



## CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O sıvı direncin harmonikli ve harmoniksiz yüksek gerilim altında kısmi boşalma davranışları

Murat Fidan<sup>1\*</sup>, Hasbi İsmailoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Gerilim Laboratuvarı, Gölköy, 14300, Bolu, Türkiye

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Gerilim Laboratuvarı, Umuttepe, 41380, Kocaeli, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Elektriksel kısmi boşalma ölçümü
- Yüksek gerilim direnç tasarımı
- Harmonikli ve harmoniksiz yüksek gerilimler

### Makale Bilgileri

Geliş: 10.02.2016  
Kabul: 02.09.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.300620

### Anahtar Kelimeler:

Yüksek gerilim,  
kısmi boşalma,  
sıvı direnç,  
bakır (II) sülfat penta hidrat,  
ultrasonik banyo

### ÖZET

Elektrik enerjisi iletiminde yüksek gerilim kullanılması kayıpları düşürürken, ortaya elektriksel yalıtım sorunları çıkarmaktadır. Elektriksel yalıtım sorunlarının aşılabilmesi yalıtım malzemelerinin ve sistemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Yalıtım sistemlerinin geliştirilmesinde deneysel çalışmalar önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmalarda kullanılacak devre elemanlarının uygun biçimde tasarlanması ve gerçekleştirilmesi oldukça zor, zaman alıcı ve yüksek maliyetlidir. Elektriksel kısmi boşalma ölçümleri, yüksek gerilim aygıtlarının performanslarının değerlendirilmesinde yararlanılan tahribatsız deney yöntemlerinin başında gelmektedir. Kısmi boşalma ölçümlerinde elde edilen sonuçların doğruluğu, deneylerde kullanılan elemanların kısmi boşalmaması olmalarına bağlıdır. Bu çalışmada, ultrasonik banyo ve vakumlama tekniği ile işlenen CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O (Bakır (II) sülfat penta hidrat) çözeltisinin kullanıldığı kısmi boşalmaması sıvı direnç yapım tekniği anlatılmıştır. Bu şekilde elde edilen sıvı direncin, geleneksel yöntemlerle elde edilenlere göre kolay hazırlanması ve değerinin değiştirilmesi mümkündür. Deney sonuçları, sıvı dirençlerin saf sinüzoidal ve 3. ve 5. harmonik bileşenler içeren gerilimlerde, 0,1 pC'dan düşük kısmi boşalma düzeylerine sahip olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, sıvı direncin doğru gerilimde kullanılmaması önerilmiştir.

## Partial discharge behavior of the CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O liquid resistor at high voltages with and without harmonics

### H I G H L I G H T S

- Partial discharge measurement
- High voltage resistor design
- High voltages with and without harmonics

### Article Info

Received: 10.02.2016  
Accepted: 02.09.2016

### DOI:

10.17341/gazimmfd.300620

### Keywords:

High voltage,  
partial discharge,  
liquid resistor,  
copper (II) sulfate  
pentahydrate,  
ultrasonic bath

### ABSTRACT

The usage of high voltage in electrical transmission systems reduces the power losses; on the other hand, raises the insulation problems. To overcome the problems of electrical insulation depends on the development of insulation materials and systems. Experimental studies play an important role in the development of insulation systems. Design and implementation of components used in experimental studies, are very difficult, time consuming and therefore higher costs. In this study, the production of a liquid resistor, using CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O (copper (II) sulfate pentahydrate) solution treated with ultrasonic bath and vacuum technique, is described. The produced liquid resistance can be prepared easily compared to that obtained by conventional methods and its value can be changed. Experimental results show that, the liquid resistance exhibits low partial discharge levels less than 0.1 pC, at pure sinusoidal and at voltages containing 3rd and 5th harmonic components. On the other hand, it is not recommended to use the liquid resistance under DC conditions.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding author: mfidan@ibu.edu.tr / Tel: +90 374 254 10 00-4866

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek gerilim laboratuvarlarında yapılan kısmi boşalma (KB) deneylerinde kullanılan elemanlar özel olarak tasarlanarak imal edilmektedirler. Bu aygıtların tasarımlarının, yapılarının ayrıntılı çalışma ve çaba gerektirmesi, söz konusu aygıtların imalatını zaman alıcı ve yüksek maliyetli kılmaktadır [1]. Kısmi boşalma deneylerinde kullanılan devre elemanları arasında yüksek gerilim dirençleri de önemli bir yer tutmaktadır. Yüksek gerilim dirençleri, deneyler sırasında gerilim altında bulunan deney malzemesinin, olası bir kısa devreye maruz kalması durumunda akımı sınırlamak ve ölçme devresine yansiyabilecek gürültüleri azaltmak için kullanılırlar [2]. Bu dirençlerin boyutları, kullanıldıkları gerilim seviyesine ve üzerlerinden geçirecek akıma bağlı olarak yapısal farklılıklar gösterebilmektedir. Alçak gerilimde kullanılan dirençlerle karşılaştırıldıklarında, boyutlarının ve yapılarının oldukça farklı ve yapı olarak daha büyük oldukları görülmektedir [3]. Yüksek gerilim dirençleri çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedir. Belirli değere sahip bir yüksek gerilim direnci elde etme yöntemlerinden birisi, uygun sayıda ve dayanımda alçak gerilim direncini seri olarak bağlamaktır. Bu yöntemde alçak gerilim dirençlerinin birbirine bağlantılarının yapılması ve bunların bir muhafaza içine montajı oldukça zahmetlidir. Uygulaması gerçekleştirilen böyle bir direnç yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Alçak gerilim dirençleri kullanılarak yapılmış yağ yalıtımlı bir yüksek gerilim direnci  
(Oil insulated high voltage resistor, constructed using low voltage resistors)

