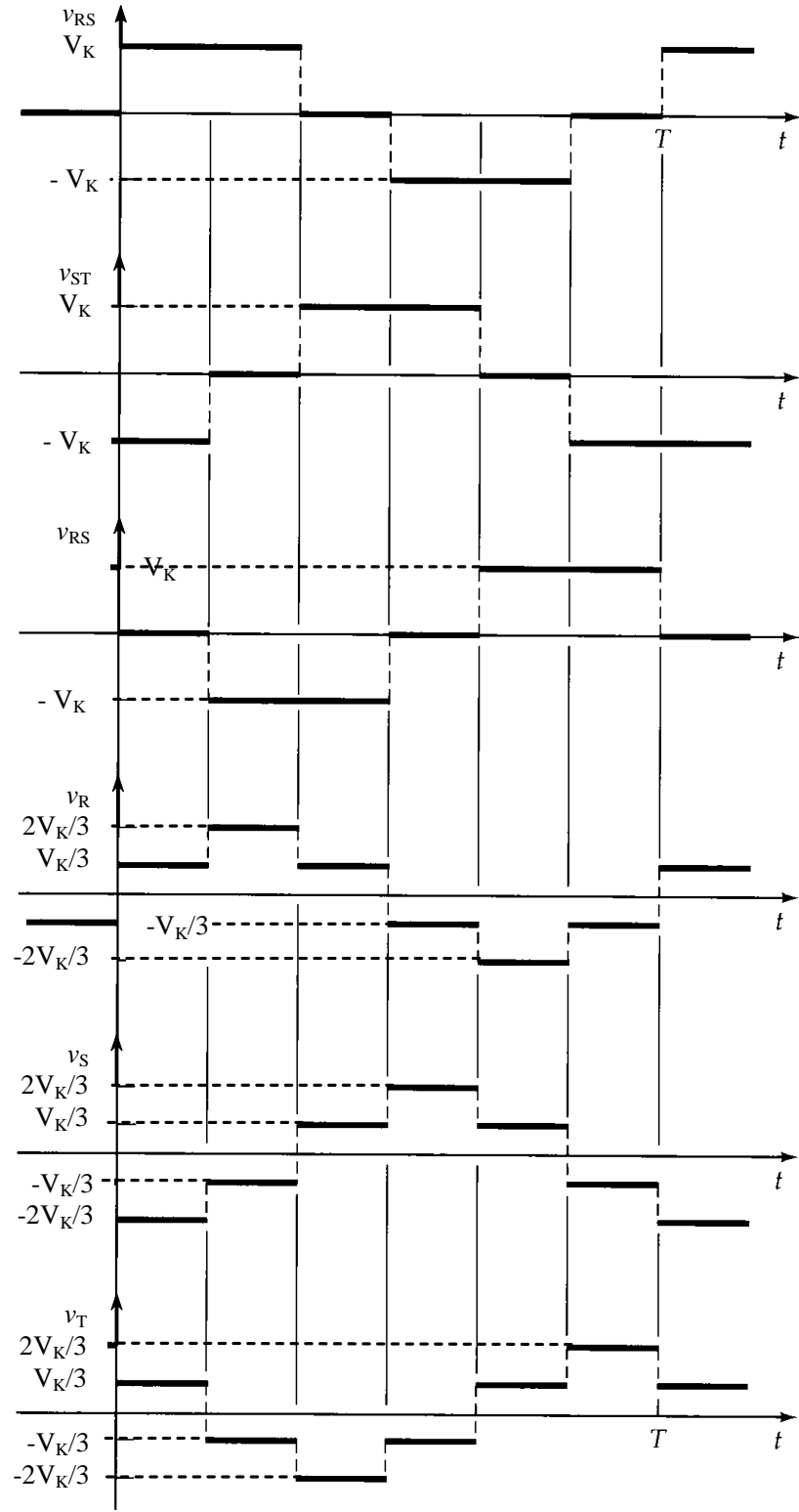
Üç fazlı eviricide, yükün dengeli, yıldız bağlı ve faz başına $R \ \Omega$ değerinde üç fazlı omik bir yük olduğu göz önüne alınırsa, anahtarlama sırasında, yük uçlarındaki gerilim değerleri, Tablo 4.3'de gösterilmektedir [66].

Yıldız bağlı yükün orta noktası (M_p , middle pole: orta kutup) ile fazlar arasındaki gerilimin yarı peryodunda altı anahtarlama gerçekleşir. Omik yüklü eviricide yük akımı, faz-orta kutup gerilimi gibi değişir. Evirici kullanılan AA yükler, genelde omik-indüktif özellikli olduğundan, yük akımı, faz-orta kutup geriliminden farklıdır [66].

Tablo 4.3: Üç fazlı eviricide anahtarlama aralıklarında yük gerilimi değerleri

Gerilimler [V]	Aralıklar [°]					
	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300	300-360
v_R	$V_K/3$	$2V_K/3$	$V_K/3$	$-V_K/3$	$-2V_K/3$	$-V_K/3$
v_S	$-2V_K/3$	$-V_K/3$	$V_K/3$	$2V_K/3$	$V_K/3$	$-V_K/3$
v_T	$V_K/3$	$-V_K/3$	$-2V_K/3$	$-V_K/3$	$V_K/3$	$2V_K/3$
v_{RS}	V_K	V_K	0	$-V_K$	$-V_K$	0
v_{ST}	$-V_K$	0	V_K	V_K	0	$-V_K$
v_{TR}	0	$-V_K$	$-V_K$	0	V_K	V_K

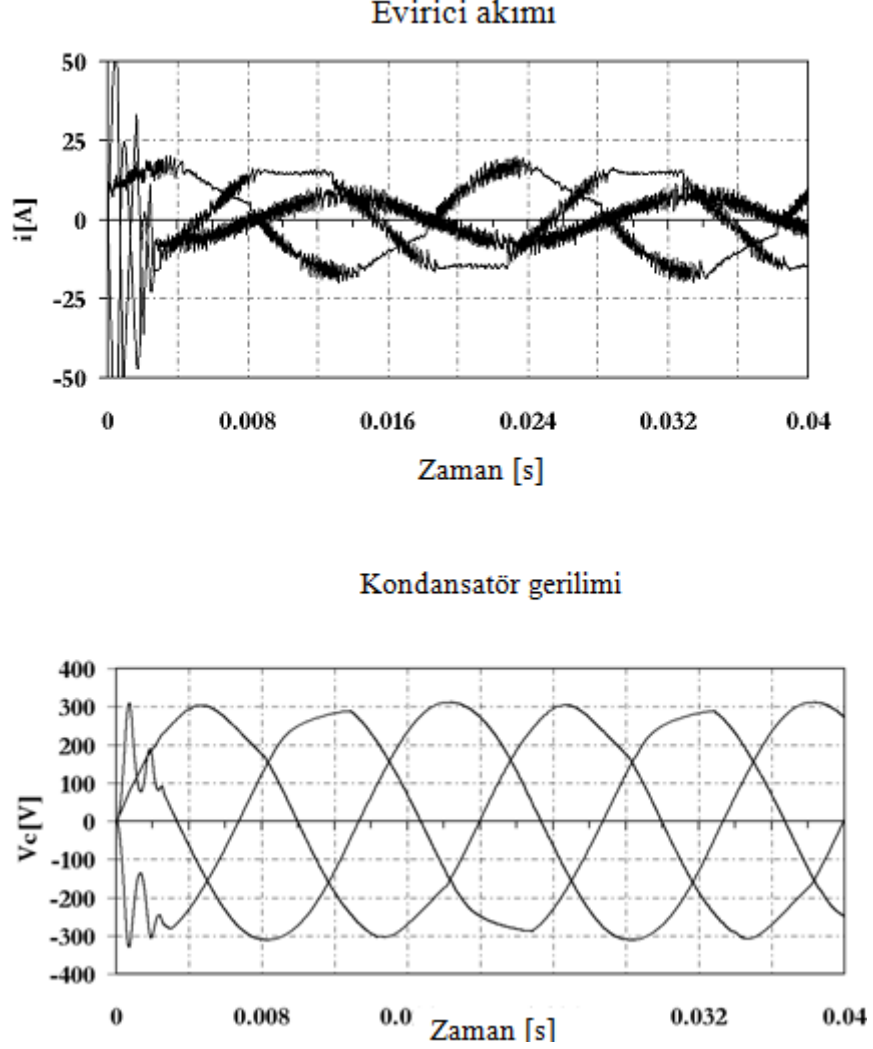
Eviricide, 0° - 60° aralığında, i_R önce negatif olup zamanla pozitif bir değer alır. Bu aralıkta A_1 anahtarı kapalıdır. Anahtarlar genelde iki yönlü akım akıtabilir özelliktedir. Bunun için bu anahtarlar için kullanılacak tranzistör veya tristör güç yarıiletken elemanlarına, bir pn-eklem diyodu ters-paralel bağlanır. Güç yarıiletken elemanları akımın pozitif kısmını, ters bağlanmış diyot ise negatif kısmını akıtır. Evirme sırasında, 180° - 360° aralığında ise, güç yarıiletken elemanları negatif kısmı ve diyot ise i_R akımının pozitif kısmını taşır. Anahtarlar üzerindeki gerilimler, Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Anahtarlamanın ardından çok kısa bir süre i_R akımı sabit kabul edilebilir. Anahtarlama işlemi; SCR, MOSFET, IGBT, MCT gibi yarıiletkenler de kullanılarak yapılabilir [66].



Şekil 4.29:Üç fazlı altı darbeleri evirici çıkış gerilimlerinin değişimi

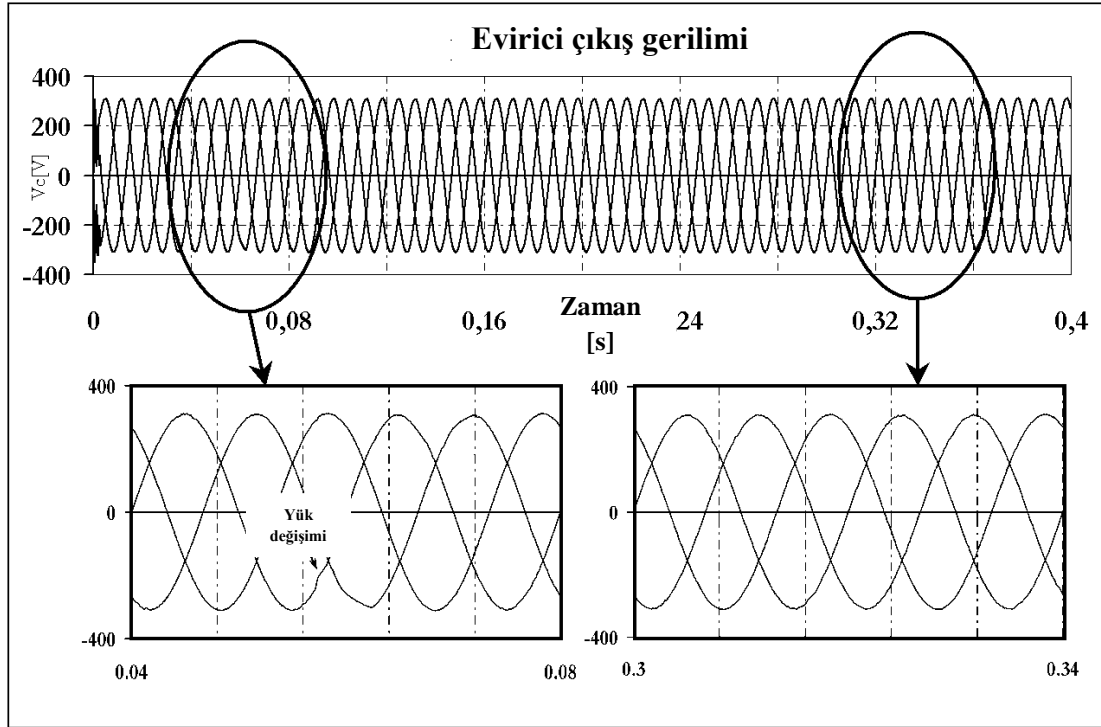
Üç fazlı eviricilerin denetiminde darbe genişlik ayar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşzamansız olarak sabit veya değişken bir DA kaynağından üç veya tek fazlı yüklerin beslenmesi sırasında çıkışa LC elemanlı bir süzgeç de

kullanılarak tasarlanır. Bazen arada kullanılan bir kondansatör DA kaynaktan yüke güç aktarımında aracılık yapmak üzere kullanılır. Denetim devresinin matematiksel modeli çıkartılarak bir denetim şekli seçilir [66].



Şekil 4.30: Denetimsiz DA gerilimi uygulanan eviricide dengesiz yüklemde evirici akımı ve kondansatör geriliminin değişimleri. ($R_{YR}=R_{YS}=20\Omega$, $R_{YT}=2000\Omega$)

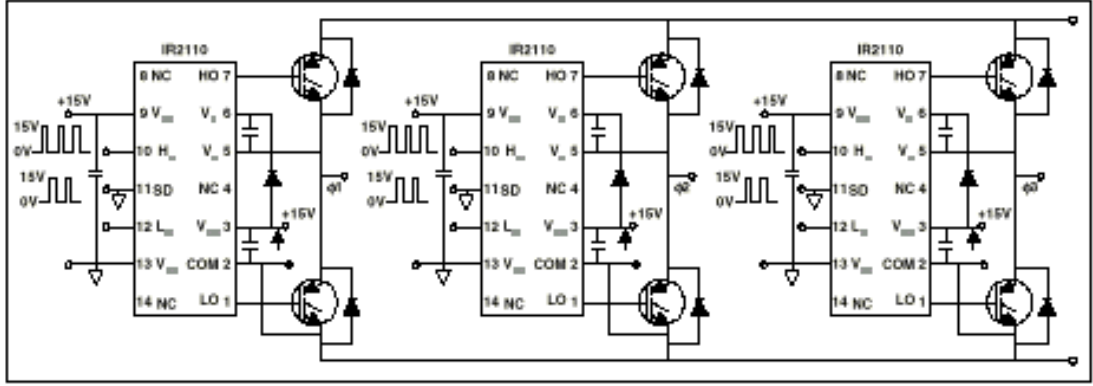
Elektrik enerjisi genelde AA olarak üretilir. Güneş pilleri v.b. gibi, bazı yeni ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen DA enerji ya doğrudan kullanıma sunulur veya AA enerji şekline dönüştürülür. Bu dönüşüm işlemi evirici devrelerle yapılır. Çıkış geriliminin düzgün olabilmesi açısından çıkışa LC süzgeci konur. Bu tip eviriciler gerilim ara devreli olarak tasarlanır [66].



Şekil 4.31: Giriş DA gerilimi denetlenen eviricinin dengesiz yük çıkış kondansatör gerilimi değişimi

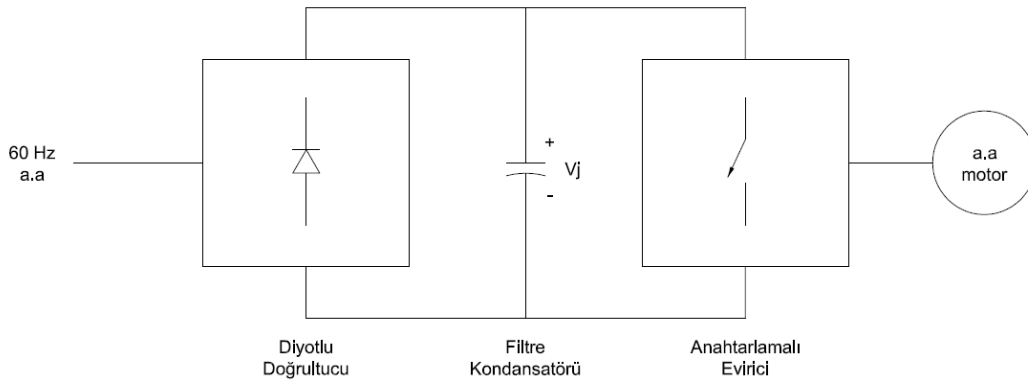
Şekil 4.30'da denetimsiz DA gerilimi uygulanan eviricinin dengesiz yüklenmesi konumunda benzetişiminin sonuçları gösterilmektedir. Dengesiz yüklenmiş eviricinin denetim sinyali, DGA ayarlayıcısının doğrusal bölgesinin dışına çıktığında evirici akımında salınımlar olur. Bunun sonucunda çıkıştaki süzgeç kondansatörünün geriliminde bozulma olur. Bu bozulmayı önlemek için giriş DA gerilimi denetlenir. Şekil 4.31'de DA denetimli eviricide kondansatör geriliminin benzetimi gösterilmiştir. Yükün $R_{YR}=R_{YS}=60\Omega$, $R_{YT}=2000\Omega$ değerinden $R_{YR}=R_{YS}=20\Omega$, $R_{YT}=2000\Omega$ değerine değişmesi durumunda, sol alta okla gösterilen noktada, kondansatör gerilimindeki değişimi göstermektedir [66].

Giriş DA geriliminin denetlenmesiyle, çıkış gerilimindeki bozulmalar çok çabuk düzeltilebilir. Böyle bir denetim sonucu elde edilen çıkış gerilimi Şekil 4.26'da sağ tarafta gösterilmiştir. Şekil 4.32'de tümdevrelerle sürülen IGBT ile tasarlanmış örnek bir üç fazlı evirici devresi gösterilmiştir [66].



Şekil 4.32: Üç fazlı eviricinin tüm devrelerle sürülmüş IGBT'li örnek devresi

Değişken gerilim ve frekansa gereksinim duyulan endüstriyel uygulamaların olduğu farklı alanlarda eviriciler kullanılmaktadır. Anahtarlamalı ve/veya kesintisiz güç kaynaklarından asenkron ve diğer motorların kontrolüne kafar birçok uygulamada eviriciler yoğun olarak kullanılmaktadır. Evirici kullanımında temel amaç, genliği ve frekansı kontrol edilebilen bir gerilim üretmektir. Şekil 4.33' de bir AA akım motor tahrik sistemini kontrol etmek için kullanılan evirici devresinin prensibi gösterilmektedir. Sistemde alternatif şebeke gerilimi önce doğrultularak bir doğru gerilim elde edilmektedir. Sonra bu DA gerilim bir evirici devre yardımıyla değişken frekansta başka bir alternatif gerilime dönüştürülmektedir. Doğrultma genelde kontrolsüz bir doğrultucu ile yapılmaktadır. Değişken gerilim istendiğinde, denetimli doğrultucu veya DA/DA dönüştürücülerle evirici girişine değişken genlikli DA gerilimi sağlanır.



Şekil 4.33: AA motor denetiminde kullanılan evirici prensibi devresi

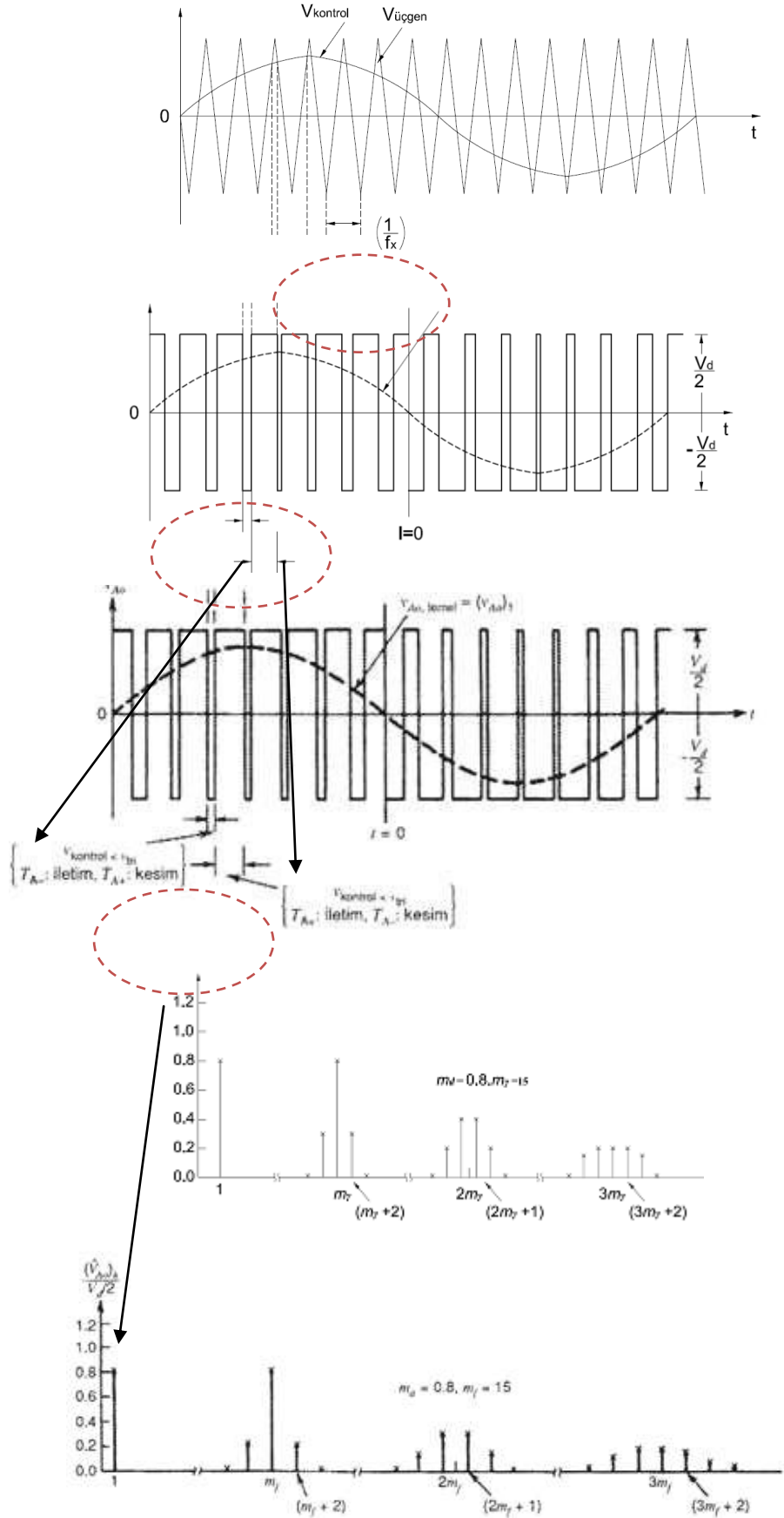
Uygulamalarda genelde Şekil 4.33'de gösterilen evirici, enerjinin her iki yöne de aktarılabilirdiği bir dönüştürücü olarak tasarlanır. Elektrik enerjisi, DA tarafından AA motor tarafına doğru aktarılırken evirici görev yapar.

