

Enerji Depolama Uygulamalarında Ultrakondansatörlerin Yeri ve Kullanımı

Yük. Müh. Hasan Hüseyin Eroğlu
hheroglu@gata.edu.tr
TSK Rehabilitasyon ve
Bakım Merkezi
Gülhane Askeri Tıp Akademisi

Doç. Dr. Ahmet M. Hava
hava@eee.metu.edu.tr
Elektrik ve Elektronik
Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Enerji ve güç yoğunluğu bakımından kurşun asit akü ve elektrolitik kondansatörler arasında yer alan yüksek sığalı ultrakondansatörler, güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla; yüksek güç, hızlı doldur/boşalt süresi, kısa ve orta vadede enerji gereksinimi olan, elektrikli otomobil, hafıza destekleme, kesintisiz güç kaynağı, vb. uygulamalarda kullanılır.

Ultrakondansatörlerin Enerji Depolama Birimleri İçerisindeki Konumu

Elektrik çift tabaka kondansatörü veya süperkondansatör olarak da adlandırılan ultrakondansatörler (UK) yüksek sığa değerlerine sahip kondansatörlerdir. UK'ler kurşun-asit akü (KAA), elektrolitik kondansatör (EK) gibi geleneksel enerji depolama birimlerine (EDB) göre nispeten yeni EDB'lerdir. Dolayısıyla, UK'lerin, enerji depolama birimleri arasındaki konumunu görmek için, geleneksel enerji depolama birimleriyle enerji ve güç yoğunluğu (E_d , P_d), doldurma ve boşaltma zamanı, verim ve kullanım ömrü ölçütleri çerçevesinde karşılaştırılması gerekir. Tablo I'de UK'ler, KAA'lar ve EK'ler ile karşılaştırılmaktadır [1-2].

Tablo I'deki dolum ve boşalma zamanları incelendiğinde UK'lerin genellikle düşük seviyedeki akımlarla doldurulan KAA'lara oranla daha küçük ve simetrik dolum ve boşalma zamanlarına

sahip oldukları görülmektedir. Dolayısıyla, UK'ler KAA'lara oranla daha yüksek seviyedeki akımlarla doldurulup boşaltılabilir. Diğer taraftan, UK'lerin verim değerlerinin KAA'lara oranla daha yüksek olduğu, enerji ve güç yoğunlukları ele alındığında ise UK'lerin KAA ve EK'ler arasında bulunduğu görülmektedir. Son olarak Tablo I'deki EDB'lerin kullanım ömürleri incelendiğinde UK'lerin KAA'lara oranla daha yüksek kullanım ömrüne sahip olduğu görülmektedir [1].

Tablo I'de enerji yoğunluğu bazında gözlenen UK'lerin KAA'lar ve EK'ler arasındaki konumu, birer adet ticari KAA, UK ve EK ürününün parametreleri incelenerek Tablo II'de depolanabilir enerji ve maliyet parametreleri bazında doğrulanmıştır. Tablo II incelendiğinde, UK'lerin KAA'lara hem enerji yoğunluğu hem de maliyet açısından bir alternatif oluşturmadığı; diğer taraftan, UK'lerin EK'lere oranla daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha düşük

Parametreler / EDB	KAA	UK	EK
Dolum zamanı	1-9 saat	0.3-30 s	10^{-6} - 10^{-3} s
Boşalma zamanı	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
Kullanım ömrü: (doldur/boşalt döngü sayısı)	< 10^3	>500,000	>500,000

Tablo I. Farklı Enerji Depolama Birimlerinin Karşılaştırılması

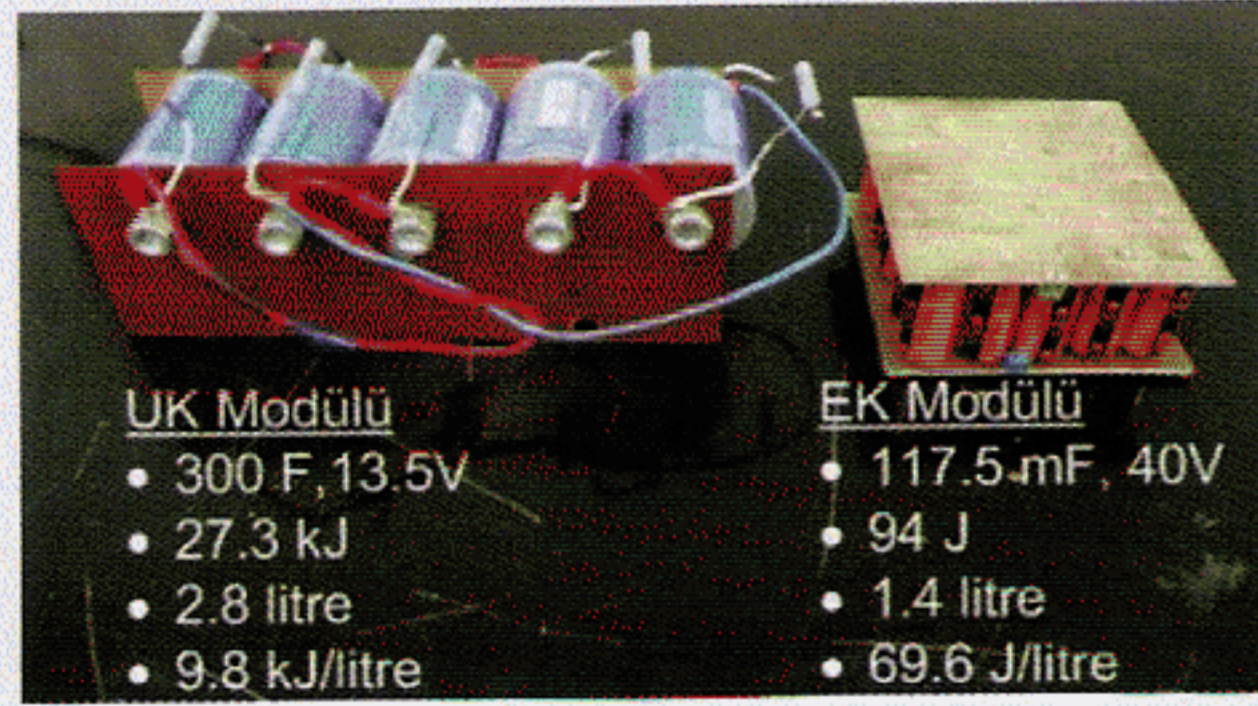
Ürün	Enerji (kJ)	Enerji Yoğunluğu		Maliyet (\$)	Maliyet/Enerji (\$/kJ)
		(J/ml)	(J/g)		
KA ¹	311.040	339.7	125.9	35.51	0.114
UK ²	7.5	20.1	14.42	137.5	18.33
EK ³	0.05	0.63	0.385	31.08	621.6

