

Güç Elektroniği Dönüştürücüleri ile Ultrakondansatörlerin Enerji Yönetimi

Energy Management of Ultracapacitors with Power Electronics Converters

Hasan Hüseyin EROĞLU¹, Ahmet M.Hava²

¹TSK Rehabilitasyon ve Bakım Merkezi
Gülhane Askeri Tıp Akademisi
hheroglu@gata.edu.tr

²Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
hava@eee.metu.edu.tr

Özet

Ultrakondansatörler (UK) yüksek sığa, düşük eşdeğer seri direnç (ESD) ve düşük anma gerilim değerleri olan kondansatörlerdir. UK'lerin geleneksel kondansatörlere göre enerji yoğunluğu, akülere göre ise güç yoğunluğu daha yüksektir. UK uygulamaları incelendiğinde temel işlevin doldurma ve boşaltma süreçlerindeki enerji yönetimi olduğu görülmekte ve güç elektroniği dönüştürücülerinin (GED) UK'lerin doldurma ve boşaltma süreçlerindeki enerji yönetiminin sağlanması amacıyla kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, UK'lerin temel özellikleri ve UK uygulamalarında kullanılacak GED yapıları incelenmiş, UK'lerin istenilen akım profilinde doldurma ve boşaltma işlevlerinin sağlanmasında kullanılacak bir GED yapısı gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen dönüştürücü ile bir UK modülü sabit akım doldurma ve boşaltma süreçlerine tabi tutulmuştur. Dönüştürücü başarımı deneysel olarak aktarılmıştır.

Abstract

Ultracapacitors (UC) are capacitors with high capacitance, low equivalent series resistance (ESR), and low rated voltage values. Energy density of UCs is higher than conventional capacitors, whereas their power density is higher than batteries. When UC applications are investigated, it is seen that energy management in the charging and discharging processes is the basic operation, and power electronics converters (PEC) could be utilized for energy management in these processes of UCs. In this study, basic properties of UCs and PEC topologies for managing the charging and discharging processes of UCs are reviewed. A PEC structure that could be utilized for managing the charging and discharging processes of UCs with predetermined current profiles is implemented. With the implemented PEC structure, a UC module is put in a constant current charging and discharging process. The performance of the converter is demonstrated by means of experimental results.

1. Giriş

Ultrakondansatörler (UK); yüksek sığa ($>1000F/kg$), düşük eşdeğer seri direnç (ESD) ($<1m\Omega$) ve düşük anma gerilim ($\sim 2.5V$) değerleri olan kondansatörlerdir [1-6]. UK'lerin enerji yoğunlukları geleneksel (elektrolitik) kondansatörlerin enerji yoğunluklarından büyük olup, güç yoğunlukları ise geleneksel kondansatörlere göre daha küçüktür. Akü teknolojisi ile karşılaştırma yapıldığında ise UK'lerin enerji yoğunluklarının akülerinkinden düşük olduğu, ancak UK güç yoğunluklarının akülerin güç yoğunluğunun oldukça üzerinde olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, UK'lerin enerji ve güç yoğunlukları açısından akü ve geleneksel kondansatörlerin arasında yer aldığı görülür [2]. Akü teknolojisi ile ısı, döngüsel ve azami güç başarımları çerçevesinde karşılaştırıldığında, daha üstün özellikleri olan UK'ler [3]; elektrikli araçların darbe gücü, kesintisiz güç kaynaklarının köprü gücü, elektronik cihazların tepe gücü ihtiyaçlarının sağlanması gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [4]. UK'lerin temel götürüsü 2.5V düzeyindeki düşük anma gerilim değerleridir. Bu nedenle, birçok uygulamada UK hücrelerinin seri bağlanmasıyla oluşturulan daha yüksek anma gerilim değerleri olan modüller kullanılmaktadır [4]. UK'ler kullanım biçimleri çerçevesinde değerlendirildiğinde, uygulamalardaki temel işlevin doldurma ve boşaltma süreçlerindeki enerji yönetimi olduğu görülmektedir. Bu noktada, UK'lerin doldurma ve boşaltma süreçlerinde enerji yönetiminin sağlanması amacıyla güç elektroniği dönüştürücülerinden (GED) yararlanılabileceği değerlendirilmektedir [1].