Darbe genişlik ayarı (DGA: Pulse Width Modulation-PWM) yöntemi ile denetlenen eviricilerin girişindeki doğru gerilim yaklaşık sabit alınır. Çünkü bu gerilim şebeke geriliminin kontrolsüz bir doğrultucu tarafından doğrultulmasıyla sağlanır. Bu nedenle evirici ile çıkış geriliminin hem frekansı hem de genliği ayarlanır. Ayarlama DGA ile yapıldığından bu tür eviricilere DGA-PWM evirici de denir. Çıkış geriliminin dalga biçimi sinüse yaklaştırılır. Bu amaca yönelik birçok PWM yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan biri de sinüzoidal PWM dir. Sabit veya zamanla çok yavaş değişen bir kontrol işareti $v_{kontrol}$, anahtarlama frekansındaki bir üçgen dalga ile karşılaştırılarak iki dalganın kesiştiği noktalarda anahtarlama işaretleri üretilir. Böylece anahtarların çalışma oranları ayarlanır. Eviricinin çıkışındaki AA dalgasının hem genlik ve frekansının ayarlanması hem de dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, eviricilerde PWM uygulaması biraz daha zordur. İstenen frekansta bir sinüzoidal dalga elde etmek için, aynı frekansta sinüzoidal bir kontrol işareti daha yüksek frekanslı bir üçgen dalga ile karşılaştırılır. Genliği V_{tri} olan üçgen dalganın frekansı genellikle sabit tutulur ve bu frekans eviricinin anahtarlama frekansını oluşturur.

PWM kontrolünde taşıyıcı dalga $v_{üçgen}$ üçgen dalgasının frekansı f_s aynı zamanda eviricinin anahtarlama frekansıdır. Bu frekansa taşıyıcı frekansı da denir. Kontrol dalgası $v_{kontrol}$ ise anahtarların çalışma oranının ve eviricinin çıkış dalgasının frekansı olan f_1 'i belirler, f_1 ise modülasyon frekansı olarak tanımlanır. Ne kadar başarılı bir PWM uygulanırsa uygulansın bir eviricinin çıkış gerilimi ideal bir sinüs oluşmaz. Asıl dalga ile birlikte frekansı f_1 ile orantılı harmonikler bulunur. Modülasyon genliği olarak tanımlanan m_a oranı;

$$m_a = \frac{V_{kontrol}}{V_{üçgen}} \quad (4.46)$$

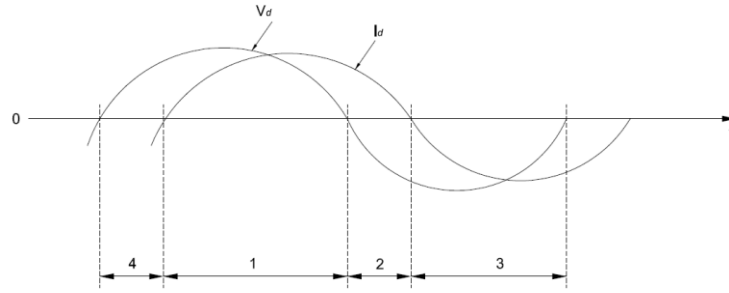
olarak tanımlanır. Burada $V_{kontrol}$ kontrol işaretinin genliğini, $V_{üçgen}$ ise değeri genellikle sabit tutulan üçgen dalganın genliğini göstermektedir.



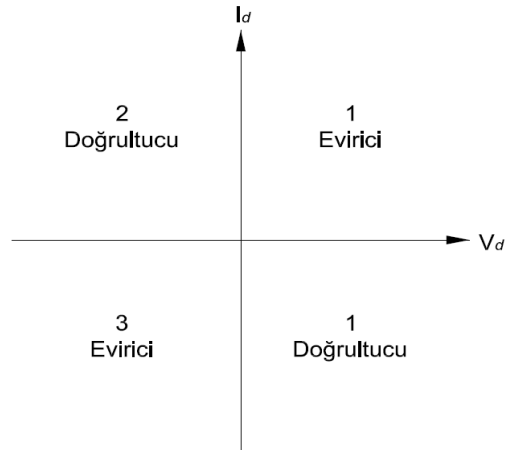
Şekil 4.34: DGA-PWM taşıyıcı ve referans sinyallerinin değişimi b) anahtarlama ile üretilen sinüs dalgası, c) harmonik bileşenlerinin görünümü



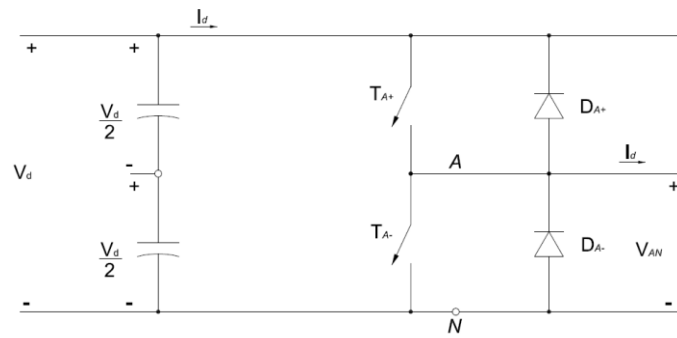
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.35: Anahtarlama eviricinin a)evirici ve filtre prensibi, b)akım ve gerilimlerin değişimi, c)dönüştürücünün çalışma bölgeleri, d)evirici devrenin bir kolu

Frekans modülasyonu oranı;

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (4.47)$$

olarak tanımlanır. Şekil 4.35' de gösterilen eviricideki $TA+$ ve $TA-$ anahtarları, $v_{kontrol}$ ve $V_{üçgen}$ sinyallerinin karşılaştırılmasına uygun olarak iletme sürülür. Akım yönünden bağımsız olan çıkış gerilim değerleri;

$$V_{kontrol} > V_{üçgen}, TA+ \text{ iletimde iken, } v_{A_0} = \frac{1}{2} V_d \quad (4.48)$$

veya,

$$V_{kontrol} < V_{üçgen}, TA- \text{ iletimde iken, } v_{A_0} = -\frac{1}{2} V_d \quad (4.49)$$

olur. Her iki anahtar aynı anda kesim konumunda bulunmadığı için, v_{A_0} çıkış gerilimi, $+(1/2)V_d$ ile $-(1/2)V_d$ değerleri arasında değişir. v_{A_0} geriliminin, $m_f=15$ ve $m_a=0,8$ değerleri için çizilen dalga şekli ve bunun noktalı çizgi ile gösterilen temel bileşeni Şekil 4.35' de gösterilmiştir. Şekil 4.34' de gösterilen koşullar için hesaplanan birime indirgenmiş harmonik spektrumu Şekil 4.34' de gösterilmiştir. Birime indirgenme işlevi $(V_{A_0})_1 / (1/2)V_d$ ile sağlanmıştır. $f_1 = \omega_1 / 2\pi$ frekansındaki bir kontrol gerilimi için;

$$v_{kontrol} = V_{kontrol} \cdot \sin \omega_1 t$$

olup burada,

$$V_{kontrol} \leq V_{üçgen} \quad (4.50)$$

olur. Görüldüğü gibi, v_{A_0} gerilimin temel bileşeni olan $(v_{A_0})_1$, sinüzoidal ve $v_{kontrol}$ ile aynı fazdadır.

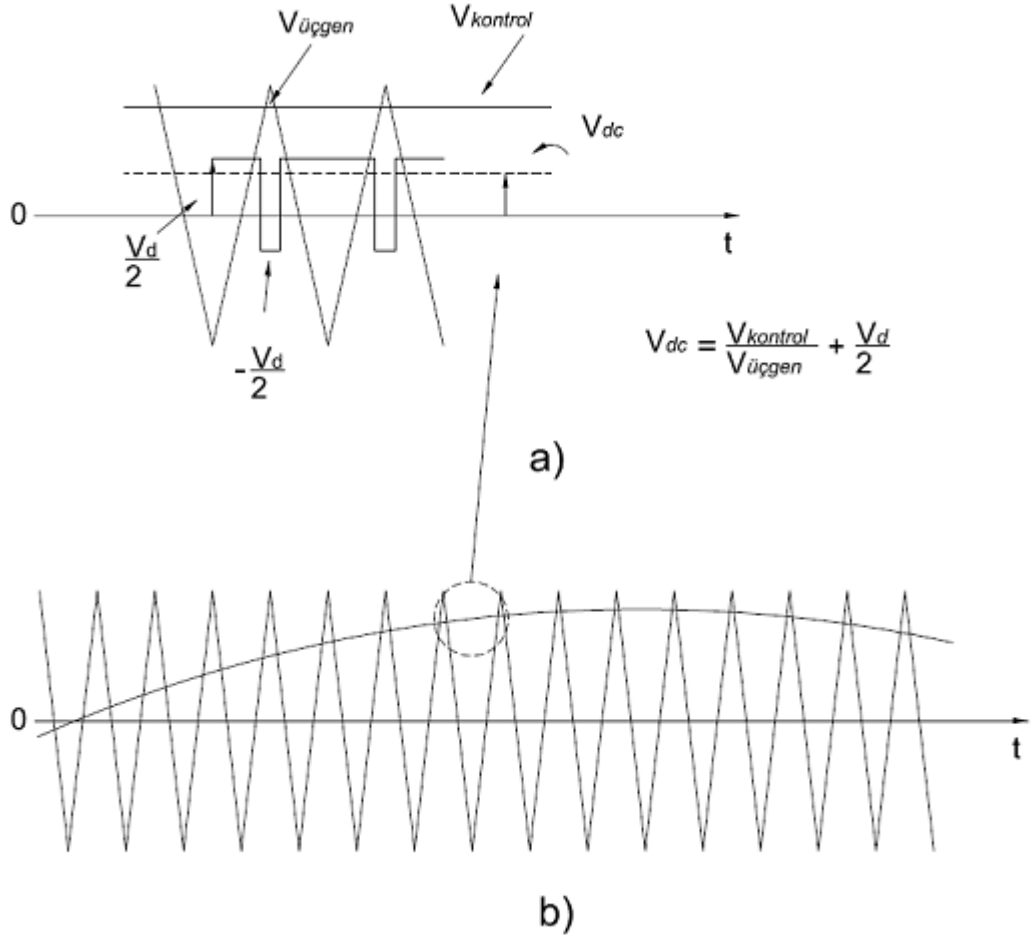
Sonuç olarak;

$$\hat{v}_{A_0} = \frac{v_{\text{kontrol}}}{v_{\text{üçgen}}} \frac{V_d}{2} \sin \omega_1 t \frac{V_d}{2} = m_a \sin \omega_1 t \frac{V_d}{2}, \quad m_a \leq 0,1 \quad (4.51)$$

olur. Buradan;

$$\hat{v}_{A_0} = m_a \frac{V_d}{2}, \quad m_a \leq 0,1 \quad (4.52)$$

olur. Böylece m_a 'nın 1.0 'dan küçük olduğu durumlarda, evirici çıkış geriliminin temel bileşeninin genliğinin m_a ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle m_a 'nın 0 ile 1 aralığında değiştiği aralığa doğrusal bölge diye tanımlanır.



Şekil 4.36: Sinüsoidal DGA darbe üretim prensibi

Eviricinin çıkış gerilim dalgasındaki harmonikler anahtarlama frekansı f_s ve onun katları biçiminde; $m_f, 2m_f, 2 > m_f$ olarak ortaya çıkar. Bu durum m_a 'nın 1 ve 0 arasındaki tüm değerleri için geçerlidir. Büyük güçlü uygulamalar dışında genellikle frekans modülasyon oranı $m_f \leq 9$ mertebesindedir. Bu oran, harmoniklerin meydana gelmesinde etkin olmakla birlikte, bu harmoniklerin genliğini etkilemez. Teorik olarak eviricinin çıkış gerilimi harmonik frekansları;

$$f_h = n_h \pm k f_1 \quad (4.53)$$

ile hesaplanabilir. Buradan, h harmonik mertebesi, frekans modülasyonu oranının j katının k 'ncü yan bandına karşılık geldiği söylenebilir. Temel frekansta $h=1$ dir. Harmonikler, j 'nin tek değerlerinde k 'nın yalnızca çift değerleri için vardır. Benzeri biçimde j 'nin çift değerlerinde ise k 'nın yalnızca tek değerleri için harmonikler bulunur.

$(v_{A0})_h / (1/2)V_d$ larak normalize edilmiş harmonik değerlerinin $m_f > 9$ varsayımıyla genlik modülasyon oranı m_a 'ya bağlı olarak değişir. Denklem 4.53'de en büyük $j=4$ değerine kadar olan belirgin harmonikler göz önüne alınmıştır.

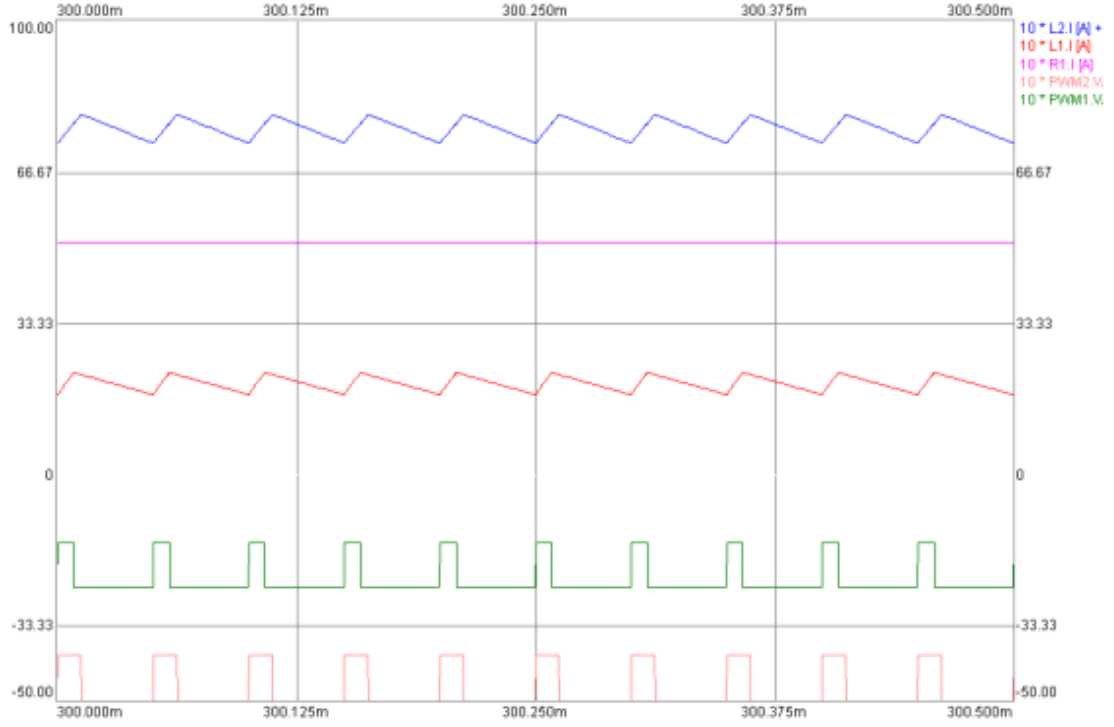
Şekil 4.33'te gösterilen evirici devresinde,

$$v_{AN} = v_{A0} + \frac{1}{2} V_d \quad (4.54)$$

olarak alınarak v_{AN} ve v_{A0} daki harmonik bileşenler;

$$v_{AN} = v_{A0} \quad (4.55)$$

olur. m_f 'nin harmonik değerleri tek tam sayılardır. m_f için tek tam sayı seçildiğinde, tek fonksiyon simetrisi nedeniyle $[f(-t) = -f(t)]$ ve Şekil 4.34' de $m_f=15$ için çizilen dalganın orijine göre yarım dalga simetrisi nedeniyle $[f(t) = -f(t + (1/2) T_1)]$ dir. Bu nedenle yalnızca tek harmonikler bulunur ve v_{A0} dalgası içerisinde çift harmonikler bulunmamaktadır. Buna ek olarak Fourier serisindeki sinüs fonksiyonunun katsayıları birer sonlu sayıdır, cosinüs fonksiyonlarının katsayıları sıfırdır. Şekil 4.34'de bu analizin harmonik spektrumu gösterilmiştir.

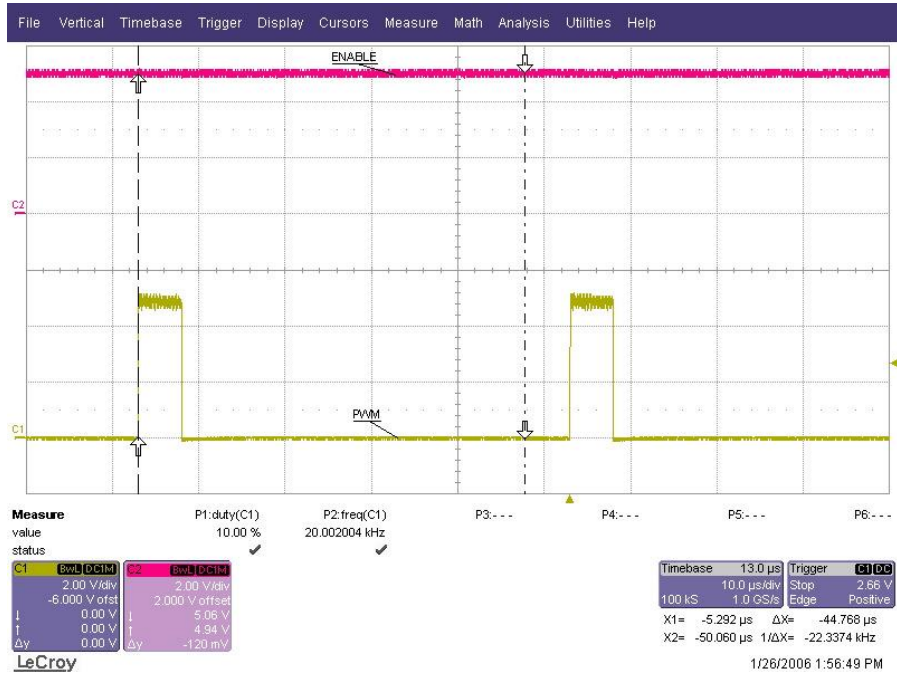


Zaman(microsecond)

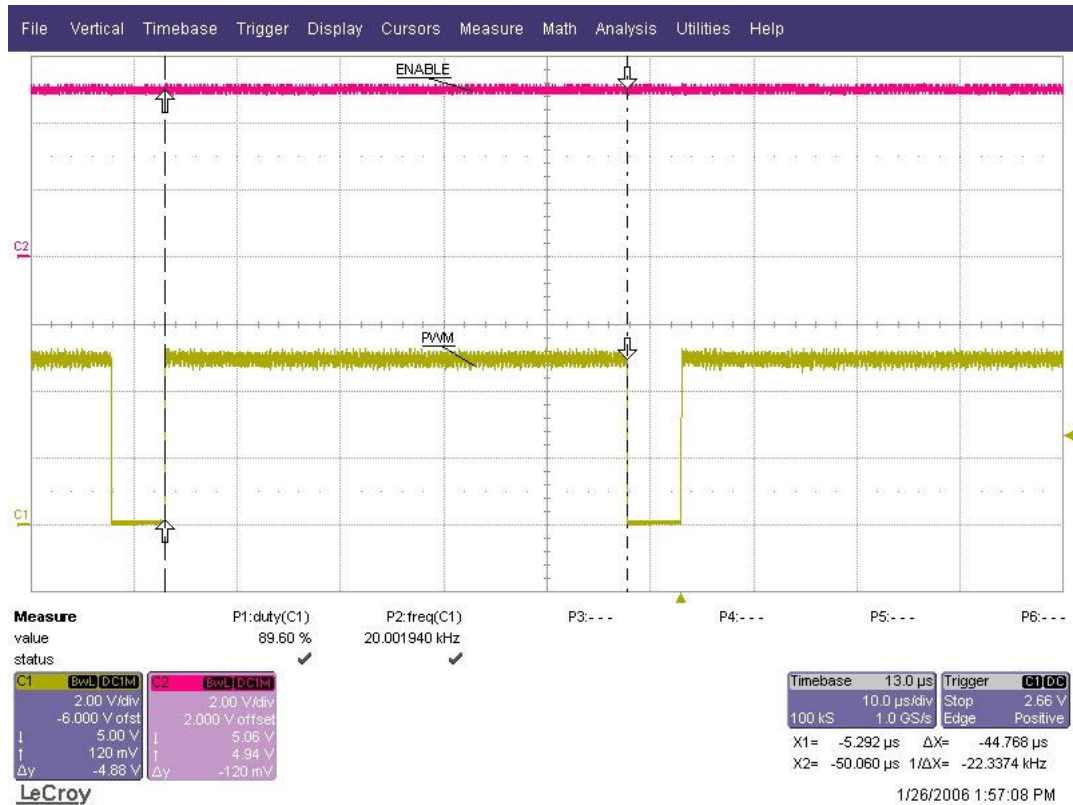
Şekil 4.37: DGA parametrelerine bağlı benzetimi [59]



Şekil 4.38: DGA darbe sinyalleri



Şekil 4.39: DGA da minimum doluluk oranı



Şekil 4.40: DGA maksimum doluluk oranı

4.5. Deneysel Çalışma için Tasarlanan DA/DA Dönüştürücü Devresi

Pratik uygulama ve deneysel çalışma amaçlı tasarlanan devrede Peukert denklemlerinden yararlanarak gerekli kondansatör kapasitesi için;

$$C_p = I^n T \quad (4.56)$$

yazılabilir. Burada; I pil deşarj akımı [A], T ise deşarj zamanını göstermektedir. Anlaşılacağı gibi, kapasite değeri deşarj akımına bağlıdır. Pil üreticisinin belirlediği deşarj akımına göre kondansatör seçilir[67]. Bu denklemlerle pratikte kullanılabilen;

$$C = \frac{\left[\frac{C}{h} \right]^{n-1}}{I^n} \quad (4.57)$$

denklemini yazılabilir. Burada; C nominal pil kapasitesi, h kapasite zaman oranı [saat:h] dir. C=100 Ah lik bir pil için, h=20 olan bir oran elde edilir. Denklem (4.57) ile deşarj akımı veya deşarj zamanı hesaplanabilir. C=27 Ah lik bir pil için, h=10 ve n=1,13 katsayısı kullanılabilir.