Alçak gerilim dirençleri kullanılarak yapılan bir yüksek gerilim direncinin, KB ölçümünde kullanılması önemli sakıncalar doğurabilmektedir. Bunların başında, böyle dirençlerin istenmeyen gürültü (kısmi boşalma) oluşturmaları gelmektedir [4]. Bağlantı ve montajda ortaya çıkan eğrilik yarıçapı küçük kısımlardan kaynaklanan bu gürültüler, KB ölçüm devresine yansımakta ve hatalı ölçüm sonuçları elde edilmesine neden olabilmektedir. Yüksek gerilim direnci elde etmek için kullanılabilecek bir diğer yöntem ise belirli öz dirence sahip Ni-Cr tellerden faydalanmaya dayanır. Bu yöntemde, istenen gerçek direnç değerinin elde edilebilmesi için oldukça uzun Ni-Cr tel kullanmak gerekebilir. Benzer biçimde bu telin de sarılarak bir muhafaza içine yerleştirilmesi oldukça zorlu bir işlemdir. Ayrıca, bu yöntemde de eğrilik yarıçapları küçük direnç tellerinin doğuracağı sakıncalarla karşılaşmak mümkündür. Her iki yöntemle elde edilen dirençlerin gürültüye sebep olmamaları; yani kısmi boşalmaz olabilmeleri için delinme dayanımı havanınkinden daha

yüksek olan bir yalıtkan ortam içine alınmaları gerekmektedir. Söz konusu yalıtkan ortam katı, sıvı veya gaz formda olabilir. Direncin, katı yalıtkan olarak epoksi reçine içine gömülmesi durumunda, ortaya çıkan yapının ağırlığı, laboratuvar ortamında montaj problemlerine neden olabilecektir. Epoksi reçine ile kaplama; vakum ve fırınlama ile yapılan pahalı bir yöntem olup, eğrilik yarıçapı küçük bölgelerin tam olarak kapatılabilmesi kimi zaman mümkün olmamaktadır. Bu bölgelerde elektrik alan şiddetleri daha büyük olacağından, kısmi boşalma oluşumu yine görülebilecektir. Ayrıca epoksi reçine kaplanan direnç yapısında herhangi bir hasar meydana geldiğinde veya KB görüldüğünde, bu direncin onarılması veya bakımının yapılması mümkün olmayacağı için KB ölçümlerinde kullanılması sakıncalı olacaktır. Kısmi boşalma oluşumunun engellenmesi için direnç, sıvı yalıtkan içine yerleştirilerek kullanılabilir [5]. Sıvı yalıtkan olarak genelde elektriksel yağlar tercih edilmektedir. Bu durumda da direncin yerleştirildiği mahfazanın tamamıyla vakum altında, nemi alınmış yağ ile doldurulması gerekmektedir. Direnç yapısının, mahfazadan ve yağdan kaynaklanan ağırlığı ve yağ sızdırmazlık problemleri göz önüne alındığında bu yöntemin de kullanışlı olmadığı söylenebilir. Yüksek gerilim direncinin gaz yalıtımlı bir mahfaza içinde kullanılması bir diğer seçenektir. Bu seçenekte genel olarak SF<sub>6</sub> gazı yalıtkan olarak tercih edilmektedir. Sıvı yalıtkan olduğu gibi, bu yöntemde de yapısal sızdırmazlık problemleri ile karşılaşılması mümkündür. Buna ek olarak, SF<sub>6</sub> gazının maliyeti ve kullanım zorluğu dikkate alındığında, yalıtkan ortam olarak gaz yalıtkan kullanımının iyi bir çözüm olmayacağı söylenebilir [6]. Sözü edilen yöntemlerle elde edilen dirençlerde bir diğer problem de, bunlarda endüktif ve kapasitif bileşenlerin, göz ardı edilemeyecek biçimde ortaya çıkma ihtimalinin bulunmasıdır. Bu bileşenler, üzerinde çalışılan işaretlerin karakteristik özelliklerini bozabilmektedir [7].

Yukarıda verilen yöntemlere alternatif olabilecek; yapımı daha kolay, ucuz ve direnç karakteri diğerlerine göre daha baskın; endüktif ve kapasitif etkileri daha düşük olan [8], kısmi boşalmaz bir yüksek gerilim sıvı direnci tasarımı ve yapımı aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Çalışmada, bu dirençlerin doğru akım, saf sinüzoidal ve harmonikli alternatif akımlar altındaki davranışları da incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Sıvı Direnç Tasarımı (Design of Liquid Resistor)

Alçak ve yüksek gerilimlerde kullanılan temel direnç yapıları birbirinin benzeridir. Aralarındaki önemli fark yapı olarak büyüklükleridir. Genel kullanım açısından bakıldığında bir direncin devreye bağlantı için kullanılan iki ucu vardır. Özellikle yüksek gerilim deneylerinde, deney malzemesinin ve diğer devre elemanlarının yapılarına ve deney tekniğine bağlı olarak belirli boyutlara sahip bir direnç kullanma gereksinimi ortaya çıkabilmektedir. Bir

sıvı direncin yapısının da uygulama kolaylığı açısından, geleneksel olarak kullanılan direnç yapısıyla benzer olması gerekmektedir. Yapısal olarak, iletken bir çözeltinin iki elektrot arasına yerleştirilmesi ile sıvı direnç elde etmek mümkündür. Ancak, istenen değerde ve boyutta bir sıvı direnç, iletkenliği bilinen bir çözelti kullanılarak elde edilebilir. Belirli iletkenliğin elde edilmesi, çözücü ve çözünen karışımının dengesine bağlıdır. Teorik olarak katı malzemelerin elektriksel direnci Eş. 1 ile ifade edilebilir.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Eş. 1'deki ( $\rho$ ) öz direnç ile ( $\chi$ ) öz iletkenlik arasındaki bağıntı Eş. 2 ile verilebilir.

$$\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = \frac{1}{\chi} (\text{S/cm})^{-1} \quad (2)$$

Eş. 2'den yararlanılarak elektriksel direncin öz iletkenliğe bağlı ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

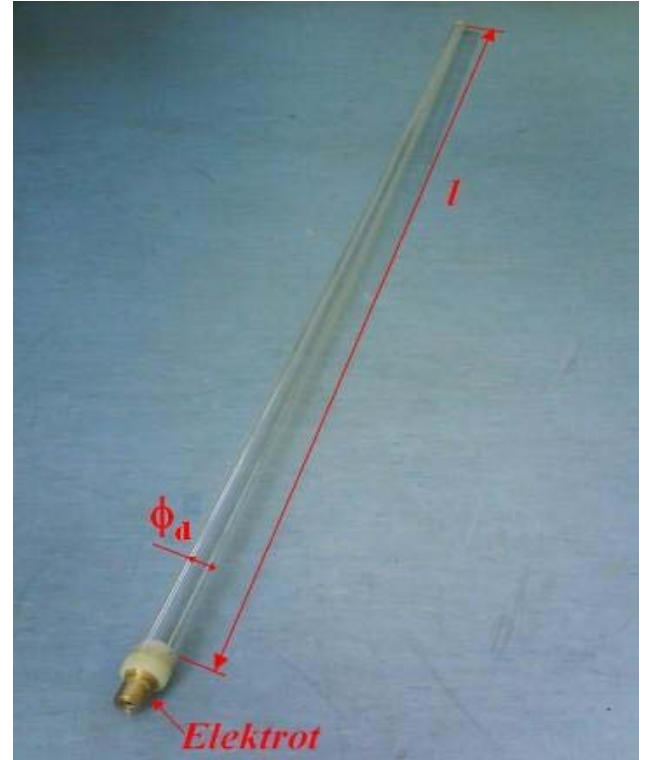
$$R = \frac{l}{\chi S} (\Omega) \quad (3)$$