(1: Panasonic, LC-R127R2P)
 (2: United Chemicon, DDSC2R5LGN242KS4BS)
 (3: CDE, 382LX103M100N062)
 * Maliyet bilgileri: www.digikey.com

Tablo II. Ticari Enerji Depolama Birimlerinin Karşılaştırılması

enerji depolama maliyetine sahip oldukları görülmektedir [1].

UK'lerin, EK'lere göre daha yüksek enerji yoğunluklu EDB'ler olduğu bilgisini fiziksel olarak gözlemlemek amacıyla Şekil 1'de gösterilen birer adet UK ve EK modülü tasarlanmıştır. Şekil 1'deki UK modülü 5 adet



Şekil 1: Laboratuvar ortamında oluşturulan UK ve EK modülleri.

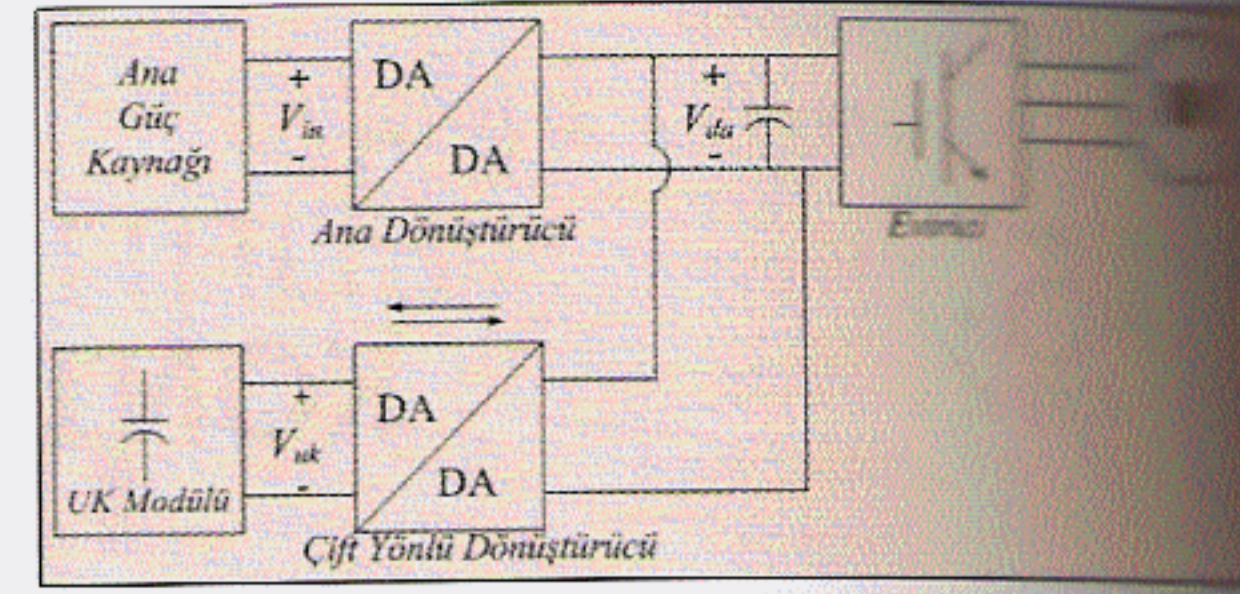
seri bağlı UK hücrelerinden, EK modülü ise 25 adet paralel bağlı EK'den oluşmaktadır. Tasarlanan UK modülünün enerji yoğunluğu EK modülünün enerji yoğunluğundan yaklaşık olarak 140 kat daha fazladır.

Bu durum ise Tablo I-II'de bildirilen UK'lerin EK'lere oranla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu bildirimini doğrulamaktadır. Sonuç olarak UK'ler; yüksek güç, hızlı doldur boşalt süresi, kısa ve orta vadede enerji depolama gereksinimi olan uygulamalarda kullanılabilir [1-2].