Pilin şarj-deşarj durumuna bağlı olarak pile aktarılan ve alınan enerji miktarıyla pil kapasitesi belirlenir. olarak C=100 Ah lik bir pil için, h=20 olan bir oran elde edilir. Denklem (4.29) ile deşarj akımı veya deşarj zamanı hesaplanabilir. C=27 Ah'lik bir pil için, h=10 ve n=1,13 katsayısı kullanılabilir. Pilin şarj durumu;

$$SoC_{pil} = \frac{\text{anlık pil şarji}}{\text{toplam pil şarji}} \quad (4.58)$$

olarak tanımlanır. Güç yönetimi için önemli bir parametredir. Pil şarj durum kapasitesini hesaplamak için fuzzy logic gibi birçok başka yöntemler de kullanılmaktadır. Analitik olarak hesaplanan yöntemlerden biri de Peukert denklemleri ile bulunmasıdır. Deşarj sisteminin oran katsayısı C_n in t_0 dan t_1 e kadar

pili deşarj durumuna getiren I_p pil deşarj akımına bağlı olarak deşarj durumunu (SoC:State of Charge);

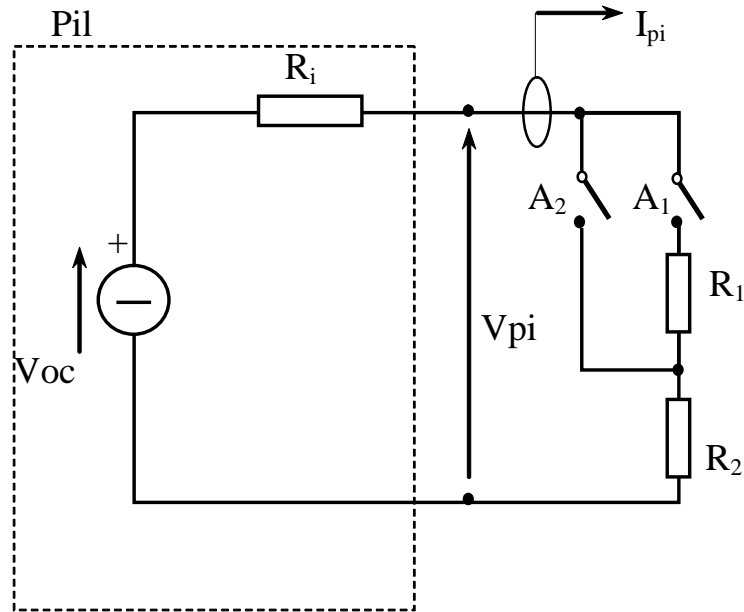
$$SoC_{pil}(t_1) = SoC_{pil}(t_0) + \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_b(t)}{C_n 3600} \quad (4.59)$$

ile belirlenebilir. Gerçek deşarj durumunu ayrıık zamanlı durumlar için;

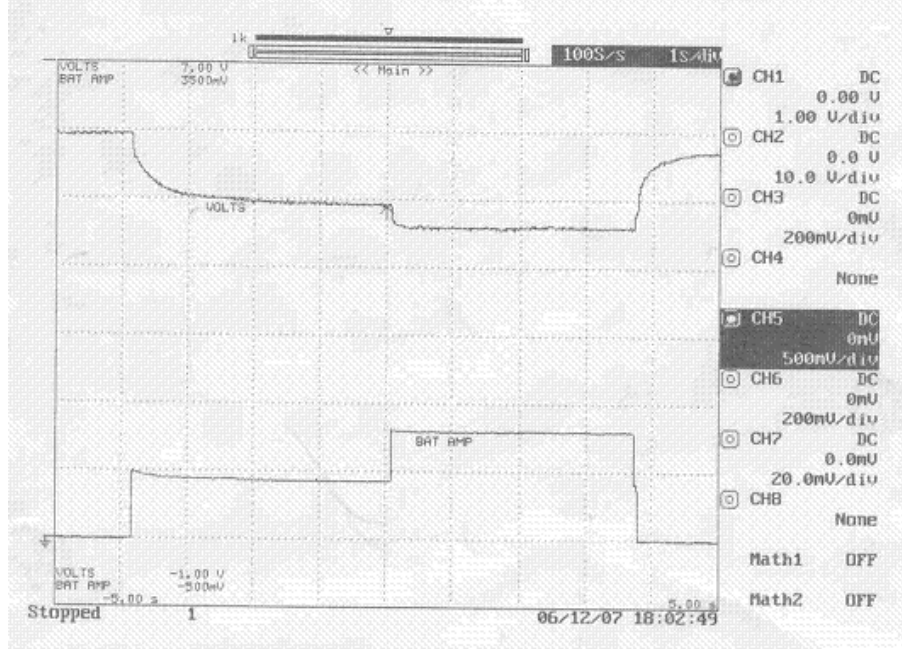
$$SoC_{pil}(k+1) = SoC_{pil}(k) + \left(\frac{I_p \Delta T}{C_n 3600} \right) \quad (4.60)$$

ile hesaplanabilir. ΔT örnekleme peryodu, k ve k+1 arasında pil akımının sabit kabul edildiği aralıktır.

Pil hesaplamaları yapılırken, iç direnç hesaplanması gerekir. Bunun için deneysel olarak, Şekil 4.41’de gösterilen devre kullanılarak DA dahili direnç ölçülebilir. Şekil 4.42’de ise deneysel olarak direnç ölçümünde akım-gerilim değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.41:Pil iç direnci R_{piDA} nın ölçülmesi için örnek devre



Şekil 4.42: Pil iç direnci R_{piDA} direncinin ölçülmesi sırasında akım ve gerilimin değişimi

Yüke bağlı olarak pil iç direncinde bir gerilim düşümü olur. İç direnci değeri;

$$R_{piDA} = \frac{V_{p1} - V_{p2}}{I_{p1} - I_{p2}} \quad (4.61)$$

ile hesaplanabilir. Şekil 4.42’de görüldüğü gibi, iç direnç ölçümünde gerilim üstel olarak değişmektedir. ΔT örnekleme periyodu, k ve $k+1$ arasında pil akımının sabit kabul edildiği

Bir pil sisteminin maksimum deşarj gücü, çekilen maksimum deşarj akımı I_{pmaks} , minimum uç gerilimi ve sıcaklığa bağlıdır. Teorik olarak tam şarjlı bir pilde iç direncin minimum değerinde maksimum deşarj akımı oluşur. Uygulamada ise, elektrot akımı ve güvenli akım durumuna göre sınırlandırılır. Akıma bağlı olarak sınırlandırılan pil deşarj gücü;

$$P_{pdesarjmaks} = |I_{pmaks}| \left[\left(\frac{V_{oc}}{R_{i[SoC]}} \right)^2 - I_{pmaks}^2 \right] \quad (4.62)$$

ile hesaplanabilir. Burada; $V_{oc[SoC]}$ pil şarj durumu açık devre gerilimi ve $R_{i[SoC]}$ ise iç direncidir.

Gerilime göre sınırlandırılan pil deşarj gücü;

$$P_{pdjmaks} = V_{p\ min} \left[\frac{V_{oc[SoC]} - V_{p\ min}}{R_{i[SoC]}} \right] \quad (4.63)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada; $V_{p\ min}$ gerilim değeri, pilin kaynak olarak kullanımında izin verilen en drilim değeridir. Deneysel olarak elde edilen $V_{oc[SoC]}$ ve $R_{i[SoC]}$ değerleri ve üretici verileri göz önüne alınarak $V_{p\ min}$ gerilimi 25 V ve I_{pmaks} akımı ise 40 A alınarak maksimum deşarj gücü hesaplanabilir. Denklem (4.62) ve (4.63) kullanılarak maksimum deşarj gücü, yaklaşık olarak 33V, 70Ah hesaplanır.

Bir pilin maksimum şarj gücü de, şarj akım ve gerilimine bağlıdır. Etkili bir şarj işlemi için maksimum şarj akımı, maksimum deşarj akımından küçük olmalıdır. Maksimum şarj gücü, maksimum şarj akımına bağlı olarak;

$$P_{psarjmaks} = |I_{pmaks}| \left(V_{oc[SoC]} - |I_{pmaks}| R_{i[SoC]} \right) \quad (4.64)$$

ile hesaplanabilir. Maksimum şarj gücü, pil elektrotları arasına güvenli uygulanacak maksimum şarj gerilimiyle sınırlandırılır. Buna göre pilin maksimum şarj gücü;

$$P_{psarjmaks} = V_{pmaks} \left[\frac{V_{pmaks} - V_{oc[SoC]}}{R_{i[SoC]}} \right] \quad (4.65)$$

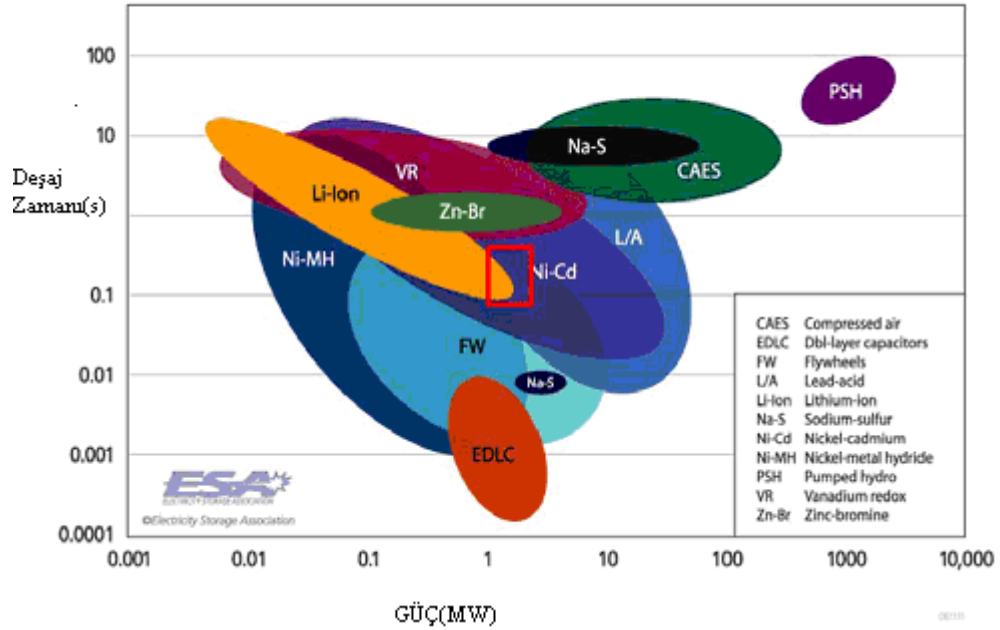
şeklinde hesaplanabilir. Burada; V_{pmaks} gerilim değeri, pile uygulanan maksimum gerilimdir. Deneysel olarak elde edilen $V_{oc[SoC]}$ ve $R_{i[SoC]}$ değerleri 33V'luk V_{pmaks} gerilimi ve 40A'lik I_{pmaks} akımı için şarj durum katsayıları belirlenebilir[68].

Pil denetim sisteminde darbeleri yükler beslenirken; Li-iyon pil şarjı, darbeleri yük için güçlü enerji sağlanması ve deşarj enerjisi önemli yer tutar. Bu bakımdan pil denetim sistemi biraz karmaşık yapıdadır. Güç kaynağı, deşarj donanımı, denetleyici gibi birimlerin tasarımı önem kazanır.

Sivil ticari ve askeri amaçlı su taşıtlarında kullanılmakta olan birçok elektrikli yük sistemi darbeli güç çeker. Gücün her an farklı değerlerde olması besleme kaynaklarını da etkiler. Dolayısıyla darbeli güçlerin karşılanmasında özel donanım tasarlamak gerekir. Bu tez çalışmasında temel amaçlardan biri de böyle bir yük beslemesinde yakıt hücresi ile birlikte kullanılacak Li-iyon pillerin bu gereksinimleri karşılamasını değerlendirmek ve olası öneriler üretmektir. Darbeli yüklerin farklı özellikleri bulunmaktadır. Bunların başında her darbe anında gereksinim duyulacak güç seviyesidir. Bir başka özellik de, bu darbelerin tekrarlanma zamanlarıdır. Darbeler ve darbe periyotlarına göre güç gereksinimi ve bunun sağlanabilmesi için enerji depolama sistemlerinin tasarımı önemlidir. Dolayısıyla denizaltı gibi birçok su altı ve savaş gemileri gibi birçok su üstü platformda gereksinim duyulan darbeli gücü üretmek veya depolama elemanlarından gerektiğinde sağlamak için enerji yönetimi yapılır.

Su taşıtlarında, genel tahrik sistemi ve suda hareket eden sistemden dolayı 5-20 s aralığındaki periyotlarla darbeli yük gereksinimi olur. Böyle durumlarda gerekli güç ve elektriksel enerji, darbe sayısı, darbe uzunluğu-süresi, darbelerden dolayı gerekli toplam güç, enerji yoğunluğu gibi faktörler göz önüne alınır [67].

Örnek deneysel çalışmada 1kW gücünde bir su üstü platformunun sonar ve haberleşme sistemi beslemesi uygulaması gerçekleştirilmiştir. 10 saniye içinde 12 civarında darbe gözlenmiştir. Bu çalışma enerjisi deneysel düzenekte kullanılan yakıt pilinden sağlanmıştır. Ancak yakıt pilinin yeteri kadar güç sağlayamadığı darbe sırasındaki darbe gücünde Li-iyon pil gurubu devreye girererek gerekli enerjiyi sağlama görevi yapmaktadır. Bu gibi durumlarda enerji depolama sistemlerinin önemi artar. Darbeli yüklerin enerji gereksinimini karşılama açısından farklı enerji depolama sistemleri karşısında Li-iyon pil gurubunun performans karşılaştırılması Şekil4.43' de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi Li-iyon pil gurubu diğer enerji depolama sistemleri karşısında oldukça başarılı sonuçlar oluşturmaktadır.

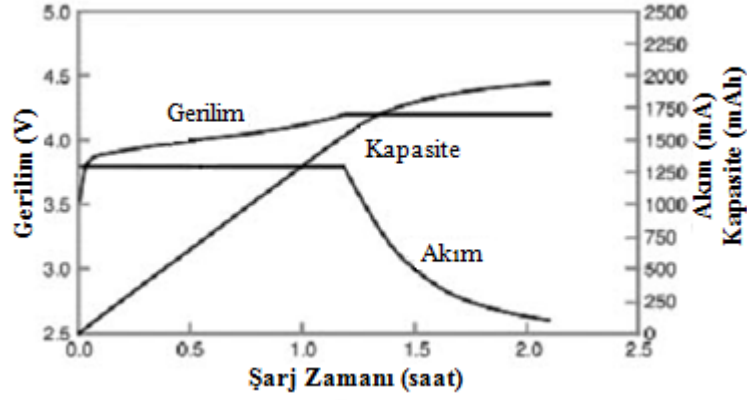


Şekil 4.43: Li-iyon pil grubunun diğer enerji depolama sistemlerine göre performansı

Dezavantajları açısından bazı özellikleri de göz önüne alınır. Li-iyon pil şarj gerilimi genelde düşük seviyelerdedir. Tam kapasite ile şarj olmuş pillerin gerilim değerleri genelde 3,3V ile 4,2V arasındadır. Darbeli yükleri beslemek için piller seri olarak bağlanır. Li-iyon pillerin şarj edilmesinde çok yüksek gerilim veya aşırı akım ile şarj edilmesi durumunda veya aşırı deşarj akımı etkisiyle patlama riski bulunur. Minimum deşarj geriliminin altındaki deşarjlarda kimyasal değişim riski de vardır.

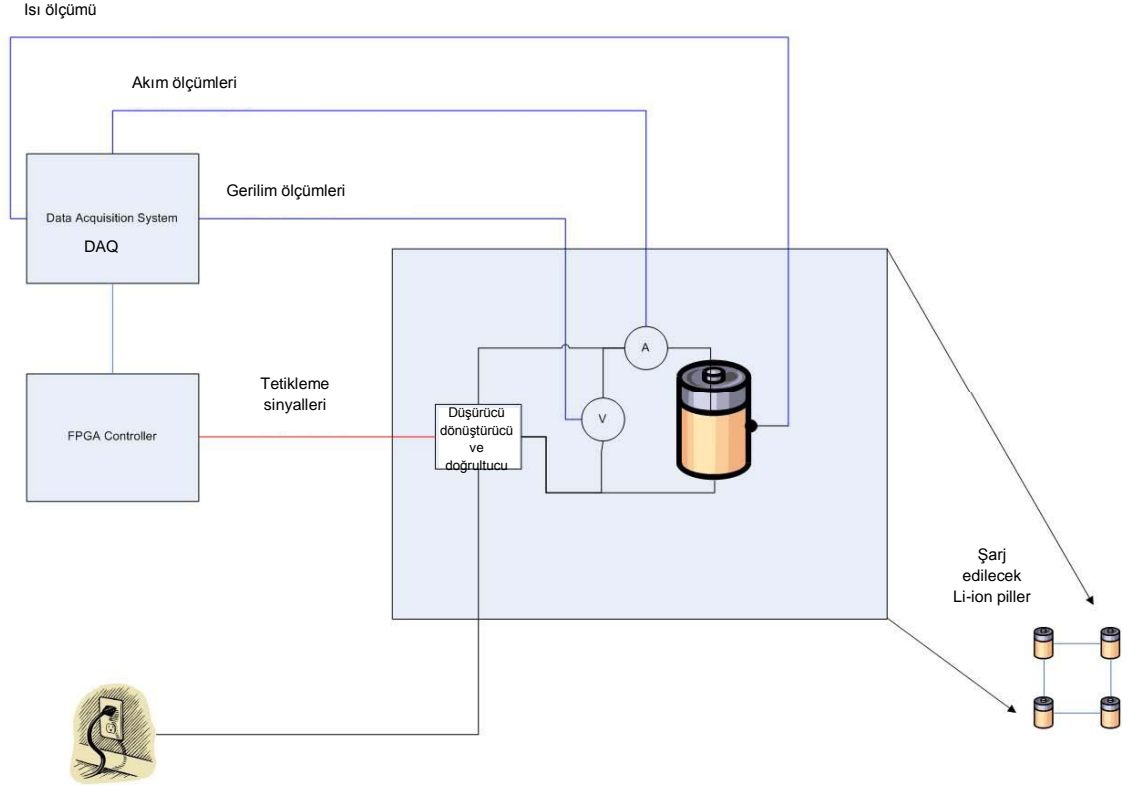
Li-iyon pillerin şarj edilmesi için; sabit akımla şarj ve sabit akım-sabit gerilimle şarj gibi birçok şarj yöntemi uygulanabilir. Bu yöntemlerde önemli bir parametre şarj süresidir. Bu yöntemlerden sabit akım ve sabit gerilimle şarj yöntemi şimdilik, her Li-iyon pil için güvenli şarj ve deşarj sağlayabilir. Tamamen boşalmış veya yeni bir pil şarj edilmek istenirse pil hücresi, deşarj kesme gerilimi seviyesi üzerine çıkıncaya kadar, üretici normal şarj akım değerinin %10'u kadar bir akımla şarj edilir. Daha sonra pil sabit gerilim değerine kadar sabit akımla şarj edilmeye devam edilir. Bu aşama sonunda pil kapasitesinin %70 ine yakın şarj olur. Sonra sabit gerilim ile şarj aşaması başlar. Sabit gerilim uygulaması, şarj akımının şarj kesme akımı seviyesine düşünceye kadar devam eder.

