

Ultrakondansatörlerin Başarımlarının Deneysel Olarak Değerlendirilmesi

Experimental Performance Evaluation of an Ultracapacitors

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) enerji ve güç yoğunluğu açısından akü ve elektrolitik kondansatörler arasında yer alan, yüksek güç yoğunluğu, verim ve uzun kullanım ömrü gibi özellikleriyle de birçok uygulamada kullanılmaya başlanan enerji depolama birimleridir (EDB). Nispeten yeni EDB'ler olan UK'lerin başarımlarının deneysel olarak değerlendirilmesi oldukça önemli ve özel tasarım test aygıtları gerektiren bir konudur. UK'lere yüksek genlikli ve denetlenebilir doğru akım (DA) darbeleri uygulamak UK'leri deneysel olarak değerlendirmek için kullanılacak bir yöntemdir. Bu çalışmada, UK'lere yüksek genlikte DA akım darbeleri uygulama esasına dayanan sabit akım ve sabit güç test yöntemleri incelenmiş, bu yöntemleri uygulamak için kullanılacak bir güç elektroniği tabanlı test sisteminin yapısal ele alınmış ve laboratuvar ortamında oluşturulmuş bir UK modülünün deney sonuçları aktarılmıştır.

Abstract

Ultracapacitors (UC) are energy storage devices that lie between batteries and electrolytic capacitors with respect to energy and power density. UCs start to be used in many applications since they have high power density, high efficiency and long lifetime. Since UCs are relatively new devices, experimental performance evaluation of UCs is very important and requires specially designed test equipments. Applying large and controllable DC current signals to UCs is a method that could be used for experimental evaluation of UCs. In this study, constant current and constant power tests, which are based on applying large DC current signals to UCs, are reviewed, a power electronics based test system structure that could be utilized to apply these tests is investigated, and experimental results of a laboratory constructed UC module are presented.

1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisinin verimli bir biçimde depolanıp kullanılması oldukça önem kazanmıştır. Birçok uygulamada, enerji depolama birimlerinin (EDB) depolama kapasitelerinin

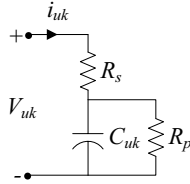
yanı sıra; güç yoğunluğu, doldurma boşaltma verimi ve kullanım ömrü gibi özellikleri de önem kazanmıştır. Enerji ve güç yoğunluğu açısından akü ve elektrolitik kondansatörler (EK) arasında yer alan ultrakondansatörler (UK) yüksek güç yoğunluğuna ve kullanım ömrüne sahip olmaları nedeniyle elektrikli araç, kesintisiz güç kaynakları, tüketici elektroniği gibi alanlarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır [1-2]. UK'lerin akü ve EK gibi geleneksel EDB'lere göre daha yeni araçlar olmaları nedeniyle başarımlarının değerlendirilmesi hem üreticiler hem de kullanıcılar açısından oldukça önemli bir konudur. Konu, UK üreticileri tarafından ele alındığında, UK'lerin teknik özelliklerinin veri kağıdı ve uygulama notu gibi dokümanlarda hatasız ve güvenilir bir şekilde yer alması gerekir. Konu, kullanıcılar tarafından ele alındığında ise UK'lerin uygulamalarda kullanılmadan önce başarımlarının değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir [3]. Birçok üretici de kullanıcılara UK'lerin başarımlarını değerlendirmeleri için test yöntemleri önermektedir [4-5].

UK parametrelerinin, LCR-metre gibi standart ölçü aletleriyle ölçülmesi mümkün değildir. Örneğin, sayısal bir LCR-metrenin ölçüm uçlarını bir UK'nin terminallerine bağlayıp, cihazı sığa ölçüm kipine aldığımızda, sayısal LCR-metrenin ekranında "aralık dışında (over range)" iletisi görüntülenir. Bu durumun temel nedeni, LCR-metre tarafından UK'ye uygulanan işaretin, UK'nin terminallerinde LCR-metrenin ölçebileceği bir değişim yaratamamasıdır [3]. UK'lerin elektriksel davranışını gözlemek için kullanılacak bir yöntem de test edilecek UK'yi yüksek genlikte doğru akım (DA) darbeleri ile uyarmaktır [6]. Bu yöntemi uygulamak için ise özel tasarım bir test sistemine gereksinim duyulur.