Bu çalışmada; UK'lerin temel özellikleri ele alınmış, UK uygulamalarında kullanılacak GED yapıları incelenmiş ve UK'leri istenilen akım profilinde doldurma ve boşaltma süreçlerine tabi tutabilecek bir GED yapısı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen GED yapısıyla beş adet UK hücresinin seri bağlanmasıyla oluşturulan bir UK modülü sabit akım doldurma ve boşaltma süreçlerine tabi tutulmuştur ve GED yapısının başarımına ilişkin deneysel sonuçlar aktarılmıştır.

2. UK'lerin Temel Özellikleri

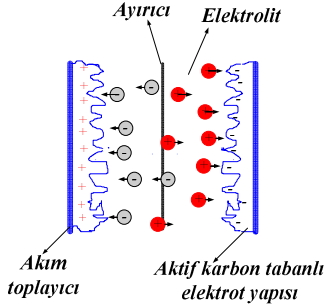
Günümüzde UK ürünleri geniş bir sığa ve dar bir anma gerilim aralığında müşteriye sunulmaktadır. Bazı UK üreticilerinin ürün bilgileri Tablo 1'de gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi UK'lerin sığa değerlerinin birkaç farad değerinden binlerce farada kadar değişebildiği ve bu değerlerinin sığa değerleri mikro farad (μF) veya mili farad (mF) ölçeğinde belirtilen elektrolitik kondansatörlere (EK) oranla oldukça büyük olduğu gözlenmektedir. Tablo 1'de belirtilen anma gerilim değerleri incelendiğinde, UK'lerin anma gerilim değerlerinin, sığa değeri büyük olan ürünlerde 2.3-2.7V aralığında olduğu, sığa değeri düşük olan ürünlerde ise 5.5V seviyesine ulaştığı görülmektedir.

Tablo 1: Bazı UK üreticilerinin ürün bilgileri

Üretici	Sığa (F)	Gerilim (V)
Maxwell	10-3000	2.5-2.7
Nesscap	5-5000	2.3-2.7
Cap-XX	0.075-2.4	2.3-5.5
Nec-Tokin	0.047-1	3.5-5.5

2.1. UK'lerin İç Yapısı

UK'ler Şekil 1'de gösterildiği gibi iki elektrot, bir ayırıcı ve elemanın içini dolduran elektrolit sıvıdan oluşmaktadır.



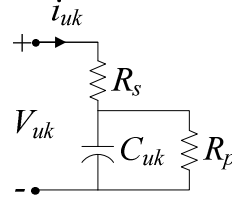
Şekil 1: Bir UK hücresinin iç yapısı [4].

UK elektrotları, akım toplayıcıları ve gözenekli yapıdaki aktif karbon yapıdan oluşur. Elektrotların gözenekli yapısı, elektrot ile elektrolit arasındaki temas yüzeyinin genişlemesini, böylece binlerce farad seviyesindeki sığa değerlerine ulaşılmasını sağlar [4]. UK içerisinde kullanılan elektrolit tipi ise UK'nin ESD ve anma gerilim değerlerini belirler. Genel olarak UK'lerde sulu veya organik tipteki elektrolitler kullanılmaktadır [2]. Sulu tip elektrolitlerin iyon iletkenlikleri organik tipteki elektrolitlere göre daha büyüktür. Dolayısıyla, sulu tip elektrolit kullanılan UK'lerin ESD'si organik tip elektrolit kullanılanlara göre daha düşüktür. Diğer taraftan, organik tip elektrolitlerin delinme gerilimi (~2.5V), sulu tip elektrolitlerinkine (~1.25V) göre yaklaşık iki kat daha büyüktür. Dolayısıyla, organik tip elektrolit kullanılan UK'lerde sulu tip elektrolit kullanılan UK'lere göre dört kat fazla enerji depolanabilmektedir. Bu nedenle, ticari ürünlerde organik elektrolit kullanımı yaygındır [2]. UK'lerde kullanılan ayırıcı katmanın görevi UK'nin iki elektrodu arasında elektriksel yalıtım sağlamaktır. Elektriksel iletimi engelleyen

ayırıcı yapısı iyon geçişlerine olanak sağlar. Dolayısıyla, UK'lerde kullanılan ayırıcılar elektrolide uygun olarak seçilir.