Li-iyon piller için önemli özdeğerler Ah olarak kapasite, sürekli deşarj akımının maksimum değeri, şarj kesme akımı ve deşarj kesme gerilimidir. Pildeki enerji kapasitesini de bu özdeğerlerden biri olan pil kapasitesi belirler. Ayrıca deşarj akımına bağlı doğrusal olmayan deşarj gerilimi de pilin enerji kapasitesine etki eder. Bu şarj işleminin aşamaları, bir Li-iyon pil için sabit akım sabit gerilim şarj yöntemi ile şarj özdeğerleri, Şekil 4.44’de gösterilmektedir.



Şekil 4.44: Li-iyon pilin sabit akım sabit gerilim şarj özdeğerleri

Li-iyon pil şarjında seri bağlı pil hücrelerinin eşit miktarda şarjını sağlayacak denetim tasarlanır. Bunun için karmaşık bir denetim sistemi kullanılır. Şebeke gerilimi bir transformator üzerinden beslenen yarıiletken doğrultucu devre ile DA gerilime dönüştürülerek bir DA/DA dönüştürücü devre üzerinden şarj devresi yardımıyla pillere uygulanır. Herbir pil için tasarlanacak DA/DA dönüştürücü birimi ile piller birbirinden bağımsız şarj edilebilir. Dolayısıyla pillerden biri şarj edilemez hale gelerek devre dışı kaldığında diğerleri olumsuz etkilenmez. Li-iyon pilin şarj yönetimi prensibi Şekil 4.45’de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, akım, gerilim ve sıcaklığın ölçülerek algılandığı sistemde, DAC üzerinden FPGA (Field Programmable Gate Array) birimine iletilen bilgiye göre DA/DA dönüştürücü vasıtasıyla şarj denetimi gerçekleştirilir.

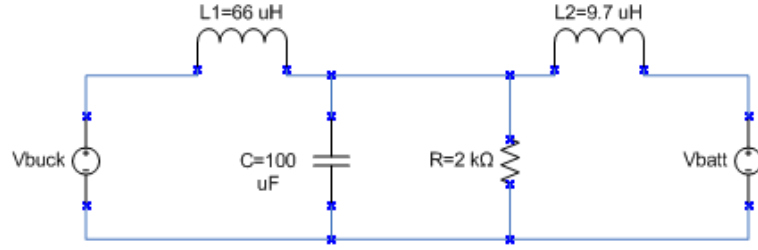


Şekil 4.45: Li-iyon pil şarjının prensip diyagramı

DA/DA dönüştürücü devresinde 15kHz-30kHz arasındaki sabit frekans değerlerinde bir sınır frekansında anahtarlama yapan yarıiletken MOSFET anahtarlama elemanlarıyla aktarılan gerilim için anahtarın iletimde kalma süresi t_{on} ve periyot T ile gösterilmek üzere doluluk oranı;

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (4.66)$$

denklemleri ile belirlenebilir. Akımın sürekliliği dönüştürücü indüktansına bağlıdır. Gerilim ve akım seviyesi dönüştürücü filtre devresi LC değerleriyle değişir. Doluluk oranının büyük değerlerinde sürekli akım, küçük değerlerinde ise süreksiz akım akıtılır. Dönüştürücünün basitleştirilmiş eşdeğer devresi Şekil 4.46'da gösterilmiştir.



Şekil 4.46: Li-iyon pil şarjı için tasarlanan DA/DA dönüştürücüsü basit eşdeğer devresi

Dönüştürücü için genel dönüşüm denklemi olarak;

$$V_c = D.V_{gir} \quad (4.67)$$

tanımlanabilir. Burada V_c yük gerilimi, V_{gir} ise dönüştürücü anahtarına uygulanan gerilimdir. Ortalama giriş ve ortalama çıkış gerilimleri arasındaki bağıntı belirlenmiş olur. Çıkış gerilimini değiştirmek için doluluk oranı değiştirilir. Dönüştürücü için transfer fonksiyonu ile V_{buck} ve V_{pil} kaynak gerilimleri ile çıkış V_c gerilimi için durum uzay denklemleri;

$$\frac{V_c}{V_{buck}} = \frac{sRL_2}{s^3RL_1L_2C + s^2L_1L_2 + sR(L_1 + L_2)} \quad (4.68)$$

$$\frac{V_c}{V_{pil}} = \frac{sRL_1}{s^3RL_1L_2C + s^2L_1L_2 + sR(L_1 + L_2)} \quad (4.69)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} I_{L_1} \\ I_{L_2} \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ -\frac{1}{C} & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pil} \quad (4.71)$$

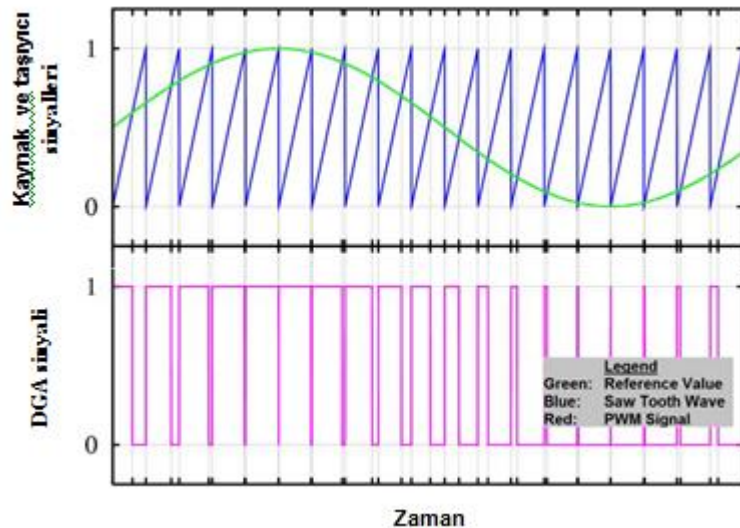
olarak tanımlanabilir. Devrede üç adet enerji depolama elemanı olduğundan, indüktans akımları ile kondansatör gerilimi durum değişkeni olarak durum uzay

denkleminin de değişkenleri olarak denklem (4.71) deki gibi tanımlanabilir. 15 kHz üzerindeki anahtarlama frekansı için çıkıştaki salınımların küçük olması için LC filtresi kullanılır. Filtre için sınır frekansı;

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.72)$$

ile hesaplanır. $f=1,98$ kHz olarak alınabilir.

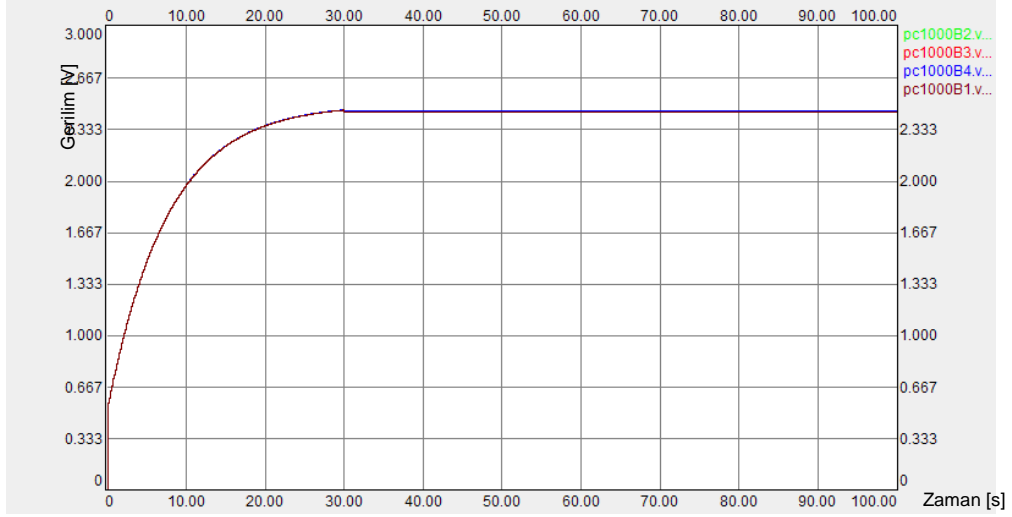
Pillerde ısınma önemli bir sorundur. Bu sorunu çözmek için pil sıcaklığı gözlenerek gerektiğinde soğutulmalıdır. Her bir pilin ortasından ısı sensörü ile algılama yapılarak evirmeyen opamp üzerinden sisteme aktarılır. Pillerin bireysel hücre sıcaklığı sürekli gözlenerek denetlenir. Anahtarlama elemanı olan MOSFET lerin sürülmesi için Şekil 4.47’de prensibi gösterilen DGA sinyalleri üretilir. Bilindiği gibi referans bir sinüs sinyali ile bir üçgen veya testere dişi sinyalin karşılaştırılması ile DGA denetim ve sürme sinyali elde edilir. Karşılaştırmada referans sinyalin büyük olduğu aralıklarda MOSFET e sürme sinyali uygulanarak iletimi sağlanır. Referansın küçük olduğu aralıklarda ise sürme sinyali üretilmez ve dolayısıyla MOSFET kesimde kalmaya devam eder [67].



Şekil 4.47:Güç MOSFET lerinin sürülmesi için üretilen DGA (PWM) sinyalleri

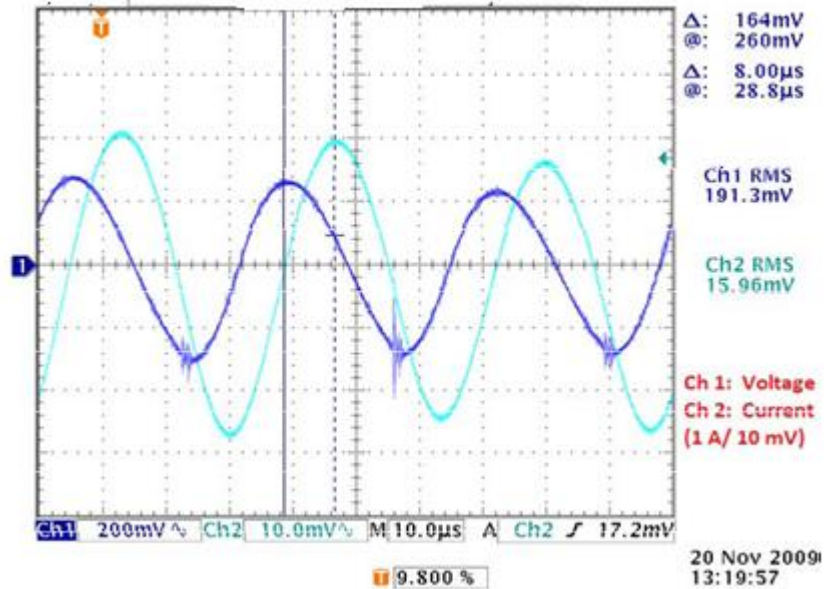
Pil denetim sisteminde ilk önce besleme gerilimini denetleyen yarıiletken anahtarlama elemanları olan MOSFET lere sürme sinyali uygulanarak iletimi

sinyalleri üretilir. Benzeşimler sonucunda, Şekil 4.49’de görüldüğü gibi, pil şarj konumu için gerilim ve akımının değişimleri belirlenir [67].

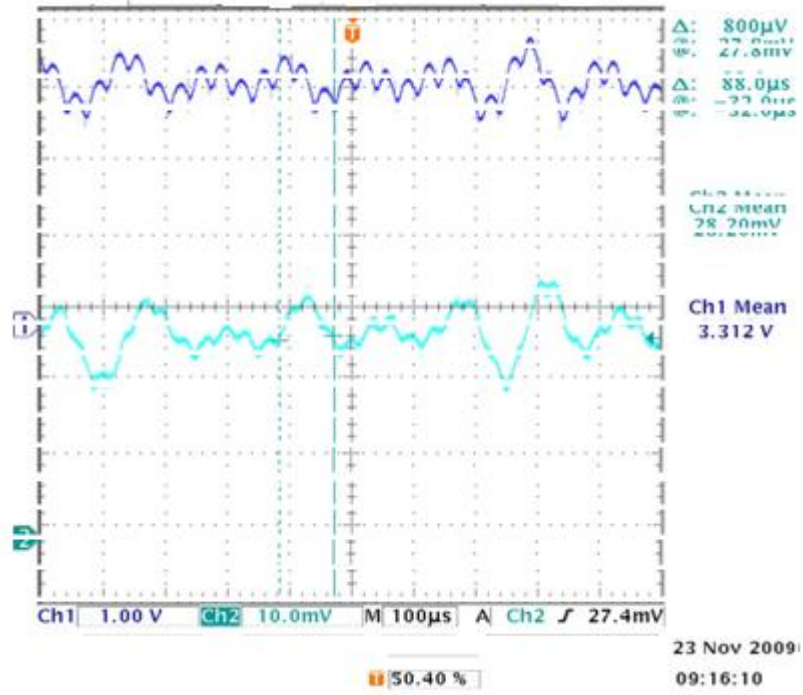


Şekil 4.49: Şarj gerilimi değişimi benzetimi

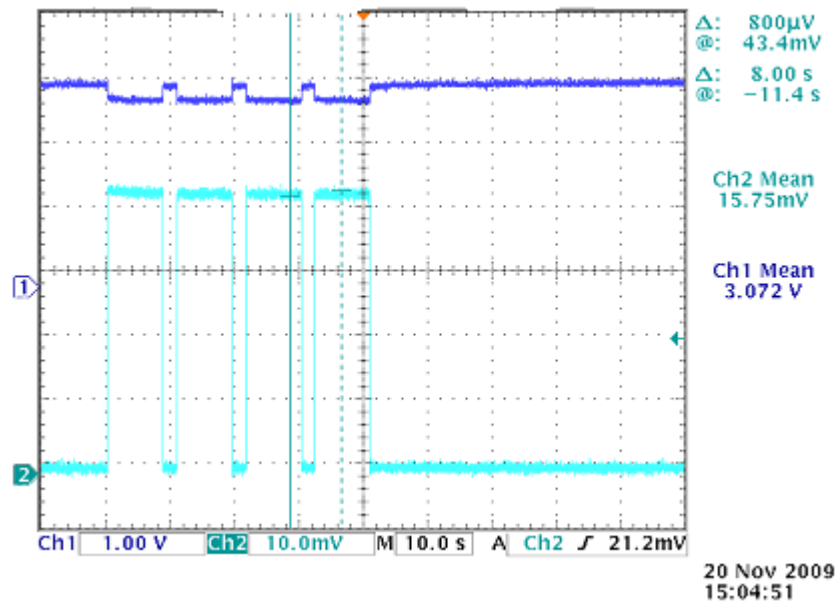
Şarj devresi ile pil şarj edilmeye başlandığında anahtarlama frekansı üst sınırlarda 30kHz alınmıştır. Pilin AA şebekeden şarj başlangıcındaki akım darbelerinin değişimi Şekil 4.50’de gösterilmektedir.



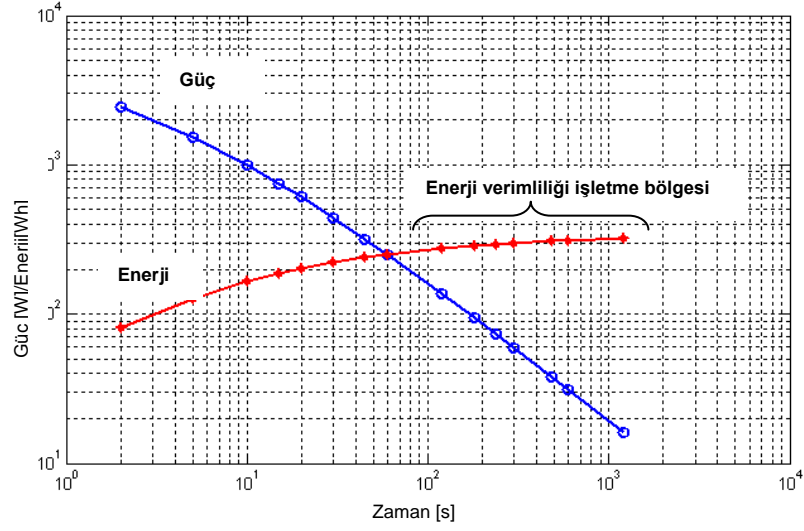
Şekil 4.50: Pilin AA şebekeden şarj başlangıcındaki akım darbeleri



Şekil 4.51: Seri bobin eklendikten sonra pilin AA şebekeden şarj başlangıcındaki akım salınım darbeleri



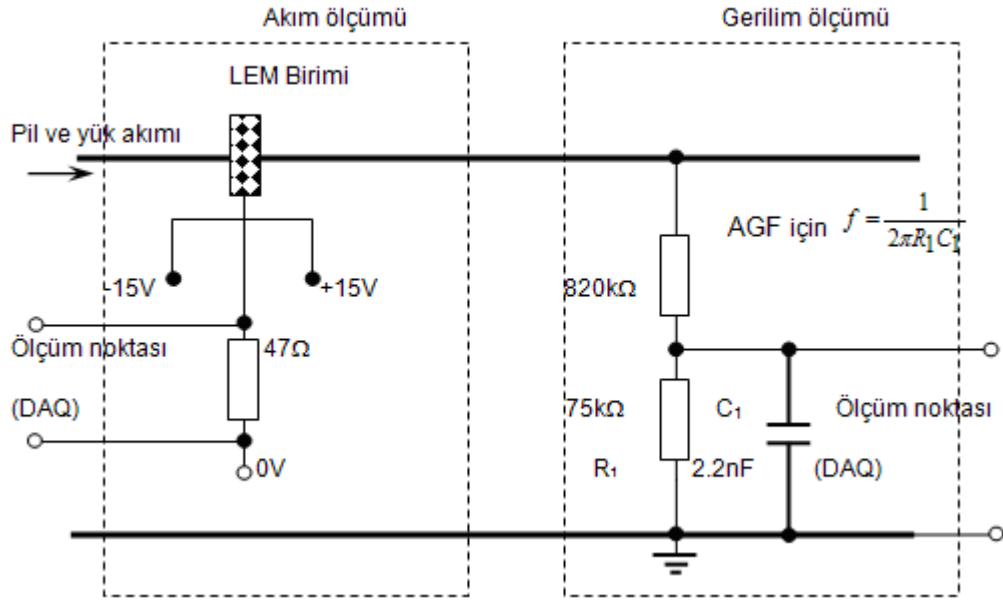
Şekil 4.52: Pilin deşarj değişimleri (4A sabit akım, 3,5V sabit gerilim)



Şekil 4.53: Sisteme sağlanan güç ve enerji kapasitesi eğrileri

Görüldüğü gibi 1A şarj akımı değerinde yaklaşık 4,5A lik tepe değer salınımları oluşmaktadır. Bu salınımlar pillerin ısınmasına neden olur. Bunu engellemek için şarj devresine seri bir bobin (9,7 μ H değerinde) eklenir. Dolayısıyla, Şekil 4.51'de gösterildiği gibi akım salınımları sınırlandırılmış olur.

Çalışma pratik devresinde pil akımı LEM-LC300, DA baradaki akım ise LEM-LT200 Hall effect algılayıcılarla ölçülmektedir. Sistemde akım, ± 15 V luk LEM'lere 47 Ω luk direnç bağlanarak ölçülmektedir. Akan akımı ölçen sistemde 500Hz'lik alçak geçiren filtre tasarlanmıştır. Gerilim ölçmek için piller ve DA baradan örnekleme alınmaktadır. Dirençli gerilim bölücülerle ve 1kHz lik alçak geçiren filtrelerle alınan gerilim ölçü birimine aktarılmaktadır. Akım ve gerilim ölçüm birimleri girişten ve sinyal hattından yalıtılmıştır.



Şekil 4.54: Sistemde akım ve gerilim ölçüm prensibi gösterimi

Yarıiletken güç anahtarları için doluluk oranına bağlı olarak üretilen DGA sinyalleri optik yalıtım tümdevreleri üzerinden uygulanarak hem sinyal kuvvetlendirilmekte ve hem de elektriksel yalıtım sağlanmaktadır. MOSFET'ler DGA frekansı olan f_{sw} değeri ile anahtarlanmaktadır. Devre çalışmasında parametrelerinden bazılarının değerleri;

Maksimum dönüştürücü gücü	$P_{maks} = 1,2kW$
Pil çıkış gerilimi (Deşarj konumu)	$V_{pildeşj} = 25,2V$
Pil giriş gerilimi (Şarj konumu)	$V_{pilşrj} = 22V \sim 52V$
YAKIT pili çıkış gerilimi	$V_{yp} = 52V$
DC Bara gerilimi	$V_{DA} = 25,2V$
Anahtarlama frekansı	$f_{sw} = 20kHz$
Pil deşarj salınımı	1%
Pil şarj akımı salınımı	1%

şeklinde tanımlanabilir. Pasif devre elemanları değer ve boyutları; anahtarların doluluk oranı, giriş/çıkış gerilim katsayıları, devre topolojileri, v.b gibi parametreler göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Li-iyon piller 4,2V luk altı adet seri bağlı kollardan biribiri ile paralel bağlı 10 koldan oluşmaktadır. Gerilim değeri $6 \times 4,2V = 25,2V$ olarak uçlarda görülmektedir.