Bu çalışmada; UK'lerin elektriksel davranışını gözlemek amacıyla uygulanabilecek, güç elektroniği devreleri ile yüksek genlikli DA akım darbeleri uygulama esasına dayanan sabit akım ve sabit güç test yöntemleri incelenmiş, bu yöntemleri uygulamak amacıyla kullanılacak güç elektroniği tabanlı özel tasarım bir UK test sistemi yapısı ele alınmış ve laboratuvar ortamında oluşturulmuş bir UK modülünün sabit akım ve sabit güç deney sonuçları aktarılmıştır.

2. UK Test Yöntemleri

Üretici firmaların uygulama notlarında ve araştırmacıların çalışmalarında UK'lere yüksek genlikli DA akım darbeleri uygulama esasına dayanan test yöntemleri önerilmektedir [4-6]. Bu yöntemlerde genel olarak UK'lerin Şekil 1'de gösterilen temel elektrik devre modeli esas alınmaktadır.



Şekil 1: UK temel elektrik devre modeli [5-6].

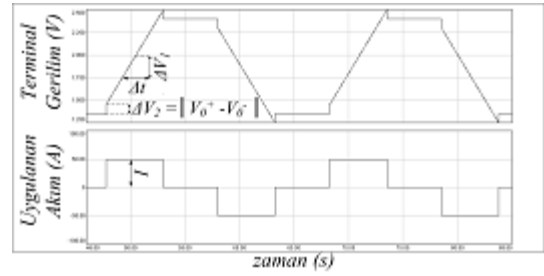
Şekil 1'de gösterilen modelde, C_{uk} parametresi sığayı, R_s parametresi eşdeğer seri direnci (ESD), R_p parametresi ise eşdeğer paralel direnci (EPD) ifade etmektedir [5-6]. C_{uk} parametresi UK'lerin enerji depolama kapasitesini gösteren bir değerdir. Üretici firmaların veri kağıtlarında pozitif ve negatif yönde belirlenmiş tolerans değerleri ile birlikte verilir. UK içindeki omik kayıpları ifade eden R_p parametresi UK'den çekilebilecek güç miktarını belirleyen bir değerdir. R_p parametresi ise UK içinde kaçak akımdan dolayı oluşan kayıpları ifade eder. UK'lerin temel elektrik devre parametrelerini ölçerek veri kağıtlarında gösterilen değerler ile karşılaştırmak, UK tabanlı tasarımlarının güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, üretici firmalar ve araştırmacılar tarafından, UK'leri enerji ve güç yoğunlukları, doldurma ve boşaltma verimi ve kullanım ömrü gibi başarımlar ölçütleri çerçevesinde değerlendirmeye yönelik test yöntemleri de önerilmektedir [4-6]. Bu çalışmada, UK'lerin sığa, ESD ve verim ölçümlerine odaklanılmış olup, UK'lerin farklı başarımlar ölçütlerinde değerlendirilmesine ilişkin olarak [4-6]'dan faydalanılabilir.

2.1. Sabit Akım Testleri

Sabit akım testleri, UK'lerin sabit akımdaki dolma ve boşalma davranışını gözlemlemek için kullanılır. Sabit akım testlerinin sonucunda UK'lerin sığa ve ESD parametreleri elde edilir. Bu yöntemde test edilecek UK, sabit akım dolma ve boşalma süreçlerine tabi tutulur. Sabit akım testleri uygulanırken test edilecek UK'nin anma gerilim değerinin aşılmamasına dikkat edilir. Sabit akım testlerine tabi tutulan bir UK'nin terminal gerilimindeki değişim ile uygulanan akım profili Şekil 2'de gösterilmektedir. Sığa (C_{uk}), Şekil 2'de gösterilen gerilim profilinin doğrusal değiştiği kısım (ΔV_1), uygulanan akımın genliği (I) ve gerilimin doğrusal değiştiği kısmın zaman aralığı (Δt) dikkate alınarak (1)'de verildiği gibi hesaplanır. ESD (R_s) ise, akımın uygulandığı ve kesildiği anlardaki UK gerilimindeki ani değişimler (ΔV_2) ve uygulanan akımın genliği (I) dikkate alınarak (2)'de verildiği gibi hesaplanır. Sığa ve ESD ölçümleri doldurma ve boşalma fazları için ayrı olarak tekrarlanmalıdır [6].

$$C = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V_1} \quad (1)$$

$$ESD = \frac{\Delta V_2}{I} = \frac{V_{0^+} - V_{0^-}}{I} \quad (2)$$



Şekil 2: Sabit akım testi uygulanan bir UK'nin terminal gerilimi ve uygulanan akım profili.