2.2. UK'lerin Temel Elektrik Devre Modeli

UK'lerin, uygulamalarda verimli biçimde kullanılmasını sağlamak için elektriksel davranışının modellenmesi gerekmektedir. UK'lerin ayrıntılı elektrik devre modellerini aktaran çalışmalar mevcuttur [7]. UK'lerin R ve C elemanlarından oluşan en temel elektrik devre modeli Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: UK temel elektrik devre modeli [5].

Şekil 2'de gösterilen modelde, C_{uk} parametresi UK'nin sığasını, R_s parametresi UK'nin ESD'sini, R_p parametresi ise UK'nin eşdeğer paralel direncini (EPD) ifade etmektedir [5]. R_s parametresi, UK içindeki omik kayıpları ifade eder, veri kağıtlarında doğru akım (DA) ve alternatif akım (AA, 100 Hz veya 1 kHz) durumları için verilmektedir. Bu değer genellikle $1\text{m}\Omega$ 'un altındaki seviyelerdedir [6]. UK'lerin küçük ESD değerlerine sahip olması yüksek güç gerektiren uygulamalarda rahatlıkla kullanabilmelerine olanak sağlamaktadır. EPD ise, UK'lerin tam dolu olduğu durumda kaçak akım nedeniyle oluşan durağan kayıpları ifade eder. UK'lerin EPD değerleri genel olarak $\text{k}\Omega$ mertebesinde olup, ürün veri kağıtlarında belirtilen azami çalışma gerilimi değerinin kaçak akım değerine bölünmesiyle elde edilmektedir [1].

2.3. Çeşitli Enerji Depolama Birimlerinin Karşılaştırılması

UK'lerin diğer enerji depolama birimleri (EDB) ile karşılaştırılması nispeten yeni EDB'ler olduğu için doğru bir yaklaşımdır. Enerji ve güç yoğunluğu (E_d, P_d), doldurma ve boşalma zamanları (t_d, t_b), verim, kullanım ömrü (doldur-boşalt sayısı) ve maliyet temel karşılaştırma ölçütleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Tablo 2'de, Maxwell firması tarafından verilen bilgiler ışığında, UK'ler, kurşun asit (KA) akü ve EK'ler ile karşılaştırılmaktadır [8]. Tablo 2 incelendiğinde, UK'lerin t_d ve t_b değerlerinin KA akülerin değerlerinden küçük ve simetrik olduğu görülür. Bu noktada UK'lerin yüksek akım seviyelerinde doldurulup boşaltılabileceği sonucuna ulaşılmaktadır. EK'lerin t_d ve t_b değerlerinin ise oldukça düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Verimlilik değerleri ele alındığında UK'lerin KA akülere göre daha verimli olduğu görülmektedir. E_d ve P_d değerleri incelendiğinde, UK'lerin KA akü ve EK'ler arasında olduğu görülmektedir. Son olarak kullanım ömrü incelendiğinde UK'lerin KA akülere göre daha yüksek kullanım ömrüne [doldur-boşalt sayısına (DBS)] sahip olduğunu görülmektedir. KA akülerin kullanım ömürleri elemanın kimyasal enerji depolama yapısı nedeniyle oldukça düşüktür. Altı tip ticari EDB ürününün hacimsel ve kütleli

olarak enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 2: UK'lerin farklı EDB'ler ile karşılaştırılması [8]