Giriş-çıkış gerilimlerine ait transfer fonksiyonu için;

$$V_{gir} - L_{pil} \frac{di_{pil}}{dt_{on}} - V_{cik} = 0 \quad (4.73)$$

$$V_{gir} - V_{cik} - L_{pil} \frac{\Delta i_{pil}}{1 - D_T} f_{sw} = 0 \quad (4.74)$$

olarak yazılıp düzenlenirse,

$$V_{gir} - V_{cik} D_T = L_{pil} \cdot \Delta i_{pil} \cdot f_{sw} \quad (4.75)$$

şeklinde yazılabilir. İletim periyodu boyunca KGY uygulanarak;

$$V_{cik} - L_{pil} \frac{di_{pil}}{dt_{off}} - V_{gir} = 0 \quad (4.76)$$

$$V_{cik} - L_{pil} \frac{\Delta i_{pil}}{1 - D_T} f_{sw} = 0 \quad (4.77)$$

$$V_{gir} - V_{cik} D_T = V_{cik} (1 - D_T) \quad (4.78)$$

olarak yazılabilir. Giriş ve çıkış gerilimleri arasında ise;

$$V_{cik} = V_{gir} \cdot D_T \quad (4.79)$$

denklemleri tanımlanabilir.

Bu denklemle doluluk oranı değerleri hesaplanmaktadır. Giriş geriliminin maksimum değeri ile çıkış geriliminin minimum değerinden doluluk oranının minimum değeri,

$$D_{T\min} = \frac{25,2}{52,2} = 0,482 \quad (4.80)$$

olarak bulunabilir. Doluluk oranının minimum değeri ise, giriş geriliminin minimum ve çıkış geriliminin maksimum değerinden,

$$D_{T\max} = \frac{52}{52,2} = 0,996 \quad (4.81)$$

şeklinde bulunabilir.

Bu doluluk oranı aralığında, 23A lik bir akım %1'den az olan akım salınımlıyla,

$$L_p = \frac{V_{cik} (1-D_T)}{\Delta i_p \cdot f_{sw}} = \frac{25,2 \cdot 1-0,482}{0,46 \times 20000} = 1,418\text{mH} \quad (4.82)$$

olarak bulunabilir. Seri bağlı indüktans ile birlikte çıkışa paralel bağlanan kondansatörün oluşturduğu alçak geçiren filtre gibi çalışan kondansatör yükü ΔQ olarak gösterilirse, tepe tepe arası gerilim oranı;

$$\Delta V_{cik} = \frac{\Delta Q}{c_p} = \left(\frac{1}{c_p} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) \left(\frac{1}{2f_{sw}} \right) \quad (4.83)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Burada; $i_L = i_{pil}$ olarak alınabilir. Burada;

$$\Delta i_L = \frac{V_{cik} (1-D_T)}{L_p \cdot f_{sw}} \quad (4.84)$$

ile hesaplanabilir.

Buradan kondansatör kapasitesi;

$$C_p = \frac{V_{cik} (1 - D_T)}{8L_p \times f_{sw}^2 \times \Delta V_{cik}} \quad (4.85)$$

ile hesaplanabilir. 1,418 mH indüktans değeri ile birlikte 125 mV gerilim dalgalanması göz önüne alınarak;

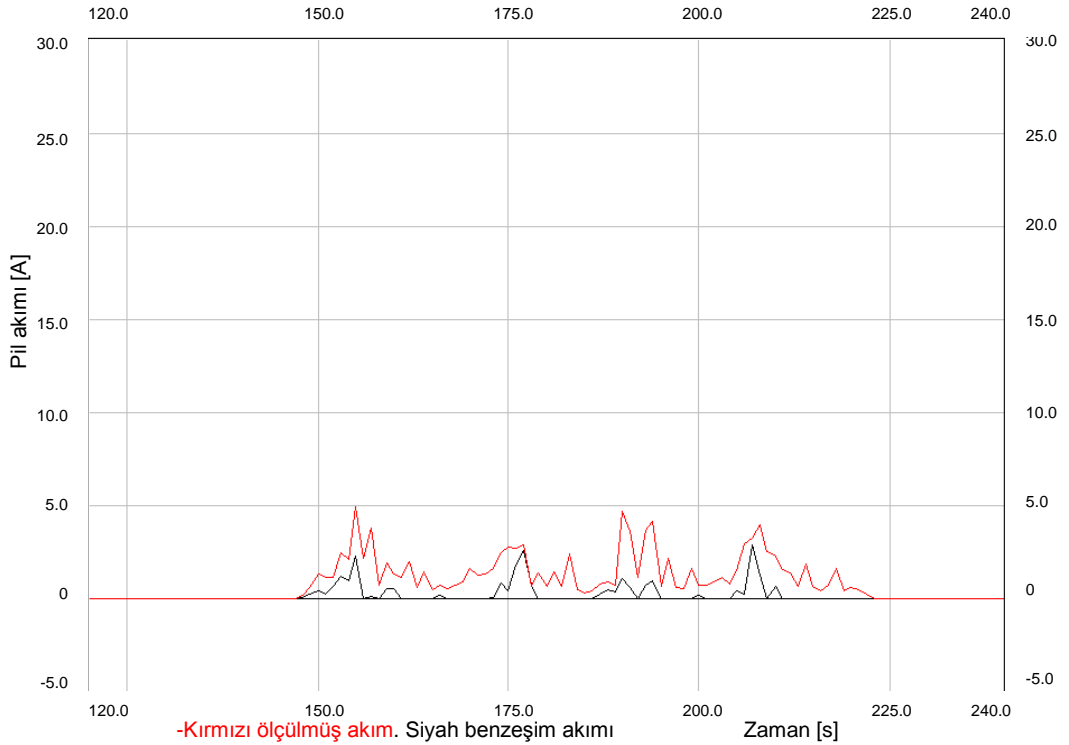
$$C_{pmin} = \frac{25 (1 - 0,482)}{8 \times 0,001418 \times 20000^2 \times 0,125} = 22,831 \mu F \quad (4.86)$$

olarak bulunur. Buna bağlı alçak geçiren filtre sınır frekansı;

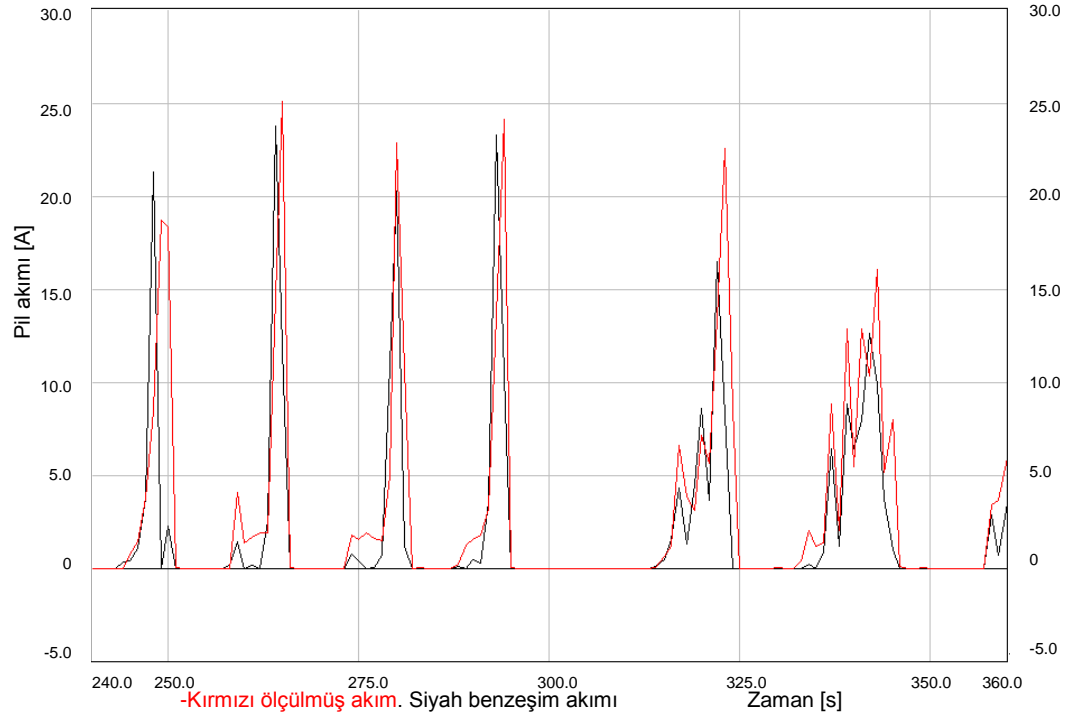
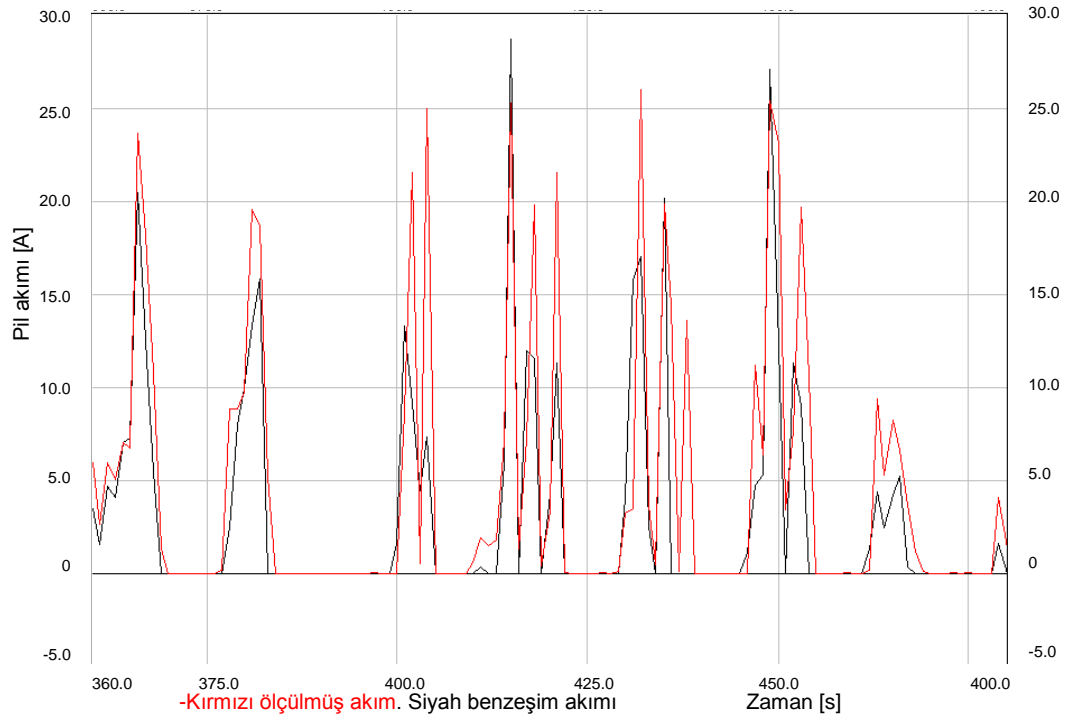
$$f_k = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_p \times C_p}} \quad (4.87)$$

ile hesaplanabilir.

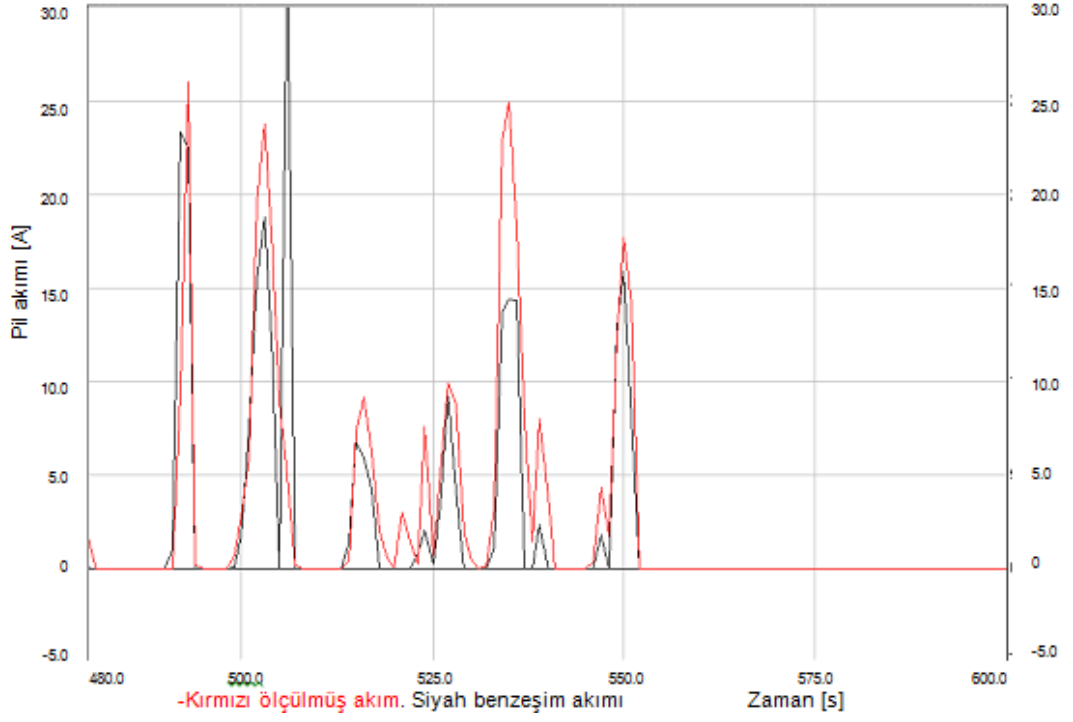
Anahtarlama elemanları için düşük dirençli MOSFET'ler kullanılabilir. ; 3 uluk oranı aralığında, 23A şık bir akım ile %1'den az olan akım salınımla, yazılıp düzenlenirse,



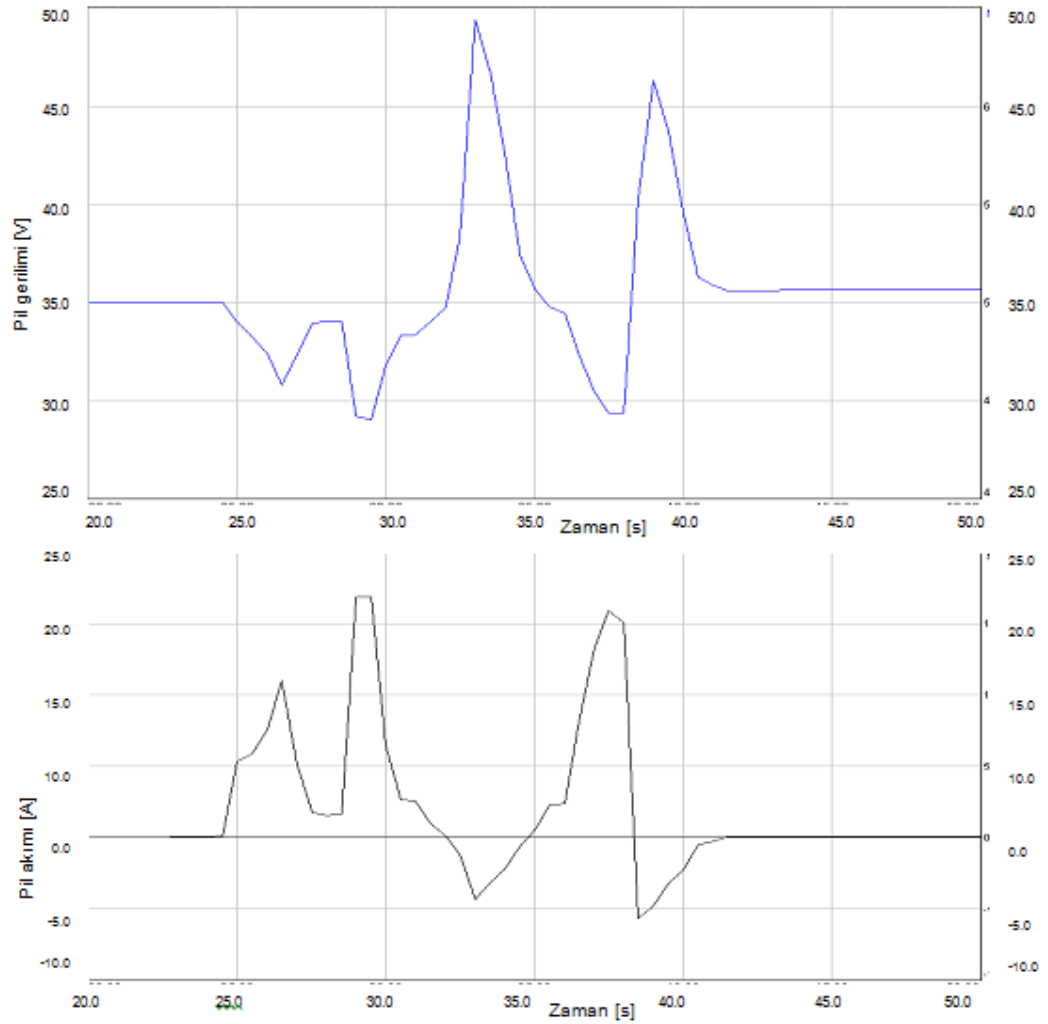
Şekil 4.55: Benzetim yapılmış akımlarla ölçülen pil akımlarının karşılaştırmaları



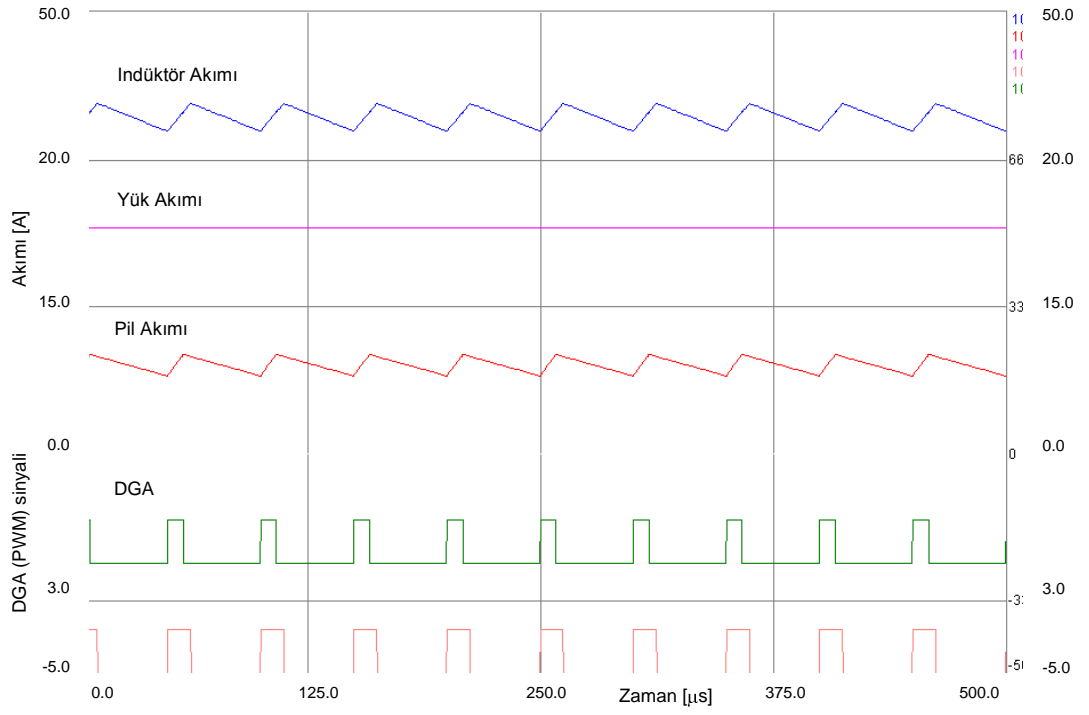
Şekil 4.55(Devamı): Benzetim yapılmış akımlarla ölçülen pil akımlarının karşılaştırmaları



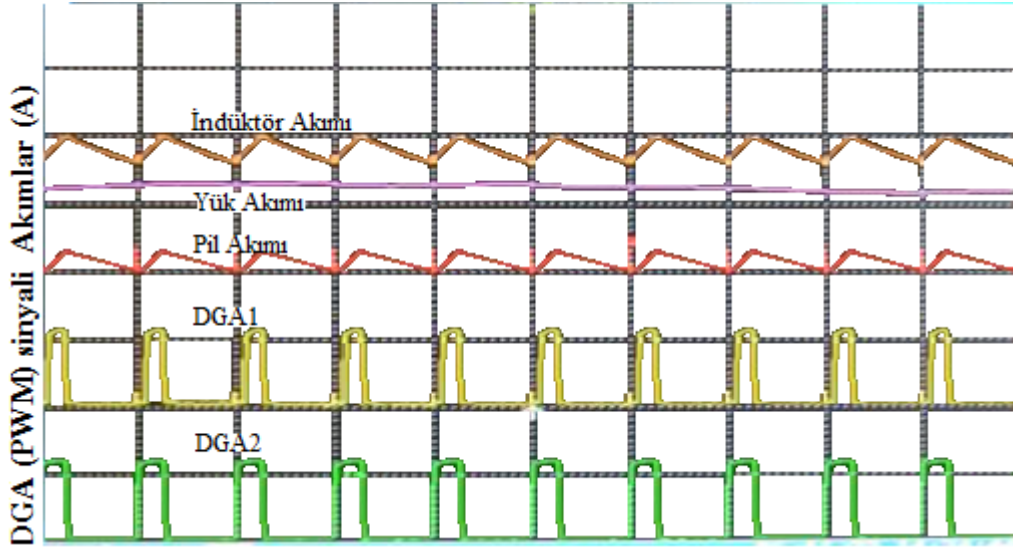
Şekil 4.55(Devamı): Benzetim yapılmış akımlarla ölçülen pil akımlarının karşılaştırmaları