Ultrakondansatör Uygulamaları

Günümüzde UK'ler bir çok sistemin enerji ihtiyacını kısmen veya tamamen karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. UK'lerin yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları sebebiyle sistemlerin tepe güç ihtiyaçlarını karşılamaları, sistemlerin güvenilirliğini ve başarımlarını artıran bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle UK'ler endüstriyel sistem uygulamaları, tüketici elektroniği uygulamaları, ulaşım mühendisliği uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır [3].

Birçok uygulamada darbe şeklinde ortaya çıkan tepe güç ihtiyaçları UK'lerden, ortalama güç ihtiyaçları ise KAA veya üreteç gibi uzun süreli enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Elektrikli araçların hızlanması sırasında ihtiyaç duyulan tepe gücü gereksinimlerinin sağlanması ve frenlenmesi esnasında açığa çıkan enerjinin depolanması, UK'lerin darbe gücü alanında kullanılabileceği uygulamalardan biridir [3]. Evirici tabanlı motor sürücülerinin kullanıldığı elektrikli araç uygulamalarında UK'ler Şekil 2'de gösterildiği gibi bir çift yönlü dönüştürücü üzerinden eviricinin doğru akım (DA) barasına bağlanır [1]. Tepe güç ihtiyacının ortaya çıktığı hızlanma durumunda UK modülü çift yönlü dönüştürücü üzerinden sis-

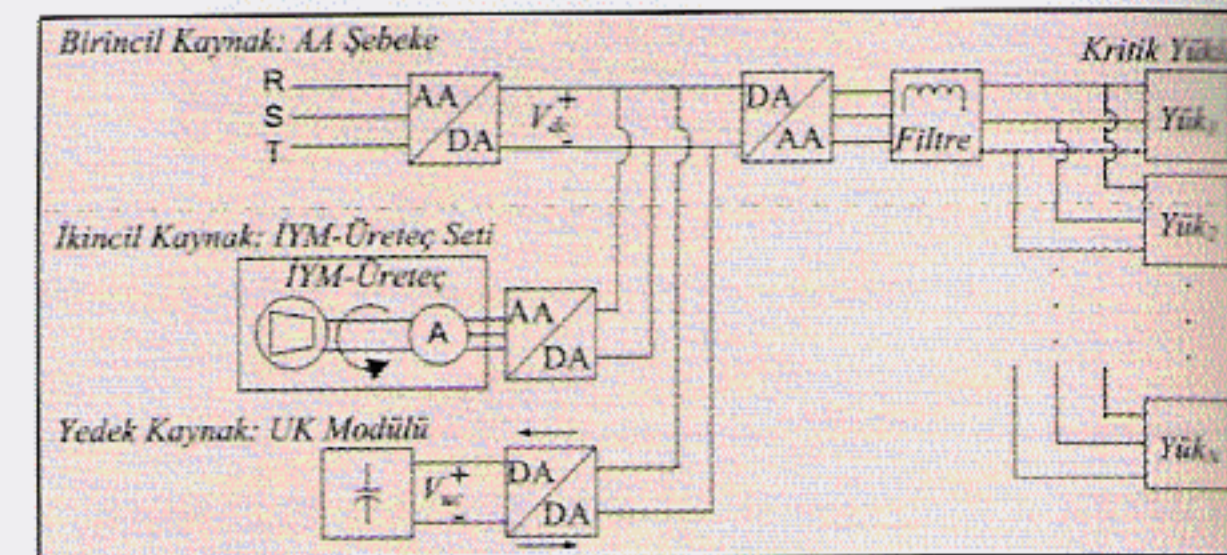


Şekil 2: UK destekli elektrikli araç uygulaması.

temi desteklemektedir. Frenleme sırasında ortaya çıkan enerji ise çift yönlü dönüştürücü üzerinden UK modülü üzerinde depolanabilmektedir.

UK'lerin bir diğer kullanım alanı ise köprü gücü uygulamalarıdır. Köprü gücü, kritik yüklerin ihtiyaç duyduğu elektriksiz gücün birincil kaynaktan; kesinti, arıza ve benzeri bir neden sebebiyle sağlanamadığı durumda, ikincil bir kaynağın etkin hale gelmesi için gereken geçiş süresi boyunca yedek bir kaynak tarafından sağlanmasıdır. Burada geçiş süresi boyunca elektriksiz güç gereksinimini sağlayan yedek kaynak birincil ve ikincil kaynak arasında köprü görevini üstlenir [1]. Köprü gücü sağlayacak yedek kaynağın çok hızlı tepki verebilmesi gerekir. Blok şeması Şekil 3'te gösterilen içten yanmalı motor (İYM) ve üreteç (generatör) çiftini ikincil kaynak olarak kullanan kesintisiz güç kaynağı (KKG) sistemleri, UK'lerin köprü gücü alanında kullanılabileceği bir uygulamadır [1].