Parametre	KA Akü	UK	EK
t_d	1-5 saat	0.3-30 s	$10^{-6}-10^{-3}$ s
t_b	0.3-3 saat	0.3-30 s	$10^{-6}-10^{-3}$ s
Verim	0.7-0.90	0.85-0.98	>0.95
E_d :Wh/kg	10-100	1-10	< 0.1
P_d : W/kg	< 10^3	< 10^4	< 10^5
Ömür (DBS)	< 10^3	>500,000	>500,000

Tablo 3: Çeşitli ticari EDB'lerin karşılaştırılması [1]

Ürün	E (kJ)	Hacim (l)	Kütle (g)	E_d	
				(J/ml)	(J/g)
NaS ¹	4.5×10^3	3.35	5500	1349.39	822.11
Li-iyon ²	18	0.011	25	1621.46	719.28
Ni-Mh ³	35.64	0.052	170	682.84	209.65
KA ⁴	141.7	4.06	11.1×10^3	349.36	127.54
UK ⁵	5.832	0.24	335	24.1	17.41
EK ⁶	0.135	0.04	325	3.27	0.411

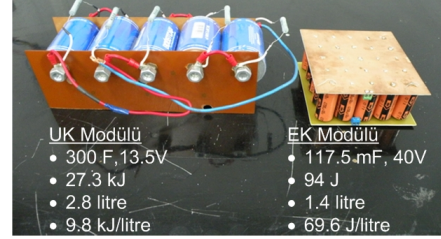
(1: Akü, NGK, NAS T5), (2: Akü, Maxell, ICP803443AR),
(3: Akü, Panasonic, HHR900D), (4: Akü, Haze, UPS140),
(5: Nesscap, ESHSR-1200-C0-002R7A5),
(6: CDE, 38LX273M100B102V)

Tablo 3'teki EDB'lerin enerji depolama kapasiteleri ve yoğunlukları incelediğinde UK'lerin akülere tam bir alternatif oluşturduğu söylenemez. Ancak UK'lerin enerji yoğunluklarının EK'lere göre çok daha büyük olduğu, dolayısıyla da kondansatör teknolojisinde yeni bir açılım yarattığı söylenebilir. EDB'lerin maliyetleri de pratik anlamdaki kullanımları için oldukça önemli bir etkidir. [1]'de bir KA akü, Li-iyon akü, UK, ve EK'nin enerji depolama kapasiteleri ve fiyatları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda KA ve Li-iyon akü maliyetlerinin kJ başına 0.2\$'ın altında olduğu, UK'nin kJ başına maliyetinin 18\$, EK'nin kJ başına maliyetinin ise 179\$ seviyesinde olduğu aktarılmaktadır [1]. Burada verilen bilgiler ışığında KA akülerin en ucuz EDB olduğu ve pratik kullanımının bu sebeple yaygın olduğu sonucuna varılmaktadır. UK'lerin enerji depolama maliyetlerinin EK'lere göre düşük olmasına rağmen pratikte kullanımının yaygınlaşması için fiyatlarında azalmanın olması gerekmektedir. Dolayısıyla UK'lerin günümüzdeki kullanımını hızlı doldur-boşalt süreci, kısa-orta süreli enerji kaynağı gereksinimli ve küçük hacim/ağırlık koşulu gerektiren uygulamalarla sınırlıdır.

2.4. Oluşturulan Kondansatör Modülleri

UK ve EK'lerin enerji depolama kapasitelerini fiziksel olarak gözlemlemek amacıyla laboratuvar ortamında UK ve EK

modülleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modüller Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'teki UK modülü 5 adet UK hücrenin seri bağlanmasıyla, EK modülü ise 25 adet EK'nin paralel bağlanmasıyla elde edilmiştir. Her iki modülün enerji yoğunlukları karşılaştırıldığında UK modülünün enerji yoğunluğunun EK modülünün enerji yoğunluğunun yaklaşık olarak 140 katı olduğu görülmektedir. Oluşturulan UK modülü deneysel çalışmada da kullanılmıştır.

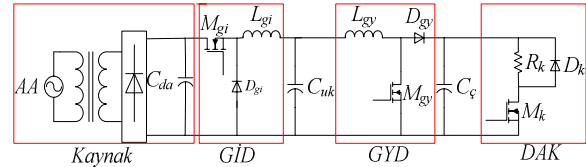


Şekil 3: Oluşturulan kondansatör modülleri.