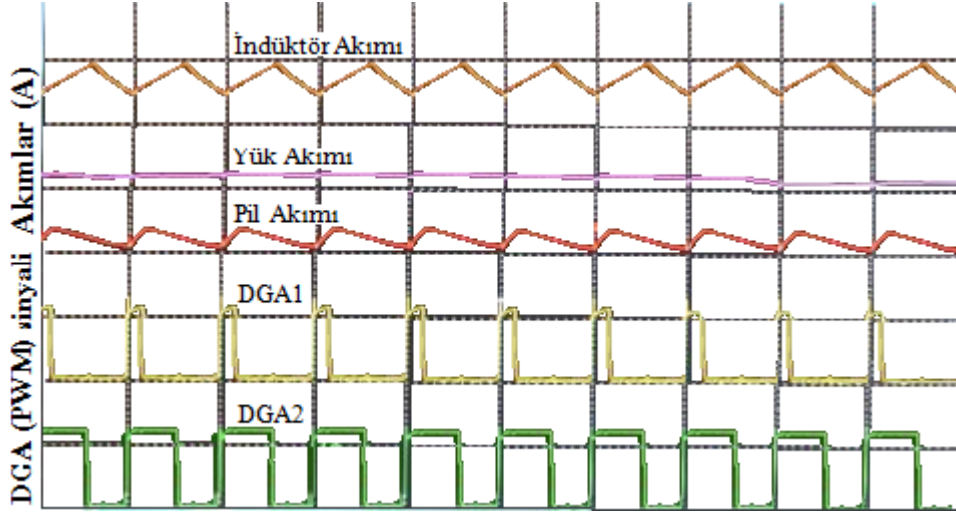
Şekil 4.56: Pil benzetim gerilimi ile ölçülen pil gerilimi karşılaştırmaları



Şekil 4.57: Denetim devresi sinyallerinin benzetim değişimleri



Şekil 4.58: Ölçülen denetim devresi sinyallerinin değişimleri



Şekil 4.59: Ölçülen denetim devresi sinyallerinin değişimleri

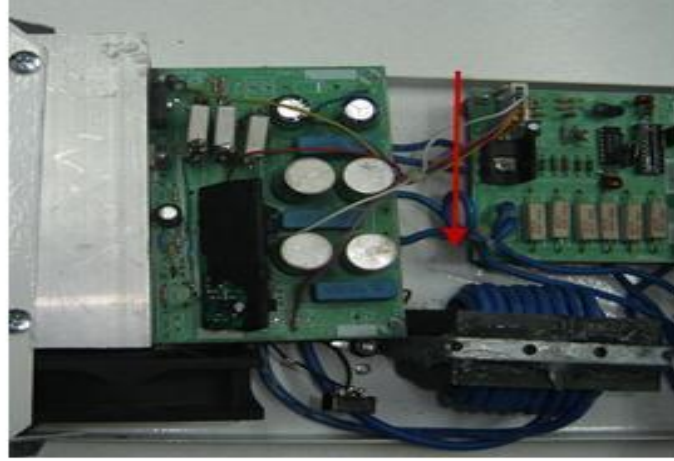
4.5.1. Düşürücü tip DA/DA dönüştürü

Çalışmada kullanılan Li-iyon pil grubunu şarj edebilmek için tasarlanan DA-DA dönüştürücü devresinin gerçekleştirilen deneysel düzeneği Şekil 4.60'da sunulmuştur. Pillerin şarj karakteristiğine bağlı olarak çalışmakta öncelikle pil grubu sabit akım ile şarj edilmekte pil gerilimi nominal gerilime ulaştığında sabit gerilim ile şarj etmeye devam ederek şarj akımı nominal akımın 0.1 katına ulaştığında devreyi beslemeyi kesecek şekilde tasarlanmıştır. Dönüştürücü sistem, doğrultucu, yükseltici ve sınırlayıcı olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır [51].

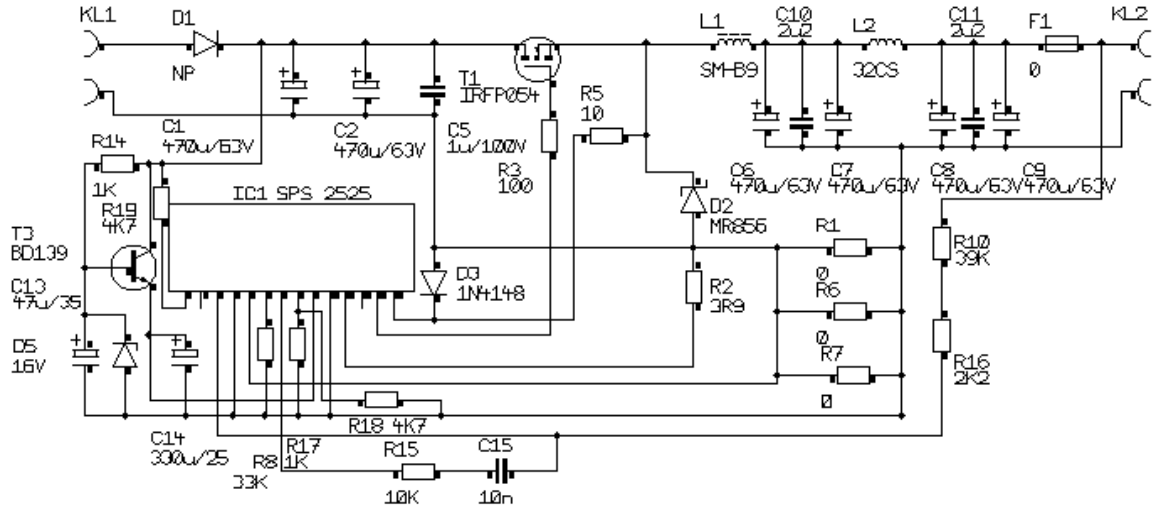


Şekil 4.60: Tezde kullanılan deneysel DA-DA dönüştürücü görünümü

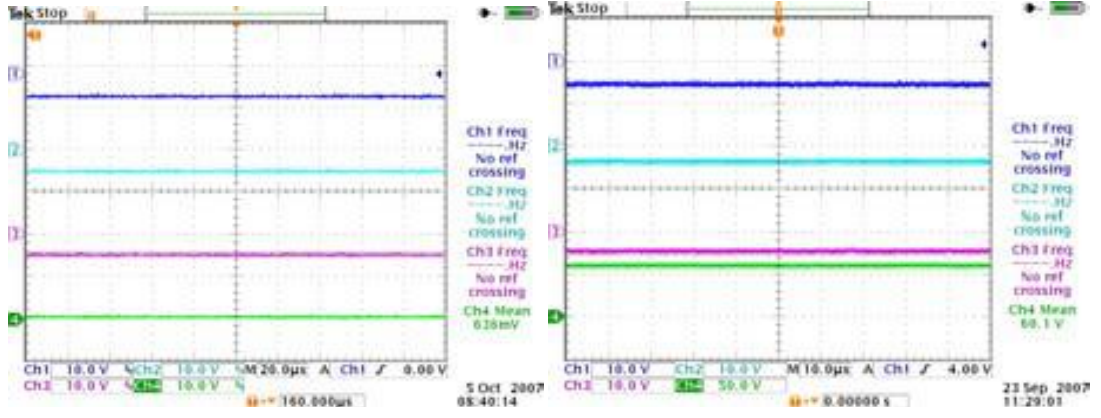
Dönüştürücü giriş gerilimi 52-27V DA gerilimini, sabit değerde 12A akım verecek şekilde dönüştüren buck tipi dönüştürücüden oluşmaktadır. Devre görünümü Şekil 4.61’de gösterilmiştir. DA/DA dönüştürücünün devre şeması Şekil 4.62’de gösterilmiştir.



Şekil 4.61: DA/DA dönüştürücü düzeneğin görünümü

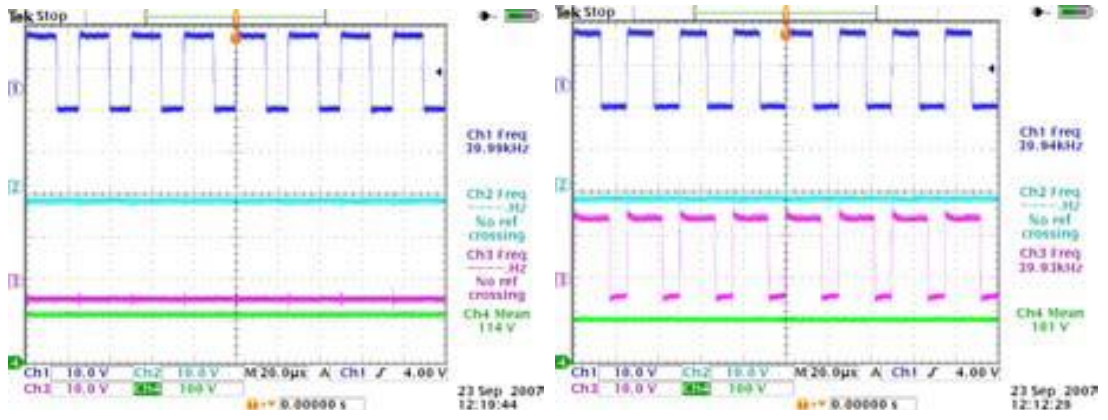


Şekil 4.62: Düşürücü tip DA/DA dönüştürücü devre şeması



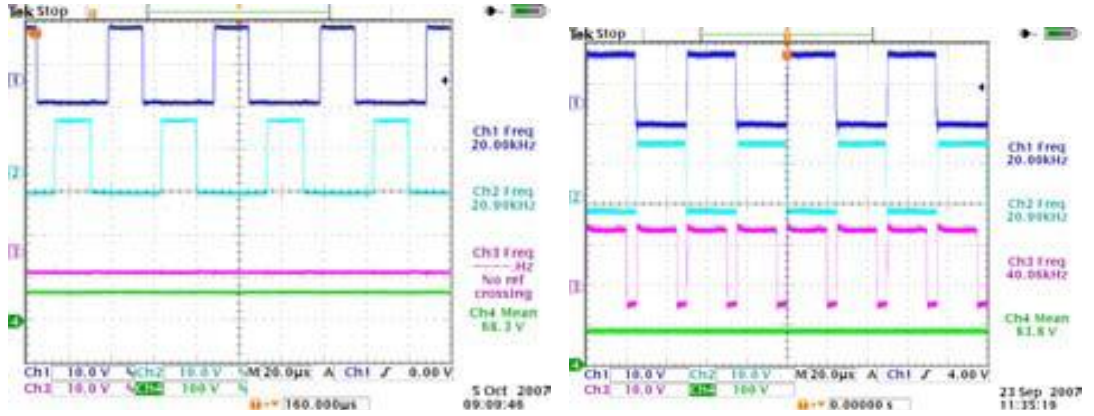
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

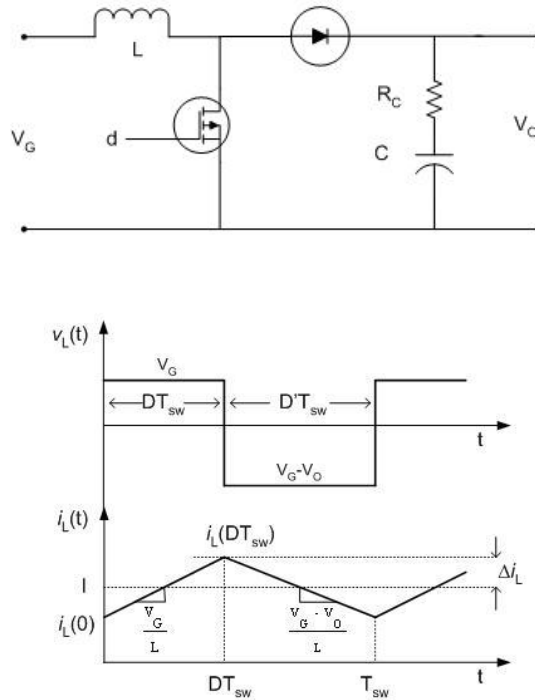
Şekil 4.63: DA/DA dönüştürücü kapı darbelerine göre çıkış gerilimi değişimleri.

Şekil 4.63.a' da sistem kapalı konumunu göstermektedir. Bu konumda yük uçlarında herhangi bir gerilim yoktur. Dönüştürücü akımı 100-120 mA civarındadır. Bu akımı ihmal edilerek açık devre kabul edilebilir. Dönüştürücünden beslenen yarıiletkenler, mikrodenetleyici tarafından kontrol edilir. Bu esnada analog ölçümler, bunlara bağlı

değerlendirmeler sürekli olarak yapılmaktadır. Yakıt pili veya bataryadan başlatma işaretlerini bekleyen denetleyici aküden başlatma işareti aldığı anda akü gerilimini yüke aktarmaya başlar. Bu konumda dönüştürücü işaretleri ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki Şekil 4.63.b'de verilmektedir. Batarya deşarj sonu gerilimi olan 50 V DA değerinden büyük olduğu sürece devam eder. Gerilim 50V DA'nin altına düştüğünde ya da durdurma butonuna basıldığında sistem durumu Şekil 4.63.a'ya geri döner. Eğer çıkış gerilimi sınır değere ulaşmış ise CV yöntemi bırakılarak güce bağlı olarak dönüştürücü çıkış gerilimi sınırlama döngüsü çalışmaya başlar. Çıkış gerilimi uygun aralıkta kalmış ise güç denetimi uygun konumda devam eder. Şekil 4.63.e 'ye konumunda çıkış gerilimin akü şarj değerinin üzerine çıkması halinde ise çalışma durumu 4.63.f'de verilmektedir.

4.5.2. Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü

Yükseltici giriş gerilimi 22-27 VDA gerilimi 28 VDA gerilime çeviren çeviriciden meydana gelmiş olup Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü devre şeması ve akım gerilim değişimi Şekil 4.64'de gösterilmiş olup sistem için kullanılan DA/DA'nın fotoğrafı Şekil 4.65'de, devre şeması ise Şekil 4.66'da gösterilmiştir.



Şekil 4.64:Yükseltici tip DA/DA dönüştürücü devre şeması ve akım gerilim değişimleri

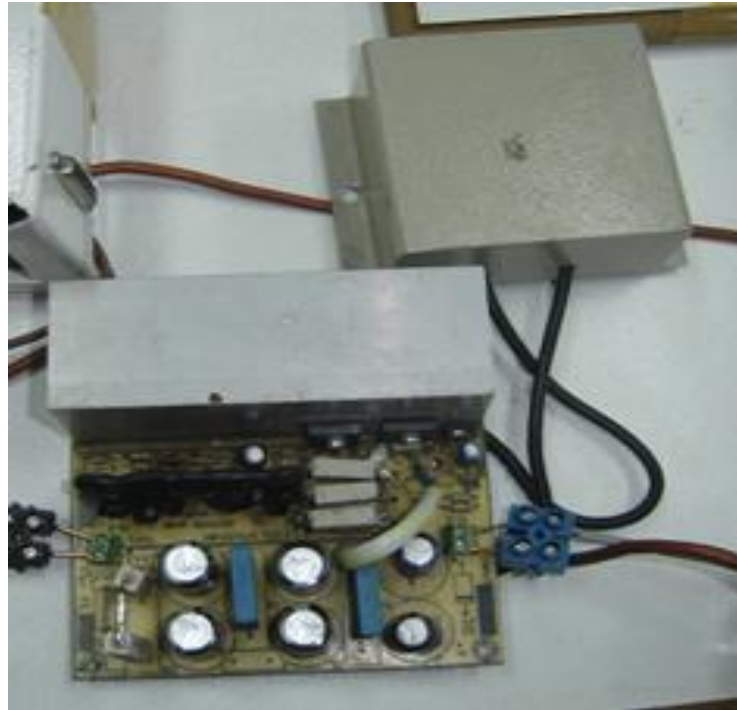
Yükseltici tip dönüştürücüde yarıiletken anahtar iletimde iken diyot kesime kutuplanarak çıkışı girişten yalıtır. L endüktansından i_L akımı artarak akar ve enerji depolanır. Tranzistör kesime girdiğinde D diyotu iletime girerek akıttığı akımı C kondansatörü ve R_Y yükü üzerinden akıtır. Dolayısıyla endüktörde depolanan enerji yüke aktarılmış olur. Şekil 4.67’da L endüktansının sürekli akım konumunda akım ve geriliminin değişimi gösterilmektedir. Yük gerilimi;

$$\frac{V_{yük}}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (4.89)$$

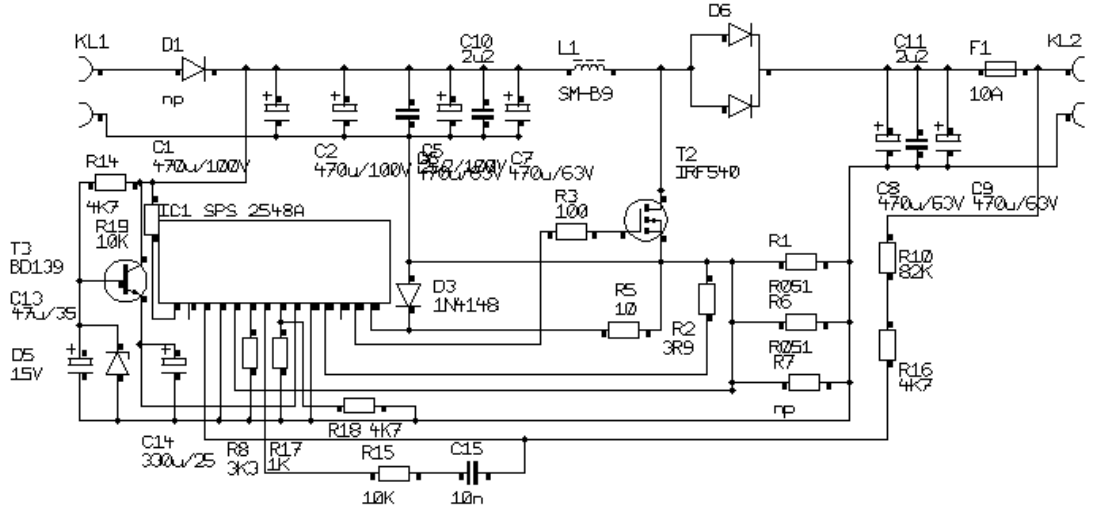
ile hesaplanabilir. Devrenin kayıpsız, yani $P_d = P_{yük}$ olduğu kabul edilirse;

$$\frac{I_{yük}}{I_d} = 1-D \quad (4.90)$$

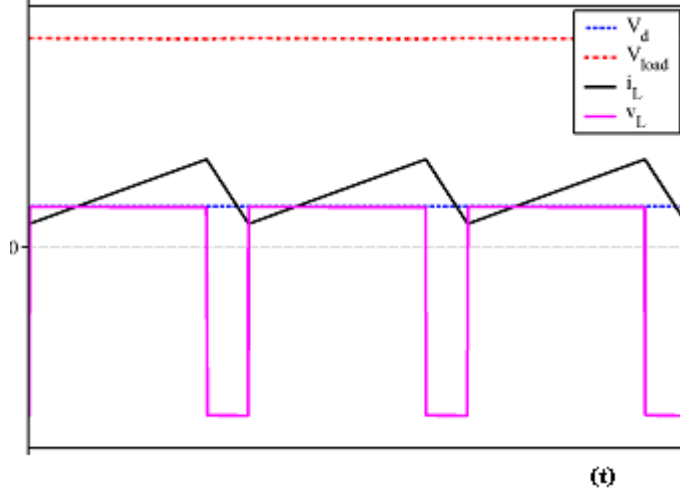
şeklinde yazılabilir.



Şekil 4.65: DA-DA çevirici yükseltici fotoğrafı



Şekil 4.66: DA-DA çevirici yükseltici devre şeması



Şekil 4.67: Yükseltici DA-DA dönüştürücünün sürekli akım çalışmasında gerilim ve akım değişimleri

Güç devresinde Kirşof yasası uygulandığında,

$$V_{in} - L \frac{di_L}{dt_{on}} = 0 \quad \text{den} \quad V_{in} - L \frac{\Delta i_L}{DT} f_{sw} = 0 \quad \text{ve düzenlenerek,} \quad (4.91)$$

$$V_{in}(DT) = L \Delta i_L f_{sw} \text{ olur.} \quad (4.92)$$

Burada D_T , T için doluluk oranını, f_{sw} ise dönüştürücüde anahtarlama frekansını tanımlar. Bu durumda doluluk oranının en küçük değeri;

$$D_{T \min} = 1 - \frac{V_{maks}}{V_{out}} f_{sw} = 0,12 \quad (4.93)$$

olarak hesaplanabilir. En büyük değeri ise;

$$D_{Tmaks} = 1 - \frac{V_{\min}}{V_{out}} = 0,32 \quad (4.94)$$

şeklinde hesaplanabilir. Böylece batarya deşarjında giriş-çıkış transfer fonksiyonu doluluk periyodu $0,12 \leq D_T \leq 0,3$ aralığında olur.