Katı malzemeler için verilen Eş. 3, sıvı (elektrolit) malzeme kullanılarak elde edilen bir direnç için de kullanılabilir. İletkenliği bilinen bir sıvının, Şekil 2'deki gibi, boru şeklinde yalıtkan bir mahfaza içine doldurulması ve uçlarının metal elektrotlar ile kapatılması ile sıvı direnç edilmesi mümkündür. Bu durumda, Eş. 3 ifadesini sıvı dirence uyarlayabilmek için eşitlikteki öz iletkenlik, uzunluk ve kesit büyüklüklerine, sırasıyla elektrolitiğin öz iletkenliği, sıvı direncin elektrotları arasındaki uzunluğu ve yalıtkan mahfazanın iç kesiti karşı düşürülebilir. Şekil 2'de gösterilen ve mahfaza olarak kullanılan borunun kesiti Eş. 4 ile belirlenebilir.

$$S = \pi \left( \frac{\Phi_d}{2} \right)^2 \quad (4)$$

Sıvının yerleştirildiği borunun şeffaf olması, sıvının çalışma sırasındaki fiziksel değişimlerinin gözlenmesine olanak tanır. Bu yüzden, çalışmada PVC ve akrilik malzemelerden yapılmış şeffaf boruların kullanımı tercih edilmiştir. Yüksek gerilim sıvı direnç yapımında kullanılacak olan sıvının ( $\chi$ ) öz iletkenliği değiştirilerek, istenen değerlerde sıvı dirençler elde edilebilir.

Söz konusu sıvı direnci elde etmek için tuz ve saf su kullanılarak hazırlanan çözeltiler kullanılabilir. Saf su ve tuzdan oluşan çözeltilerde öz iletkenlik, çözeltinin molar derişimine bağlıdır. Çözeltinin molar derişimi de kullanılan tuz ve saf su miktarına bağlı olarak değişir. Çalışmada sıvı olarak,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (bakır (II) sülfat penta hidrat) tuzu ve saf su ile hazırlanan çözelti kullanılmıştır.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin molaritesi Eş. 5 ve Eş. 6 ile belirlenebilir.



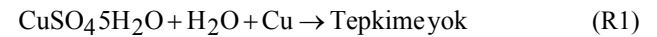
**Şekil 2.** Sıvı direnç yapımında kullanılan PVC/akrilik boru yapısı [1]

(The PVC/acrylic pipe insulator used in application of the liquid resistor)

$$n(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = \frac{m}{M_A(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} \quad (5)$$

$$M(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = \frac{n(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}{V_d} \quad (6)$$

Sıvı direnç elektrotlarını oluşturacak metalin cinsinin, elektrolit çözeltiye bağlı olarak seçilmesi gerekir. Elektrot olarak kullanılacak metalin cinsi, çözelti ile tepkimeye girmeyecek türden olmalıdır. Çözelti ile elektrotlar arasında herhangi bir tepkime olması durumunda, çözeltinin iletkenliği değişebileceğinden, tasarlanan direncin değeri, kısa bir süre içinde kayda değer oranda değişebilir. Ayrıca elektrotlar, korozyon nedeni ile zamanla aşınarak, bozunmaya uğrayabilir ve deney sisteminde sorunlara neden olabilirler.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ve saf su kullanılarak hazırlanan çözeltiler için bakır ve bakır alaşımly pirinç gibi metallerin seçilmesi gerektiği reaksiyon 1 ile anlaşılabilir.



Reaksiyon 1'e göre,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi ile bakır elementinin tepkimeye girebilmesi için gerekli olan elektron alış veriş gerçekleşmemektedir [9]. Yukarıda da söz edildiği gibi,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin öz iletkenliği, molar derişimi (molaritesi) ile ilişkilidir [10].  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin molaritesi ve öz iletkenliği arasındaki bu

**Tablo 1.** CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisinin 25<sup>0</sup> C'deki molariteye bağlı öz iletkenlik değerleri  
(Conductivity versus molarity of CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O solution at 25<sup>0</sup> C)

Çözelti No	Saf Su Miktarı, lt	Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O Miktarı, gr	Molarite, Molar	Ölçülen İletkenlik, µS/cm
1	0,5	0,2018	0,001616404341	325,008
2	0,5	0,1954	0,001565140775	319,6932
3	0,5	0,1905	0,001525892106	311,6386
4	0,5	0,184	0,001473827546	297,575
5	0,5	0,1781	0,001426568945	291,966
6	0,5	0,1678	0,001344066643	276,045
7	0,5	0,1556	0,001246345468	251,336
8	0,5	0,1373	0,001099763707	231,549
9	1,5	0,3526	0,000941434045	196,753
10	1,5	0,334	0,000891772465	188,426
11	0,5	0,1089	0,000872281629	186,605
12	1,5	0,3123	0,000833833954	179,879
13	1,5	0,2979	0,000795386279	170,896
14	1,5	0,1692	0,000451760183	100,856
15	1,5	0,14356	0,000383301961	85,183
16	0,5	0,0456	0,000365252914	84,521
17	1,5	0,12305	0,000328540724	78,259
18	1,5	0,1023	0,000273138692	62,359
19	1,5	0,0857	0,000228817066	52,059
20	1,5	0,0773	0,000206389256	47,948