3. UK'lerin Enerji Yönetimi Amacıyla Kullanılan GED Yapıları

Birçok uygulamada UK'lerin doldurma ve boşaltma süreçlerinde enerji yönetimi amacıyla GED yapılarından faydalanılmaktadır. UK'ler düşük anma gerilimli araçlardır. Doldurma uygulamasında kaynak; boşaltma uygulamasında ise yük tarafının gerilim değeri, genellikle UK anma gerilim değerinden büyüktür. Dolayısıyla, doldurma uygulaması için gerilim indirici DA-DA dönüştürücü (GİD), boşaltma uygulaması için ise gerilim yükseltici DA-DA dönüştürücü (GYD) kullanılır. Doldurma işlevi için GİD, boşaltma işlevi için GYD yapılarının kullanılmasının bir faydası ise doldurma ve boşaltma akımlarının sürekli özellik göstermesidir. Bu sayede doldurma ve boşaltma işlevleri akım denetimli olarak sağlanabilmektedir. UK doldurma ve boşaltma işlevlerinin GED yapılarıyla deneysel olarak gerçekleştirilmesi için iki tür yaklaşım kullanılabilir.

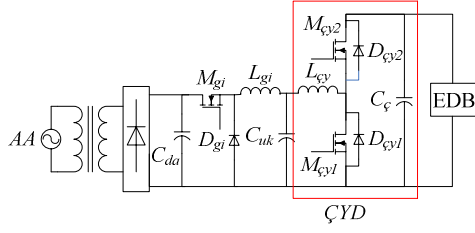
Birinci yaklaşımda UK bir kaynaktan GİD kullanılarak doldurulur ve GYD aracılığıyla da bir direnç grubu üzerine boşaltılır. Bu yaklaşımda GYD çıkış geriliminin bir DA kıyıcı (DAK) kullanılarak sabit tutulması GYD denetimi açısından kolaylık sağlar. Belirtilen GİD ve GYD tabanlı GED yapısı Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te gösterilen yapıda, GİD M_{gi} anahtarı, GYD M_{gy} anahtarı, DAK ise M_k anahtarı aracılığıyla denetlenmektedir.



Şekil 4: GİD-GYD tabanlı UK doldur-boşalt sistemi.

İkinci yaklaşımda, GİD-GYD tabanlı UK doldur-boşalt sistemine (DBS) alternatif olarak Şekil 5'te gösterilen çift yönlü DA-DA dönüştürücü (ÇYD) tabanlı yapı kullanılabilir. Şekil 5'te gösterilen yapıda UK ilk adımda bir kaynaktan GİD üzerinden doldurulur. Daha sonra ÇYD aracılığıyla harici bir EDB ile UK arasında doldurma ve boşaltma işlevleri

uygulanır. ÇYD yapısı GİD ve GYD yapılarının tek bir GED yapısında birleşimi olarak düşünülebilir.

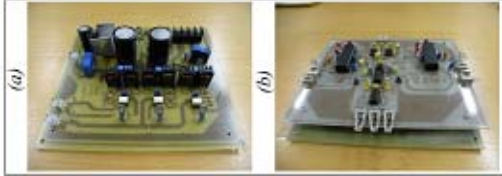


Şekil 5: ÇYD tabanlı UK doldur-boşalt sistemi.

ÇYD yapısında UK'nin doldurma işlevi $M_{çy2}$ anahtarının denetimi, boşaltma işlevi ise $M_{çy1}$ anahtarının denetimi ile sağlanır. Doldurma işlevinde $M_{çy1}$ 'in, boşaltma işlevinde ise $M_{çy2}$ 'in anahtarlama işareti sıfır yapılarak iletimde olmaması sağlanır. ÇYD tabanlı yapı, GİD-GYD tabanlı yapı ile karşılaştırıldığında daha verimli bir yapıdır. Ancak, ÇYD tabanlı yapıda fazladan bir EDB'ye ihtiyaç duyulması sistemin maliyetini artırmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, deneysel doğrulama GİD-GYD tabanlı yapı seçilerek gerçekleştirilmiş ve Şekil 3'te gösterilen UK modülünden faydalanılarak GED yapısının başarımı ortaya konmuştur.