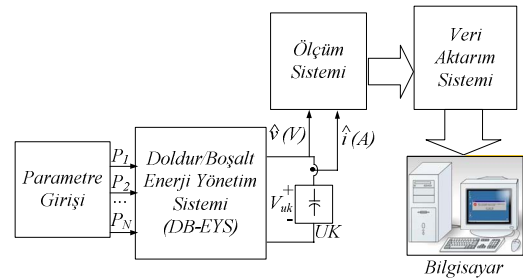
2.2. Sabit Güç Testleri

Sabit güç testleri UK'lerin sabit güçteki dolma ve boşalma davranışını gözlemlemek için uygulanır [6]. Sabit güç testleri sonucunda UK'lerin boşalma ve dolma fazlarındaki akım ve gerilim profillerinin tümleşimi alınarak oranlanır ve böylece UK'lerin belirlenen güç değeri için verim (η) hesabı yapılır. Belirtilen verim hesabı (3)'te gösterilmektedir.

$$\eta = \frac{\int_0^{\Delta t_{\text{boşalma}}} v_{uk}(t) \times i_{uk}(t) \times dt}{\int_0^{\Delta t_{\text{dolma}}} v_{uk}(t) \times i_{uk}(t) \times dt} \quad (3)$$

2.3. Bir UK Test Sistemi Yapısı

UK'lere sabit akım ve sabit güç testlerini uygulayabilmek için, test edilecek UK'ye DA akım işaretleri uygulayıp, UK terminallerindeki gerilim ve akım değişimlerini ölçebilen, blok şeması Şekil 3'te gösterilen bir test sistemine gereksinim duyulur.



Şekil 3: Bir UK test sistemi yapısı.

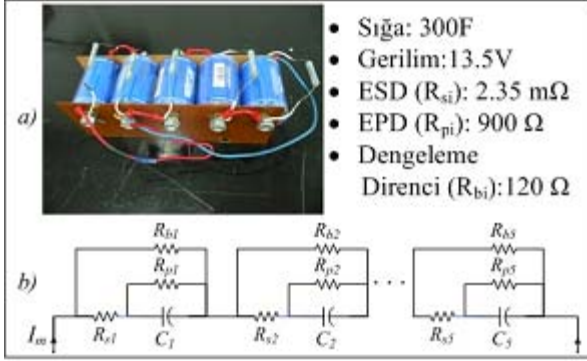
Şekil 3'te gösterilen test sistemi yapısının ana kısmı doldur/boşalt enerji yönetim sistemidir (DB-EYS). Bu birimle UK'ye istenilen profildeki DA akım işaretleri uygulanmaktadır. UK testleri bir gerilim aralığında uygulanır ve azami test gerilimi UK anma geriliminden küçük olacak şekilde seçilir. DB-EYS tarafından uygulanacak akım işaretlerinin profili, UK'lerin hangi gerilim aralığında teste tabi tutulacağı, test yöntemi çeşidi, uygulanacak doldurma ve boşaltma devir sayısı gibi özellikler parametre girişi adı verilen blok aracılığıyla ayarlanır. UK testleri sonucunda UK terminallerindeki akım ve gerilim değişimleri ise bir ölçüm

sistemi aracılığıyla ölçülür ve bir veri aktarım sistemi aracılığıyla da bilgisayara aktarılır. Test sonuçları ise bilgisayar ortamında görüntülenir, gerekli hesaplamalar ve dokümantasyon yapılır.