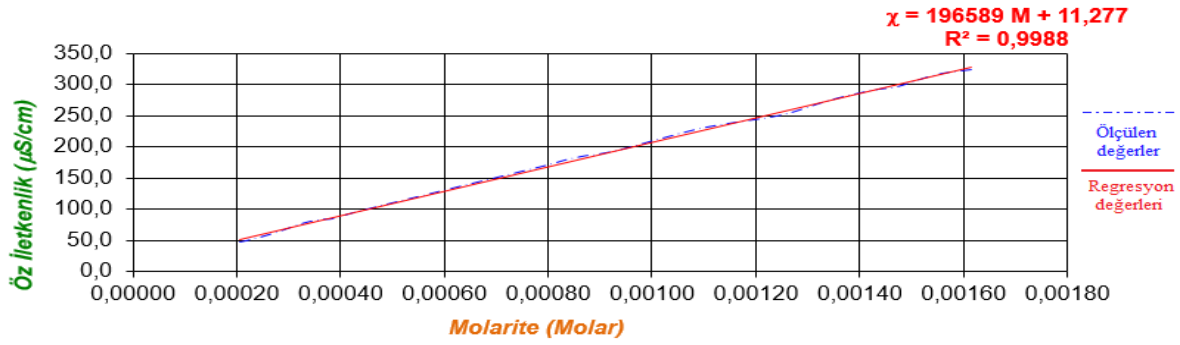
ilişkiyi belirlemek için değişik molaritelerde yirmi farklı CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisi hazırlanmıştır. Çözelti hazırlanmasında kullanılan saf su, şebeke suyundan saflaştırma (distilasyon) yöntemi ile elde edilmiştir. İşlem sonucunda elde edilen saf suyun 25<sup>0</sup>C'deki iletkenliği 2,4 µS/cm olarak ölçülmüştür. Değişik molaritelerde hazırlanan yirmi farklı CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisine ilişkin madde oranları ve ölçülen iletkenlik değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen çözeltilere ilişkin değerlerin belirlenmesinde, meydana gelebilecek sapma miktarını küçülebilmek için 0,5 ve 1,5 litre gibi farklı iki saf su ölçeği kullanılmıştır. Sabit hacimdeki saf suya eklenen tuz miktarı değiştirilerek, farklı molaritelerde yirmi farklı çözelti oluşturulmuştur. Öz iletkenlik ölçümleri, Lovibond Senso Direct Con 200 Conductivity Meter® ile 25<sup>0</sup>C sıcaklık, %50 nem ve 760 mmHg basınç altında gerçekleştirilmiştir. Tablo 1'de verilen ölçüm sonuçlarına bağlı olarak, Şekil 3'te gösterilen, molariteye bağlı iletkenlik değişimini veren grafik elde edilmiştir. Şekil 3'de verilen grafiğin değişiminin, belirli aralıkta yaklaşık doğrusal olduğu görülmektedir. Söz konusu grafik, eğri uydurma (regresyon) yöntemi ile doğrusal bir hale getirilmiş ve eşitliği elde edilmiştir. Ölçüm sonucu bulunan değerlerin meydana getirdiği eğri ve bu değerler kullanılarak oluşturulan regresyon eğrisi aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisinin molaritesi ile 25<sup>0</sup> C'deki iletkenliği arasındaki bağıntı Eş. 7 ile belirlenmiştir. Bu eşitlikte M, çözeltinin molaritesini ifade etmektedir.

$$\chi = 196589 M + 11,277 \quad (7)$$

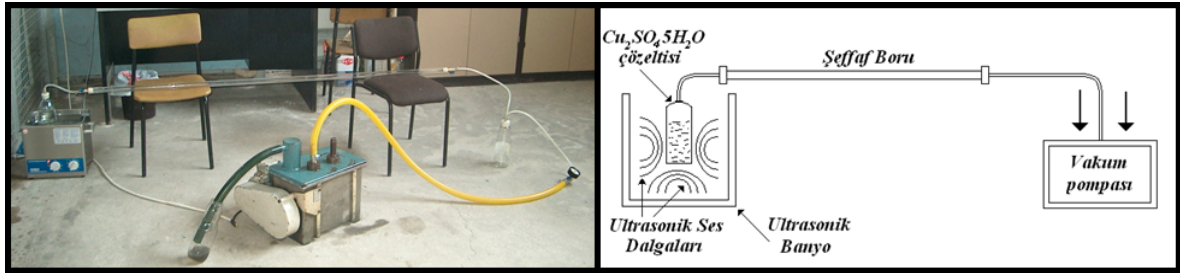
Belirli değere sahip bir sıvı dirençte kullanılması gereken CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O tuzu ve saf su miktarlarının, Eş. 3, Eş. 5, Eş. 6 ve Eş. 7 ile belirlenmesi mümkündür [1].

## 2.2. Sıvı Direnç Uygulaması (Application of Liquid Resistor)

Yukarıda teorik bilgisi verilen sıvı direnç tasarımının uygulamadaki geçerliliğini sınamak üzere üç farklı değerde ve yapıda sıvı direnç imal edilmiştir. Bunun için uzunlukları 2 m, iç çapları 20 mm ve 17 mm olan PVC ve iç çapı 14 mm olan akrilik malzemelerden yapılmış şeffaf borular kullanılmıştır. Karşılaştırmanın doğruluğunu sağlamak için tüm sıvı direnç değerlerinin 300 kΩ olması hedeflenmiştir. Eş.3 yardımıyla 20 mm çap için 212 µS/cm, 17 mm çap için 293 µS/cm ve 14 mm çap için 433 µS/cm öz iletkenliğe sahip CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisine gereksinim olduğu belirlenmiştir. Bu öz iletkenliklere sahip çözeltilerin molariteleri, Eş. 7 yardımıyla belirlendikten sonra Eş. 5 ve Eş. 6 kullanılarak, gerekli olan CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O tuzu ve saf su miktarları belirlenmiş ve yapılan hesaplamalar doğrultusunda çözeltiler hazırlanmıştır. Dirençlerin bağlantı uçları (elektrotları), daha önce açıklanan gerekçelerle pirinç ve bakır malzemelerin tornada işlenmesi suretiyle üretilmişlerdir. Hazırlanan CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisinin şeffaf boru içine doldurulması işlemi, şematik gösterilimi ile birlikte Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'teki sistemde görülen ultrasonik banyo ve vakum pompası, CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisi hazırlanırken, çözelti içinde çözünen hava moleküllerini ortamdan uzaklaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Söz konusu hava moleküllerinin tamamının çıplak gözle görülebilmesi mümkün değildir. Fakat bu hava molekülleri, zamanla birleşerek, gözle görülebilecek kadar büyük hava kabarcıklarına dönüşebilmektedirler. Direnç içinde bulunabilecek hava kabarcıkları, yüksek gerilim altında çalışma sırasında farklı zorlanmalara neden olabileceklerinden, oluşumlarının önüne geçilmesi gerekir. Bu amaçla ultrasonik banyo içine yerleştirilen CuSO<sub>4</sub>5H<sub>2</sub>O çözeltisine 36 kHz'lik ses dalgaları uygulanmıştır.