4. GİD-GYD Tabanlı UK Doldur-Boşalt Sisteminin Deneysel Gerçeklenmesi

UK'lerin doldurma ve boşaltma süreçlerini deneysel olarak gözlemlemek amacıyla GİD-GYD tabanlı UK DBS oluşturulmuştur. DBS denetimini sağlamak için ise 2 adet PIC18F452 mikrodenetleyici (μD) içeren bir denetim kartı tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen baskılı devre kartları Şekil 6'da gösterilmektedir. Deneysel UK DBS'nin devre parametreleri Tablo 4'te gösterilmektedir. Devrenin GİD kapasitesi 15A, 24V, GYD kapasitesi de 15A, 30V'dur.



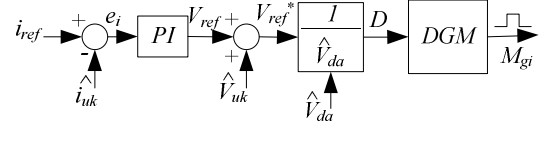
Şekil 6: Baskılı devre kartları: (a) GED kartı, (b) μD kartı.

Tablo 4: UK DBS devre parametreleri

Trafo	220V/24V, 250VA
$C_{da}, C_{ç}, R_k$	27.2 mF, 6.8 mF, 3.13 Ω
L_{gi}, L_{gy}	1 mH

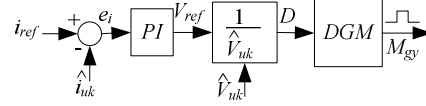
Doldurma işlevini sağlayan GİD'nin denetimi, blok şeması Şekil 7'de verilen doğrusal denetim yöntemiyle (GİD-DD) akım denetimli olarak sağlanmaktadır. GİD-DD yönteminde, ilk olarak akım referansı (i_{ref}) ile akım ölçümü (i_{uk}) arasındaki hata (e_i) hesaplanmaktadır. Bir sonraki aşamada, hesaplanan hata değeri oransal-tümlevsel (PI) tabanlı bir düzenleyiciden geçirilip, elde edilen değerin (V_{ref}) UK gerilimi (V_{uk}) ile toplanmasıyla çıkış gerilimi referans değeri (V_{ref}^*) elde edilir. UK geriliminin (V_{uk}), PI düzenleyici çıktısıyla (V_{ref}) toplanması ile denetimi sağlanan sistem, durum değişkeni doldurma akımı (i_{uk}) olan bir RL devresi haline gelmiş olur. Son aşamada ise, gerilim referansının giriş gerilimi olan DA barası gerilimine (V_{da}) oranlanmasıyla M_{gi} anahtarının çalışma

oranı (D) elde edilir ve darbe genişliği modülasyonu (DGM) işareti oluşturulur.



Şekil 7: GİD-DD blok şeması

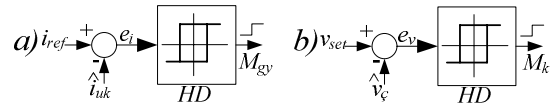
Boşaltma işlevini sağlamak için GYD ile DAK yapısı bir arada kullanılmaktadır. GYD'nin akım denetimli çalışması için blok şeması Şekil 8'de gösterilen doğrusal denetleyici (GYD-DD) ile blok şeması Şekil 9 (a)'da gösterilen histerezis denetleyici (GYD-HD) kullanılmıştır. Blok şeması Şekil 9 (b)'de gösterilen histerezis yapısındaki DAK gerilim denetleyicisi (DAK-HD) de yükseltici taraftaki bara gerilimini sabit tutarak kararlı çalışmaya katkıda bulunmaktadır.