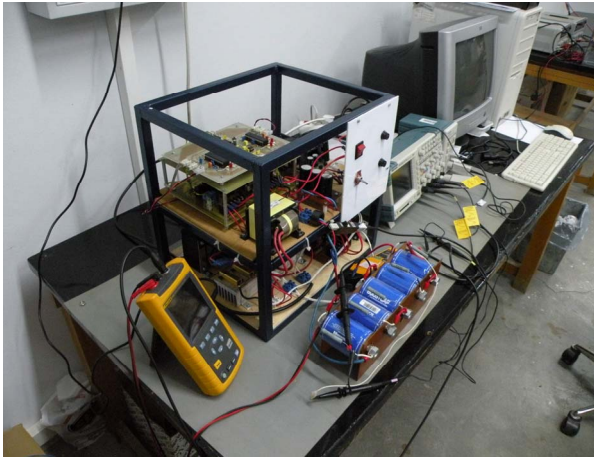
3. Deneysel Çalışma ve Sonuçları

3.1. Gerçekleştirilen UK Modülü ve Test Sistemi

Deneysel çalışma yapmak amacıyla 5 adet Maxwell marka, 1500F sığa ve 2.7V anma gerilim değeri olan UK hücresinin (BCAP 1500) [7] seri bağlanmasıyla bir UK modülü oluşturulmuştur. Modül geriliminin UK hücreleri arasında dengeli bir şekilde dağılması için her UK hücresine paralel olarak 120 Ω değerinde dengeleme dirençleri bağlanmıştır. Oluşturulan UK modülü ve modülün eşdeğer devre modeli Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te gösterilen UK modülünü sabit akım ve sabit güç testlerine tabi tutmak için bir UK test sistemi tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem güç elektroniği dönüştürücüleri tabanlı olup akım denetimlidir. UK test sistemi Şekil 5'te gösterilmekte olup sistem tasarımına ilişkin ayrıntılar [3]'te verilmiştir.



Şekil 4: (a) UK modülü, (b) UK modülü eşdeğer devre modeli.

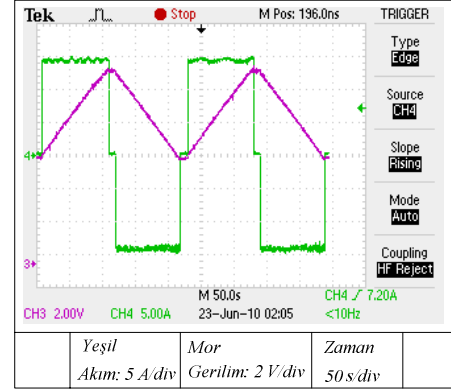


Şekil 5: UK test sistemi.

UK test sistemi aracılığıyla, UK modülü 15A'de sabit akım, 100W'ta da sabit güç testlerine tabi tutulmuştur. UK modülünün azami gerilimi test süreçleri boyunca 12V seviyesinde tutulmuştur.

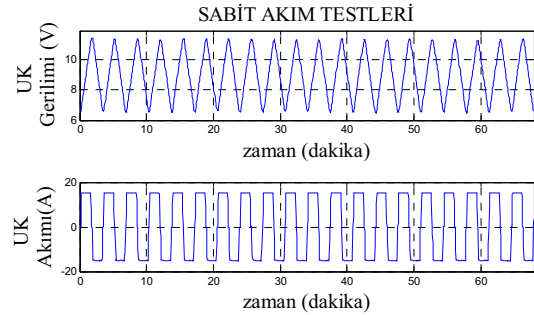
3.2. Sabit Akım Test Sonuçları

Sabit akım testleri, UK modülünün sığa ve ESD değerlerini deneysel olarak gözlemlemek ve modül geriliminin UK hücreleri arasında ne şekilde dağıldığını görmek amacıyla uygulanmıştır. Sabit akım testleri için seçilen akım referans değeri 15A olup test sonucunda oluşan UK akım ve gerilim profilleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6: Sabit akım testindeki UK modülün tepkisi.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, test sürecinde UK modülünün azami gerilimi 12V olarak belirlenmiş olup, bu değer hücre başına 2.4V'luk bir azami gerilime karşılık gelmektedir. Bu noktada, 15A test akımı ve 12V azami gerilim değeri için UK modülünün sabit akımda doğrusal tepki verdiği görülmüştür. Dolayısıyla, UK modülünün sığasının test süreci boyunca sabit kaldığı görülmektedir. UK modülünün sığa değerinin uzun vadede değişimini gözlemlemek için sabit akım testleri 500'den fazla döngü için tekrar edilmiştir ve doğrusal gerilim profilin devam ettiği gözlemlenmiştir. Sabit akım testi uygulanan modül gerilim ve akımının 20 döngü boyunca değişimi Şekil 7'de gösterilmektedir.