Devrede kullanılacak endüktans hesabı, fiziksel boyutlar ve akım darbe oranı açısından önemlidir. Akım darbe oranı, demir ve bakır kayıplarıyla gürültü seviyesi açısından endüktans değeri küçük tutulur. Akımdaki değişim %1 kabul edilirse, yani 100A civarında akım değerinde tepe-tepe değeri 2A olan değişim olduğu kabul edilebilir. Yani;

$$\Delta I = 2(0,01 I_{temel}) \quad (4.95)$$

şeklinde tanımlanabilir. Maksimum batarya deşarj geriliminde endüktans değeri;

$$L = \frac{V_{maks} \Delta t_{\min}}{\Delta I} = \frac{25.6.10^{-6}}{2} = 75 \mu H \quad (4.96)$$

olarak hesaplanabilir. Benzer şekilde akım darbelerini sınırlamak için gereken endüktans değeri ise;

$$L = \frac{V_{\min} \Delta t_m}{\Delta I} = \frac{20.16.10^{-6}}{2} = 160 \mu H \quad (4.97)$$

olarak hesaplanabilir.

Yükün çektiği maksimum akım;

$$I_Y = \frac{P_m}{V_{nom}} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{25} = 48A \quad (4.98)$$

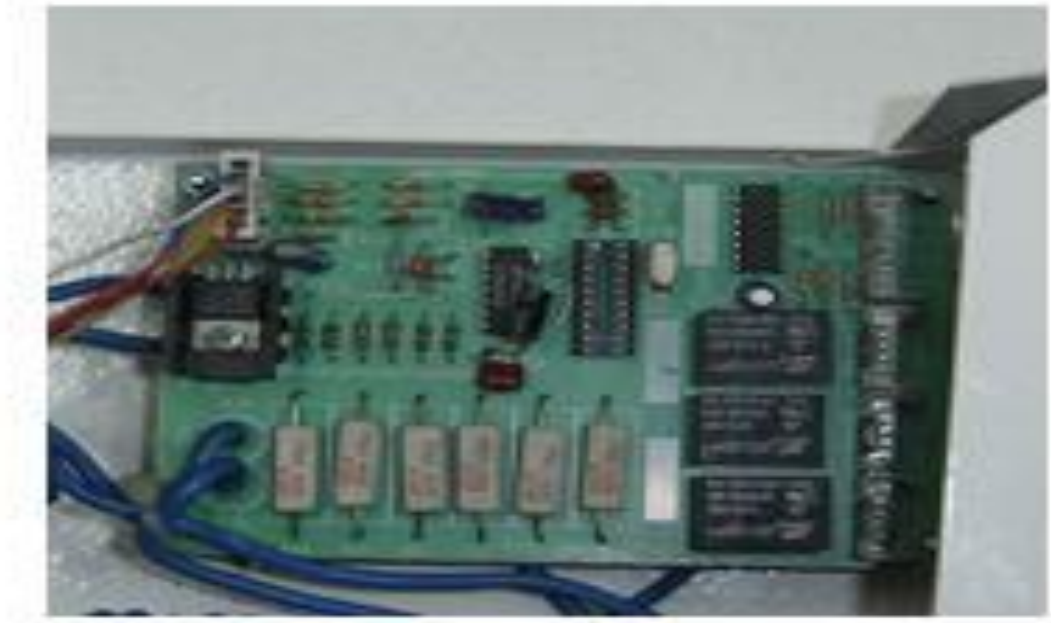
olur. DA barada oluşacak %2 oranındaki dalgalanma göz önüne alınarak;

$$C_{DAmin} = \frac{i_{cm} \cdot \Delta t_{maks}}{\Delta V} = \frac{48 \cdot 16 \cdot 10^{-6}}{0,5} \geq 1,536mF \quad (4.99)$$

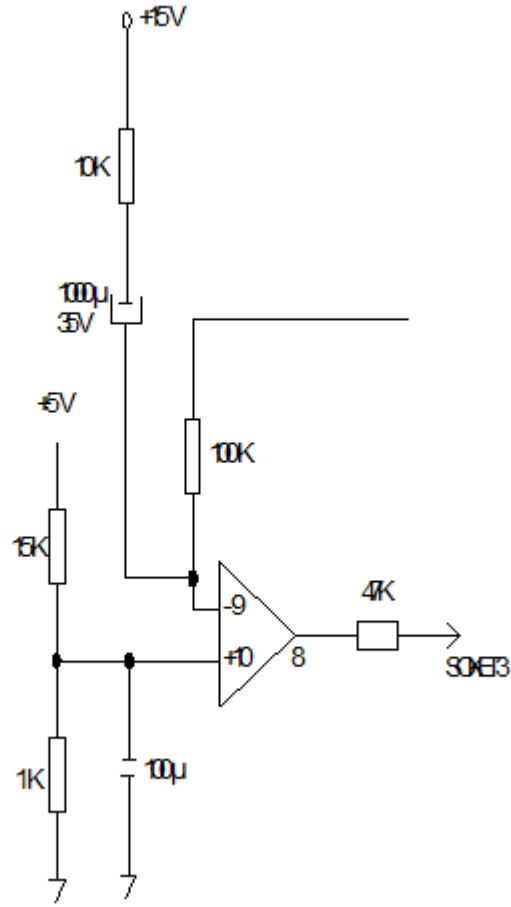
olur. Dönüştürücü decresi tasarımında sınır değerler belirlenerek nominal devre parametreleri bulunabilir.

4.6. Sınırlayıcı

Sınırlandırıcı Li-iyon pillerin şarj karakteristiği gereği 0.1C kadar şarj edilmesi gerektiğinden şarjı 2A olan 0.1C de kesmek için kullanılmakta olup gerçekleştirilen devrenin görünümü Şekil 4.68'de, devre şeması ise Şekil 4.69'de gösterilmiştir.



Şekil 4.68: DA-DA dönüştürücü için sınırlandırıcı devresinin görünümü



Şekil 4.69: DA-DA dönüştürücü için sınırlandırıcı devre algılayıcı prensip şeması

4.7. DA-AA Dönüştürücü (Evirici Devresi)

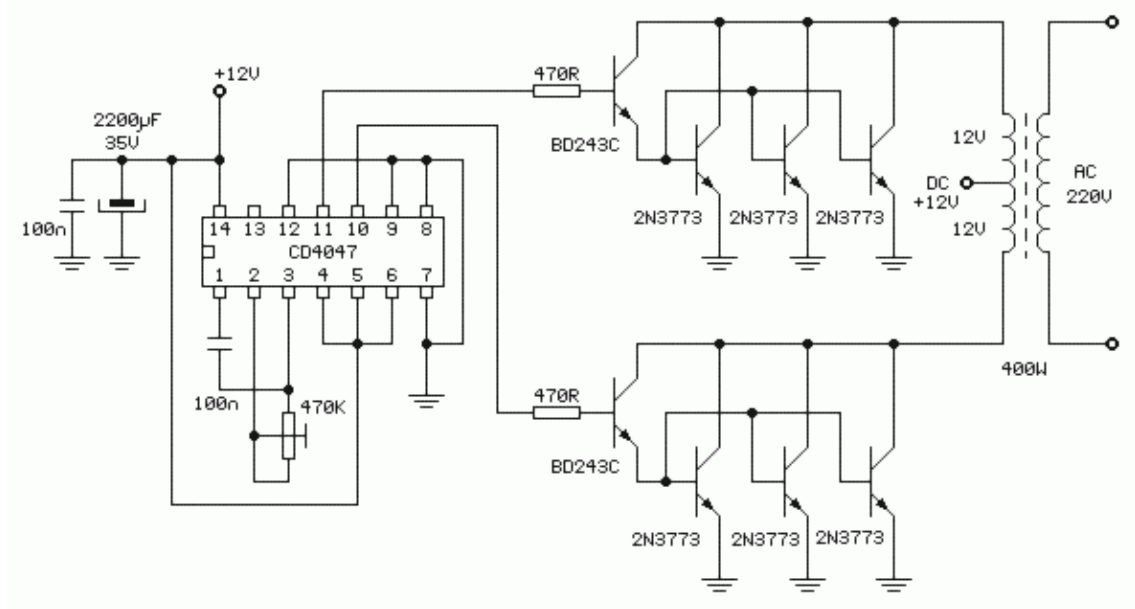
Kullanılan evirici devresi, 17-50VDA gerilimi gemi gerilimi olan 115V AA 60Hz değerlerinde bir şebekeye çevirmek için kullanılmaktadır. Devrenin ani gücü 1600W nominal gücü 1000W olup gerçekleştirilen devre görünümü Şekil 4.70'de verilmektedir.



Şekil 4.70: Çalışmada kullanılan DA/AA dönüştürücü olan eviricinin görünümü

Elektrik enerjisi DA olarak yakıt hücresinde üretilmekte ve Li-iyon pillerle depolanmaktadır. AA ile çalışan yükler için gereksinim duyulan gerilim, bu eviricilerle elde edilmektedir. İleri teknoloji ürün olan hassas cihazlarda sorunlarla karşılaşmamak ve maksimum güvenlik için evirici seçimi önemlidir.

Şekil 4.71’de prensip çalışması sembolize edilen ve çalışmada kullanılan DA-AA dönüştürücü fonksiyon olarak klasik eviriciler gibi çalışmaktadır. 4047 entegresi kare dalga osilatör olarak kullanılmıştır. Devredeki anahtarlama elemanları olarak transistör kullanılmaktadır. Bu tip dönüştürücülerde, akü ile dönüştürücü arasındaki bağlantı kabloları kısa tutulmalıdır.



Şekil 4.71: DA/AA dönüştürücü şeması

4.8. İzleme Sistemi

Yapılan sistemdeki gerilim, akım sıcaklık yük akımı gibi değerleri bilgisayar aracılığıyla izlenmesini sağlayan sistem olup fotoğrafı Şekil 4.72’de sunulmuştur.



Şekil 4.72: Güç izleme sistemi görünümü

4.9. Şarj Devre Donanımı

Şarj yönteminde sabit akım sabit gerilim yöntemi temel alınmıştır. Bu metot doğrultusunda, piller maksimum değeri olan DA 24.2 V'a ulaşana kadar, sabit akım yöntemi uygulanmaktadır. Bu aşamada piller kapasitelerinin %70'ine kadar şarj edilmiştir. Pillerin %100 kapasite ile doldurulabilmesi için, pillerin DA 24.2 V sabit gerilimde pil grubu 0.1C olana kadar sabit gerilim altında tutularak pilin %100 şarj edilmiş olması sağlanmaktadır.

Devrede önemli bir özellik de pillerin maksimum kapasitesine ulaşması esnasında, dengesiz biçimde yüklenme olasılığıdır. Bunu önlemek için hücrede dengeleme yöntemi kullanılmıştır.

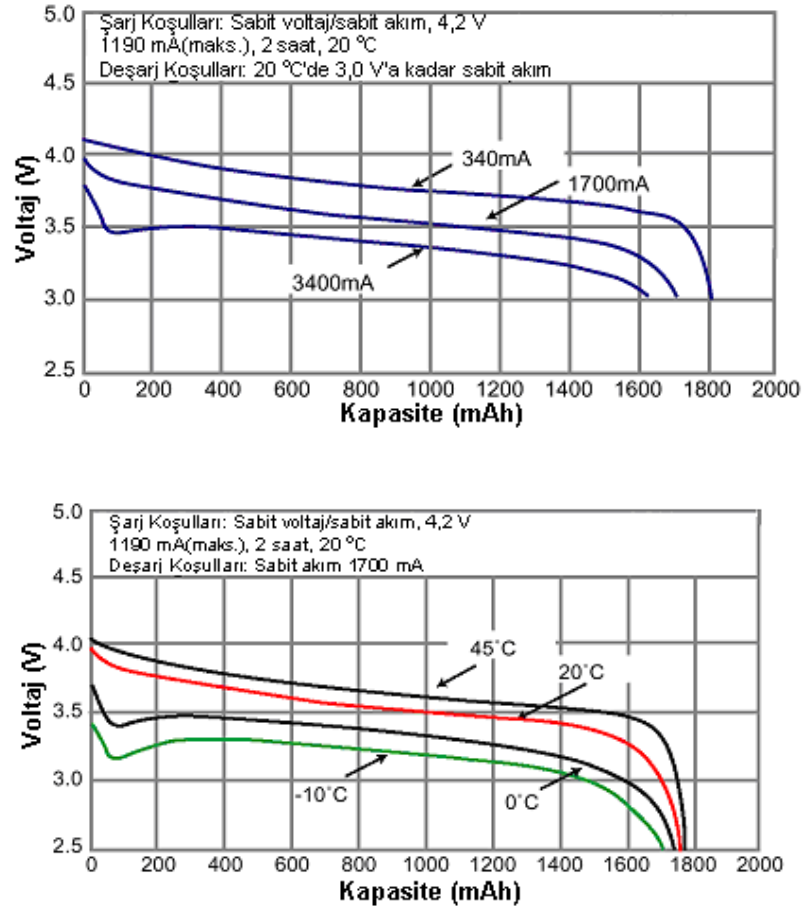
Li-iyon pillerin sınıflarına bağlı olarak bazıları 2,5 V'ten 4,2 V'a kadar geniş bir gerilim aralığı göstererek 3,5 V ve 4,2 V aralığında kalmaktadır. Bu farklılıklar

genellikle üretim ve montaj teknolojisinden kaynaklanabileceği gibi kullanılan malzemenin farklılığından da kaynaklanabilmektedir [54].

4.9.1. Şarj Kontrol Sistemi

Pillerin tam olarak ve dengeli bir biçimde şarjının kontrolü için şarj denetim sistemine gereksinim vardır [52].

Şekil 4.73'de Li-iyon pil deşarj özeğrileri gösterilmiştir. Pil, 4,2V tan deşarj son gerilimi olan 3V a kadar deşarj olmaktadır. Pil endüktansına bağlı olarak daha kullanışlı uygulama yapılma olanakları oluşturulabilir.



Şekil 4.73: Farklı deşarj oranları ve farklı sıcaklıklarda bir Li-iyon pilinin deşarj özeğrileri
Devrede mikrokontrolör denetiminde, gerilim seviyesi algılanmaktadır. Uygun donanım ile göstergelere aktarılan sinyal ile gerilim seviyesi gözlenmektedir. Pillerin tam olarak şarj edildiği durumda, bağlantı kesilerek şarj işlemi durdurulmaktadır.

Bununla birlikte piller tam olarak şarj edilmediğinde, gerilim ve sıcaklık değerleri her bir pil için algılanarak, normal şartlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler, olması gereken değerlerin dışında olduğunda, se sistem bir alarm sinyali üreterek bigi vermektedir. Algılanan hata sinyalleri vasıtasıyla, piller arasındaki en dengesiz şekilde şarj edilmiş pil tespit edilerek sorun giderilebilmektedir. Şarj süresi boyunca pile ulaşan akım değeri sürekli olarak ölçülüp karşılaştırılmıştır. Şarj işlemi tamamlandıktan sonra ve akım kesilmeden hemen önce piller ile ilgili bilgiler denetleyiciden gösterge ekranı veya bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır. Şarj için kullanılan elektrik akımı kesildikten sonra, piller kullanıma hazır duruma gelmektedir.

Bir ya da birden fazla pil maksimum gerilim değerine ulaştığında, şarj işlemi durdurulmaktadır. Bununla birlikte maksimum gerilim değerine ulaşmış olan piller en büyük ve en küçük değerleri belirlenen ve izin verilen aralığa ulaşınca kadar deşarj işlemi devam etmesi için yük uygulamasına izin vermektedir.

Şarj işlemi sadece akım değeri 0,1C'a ya da daha alt değere düştüğünde ve Li-iyon piller tamamen şarj edildiğinde sona erdirilmektedir [14].

4.9.2. Güvenlik ve Koruma

Li-iyon piller her ne kadar birçok avantaja sahip olsa da kimyasal içeriğinden dolayı bazı zararları da bulunmaktadır. Pillerin şarj esnasında gerilim değerinin sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir. Çekilen akımın değeri de izin verilen maksimum aralığın dışına çıkması istenmez. Sıcaklık, şarj esnasında dikkat edilmesi gereken bir değer önemli özelliktir. Ortam oda sıcaklığı 25 C° olduğu durumlarda, işletme sıcaklığı 40 C°'den düşük olmalıdır [53]. Şarj çevrimi esnasında pillerde kısa devre oluşmasını önlemek amacı ile sistem içersinde sigorta ve elektromekanik donanım kullanılmaktadır. Uygulamalarda güvenlik ve koruma önlemleri göz önüne alınmaktadır [15].

4.9.3. Diğer Donanımlar

Tasarlanan deneysel devrede kullanılan yakıt pili, pil şarj ediciler, maksimum 4,2 voltta ve her bir pil 2 Ah akımı karşılayacak biçimde ayarlanmış olup 6 adet seri bağlı pilin oluşturduğu 10 lu paralel grubun şarj edilebilmektedir.

Bu sistem içeriğinde iki ana bölüm bulunmaktadır. İlk bölüm sabit-akım/sabit-gerilim kaynağı kullanılarak elde edilen yüksek güç kontrolü, dolaşım dengelenmesi ve yedek dolaşımdır. İkinci bölüm, düşük güç kontrolü bilgi kontrol dolaşımı ve sistemi oluşturan malzeme çevrimidir. Bu iki bölüm ve koruma sistemi özellikle oluşabilecek kısa devrelerden korunmak amacı ile oluşturulmuştur [16].

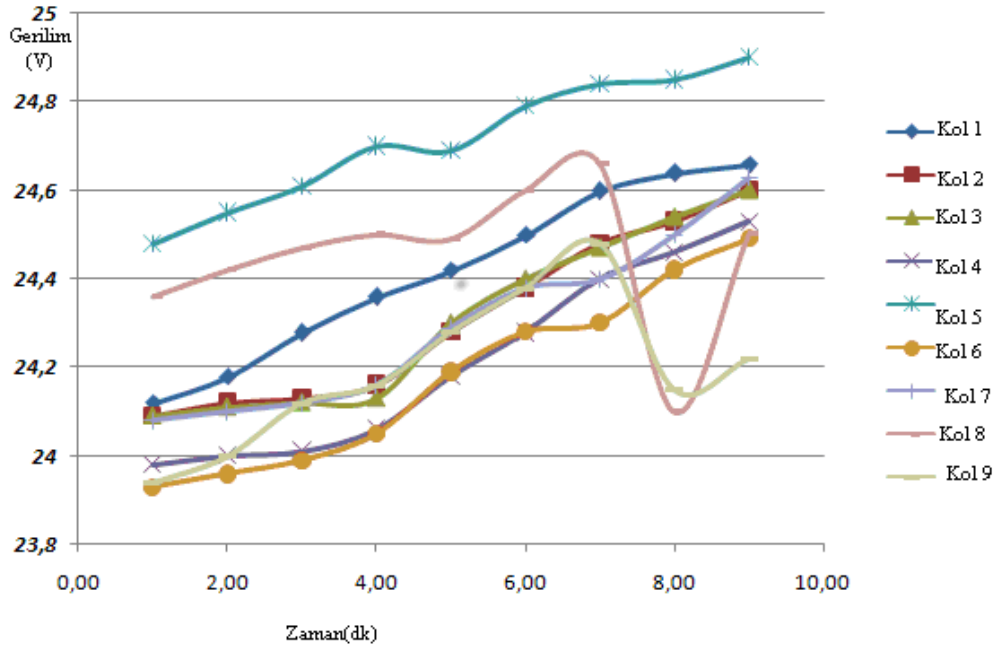
5. TEST SONUÇLARI

5.1. Şarj Eğrisi

Li-iyon pillerin şarj esnasında elde edilen değerler Tablo 5.1’de gösterilmiş olup her bir pil grubunun gerilim zaman eğrisi Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Kol 9’da görüldüğü gibi 6. dakikadan sonra aniden düşen gerilim seviyesinin batarya grubunda bir tane pilin tahrip olduğunun göstergesidir.