Şekil 3'te gösterilen sistemde, şebekede kesinti olduğu zaman İYM-üreteç seti etkin hale gelerek kritik yüklerin güç gereksinimini sağlar. Fakat, İYM-üreteç setinin

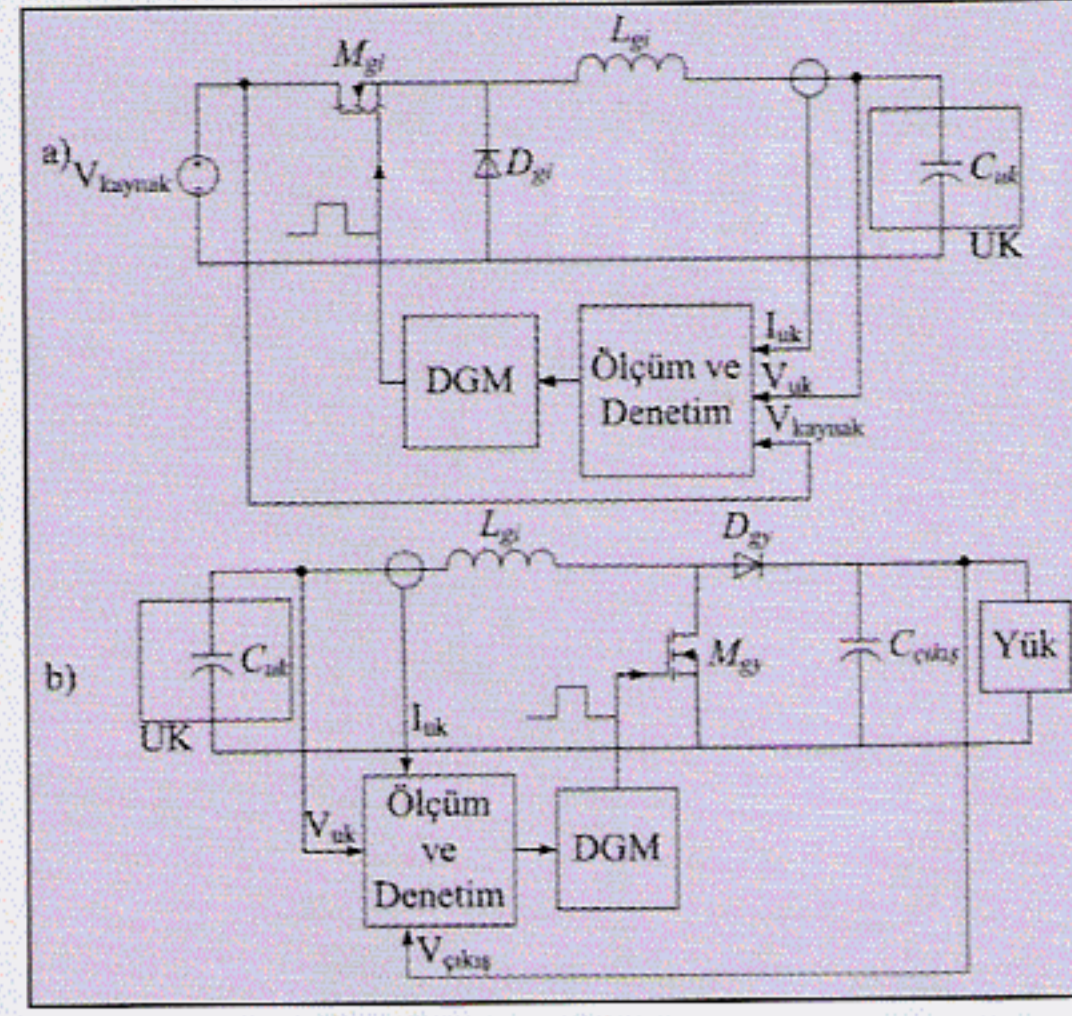


Şekil 3: UK destekli KKG uygulaması.

etkin hale gelmesi için belirli bir tepki süresinin geçmesi gerekir. İYM-üreteç setinin tepki süresi boyunca güç gereksinimi bir UK modülünden sağlanır. Geleneksel KGK'lerde köprü gücü gereksinimi KAA'lar üzerinden sağlanır. Ancak, KAA'ların kullanım ömürlerinin sınırlı olması sebebiyle belirli zaman aralıklarında değiştirilmesi gerekir. Diğer taraftan UK'lerin KAA'lara oranla daha yüksek doldur/boşalt kullanım ömrüne sahip olması nedeniyle UK kullanımı uzun vadede KGK sistemlerinin bakım maliyetini düşürür [1].

Güç kalitesi uygulamaları UK'lerin kullanabileceği bir diğer alandır. Günümüzde birçok endüstriyel süreç evirici tabanlı motor sürücüleri ile yönetilmektedir. Endüstriyel süreç sonucunda yüksek kaliteli çıktı almak için sürücü sisteme sağlanan güç kalitesinin yüksek seviyelerde olması gerekir. Bu alanda en çok rastlanan problemlerden birisi de şebeke geriliminin de yaşanan çökmelerdir. Bu durum, IEEE 1159-1195 standardında yarım şebeke gerilim periyodu ile bir dakika arasında şebeke geriliminde genlik olarak %10-90 düşme olarak tanımlanmıştır.