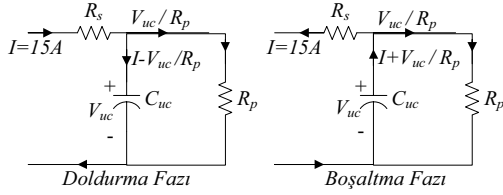
Şekil 7: Sabit akım testindeki UK modülün uzun vade tepkisi.

Şekil 7'de gösterilen UK akım ve gerilim profilleri ile eşitlik (1) birlikte kullanılarak modülün dolma ve boşalma döngülerindeki sığa değerleri hesaplanmış ve dolma ve boşalma fazları için 20 döngünün ortalaması alınmıştır. Ortalama sığa değerleri, veri kağıdı değeriyle Tablo 1'de karşılaştırılmaktadır. Tablo 1'de görüldüğü gibi dolma ve boşalma fazları için hesaplanan ortalama sığa değerleri UK modülünün veri kağıdında değerinden küçüktür. Ancak, UK hücrelerinin veri kağıdında, sığa değeri % 20 ve %-5 tolerans değeri ile birlikte verilmiştir [7]. Dolayısıyla dolma fazı için

hesaplanan %-4.21, boşalma fazı için hesaplanan %-5.60'lık sapma değerlerinin veri kağıdında verilen negatif tolerans değerine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan dolma fazı için hesaplanan sığa değeri ise boşalma fazı için hesaplanan sığa değerine oranla daha yüksektir. Bu durumun sebebi Şekil 8'de gösterilen eşdeğer devre modelleri dikkate alınarak açıklanabilir.

Tablo 1: Hesaplanan sığa değerlerinin karşılaştırılması

Veri Kağıdı	Dolma (Ortalama)	Boşalma (Ortalama)
300 F	287.37 F (Sapma: %-4.21)	283.18 F (Sapma: %-5.60)



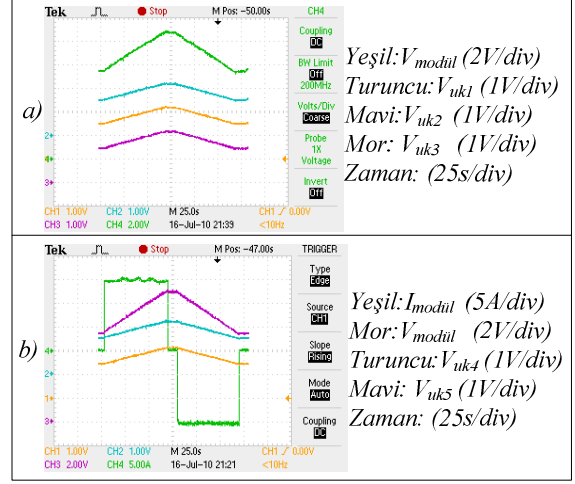
Şekil 8: UK modülünün dolma ve boşalma fazlarındaki eşdeğer devre modelleri.

Şekil 8 incelendiğinde, paralel koldaki akım nedeniyle, UK'ye uygulanan akımın test akımından dolma fazında daha küçük, boşalma fazında ise daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak, hesaplamalarda bu durum dikkate alınmadığı için UK modülünün sığa değeri dolma fazı için gerçek değerinden daha büyük; boşalma fazı için de gerçek değerinden daha küçük olarak hesaplanır. Dolayısıyla, ölçmelerdeki sapmanın nedeni bilinmemekte, sapma miktarı da toleranslar dahilinde olduğundan kabul edilir boyuttur.

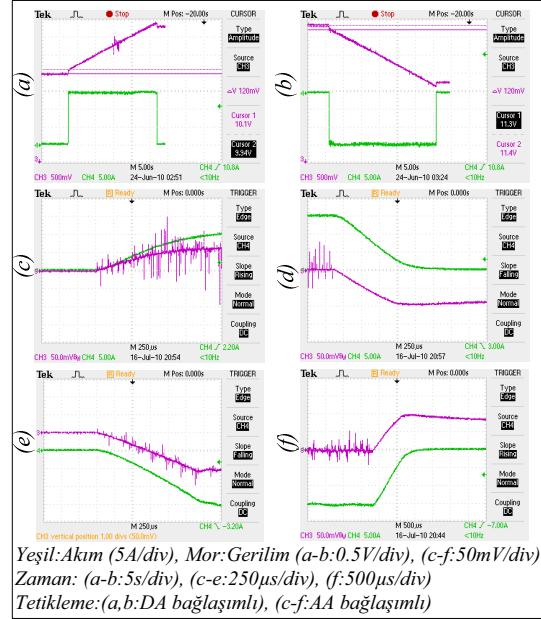
UK modülünün sığa değişiminin incelenmesinden sonra UK modül geriliminin UK hücreleri arasında ne şekilde dağıldığı incelenmiştir. Sabit akım testleri uygulanan UK modülünün hücre gerilim dağılımı Şekil 9'da (üst üç hücre(a), alt iki hücre (b)) gösterilmektedir. Şekil 9 incelendiğinde dolma fazının sonunda 11.2V'luk modül geriliminin UK hücreleri arasında 2.24V olarak eşit dağıldığı, boşalma fazı sonunda ise 7.2V'luk modül geriliminin UK hücreleri arasında 1.44V olarak eşit dağıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, paralel dirençlerden oluşan gerilim dengeleme yapısının bu uygulama için yeterli olduğu sonucuna varılmaktadır.