Şekil 8: GYD-DD blok şeması

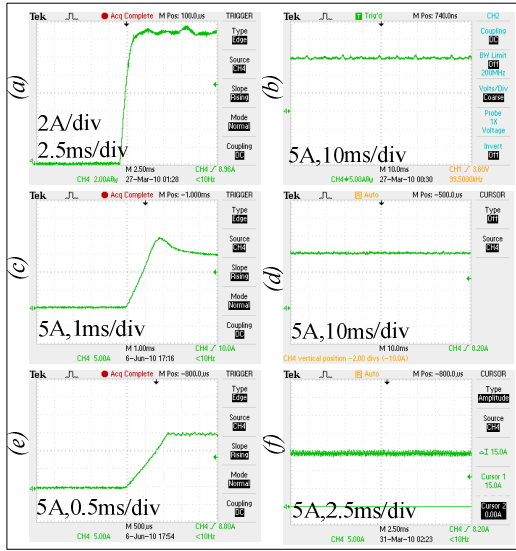
GYD-DD yönteminde, akım referansı (i_{ref}) ile akım ölçümü (i_{uk}) arasındaki farkın (e_i) hesaplanarak bir PI düzenleyiciden geçirilmesiyle, boşaltma akımının istenilen değere yükselmesini sağlayacak gerilim referansı değeri (V_{ref}) elde edilir. Bir sonraki aşamada ise, elde edilen gerilim referansının giriş gerilimi olan UK gerilimine (V_{uk}) oranlanmasıyla M_{gy} anahtarının çalışma oranı (D) elde edilir ve DGM işareti oluşturulur.

İkinci akım denetimi yöntemi olan GYD-HD'de akım ölçümünün (i_{uk}) akım referansı (i_{ref}) ile karşılaştırılmasının ardından M_{gy} anahtarının aç-kapa kipinde çalıştırılması sağlanır. Bu şekilde akım değerinin belirli bir bant aralığı içinde tutulması sağlanır. DAK-HD yönteminde ise, çıkış gerilim ölçümünün (v_c) belirli bir gerilim referansı (v_{set}) ile karşılaştırılmasının ardından M_k anahtarının aç kapa kipinde anahtarlama sağlanır. Böylece, GYD'nin çıkış geriliminin belirli bir bant aralığında tutulması sağlanarak, çıkış gerilimindeki değişimlerin dönüştürücü denetimine etkisi en az seviyeye çekilmiş olur.



Şekil 9: HD blok şemaları: (a) GYD-HD, (b) DAK-HD.

Deneysel UK DBS'nin 15A akım adım referansına verdiği dinamik ve kalıcı durum tepkileri Şekil 10'da gösterilmekte ve Tablo 5'te özetlenmektedir.

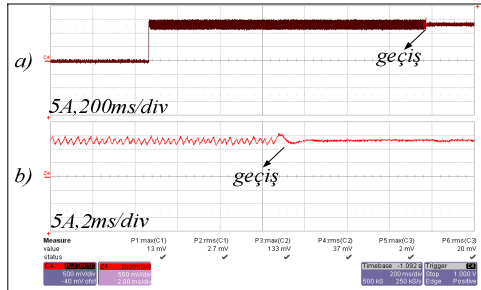


Şekil 10: UK adım akım tepkileri: (a,c,e) dinamik tepkiler, (b,d,f) kalıcı durum tepkileri, (a,b) GİD-DD tepkisi, (c,d) GYD-DD tepkisi, (e,f) GYD-HD tepkisi.

Tablo 5: UK DBS başarımlar değerleri

	GİD-DD	GYD-DD	GYD-HD
$t_{kalkış} (ms)$	2.5	1.36	1.18
$t_{iniş} (ms)$	0.96	0.78	0.74
% aşma $[i_{uk}]$	0	33	0
$\Delta I_{kısıtlı} (A)$	0.5	0.4	1.5