Tablo 5. 1: Li-iyon pil şarj değerleri

PİLLERİN ŞARJ TABLOSU																
BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ	YÜKSELTİCİ GİRİŞ VOLTAJİ (V)				YÜKSELTİCİ ÇIKIŞ VOLTAJİ (V)				BATARYA ŞARJ VOLTAJİ (V)							
	37.58				34.95				25.45							
ZAMAN	14:35	14:40	14:50	14:55	15:05	15:15	15:25	15:35	14:35	14:40	14:50	14:55	15:05	15:15	15:25	15:35
BATARYA VOLTAJİ (V)	23.45	24.08	24.90	24.93	25.00	25.18	25.70	25.31	23.45	24.08	24.90	24.93	25.00	25.18	25.70	25.31
ŞARJ AKİMİ (A)	14.0	11.4	9.2	8.7	8.0	6.7	5.7	4.6	14.0	11.4	9.2	8.7	8.0	6.7	5.7	4.6
	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ	AKİM	VOLTAJ
1. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.0	24.12	1.0	24.18	0.3	24.28	0.4	24.36	0.2	24.42	0.3	24.50	0.5	24.60	0.3	24.64
2. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.8	24.09	2.5	24.12	2.0	24.13	1.9	24.16	1.6	24.28	1.5	24.38	1.3	24.48	1.1	24.53
3. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.4	24.09	2.5	24.11	1.8	24.12	1.7	24.13	1.3	24.30	1.2	24.40	1.1	24.47	0.8	24.54
4. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.5	23.98	2.4	24.00	1.9	24.01	1.8	24.00	1.0	24.18	1.5	24.28	1.3	24.40	1.0	24.46
5. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	0	24.48	0.5	24.55	0.2	24.01	0.2	24.70	0.1	24.69	0.7	24.79	0.3	24.84	0.3	24.85
6. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.3	23.93	2.4	23.96	1.7	23.99	1.6	24.05	1.2	24.19	1.2	24.28	1.1	23.17	0.8	24.42
7. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	2.7	24.08	2.7	24.10	2.0	24.12	1.8	24.16	1.6	24.29	1.6	24.38	1.2	24.40	1.0	24.50
8. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	0	24.38	0.8	24.42	0.2	24.47	0.3	24.50	0.1	24.49	0.3	24.60	0.3	24.66	0.3	24.10
9. KOL ŞARJ AKİMİ VE KOL VOLTAJİ (A / V)	1.0	23.94	1.5	24.00	0.8	24.12	0.8	24.10	0.5	24.28	0.7	24.38	0.6	24.48	0.5	24.15



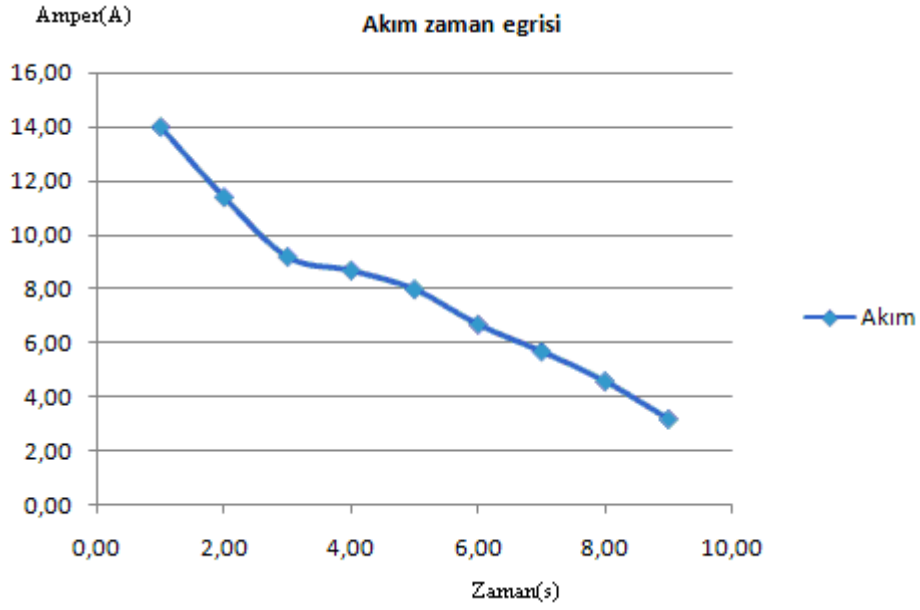
Şekil 5.1: Farklı konumlarda şarj özgeğirileri

5.2 Deşarj Eğrisi

Li-iyon pillerin şarj esnasında deneysel olarak elde edilen değerler Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2: Li-iyon pil deşarj değerleri

TARİH:16 Ocak 2009		DEŞARJ BAŞLANGICI											
1 Saat :13:00													
1/1	4.3	1/2	4.36	1/3	3.48	1/4	4.05	1/5	4.09	1/6	4.36		
2/1	4.00	2/2	3.98	2/3	3.98	2/4	3.98	2/5	3.99	2/6	3.96		
3/1	4.06	3/2	4.04	3/3	3.88	3/4	4.05	3/5	4.06	3/6	4.03		
4/1	3.95	4/2	3.97	4/3	3.94	4/5	4.00	4/6	3.95	4/7	4.00		
5/1	4.35	5/2	4.28	5/3	2.78	5/4	4.29	5/5	4.39	5/6	4.31		
6/1	3.89	6/2	3.86	6/3	4.06	6/4	4.07	6/5	4.04	6/6	4.06		
7/1	3.96	7/2	3.98	7/3	3.96	7/4	4.01	7/5	3.99	7/6	3.85		
8/1	4.5	8/2	4.5	8/3	4.5	8/4	4.5	8/5	0	8/6	4.5		
9/1	3.8	9/2	4.00	9/3	4.12	9/4	3.92	9/5	3.98	9/6	3.98		
											Toplam		
											Gerilim:	23.94	



Şekil 5. 2:Pil deşarj akımının zamana göre değişim eğrisi

5.3. Deneysel Yük

Deneysel sistem tasarımı, yükün özelliği gereği akımının nominal değerde olması halinde pil gurubu off yapılarak yükün yakıt pilinden beslenmesini sağlayacak niteliktedir. Yük akımın yakıt pilinden sağlanamayacak durumunda pilden karşılanmasını sağlayacak ve pil ile yük arasında bir denge kuracak şekilde tasarlanmıştır. Tez çalışmasında özgün bir uygulama olarak yakıy pili ile bir savaş denizaltısı yük olarak planlanmıştır. Ancak bu uygulama olanağı elde edilemediği için benzer karakteristiğe sahip darbeli bir yüke uygulanmıştır. Bu amaçla, uygulama için darbeli akım çekecek ve ilk uygulamalardan birini oluşturan bir geminin telsiz kamerası tercih edilmiştir. Deneysel sonuçlar bu platformda yapılmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile yakıt pilinin kullanım alanını genişletilmesindeki temel basamak olan darbeli güç gereksinimi duyan sistemlerde kullanılabilmesi için Li-iyon pil destekli özgün bir uygulama hedeflenmiştir. Yerli olarak ülkemizde üretilen bir yakıt pilinin akım gerilim eğrisi, çektiği güce göre yakıt tüketimi üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Su üstü bir platformdaki yüke uygulanabilmesi için gerekli sistemin tasarım çalışmaları yapılmıştır. Deney çalışmaları Li-iyon pillerin şarj-deşarj karakteristiği göz önüne alınarak yakıt hücresinden beslenerek darbeli bir yükü beslemedeki davranış ve başarısı incelenmiştir. Gelecekte, Li-iyon pil şarjını verimli şekilde gerçekleştirecek DA/DA dönüştürücülerin mikroişlemcilerle denetimi üzerinde yapılan çalışmalar geliştirilerek kontrol çevrimi, dengeleme çevrimi gibi faktörlere bağlı olarak oluşan güç kaybı ve güç harcanması açısından sistem verimliliğinin artırılması yakıt pilinin etkinliği genişletilebileceği düşünülmektedir. Tezde yapılan araştırmalarla bu çalışmalara bir altyapı katkısı sağlanmıştır.

Bu çalışma sonucunda, yakıt pillerinin uygulama, kullanım ve üretimine olumlu katkılar sağlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bir su üstü platform olan gemilerde ve hatta savaş gemisine veya yakın gelecekte denizaltı taşıtlarına uygulanabilecek bilgi ve deneysel deneyim katkıları sağlamıştır.

Deneysel çalışmaların olumlu sonuç vermesi daha büyük güçteki sistemlerin tasarım ve üretiminde alt yapı desteğinin hazır olmasını sağlamamıştır. Böylece, havadan bağımsız denizaltı üretiminde güç destek ünitesinin yerli imkanlarla üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Bu çalışma ile yakıt pilinin bir türk savaş gemisinde ilk kez kullanımı gündeme gelmiştir. Bu çalışma, Türk bahriyesini yakıt pilini kullanabilen ender ülkeler arasına sokmakla birlikte Türk bahriyesinin yakıt pilli sistemlere aşinalığı ile yapılan deneysel çalışmanın deniz tecrübeleri sonucunda yakıt pili sistemine ait deneysel

bilgilere sahip olunabilecektir. Özellikle yakıt hücresi ile üretilen enerjinin bir Li-iyon pil grubu ile desteklenerek su üstü platformlardaki darbeli akım çeken yüklerin enerji gereksinimini sağlaması açısından özgün uygulamadır. Sonraki aşamalarda yapılacak araştırmalarda, sistemin verimini arttırmak, kontrol olanakları ve alanını genişletmek, güç üretim seviyesini daha yüksek değerlere çıkartmak ve özellikle gemi tahrik sisteminin enerji gereksinimini karşılamak alanında altyapı katkısı olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhuo, J., Chakrabarti, C., Chang, N., and Vrudhula. S. "Extending the lifetime of fuel cell based hybrid systems", *In in Proc. of DAC*, 56-267, (2006).
- [2] Gonai, T., Kiyokawa, T., Yamazaki, H., and M. Got. "Development Of The Lithium Ion Battery System For Space", 19-23, (2003).
- [3] Spotnitz, R., "Advanced EV and HEV Batteries", *IEEE*, (2005).
- [4] Dyer, C. K., "Fuel Cells ve Portable Electronics", *Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers*, (2004).
- [5] Elias, M. F. M., Nor, K. M., ve Arof, A. K., "Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Batteries", *IEEE PEDS*, (2005).
- [6] Hwang, Y., Wang, S., Yang, F., Chen, J., Lee, W. "New Li-ion Battery Charger Based on Charge-Pump Techniques", *IEEE*, (2006).
- [7] Chen, L., Chou, C., Han, G., Chang, H., Lin, Y. "A Design of a Digital Frequency-Locked Battery Charger for Li-ion Batteries", *IEEE ISIE*, (2005).
- [8] Adams, W. A., Blair, J. D., Bullock, K. R., Gardner, C.L., Li, L. W. "Cost/Benefit Analyses of a New Battery Pack Management Technique for Telecommunication Application:Future Directions with Fuel Cell/Battery Systems", *IEEE*, (2004).
- [9] Lopez, J., Gonzalez, M., Viera, J. C., Blanco, C., "Fast-Charge in Lithium-Ion Batteries for Portable Applications", *IEEE*, (2004).
- [10] Yang, F., Chen, C., Chen, J., Hwang, Y., Lee, W. "Hysteresis-Current Controlled Buck Converter Suitable for Li-ion Battery Charger", *IEEE*, (2006).
- [11] Chern, T. L. ve Pan, P. L. "The Research of Smart Li-ion Battery Management System", *IEEE* (2007).
- [12] Butler, P., Delnick, F., Ripple, R., Peterkin, F. "Assessment of Rechargeable batteries for high power applications", *IEEE* (2004).
- [13] Palma, L. ve Enjeti, P. "A modular Fuel Cell, Modular DA-DA Converter Concept for High Performance and Enhanced Reliability", *IEEE*, (2007).
- [14] Chen, L., Hsu, R., Liu, C., Yen, W., Chu, N., Lin, Y. "A Variable Frequency Pulse Charge Strategy for Li-ion Battery", *IEEE ISIE*, (2005).

- [15] Takeno, K., Ichimura, M., Yamaki, J., “Methods of Energy Conservation and Management for Commercial Li-ion Battery Packs of Mobil Phones”, *IEICE/IEEE INTELEC*, (2003).
- [16] Potanina, E. E. ve Potanin, V. Y. “Li-ion Battery Charger with Three-Parameter Regulation Loop”, *IEEE*, (2005).
- [17] Yan, W. M., Wang, X. D., Lee, D. J., Zhang, X. X., Guo, Y. F. ve Su, A. “Experimental study of commercial size proton Exchange membrane fuel cell performance”, *Applied Energy*, (2010).
- [18] Mathiak, J., Heinzl, A., Roes, J., Kalk, T., Kraus, H. ve Brandt, H. “Coupling of a 2.5 kW steam reformer with a 1 kW PEM fuel cell”, *Journal of Power Sources*, 131, 112-119, (2004).
- [19] D. Gervasio, S. Tasic, and F. Zenhauser, "A room temperature micro-hydrogen-generator," *Journal of Power Sources*, vol. 149, pp. 15-21, 2005.
- [20] Papageorgopoulos, D., “DOE fuel cell technology program overview and introduction to the 2010 fuel cell pre-solicitation workshop in DOE fuel cell pre-solicitation workshop”, *Department of Energy*, Lakewood, Colorado, (2010).
- [21] Appleby, A. J. ve Yeager, E. B. “Solid polymer electrolyte fuel cells (SPEFCs)”, *Energy*, 11, (1–2), 137–152, (1986).
- [22] Raistrick, I. D., “Modified gas diffusion electrode for proton exchange membrane fuel cells. In: Proceedings of the symposium on diaphragms, separation, and ion-exchange membranes. Ponnington (NJ)”, *Electrochemical Society*, (1986).
- [23] Gittleman, C., Jorgensen, S., Waldecker, J., Hirano, S., Mehall, M. “Automotive fuel cell R&D needs. In: DOE fuel cell pre-solicitation workshop”, *Department of Energy*, Lakewood, Colorado, (2010).
- [24] Garce, J. and Jorissen, L., “PEMFC fuel cell. In: W. Vielstich, H. Gasteiger and A. Lamm, Editors, Handbook of fuel cells: fundamentals, technology and applications”, *John Wiley & Sons*, (2003).
- [25] Geiger, S. ve Copper, M. A. J. “Fuel cell small stationary market survey”, *Fuel Cell Today*, (2003).
- [26] Pander, J. “Hamburg speeds up preparation for fuel-cell cars.” *In: Spiegel. SPIEGELnet GmbH*, Hamburg, (2009).
- [27] Zhang, S. et al., “A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells”, *Int J Hydrogen Energy*, 34 (1), 388–404, (2009).
- [28] Borup R, et al. “PEM fuel cell durability”, “2008 DOE hydrogen program review” June 9–13, (2008).

- [29] Schmittinger, W. ve Vahidi, A. “A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells”, *J Power Sources*, 180 (1), 1–14, (2008).
- [30] Borup, R. et al. “Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation”, *Chem Rev*, 107 (10), 3904–3951, (2007).
- [31] Wood, D. L. ve Borup, R. L. “Polymer electrolyte fuel cell durability”, *Springer*, New York, 159, (2009).
- [32] Lipman, T. ve Sperling, D. “Market concepts, competing technologies and cost challenges for automotive and stationary applications. In: W. Vielstich, H. Gasteiger and A. Lamm, Editors, Handbook of fuel cells: fundamentals, technology and applications”, *John Wiley & Sons*, 1318–1328, (2003).
- [33] McNicol, B. D., Rand, D. A. J. ve Williams, K.R. “Fuel cells for road transportation purposes – yes or no”, *J Power Sources* 100 (1–2), 47–59, (2001).
- [34] Gostick, J. T. et al. “On the role of the microporous layer in PEMFC operation”, *Electrochem Commun* 11 (3), 576–579, (2009).
- [35] Weber, A. Z. ve Newman, J. “Effects of microporous layers in polymer electrolyte fuel cells”, *J Electrochem Soc*, 152 (4), A677–A688, (2005).
- [36] Pasaogullari, U., Wang, C. Y. ve Chen, K. S. “Two-phase transport in polymer electrolyte fuel cells with bilayer cathode gas diffusion media”, *J Electrochem Soc*, 152 (8), A1574–A1582, (2005).
- [37] Wang Y, ve Chen KS., Predicting through-plane water distribution in a polymer electrolyte fuel cell “*8th International fuel cell science, engineering & technology conference*”, Brooklyn, NY, (2010).
- [38] Mukundan, R. “Imaging of water profiles in PEM fuel cells using neutron radiography: effect of operating conditions and GDL composition”, *ECS Meet Abstracts*, 702 (9), 406, (2007).
- [39] Hickner, M. A. et al. “In situ high-resolution neutron radiography of cross-sectional liquid water profiles in proton exchange membrane fuel cells”, *J Electrochem Soc*, 155 (4), B427–B434, (2008).
- [40] Kramer, D. et al. “In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging: Part A. Experimental, data treatment, and quantification”, *Electrochim Acta*, 50 (13), 2603–2614, (2005).
- [41] Lehmann, E. H., Oberholzer, P., Boillat, P., “Neutron imaging methods for the investigation of energy related materials: fuel cells, batteries, hydrogen storage, and nuclear fuel”, *In: Mater res soc symp proc*, W05-01, (2010).

- [42] Ji, Y., Luo, G., Wang, C-Y “Computer simulation of liquid water transport at pore level in MPL and GDL and their interface”, *In: ASME eighth international fuel cell science, engineering & technology conference*, Brooklyn, NY, (2010).
- [43] Borup, R. “FC-35: water transport exploratory studies”, *In: Energy Do, editor, Hydrogen program review*, (2009).
- [44] Wang, Z. H., Wang, C.Y., ve Chen, K.S. “Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells”, *J Power Sources* 94 (1), 40–50, (2001).
- [45] Natarajan, D. ve Nguyen, T. V. “A two-dimensional, two-phase, multicomponent, transient model for the cathode of a proton exchange membrane fuel cell using conventional gas distributors”, *J Electrochem Soc* 148 (12), A1324–A1335, (2001).
- [46] Mazumder, S. ve Cole, J. V. “Rigorous 3-D mathematical modeling of PEM fuel cells”, *J Electrochem Soc* 150 (11), A1510–A1517, (2003).
- [47] Ohn, H. et al. “Capillary pressure properties of gas diffusion materials used in PEM fuel cells”, *ECS Trans*, 1 (6), 481–489, (2006).
- [48] Nguyen, T. V. et al. “Measurements of two-phase flow properties of the porous media used in PEM fuel cells”, *ECS Trans*, 3 (1), 415–423, (2006).
- [49] Fairweather, J. D. et al. “A microfluidic approach for measuring capillary pressure in PEMFC gas diffusion layers”, *Electrochem Commun*, 9 (9), 2340–2345, (2007).
- [50] Sole, J. D. ve Ellis, M. W. “Determination of the relationship between capillary pressure and saturation in PEMFC gas diffusion media”, *In: Fuel cell* (2008).
- [51] Wood, D. L., Rulison, C. ve Borup, R. L. “Surface properties of PEMFC gas diffusion layers”, *J Electrochem Soc* 157 (2), B195–B206, (2010).
- [52] Wood, D. L. ve Borup, I. R. L. “Estimation of mass-transport overpotentials during long-term PEMFC operation”, *J Electrochem Soc* 157 (8), B1251–B1262, (2010).
- [53] Mukherjee, P. P., Mukundan, R. ve Borup, R. L. “Modeling of durability effect on the flooding behavior in the PEFC gas diffusion layer”, *In: Proceedings of ASME fuel cell 2010, 8th ASME international fuel cell science, engineering, and technology conference*; (2010).
- [54] Karvonen, S. et al. “Modeling of flow field in polymer electrolyte membrane fuel cell”, *J Power Sources* 161 (2), 876–884, (2006).

- [55] http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/9900/bio_fuel_cells/groupproject/library/constructionefficiency/text.htm, 05.07.2011 10:30
- [56] Eileen,J.,2003,*Solid Oxide Fuel Cells* [online], <http://www.csa.com/discoveryguides/fuecel/overview.php>- (Ziyaret Tarihi:5 Kasım 2011)
- [57] Siemens, 2010, Elektrikle Tahrik Sistemi [online], http://www.siemens.com.tr/web/1416-12393-1-1/siemens_urunler_cozumler/marine/uygulamalar/elektrikle_tahrik_sistemi#toc-p1, (Ziyaret Tarihi: 5 Kasım 2011)
- [58] Lijun Gao, Shengyi Liu, and Roger A. Dougal,2002, “Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation”,*IEEE*, VOL. 25, NO. 3,495-505, (2002).
- [59] ROSARIO, L., C., “Power and Energy Management of Multiple Energy Storage Systems in Electric Vehicles”, PhD Thesis, *Department of Aerospace Power & Sensors, Cranfield University*, (2007).
- [60] Tallner, C., Simon Lannetoft, S., “Batteries or supercapacitors as energy storage in HEVs”, *Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University*,1-71,(2005).
- [61] Hadartz, M., Julander, M., “Battery-Supercapacitor Energy Storage”, Master of Science Thesis, *Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Göteborg*,(2008).
- [62] “Worleyparsons Energy Cells, Lithium Polymer Cell Performance”, SLPB526495, Nisan 2005.
- [63] Zhao, L., and Qian, J., “DC-DC Power Conversions and System Design Considerations for Battery Operated System” *Texas Instruments*. Amerika, 2006.
- [64] Yao, D., L., and Choi, S., S., “Detemination of the Capacity and Performance of Battery Storage Systems Used in Renewable Power Generation Schemes”, *Singapore 16.PSCC*, İsviçre,14-18 Temmuz(2005).
- [65] Ortaç, O., “DA/AA Dönüştürücü” Yüksek Lisans Tezi,*Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Ankara,(2007).
- [66] Abut, N., “Güç Elektroniği, Yarıiletken ve Dönüştürücüler” *Birsen Yayınevi*, 2004. İstanbul.
- [67] Nilsson, J., K., “High Power Multylevel DC/DC Converter”, Bachelor of Engineering, Division of Electrical Engineering, *University of Queensland*, (2002).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar TÜBİTAK tarafından onaylanmış olan SCI'da yer alan dergide yayınlanmıştır.

Abut, N., Turhan, M. “Yakıt Pillerinin Darbeli Akım İhtiyacı Duyan Sistemlerdeki Dizayn Prensipleri”, ELECO 2008

Abut, N., Turhan, M. “Utilization of Li-ion Battery Assisted Fuel Cell System in Warships”, Fuel Cell Science and Technology, Eylül 2011

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Gaziantep'in Nizip ilçesinde dünyaya geldi İlk orta ve lise eğitimini Konya da tamamladı. 1999 yılında Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nden mezun oldu. Deniz Kuvvetleri Komutanlığında Teğmen rütbesiyle göreve başladı. 2003 yılında Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri A.B.D. dan Enerji Sistem Uzmanı olarak mezun oldu. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. Halen İzmir Tersane Komutanlığında Elektrik Tasarım Şube Müdürü olarak görevine devam etmekte olup evli ve bir erkek çocuk babasıdır.