UK modülünün uzun süreli akım ve gerilim profilinin incelenmesinden sonra UK modülüne akımın uygulandığı ve kesildiği anlarda oluşan ani gerilim değişimleri ele alınmıştır. Oluşan ani gerilim değişimleri ölçülerek eşitlik (2) yardımıyla modülün ESD değerleri hesaplanmıştır. Şekil 10'da UK modülünün alternatif akım (AA) ve DA bağlaşımlı olarak ölçülen anlık gerilim değişimleri, Tablo 2'de ise anlık gerilim değişimlerine bağlı olarak hesaplanan ESD değerleri gösterilmektedir. Tablo 2'deki ESD değerlerinin, UK modülünün 2.35 mΩ'luk veri kağıdı değerinden yaklaşık 3 kat büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun ise UK hücrelerinin modül içerisindeki iletken-pabuç-vida bağlantıları nedeniyle oluşan geç dirençlerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Dolayısıyla, uygulamada modül tasarlanırken geç dirençlerini düşürecek biçimde tasarım yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9: Modülün hücre gerilim dağılımı.



Şekil 10: Anlık gerilim değişimi ölçümleri.

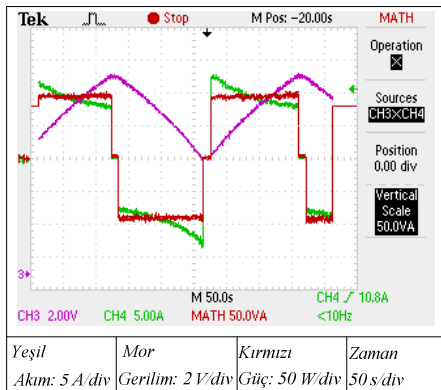
Tablo 2: ESD değerleri

Ölçümler		Dolma	Bosalma
DA bağlaşımlı (a-b)	ΔV (mV)	120	120
	ESD (mΩ)	8	8
AA bağlaşımlı (c-f)	ΔV (mV)	100	100
	ESD (mΩ)	6.67	6.67

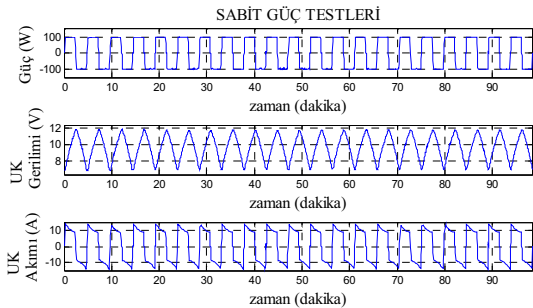
500'den fazla döngü için tekrarlanan sabit akım testleri boyunca, UK modülünün ESD değerinin değişmediği, UK modül geriliminin anlık değişimlerinin Şekil 10 ve Tablo 2 ile uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir.