UK DBS'nin başarımlarını Şekil 10 ve Tablo 5 çerçevesinde incelendiğinde, GİD-DD yönteminin dinamik ve kalıcı durum için oldukça başarılı olduğu, GYD-DD yönteminin dinamik durumda % aşma tepkisinin yüksek olduğu ancak kalıcı durum kısırtısının düşük seviyelerde olduğu, GYD-HD yönteminin ise dinamik durum tepkisinin GYD-DD yönteminden daha başarılı olduğu, fakat kalıcı durum kısırtısının yüksek bir seviyede olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında GYD denetimi için GYD-HD ve GYD-DD yöntemlerinin olumlu yönleri alınarak karma bir denetleme yöntemi uygulanmıştır [1]. Karma yöntemin kullanıldığı durumda UK boşaltma akımının 15A akım referansına verdiği tepki Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11: Karma yöntem için UK akım tepkisi.

Karma yöntemde boşaltma işlevi GYD-HD ile başlatılmış ve böylece akımın dinamik tepkisindeki % aşım miktarı sıfıra çekilmiştir. Belirli bir süre (yaklaşık 1s) geçtikten sonra ise

GYD-DD yöntemine geçiş yapılmış ve kalıcı durum akım kısırtısı GYD-DD'de elde edilen seviyeye indirilmiştir. Denetim yöntemleri arasındaki geçiş esnasında boşaltma akımında ani değişim olmasını engellemek için GYD-DD'nin tümleştiricisinin (I) başlangıç değerine 15A referans ile ilintili sıfırdan farklı bir değer atanmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada UK'lerin temel özellikleri ve GED'ler ile kullanım şekilleri incelenmiştir. UK'lerin temel özellikleri incelendiğinde enerji depolama kapasitelerinin EK'lere göre oldukça fazla olduğu ancak akülerin enerji depolama seviyesine ulaşmadığı görülmüştür. Diğer taraftan güç yoğunluğu, kullanım ömrü ve verim gibi ölçütler baz alındığında UK'lerin akülere oranla daha üstün EDB'ler olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak UK'lerin pratikte kullanılmalarının yaygınlaşması için maliyetlerinin düşmesi gerektiği görülmüştür.

UK'lerin doldurma ve boşaltma işlevlerini deneysel olarak gerçekleştirmek için GİD-GYD ve ÇYD tabanlı GED yapıları incelenmiştir. Düşük maliyeti sebebiyle GİD-GYD tabanlı UK DBS gerçekleştirilmiştir ve gerçekleştirilen DBS akım kontrollü olarak denetlenmiştir. Deneysel sonuçlar, GİD-DD yönteminin hem dinamik durum hem de kalıcı durum için başarılı olduğunu göstermektedir. GYD-DD ve GYD-HD yöntemleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise yöntemlerin kullanımında dinamik ve kalıcı durum tepkileri çerçevesinde bir ödünleşim olduğu ve GYD denetimi için her iki yöntemi birbirine yakın bir şekilde kullanmak karma bir denetim yaklaşımının hem dinamik hem de kalıcı durum için başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel GED'ler kullanılarak UK'ların enerji yönetimi uygulama gereksinimi doğrultusunda kolayca gerçekleştirilebilir.

6. Kaynaklar

- [1] Eroğlu H.H., *Design and implementation of an ultracapacitor test system*, Yüksek lisans tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [2] Schneuwly A., Gallay R., "Properties and applications of supercapacitors – from the state-of-the-art to future trends", *PCIM,2000*, ss:1-10.
- [3] Burke A., "Ultracapacitors, why, how and where is the technology", *Journal of power sources*, 91, ss: 37-50, 2000.
- [4] Maxwell Technologies, *Product guide - Maxwell Technologies BOOSTCAP ultracapacitors*, Doc. no. 1014627.1, 2009.
- [5] Nesscap, *Ultracapacitor technical guide*, 2008.
- [6] Maxwell Technologies, *MC power series BOOSTCAP ultracapacitors*, Veri kağıdı, Doc:1009361.
- [7] Shi L. ve Crow M.L., "Comparison of ultracapacitor electric circuit models", *IEEE power and energy society general meeting - conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*, ss: 1-6, 2008.
- [8] Maxwell Technologies, "Gateway to a new thinking in energy management-ultracapacitors", San Diego, 2005.