Şekil 3.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin  $25^\circ\text{C}$ 'de molariteye bağlı öz iletkenlik değişimi [1]  
(Variation of conductivity with the molarity of  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  solution at  $25^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltili direncin ultrasonik banyo ve vakum ile hazırlanması [1]  
(Preparation of the  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  solution liquid resistor via ultrasound bath and vacuum)

Ultrasonik ses dalgaları,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi içinde çözülmüş halde bulunan hava moleküllerine çarparak kinetik enerjilerini artırır; böylece çözelti içinde çözülmüş olan havanın difüzyonu kolaylaştırılmış olur. Sisteme ultrasonik etki ile eş zamanlı uygulanan vakum etkisiyle de sistemde açığa çıkan hava kabarcıklarının ortamdan uzaklaştırılması sağlanmıştır [1]. Açıklanan yöntem ile hedeflenen direnç değerlerine, maksimum  $\pm\%3$  hata ile ulaşılmıştır. 20 mm çaplı PVC boru ile 291 k $\Omega$ , 17 mm çaplı PVC boru ile 305 k $\Omega$ , 14 mm çaplı akrilik boru ile 296 k $\Omega$  değerlerinde sıvı dirençler üretilmiştir. Direnç değerlerinin belirlenmesine yönelik ölçme işlemlerinde 380 Volt alternatif şebeke gerilimi kullanılmıştır. Direnç uçlarına doğrudan uygulanan gerilime bağlı olarak direnç üzerinden geçen akım ölçülerek, direnç değerleri hesaplanmıştır. Ölçümler, UNI-T UT-71D® ölçü aleti ile  $24^\circ\text{C}$  sıcaklık, %53 nem ve 760 mmHg basınç altında gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Doğru Gerilim Davranışı (Direct Voltage Analysis)

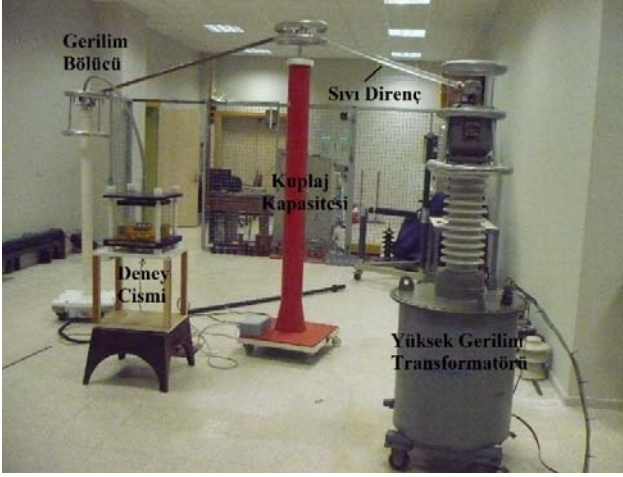
Teori ve uygulaması yukarıda aktarılan yöntemle gerçekleştirilen dirençlerin doğru akımdaki davranışlarını incelemek için her üç sıvı dirence 60 Volt doğru gerilim uygulanmıştır. Güç kaynağı olarak Dual Tracking 6303D DC Power Supply® kullanılmıştır. Doğru gerilimin direnç üzerinde meydana getireceği akım geçişine bağlı olarak doğru akım analizinin gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Fakat doğru akımın, direnç üzerine uygulandığı andan

itibaren sabit kalmadığı ve hızla düştüğü gözlenmiştir. Doğru akım koşullarında sıvı direnç değerinin değişmesi, çözelti içindeki  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzu moleküllerinin, doğru akım altında kutuplandığı ve madde kaybına uğradığı şeklinde yorumlanmıştır. Bir elektrik devresinde kullanılan direncin değerinin, çalışma süresince sabit kalması istenir. Çalışma sırasında değeri değişen bir direncin doğru akım altında yapılan KB ölçme sistemlerinde kullanılması hatalara neden olabileceği için doğru akım analizi sonlandırılmıştır. Bu çalışma, sıvı direncin KB devrelerinde kullanılabilmesini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Farklı bir çalışma ile sıvı direncin doğru akım altındaki geçici rejim analizinin ayrıntılı olarak gerçekleştirilmesi mümkündür.

#### 3.2. Harmonikli ve Harmoniksiz Sinüzoidal Gerilim Davranışları

(Sinusoidal Voltage Behaviors With and Without Harmonics)

Geliştirilen sıvı dirençlerin, bir kısmı boşalma ölçme sisteminde devreye bağlantısı Şekil 5'te verilmiştir. KB ölçme sistemlerinde kullanılan elemanların kısmi boşalmasız olması, ölçüm sonuçlarının güvenilirliği açısından çok önemlidir [4]. Güç sistemlerinde yüksek gerilim aygıtlarına ilişkin yalıtım kalitesi, işletmeye alınmadan önce bu aygıtlara uygulanan bazı tahribatsız deneylerle belirlenebilmektedir [11]. Kısmi boşalma ölçümleri, yalıtım kalitesinin değerlendirilmesinde tercih edilen, güvenilir deney yöntemlerinin başında gelmektedir. Bu nedenle, elektriksel KB ölçümlerinin yüksek gerilim endüstrisindeki önemi büyüktür [12].



**Şekil 5.** Sıvı direncin kısmi boşalma ölçüm sistemine bağlantısı [1]

(Connection of the liquid resistor on partial discharge measurement circuit)