3.3. Sabit Güç Test Sonuçları

UK'lerin sabit güçteki dolma ve boşalma davranışını gözlemek amacıyla oluşturulan UK modülü sabit güç testlerine tabi tutulmuştur. Sabit güç testi sonucunda elde edilen UK modülünün gerilim, akım ve uygulanan güç profili Şekil 11'de gösterilmektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi uygulanan güç seviyesi hem dolma hem de boşalma fazları için 100W seviyesindedir. UK modül gerilimi ile akımının değişimi de sabit akım testindeki sabit sığa gözlemi ve eşitlik (1) ile uyumludur. UK modülünün verim karakterini dögüsel olarak incelemek için, UK modülüne 100'den fazla döngü için sabit güç testleri uygulanmıştır. UK modülünün 21 döngü boyunca kaydedilen gerilim, akım ve güç profili Şekil 12'de gösterilmektedir. Şekil 12'de gösterilen profil ve eşitlik (3) birlikte ele alınarak UK modülünün verimi her döngü için hesaplanmıştır. Verim değerleri dögüsel olarak büyük farklılıklar göstermemekle birlikte 21 döngü için verim ortalaması 0.9829'dur. Bu noktadan hareketle, UK'lerin verim değerlerinin oldukça yüksek değerlerde olduğu deneysel olarak gözlenmiştir. Ancak, UK verimlerinin daha yüksek güç seviyelerinde de değerlendirilmesi, güç seviyesi ile verimin ilişkisini görmek açısından doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu amaçla, güç elektroniği tabanlı UK test devrelerinin UK'lerin anma akımı ve üzerinde tasarlanması gerekir.



Şekil 11: Sabit güç testindeki UK modülün tepkisi.



Şekil 12: Sabit güç testindeki UK modülün uzun vade tepkisi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; UK'lerin sığa, ESD ve verim özelliklerini deneysel olarak gözlemek amacıyla; sabit akım ve sabit güç test yöntemleri incelenmiş, laboratuvar ortamında bir UK modülü oluşturulmuş, oluşturulan UK modülü ise gerçekleştirilen bir güç elektroniği tabanlı özel tasarım test sistemi aracıyla 15A'de sabit akım ve 100W'ta da sabit güç testlerine tabi tutulmuştur. UK modülünün deney sonuçları geleneksel kondansatör teorisiyle uyumludur. Ancak, yapılan deneyler sonucunda UK modülünün deneysel gözlemleri ile veri kağıdı değerleri arasında bazı farklılıklar da tespit edilmiştir.

Sabit akım testleri sonucunda UK modülünün sığa değeri doldurma fazı için %4.21, boşaltma fazı içinse %-5.60'lık sapmayla veri kağıdı değerinden farklılık gösterdiği, fakat bu farklılığın veri kağıdında verilen %-5'lik negatif tolerans değerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Sığa ölçümlerinden sonra UK modülü içerisinde gerilimin ne şekilde dağıldığı incelenmiş, hem doldurma hem de boşaltma fazı için UK modül geriliminin seri bağlı UK hücreleri arasında dengeli dağıldığı sonucuna varılmıştır. Bir sonraki aşamada modülün ESD ölçümleri yapılmış ve UK modülünün ESD'sinin veri kağıdı değerinin yaklaşık 3 katı daha fazla olduğu tespit edilmiş, bu durumun ise modül içerisindeki degeç dirençlerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Son aşamada ise UK modülü sabit güç testlerine tabi tutulmuş ve yapılan hesaplamalar sonucunda UK modülünün verimliliğinin %98 mertebesinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, UK'lerin parametrelerinin tolerans bölgesi dahilinde ve sabit, enerji bakımından oldukça verimli, kullanım bakımından da uzun ömürlü EDB'ler olduğunu göstermektedir. UK'ler fiyatlarının da ekonomikleşmesi ile birlikte enerji depolama uygulamalarında yaygınlaşmaya devam etmektedirler.

5. Kaynaklar

- [1] Schneuwly A., Gally R., "Properties and applications of supercapacitors – from the state-of-the-art to future trends", *PCIM,2000*, ss:1-10.
- [2] Maxwell Technologies, *Product guide - Maxwell Technologies BOOSTCAP ultracapacitors*, Doc. no. 1014627.1, 2009.
- [3] Eroğlu H.H., *Design and implementation of an ultracapacitor test system*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [4] Maxwell Technologies, *Test procedures for capacitance, ESR, leakage current and self-discharge characterizations of ultracapacitors*, Uygulama notu, 2009.
- [5] Nesscap, *Ultracapacitor technical guide*, 2008.
- [6] Miller J.R., Burke A.F., *Electric vehicle capacitor test procedures manual*, Revision 0, Idaho National Engineering Laboratory, Report No. DOE/ID-10491, 1994.
- [7] Maxwell Technologies, *MC power series BOOSTCAP ultracapacitors*, Veri kağıdı, Doc:1009361.