Gerilim çökmesi çoğunlukla endüstriyel bölgelerde motorların başlatılması sırasında ortaya çıkmakta olup, endüstriyel süreçlerin sonucunda defolu ürünleri çıkmasına sebep olmaktadır. Tekstil fabrikalarında gerilim çökmesi sonucunda oluşan defolu ürünler bu alanda bilinen bir örnektir. Bu kapsamda UK'ler çift yönlü dönüştürücü kullanılarak evirici tabanlı endüstriyel motor sürücülerinin DA baralarına gerilim çökmesi kompanzasyonu yapma amacıyla bağlanabilir [1]. Yukarıda anlatılan örnekler UK'ların ilk uygulama alanların-



Şekil 4: (a) Gerilim indirici dönüştürücü tabanlı UK doldurma sistemi, (b) gerilim yükseltici dönüştürücü tabanlı UK boşaltma sistemi.

dan bir kısmı olup, UK'ler ekonomikleştikçe uygulama alanları da genişlemektedir. UK ve üretim teknolojisinin gelişmesi, üretim hacminin artması ve böylece ekonomikleşme sayesinde uygulamadaki en büyük engel olan maliyet problemi de gittikçe azalmaktadır.

UK'lerin karakteristiklerinin anlaşılması ve uygulamada nasıl kullanılacağına iyi öğrenilmesi ile kullanım da hızla yaygınlaşmaktadır. Bir sonraki bölümde UK'lerin enerji sistemleri ile arayüz görevini gören güç elektroniği dönüştürücüleri UK uygulaması ile ele alınacaktır.

Ultrakondansatörler için Güç Elektroniği Arayüzü

UK uygulamalarında temel süreç, doldurma ve boşalma işlevlerinin sağlanmasıdır. Bu işlevlerinin sağlanmasında güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanımı yaygındır. UK uygulamalarında kullanılacak güç elektroniği dönüştürücülerinin seçiminde temel etken UK'lerin düşük anma gerilim değerleridir.

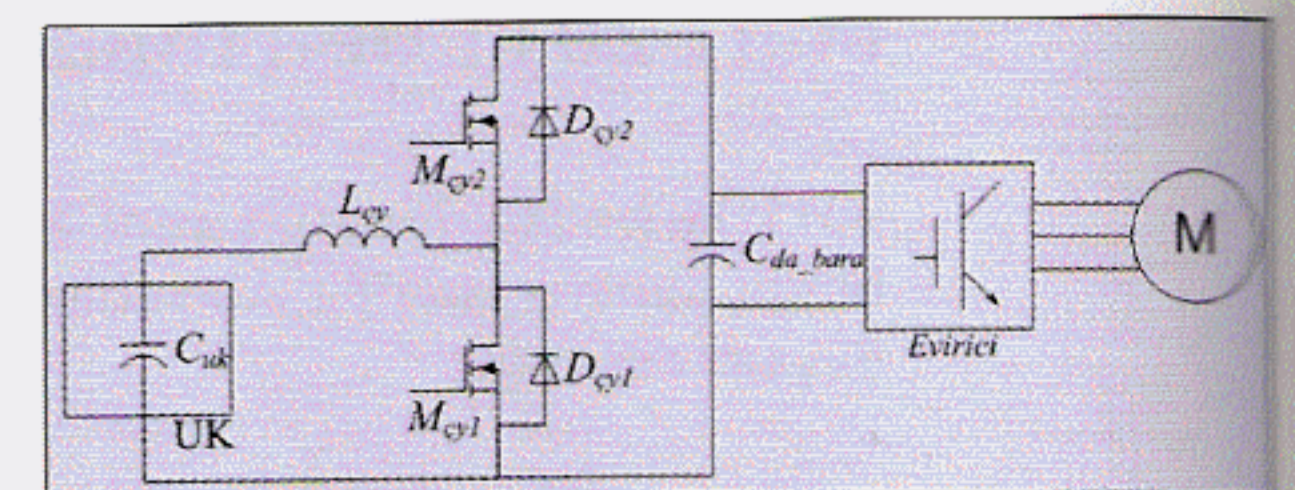
Genel olarak UK dolun uygulamalarında kaynak gerilimi, boşaltma uygulamalarında ise yük gerilimi UK anma gerilim değerinden büyüktür. Dolayısıyla, dolun uy-

gulamasında gerilim indirici DA-DA dönüştürücü, boşalma uygulamasında ise gerilim yükseltici DA-DA dönüştürücü kullanımı yaygındır [1]. UK doldurma ve boşaltma uygulamalarında kullanılan gerilim indirici ve gerilim yükseltici dönüştürücü tabanlı güç elektroniği yapıları Şekil 4'te gösterilmektedir.