KB ölçümleri laboratuvar şartlarında tam sinüzoidal deney gerilimleri ile yapılmaktadır. Ancak, yüksek gerilim sistemleri işletme koşullarında, harmoniklerden kaynaklanan bozuk gerilimler nedeniyle farklı biçimde zorlanabilmektedir [13]. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, doğrusal olmayan (non-linear) yüklerin artışıyla enerji kalitesini bozan etkenler de çoğalmıştır [14]. Elektrik güç sistemine bağlı cihazların ve son kullanıcı yüklerin zarar görmesine, arızalanmasına veya istenmeyen bir çalışma karakteristiğine neden olan gerilimin veya akımın genişliğinde, frekansında ve dalga formundaki değişimler, elektrik güç kalitesi problemleri olarak tanımlanmaktadır [15]. Özellikle harmonik bileşenler, işletme gerilimi dalga şeklini sinüzoidal biçimden uzaklaştırarak, güç kalitesini bozan etkenlerin başında gelmektedir [16, 17]. Enerji kalitesini bozan harmoniklerin, güç sistemlerinde kullanılan transformatör yağlarında [18], yüksek gerilim kablolarında kullanılan çaprazlanmış polietilen (XLPE) malzemede [19] ve yüksek gerilim sistemlerinde yalıtım malzemesi olarak kullanılan epoksi reçinede [20], meydana gelen kısmi boşalmaları önemli oranda etkilediği görülmektedir. Literatürde, özellikle işletme koşulları altındaki transformatör yalıtımlarında [20] ve birden çok yalıtkanın kullanıldığı diğer benzer yalıtım sistemlerinde [22] meydana gelen yüzeysel kısmi boşalmaların harmoniklerden etkilendiği vurgulanmaktadır. Yukarıda değinilen ve konu ile ilgili diğer kaynaklar, harmonikli gerilimler altında KB ölçümlerinde kullanılabilecek sistem ve donanımlara duyulan ihtiyacın önemini göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında geliştirilen sıvı dirençler, saf sinüzoidal ve harmonik bileşen içeren alternatif gerilimler ile KB deneylerine tabi tutularak sinanmıştır. Saf ve harmonikli deney gerilimlerinin üretildiği ve kısmi boşalmaların değerlendirildiği ölçüm sisteminin yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. Çalışmada deney gerilimleri, California Instrument 4500 Lx® model ayarlanabilir güç

kaynağı yardımı ile üretilmiştir. Ayarlanabilir güç kaynağı ile 4500 VA güce kadar, 45-1000 Hz frekans aralığında alternatif gerilimler üretilebilmektedir. Söz konusu güç kaynağı ile belirli bir temel frekans bileşeni üzerine, farklı harmonik bileşenlerin bindirilmesiyle istenen harmonik bozulmaya sahip gerilim dalga şekilleri de üretmek mümkündür. Ayarlı güç kaynağı ile üretilen deney gerilimleri Şekil 5'te görülen yüksek gerilim transformatörünün girişine uygulanarak yükseltilmiştir. Deney transformatörü 1/500 çevirme oranına sahip olup tek fazlı, 100 kV'a kadar çıkış gerilimi verebilen yağ yalıtımlı, kısmi boşalmasız bir transformatördür. KB ölçümleri için kullanılan kuplaj kondansatörü 1nF, 50 kV etkin gerilimde kullanılabilen, yine yağ yalıtımlı, kısmi boşalmasız bir kondansatördür ve çalışmadaki KB ölçümlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Kuplaj kondansatörü, silindrisel elektrot sistemlerinden faydalanılarak tasarlanmış, alüminyum ve delrin malzemelerin torna ve frezede işlenmesi ile imal edilmiştir. Deney gerilimleri, 100 kV'luk kısmi boşalmasız omik bir gerilim bölücü üzerinden ölçülmüştür. Söz konusu gerilim bölücü yine bu çalışma için tasarlanmış ve alçak gerilim dirençleri yardımıyla yağ yalıtımlı olarak imal edilmiştir. Kısmi boşalma işaretleri ve deney gerilimleri, geliştirilen Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma Ölçme Sistemi (FÇKBÖS) ile değerlendirilmiştir. Ölçüm sistemi bilgisayar kontrollü olup, National Instrument NI-5112® modeli analog-sayısal dönüştürücü karta ek olarak geliştirilen filtre ve ölçme devrelerini içermektedir. NI-5112, 100 MHz (100 MS/s) frekans kadar 8-16-32 bit örnekleme yapabilmektedir. Analog-sayısal dönüştürücüden alınan örnekler, faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sisteminin Şekil 7'de görülen kullanıcı arayüzü ile işlenmiştir.

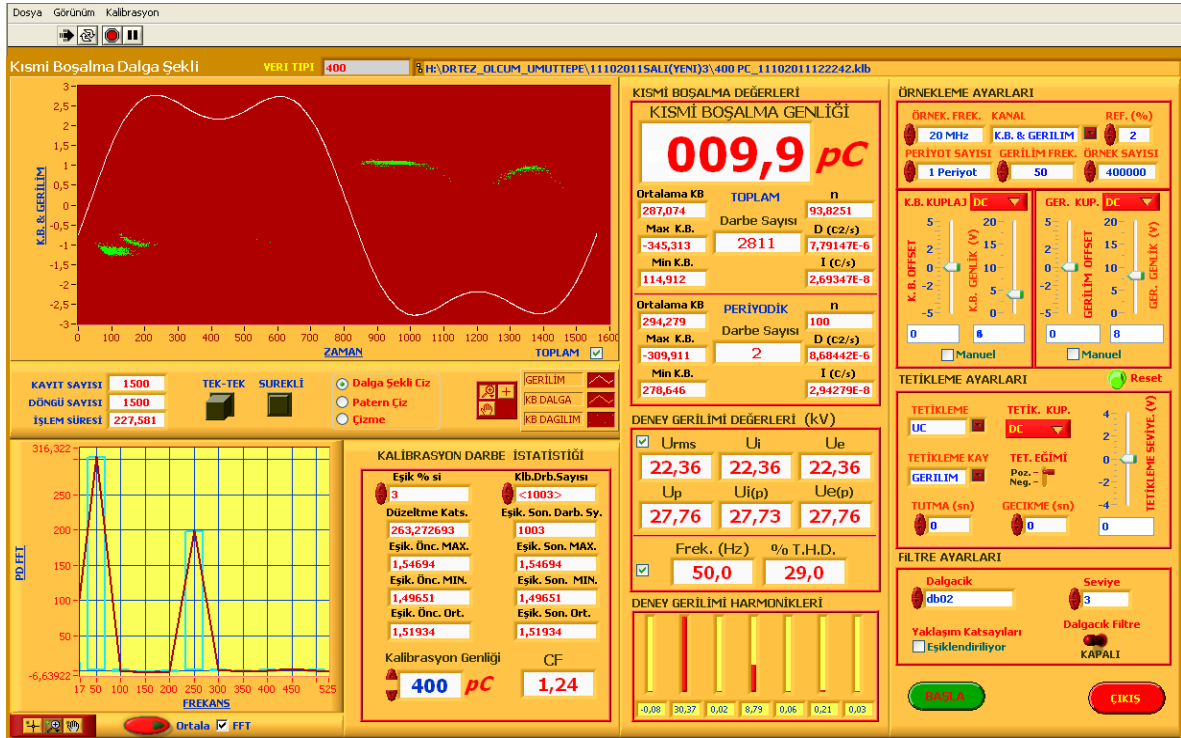
Faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemine ilişkin arayüz yazılımı, National Instrument firmasının LabVIEW® (deneme sürümü) programlama ortamında geliştirilmiştir. Yazılım ile kısmi boşalma işaretleri ve deney gerilimi gerçek zamanlı olarak ölçülebilmektedir. Geliştirilen yazılım, dalgacık analizi (Wavelet Analysis) ile sayısal filtreleme ve Fourier analizi de yapabilmektedir. Geliştirilen kısmi boşalma ölçüm sisteminin ölçebildiği en düşük kısmi boşalma değeri 0,1 pC'dur. (Çalışmada kullanılan kısmi boşalma ölçüm sistemi, çalışma tarihlerinde TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından 2012/01981 istek numarası ile kalibre edilmiştir).

### 3.2.1. Deneyisel (Experimental)

Geliştirilen her üç sıvı direncin saf sinüzoidal ve harmonikli sinüzoidal gerilimler altında kısmi boşalma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada saf sinüzoidal gerilim yanında, 3. ve 5. harmonikleri içeren gerilimler kullanılmıştır. Harmonikli gerilim sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılabilmesi için bir deney grubunda tepe değer, diğer deney grubunda etkin değer sabit tutularak deney gerilimleri üretilmiştir. Tablo 2'de tepe değer sabit tutularak gerçekleştirilen KB ölçüm değerleri verilmiştir.



Şekil 6. Faz çözünümlü KB ölçüm sistemi ve deney gerilimi üretim sistemi [1]  
(Phase resolved partial discharge measurement system and test voltage generation system)



Şekil 7. Faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemi kullanıcı arayüzü  
(Phase resolved partial discharge measurement system user interface)

Tablo 2’de verilen deney gerilimi grubunda 50,6 kV tepe değere kadar çıkmıştır. 3. harmonik bileşen içeren deney gerilimindeki en büyük toplam harmonik bozulma %26,10, 5. harmonik bileşen içeren deney gerilimindeki en büyük toplam harmonik bozulma %12,90 olarak ölçülmüştür. Sıvı dirençlerin, Tablo 2’de verilen deney gerilimlerinde KB oluşturmadıkları görülmüştür. Gerilim etkin değerinin

42,90 kV’ta sabit tutularak gerçekleştirilen KB ölçüm sonuçları da Tablo 3’te verilmiştir. 3. harmonik bileşen içeren deney gerilimindeki en büyük toplam harmonik bozulma %25,60, 5. harmonik bileşen içeren deney gerilimindeki en büyük toplam harmonik bozulma ise %12,50 olarak ölçülmüştür. Önceki deney grubunda olduğu gibi bu deney grubunda da sıvı dirençlerde KB

**Tablo 2.** Gerilim tepe değeri sabit tutularak gerçekleştirilen KB ölçüm sonuçları  
(Partial discharge measurement results at constant peak voltages)

No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ , kV	$U_p$ , kV	THB, %	TF	Görünen Ort. Yük, pC
S3H540	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	37,90	50,60	6,60	1,34	<0,1
S3H530	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	41,00	50,60	12,80	1,23	<0,1
S3H520	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	41,70	50,60	19,70	1,21	<0,1
S3H510	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	41,10	50,60	26,10	1,23	<0,1
S510	50 Hz Sinüs	35,70	50,60	0,00	1,42	<0,1
S5H510	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	34,70	50,60	2,90	1,46	<0,1
S5H520	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	33,60	50,60	6,20	1,51	<0,1
S5H530	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	32,50	50,60	9,50	1,56	<0,1
S5H540	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	31,90	50,60	12,90	1,59	<0,1

**Tablo 3.** Gerilim etkin değeri sabit tutularak gerçekleştirilen KB ölçüm sonuçları  
(Partial discharge measurement results at constant rms voltages)

No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ , kV	$U_p$ , kV	THB, %	TF	Görünen Ort. Yük, pC
S3H260	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	42,90	52,90	25,60	1,23	<0,1
S3H250	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	42,90	52,10	19,20	1,21	<0,1
S3H240	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	42,90	52,90	12,80	1,23	<0,1
S3H230	50 Hz Sinüs + 3.Harmonik	42,90	55,00	9,00	1,28	<0,1
S210	50 Hz Sinüs	42,90	60,60	0,00	1,41	<0,1
S5210	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	42,90	62,30	2,80	1,45	<0,1
S5220	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	42,90	64,00	5,90	1,49	<0,1
S5230	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik	42,90	65,90	9,10	1,54	<0,1
S5240	50 Hz Sinüs + 5.Harmonik.	42,90	67,60	12,50	1,58	<0,1

gözlenmemiştir. Tablo 2 ve Tablo 3'teki deney gerilimleri ile gerçekleştirilen KB ölçümleri, 24<sup>o</sup> C sıcaklık, %63 bağıl nem ve 755 mmHg basınç ortam koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Deney gerilimleri yüksek gerilim tarafından, omik gerilim bölücü üzerinden ölçülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  tuzu ve saf su kullanılarak istenilen değerlerde ve kısmi boşalmasız sıvı direnç yapım tekniği anlatılmıştır. Çalışma sınırları ve elde edilen deneysel veriler dikkate alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$  çözeltileri kullanılarak belirli sınırlar içinde, istenilen değerlerde ve fiziksel büyüklüklerde, hızlı ve basit biçimde sıvı dirençler elde etmek mümkündür. Kısmi boşalma ölçümleri için kullanılan ölçme sisteminin en düşük ölçüm sınırı 0,1 pC'dur. 3. ve 5. harmonik bileşen içeren ve saf sinüzoidal alternatif gerilimler ile yapılan ölçümlerde kısmi boşalma düzeyinin 0,1 pC'un altında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, 3. ve 5. harmonikli ve harmoniksiz alternatif gerilimlerde sıvı dirençlerin, kısmi boşalma ölçüm sistemlerinde kullanılabilmesi söylenebilir. Harmonikli gerilim altında kısmi boşalma ölçümleri, deney transformatörünün izin verdiği 3. ve 5. harmonikler ile gerçekleştirilebilmiştir. Sıvı

dirençlerin daha yüksek değerli harmoniklerdeki KB davranışlarının araştırıldığı farklı çalışmaların yapılmasında fayda görülmektedir. Aktarılan yöntemde verilen Şekil 3'teki lineerleştirilmiş grafik sınırları içinde elde edilen sıvı dirençlerin hata aralığı  $\pm\%3$  olarak belirlenmiştir. Söz konusu hata aralığı, çalışma gerçekleştirilirken karşılaşılan ölçme duyarlılığı ve doğruluğu, ortam koşulları gibi etkenlere bağlı olarak değişebileceğinden, benzer çalışmalar ile konunun desteklenmesinde fayda vardır.