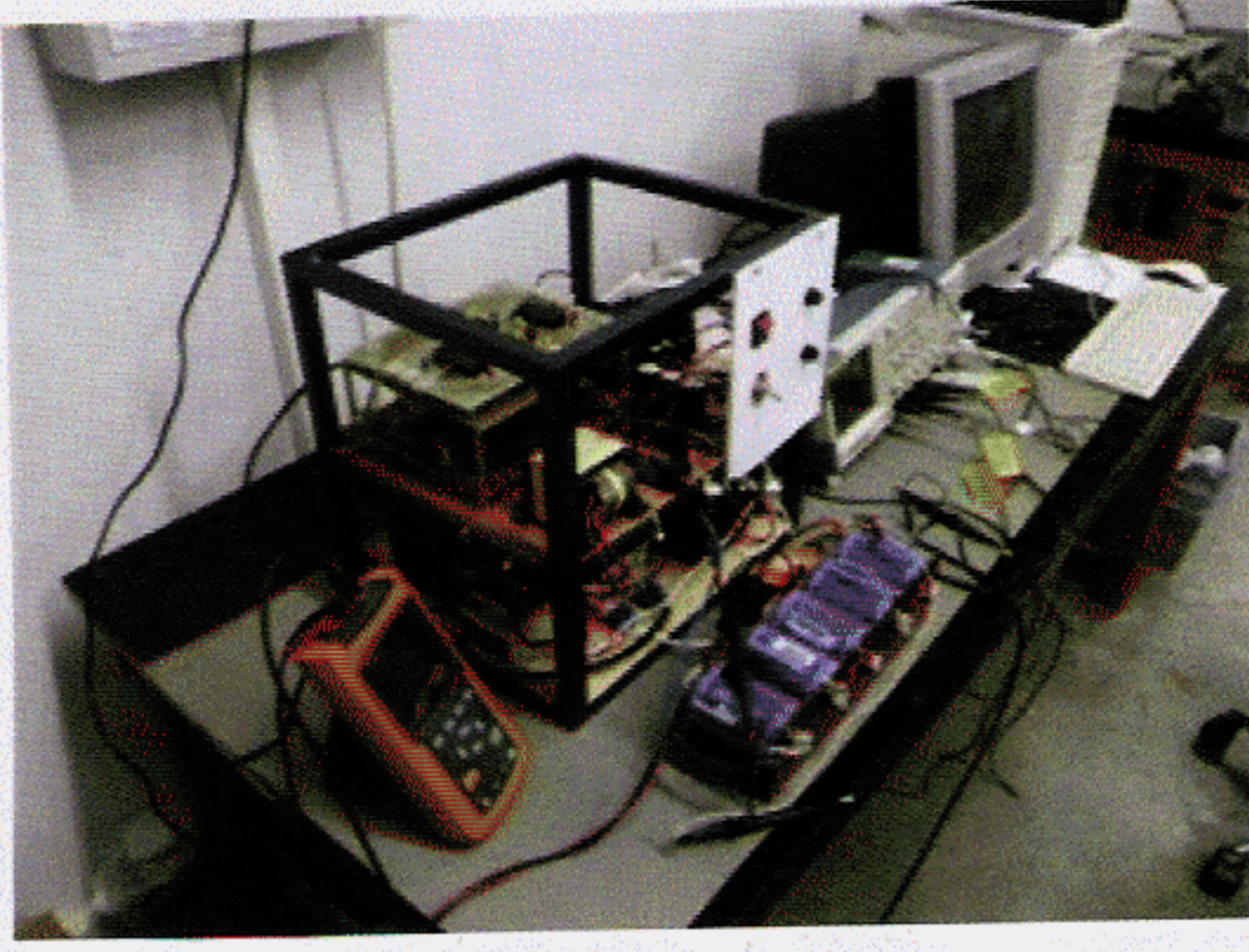
Şekil 4 (a)'da gösterildiği gibi UK'lere dolun işlevi; kaynak gerilimi ile UK akım ve geriliminin ölçülerek, bir denetim mekanizmasında işlenip darbe genliği modülasyonu (DGM) işareti oluşturulmasıyla sağlanır. Oluşturulan DGM işareti M_{gi} anahtarına uygulanarak doldurma sisteminin denetimi sağlanır.

Şekil 4 (b)'de gösterilen boşaltma işlevinde ise UK üzerinde depolanan enerji gerilim yükseltici dönüştürücü üzerinden yüke aktarılmaktadır. Boşaltma sisteminin denetimi UK akım ve gerilimi ile çıkış geriliminin ölçülerek bir denetim mekanizmasında işlenip DGM işaretinin oluşturulması ile sağlanır. Oluşturulan DGM işareti M_{gy} anahtarına uygulanarak sistemin denetimi sağlanır [1].

Birçok uygulamada UK dolun ve boşalma işlevlerinin tek bir güç elektroniği yapısı ile gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulur. Bu amaçla çift yönlü DA-DA dönüştürücü yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Şekil 5'teki uygulamada evirici tabanlı bir motor sürücünün DA barasına çift yönlü dönüştürücü üzerinden bağlanan bir UK modülü gösterilmektedir.



Şekil 5: Çift yönlü dönüştürücü tabanlı UK uygulaması.



Şekil 6: Gerçekleştirilen UK doldur boşalt sistemi.

Şekil 5'teki uygulamada UK yedek bir kaynak olarak evirici tabanlı motor sürücünün DA barasını desteklemektedir. UK tarafından DA baranın desteklenmesi gerektiğinde çift yönlü dönüştürücünün M_{cy1} anahtarının denetlenerek, UK üzerindeki enerji kullanılır. Boşalma işlevinde L_{cy} , M_{cy1} ve D_{cy2} elemanları bir gerilim yükseltici DA-DA dönüştürücü gibi kullanılmaktadır. UK'nın dolum işlevi ise M_{cy2} anahtarının denetlenmesiyle DA bara üzerinden sağlanır. Doldurma işlevinde L_{cy} , M_{cy2} ve D_{cy1} elemanları bir gerilim indirici DA-DA dönüştürücü gibi kullanılmaktadır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki Güç Elektroniği Dönüştürücüleri Araştırma Grubu'nda (GEDAG) UK'lerin enerji yönetimini deneysel olarak gerçekleştirmek amacıyla Şekil 4'te gösterilen sistemler baz alınarak bir UK doldur/boşalt sistemi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir [1]. Gerçekleştirilen UK doldur/boşalt sistemi Şekil 6'da gösterilmektedir.

Gerçekleştirilen UK doldur/boşalt sistemi akım denetimli olarak sürülmüş ve

Şekil 1'de gösterilen UK modülüne sabit akım ve sabit güç doldur-boşalt testleri uygulanmıştır. Sabit akım testinde uygulanan akım seviyesi 15A, sabit güç testinde ise uygulanan güç seviyesi 100W'tır. Test süreçleri boyunca kayıt altına alınan akım ve gerilim profilleri Şekil 7-8'de gösterilmektedir.

Şekil 7'de gösterilen UK modülünün sabit akım davranışı geleneksel kondansatör teorisi ile uyumludur. Modül sığası sabit karakterde olup, modülün 300F veri kağıdı sığa değerinden yaklaşık olarak %-5 seviyesinde bir sapma göstermektedir.

Gözlenen sapma değeri veri kağıdında verilen tolerans değeriyle uyumludur [4]. Şekil 8'de gösterilen UK modülünün sabit güç davranışı incelendiğinde ise elde edilen profilin sabit sığa gözlemi ile

uyumlu olduğu görülmüştür. Sabit güç testindeki UK modülünden boşalma fazında çekilen enerjinin doldurma fazında uygulanan enerjiye oranlanmasıyla UK modülünün verim değerleri hesaplanmış ve UK modülünün ortalama verim değerinin %98 mertebesinde olduğu gözlenmiştir [1].

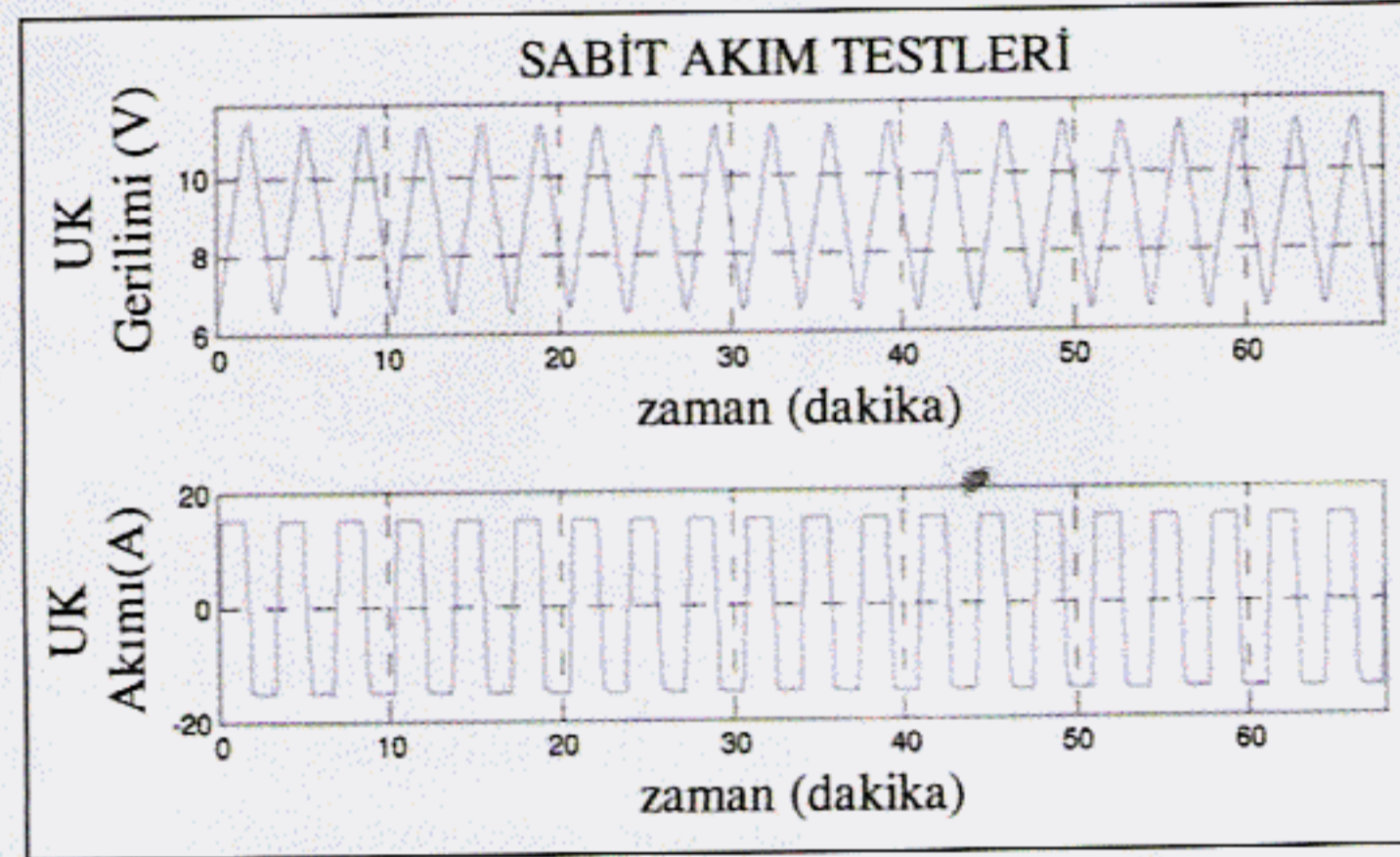
Yapılan deneysel çalışma sonucunda UK'lerin geleneksel kondansatör teorisi ile uyumlu ve yüksek verimli enerji depolama araçları olduğu gözlenmiş ve güç elektroniği dönüştürücülerini kullanarak UK'lerin doldurma ve boşaltma süreçlerindeki enerji yönetiminin başarılı bir biçimde gerçekleştirileceği doğrulanmıştır [1].