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$  çözeltileri ile gerçekleştirilen sıvı dirençler, doğru akım koşullarında kutuplanmaktadır. Kutuplanma neticesinde ortaya çıkan madde kaybı direnç karakteristiğini bozmaktadır. Bu nedenle sıvı dirençlerin alternatif akımda kullanılması önerilmektedir. Doğru akım ve darbe akımı ile yapılan analizlerin kuvvetlendirilmesi için darbe ve doğru akım davranışlarını ayrıntılı olarak irdeleyen farklı çalışmalar yapılmasında fayda söz konusudur. Çalışma sınırları genişletilerek,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  tuzu ve saf su kullanılarak yapılan sıvı direnç tekniği yardımıyla yüksek çevirme oranlarına sahip gerilim bölücüler yapılması mümkündür. Çalışmanın, bakır tuzlarının dışında alüminyum tuzları ile de yapılması eldeki veri sayısını ve seçeneği artırabilir. Aktarılan teknik ile elde edilen sıvı dirençlerin endüktif ve kapasitif etkilerini ayrıntılı olarak irdeleyen araştırma çalışmalarının yapılmasında fayda görülmektedir.



**5. SİMGELER (SYMBOLS)**

$\rho$	: Katı malzeme öz direnci ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),
$\chi$	: Katı malzeme öz iletkenliği- Elektrolit öz iletkenliği (S /cm),
$l$	: Katı malzeme uzunluğu - elektrotlar arası uzunluk (cm),
$S$	: Katı malzeme kesiti – Mahfaza iç kesiti ( $\text{cm}^2$ ),
$\phi_d$	: Sıvı direnç mahfazası (şeffaf boru) iç çapını (cm),
$m$	: Çözeltide kullanılan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tuzunun miktarını (gr),
$V_d$	: Çözelti hacmi (lt),
$\text{Cu}$	: Bakır simgesi
$\text{THB}$	: Toplam harmonik bozulma
$\text{TF}$	: Tepe faktörü (Crest factor)
$U_{\text{rms}}$	: Deney gerilimi etkin değeri
$U_p$	: Deney gerilimi tepe değeri
$\text{pC}$	: Piko Coulomb
$n(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$	: Çözünen $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tuzunun mol sayısı (mol),
$M(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$	: Çözelti molar derişimi (Molar = mol/L),
$M_A(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$	: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tuzunun molekül kütlesi (gr/mol) (Üretici firma tarafından 249,69 gr/mol olarak verilmiştir)

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)**

Yazarlar, desteklerinden dolayı ELOPAR-Elektronik Elk. Oto. İnş. San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerini sunmaktadır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Fidan M., Harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının elektriksel kısmı boşalmalar üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- Kreuger F.H., Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment, Butterworth & Co. Ltd., London, U.K., 1989.
- Özşar Ç. ve Bodur A., Yüksek Gerilim Mühendisliği Temelleri, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, EMO Yayın No: EG/2008/4, Ankara, 2008.
- IEC 60270, High-voltage test techniques- partial discharge measurements, Third Edition, 2000.
- TS 2051 EN 60270, Kablolar-yüksek gerilim deney teknikleri-kısmi boşalma ölçmeleri, Ankara, 2003.
- IEC 60060-1, High-voltage test techniques –Part 1: General definitions and test requirements, Ed. 3.0, 2010.
- Denicolai M., Hällström J., A Self-balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.
- Racz B., Patks A., Fast high-voltage resistive pulse divider, Meas. Sci. Technol. 3, 926-928, 1992.
- Kask U., Rawn J.D., General Chemistry, Wm. C. Brown Publishers, USA, 1993.
- Holler S.W., Fundamentals of Analytical Chemistry, Seventh Edition, Saunders College Publishing, Philadelphia, USA, 1996.
- Edin H., Partial discharges studied with variable frequency of the applied voltage, Doktora Tezi, Kungl Tekniska Högskolan Department of Elec. Eng. Div. Electrotechnical Design, Stockholm - Sweden, 2001.
- Florkowski M., Florkowska B., Furga J., Zydron P., Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 20 (6), 2009-2016, 2013.
- Florkowski M., Florkowska B., Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution., 153 (2), 171-180, 2006.
- Catterson V.M., Bahadoorsingh S., Rudd S., McArthur S.D.J., Rowland S.M., Identifying harmonic attributes from online partial discharge data, IEEE Trans. Power Delivery, 26 (3), 1811-1819, 2011.
- Latran M.B., Teke A., Investigation of inverter based shunt compensators for mitigation of power quality problems in power distribution systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 793-805, 2014.
- Germeç K.E., Erdem H., Time-harmonic analysis in electric power systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 263-271, 2015.
- Sarathi R., Oza K.H., Kumar C.L.G.P., Electrical treeing in xlpe cable insulation under harmonic ac voltages, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 22 (6), 3177-3185, 2015.
- Sarathi R., Archana M., Investigation of partial discharge activity by a conducting particle in transformer oil under harmonic ac voltages adopting uhf technique, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 19 (5), 1514-1520, 2012.
- Sarathi R., Nandini A., Tanaka T., Understanding electrical treeing phenomena in xlpe cable insulation under harmonic ac voltages adopting uhf technique, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 19 (3), 903-909, 2012.
- Bahadoorsingh S., Rowland S.M., Investigating the influence of the lubricant coating on hypodermic needles on electrical tree characteristics in epoxy resin, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 17 (3), 701-708, 2010.
- Sarathi R., Sheema I.P.M., Rajan J.S., Danikas M.G., Influence of harmonic ac voltage on surface discharge formation in transformer insulation, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 21 (5), 2383-2393, 2014.
- Sarathi R., Harsha S.V., Griffiths H., Haddad A., Understanding water droplet initiated discharges on epoxy nanocomposites under harmonic ac voltages adopting uhf technique, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 21 (2), 918-925, 2014.