Sonuç

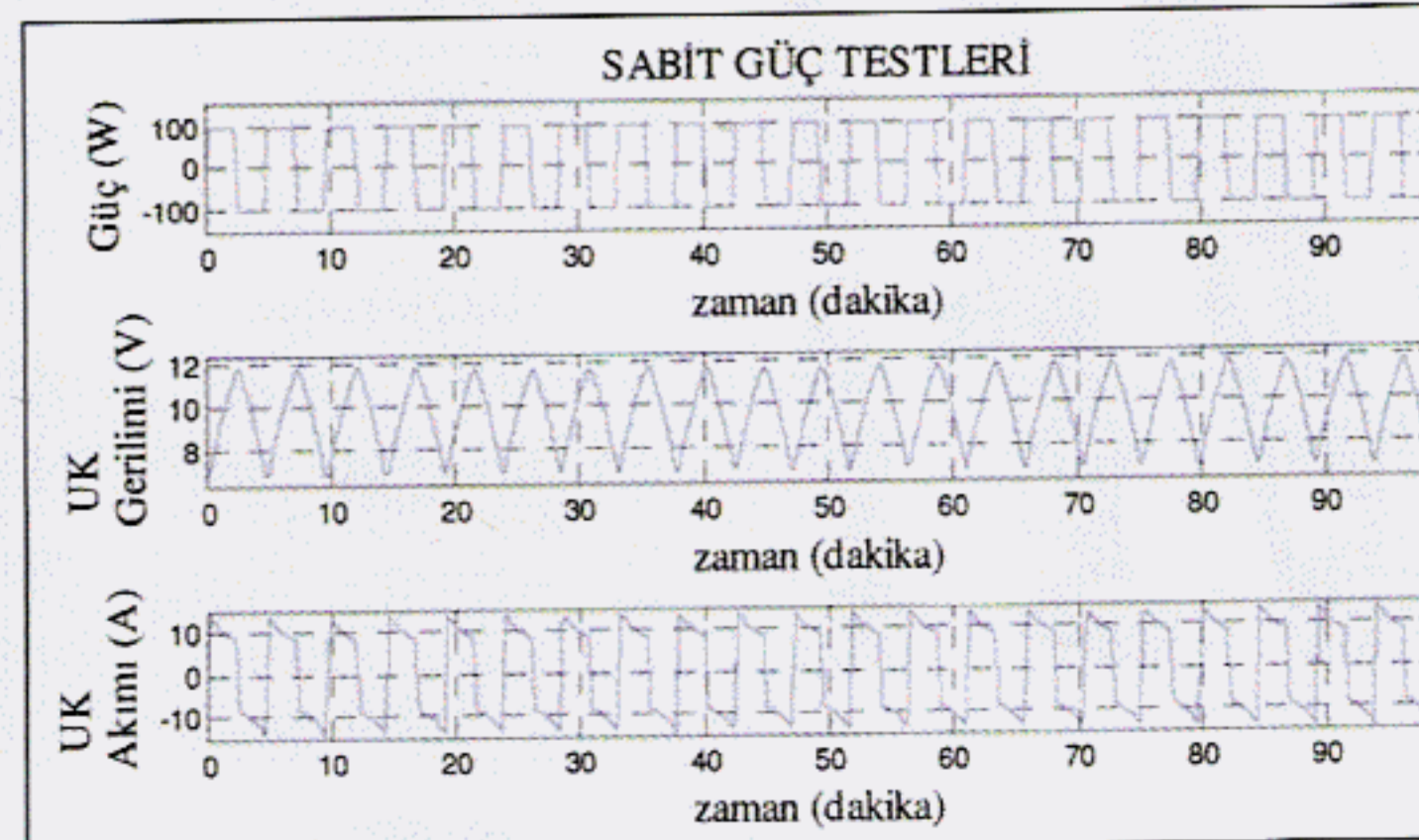
UK'ler enerji ve güç yoğunluğu açısından KAA'lar ve EK'ler arasında bir konumdadır. Enerji depolama kapasitesi, yoğunluğu ve maliyeti açısından KAA'lara tam bir alternatif oluşturmayan UK'ler, yüksek güç yoğunluğuna, verime ve kullanım ömrüne sahip olmaları sebebiyle darbe gücü, köprü gücü ve güç kalitesi gibi alanlarda güç elektroniği dönüştürücüleri yardımıyla kullanılabilir.

Kaynaklar

- 1.H.H. Eroğlu, Bir ultrakondansatör test sisteminin tasarımı ve deneysel gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- 2.Maxwell Technologies, "Gateway to a new thinking in energy management-ultracapacitors", San Diego, 2005.
- 3.Maxwell Technologies, BOOSTCAP® Ultracapacitors Product Guide, Doc.No. 1014627.1, 2009.
- 4.Maxwell Technologies, MC power series BOOSTCAP ultracapacitors, Veri kağıdı, Doc:1009361.



Şekil 7: Sabit akım testindeki UK modülünün davranışı.



Şekil 8: Sabit güç testindeki UK modülünün davranışı.