

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKSEL KİSMİ BOŞALMA

ÖLÇME DEVRELERİNİN ÖLÇEKLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Hasbi İSMAİLOĞLU

Ana Bilim Dalı: ELEKTRİK-ELEKTRONİK

Programı : ELEKTRONİK VE HABERLEŞME

HAZİRAN 1988

ÖNSÖZ

Bu çalışma ile, yüksek gerilim tekniğinde önemli bir yeri olan elektriksel kısmi boşalmalar, ölçülmeleri, ölçme devreleri ve bunlara etki eden faktörler hakkında ayrıntılı bilgi edinilmiş ve kısmi boşalma ölçme düzenlerinin ölçeklenmesi konusu incelenerek, bu amaçla kullanılabilecek ayar kaynakları araştırılmıştır. Ayrıca, sivri uç - yarım küre elektrod düzeninin, kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesinde kullanılabilirliği kuramsal ve deneysel olarak incelenmiştir.

Tez çalışmamın yürütücüsü Hocam Sayın Prof.Dr. Muzaffer ÖZKAYA'ya bana bu olanağı sağladığı için teşekkürü bir borç bilirim. Bu arada, çalışmalarımda bilgi ve deneyimleri ile, yardımlarını esirgemeyen Sayın Yük.Müh. Özcan KALENDERLİ'ye ve Sayın Yük.Müh. Aydoğan ÖZDEMİR'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Haziran, 1988

Müh. Hasbi İSMAİLOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KISMI BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİNİN VE AYARIN ÖNEMİ	4
BÖLÜM 3. TANIMLAR	6
3.1. Kısmi Boşalmalar	6
3.2. Kısmi Boşalma Yeğİnliği	6
3.3. Kısmi Boşalmalarla İlgili Büyüklükler	7
3.3.1. Görünen Yük, q	7
3.3.2. Tekrarlama (Yineleme) Sıklığı, n	7
3.3.3. Bir Kısmi Boşalmanın Enerjisi, W	7
3.4. Diğer Büyüklükler	8
3.4.1. Ortalama Boşalma Akımı, I	8
3.4.2. Karesel Oran, D	8
3.4.3. Boşalma Gücü, P	9
3.5. Kısmi Boşalmalarla İlgili Gerilimler	9
3.5.1. Kısmi Boşalma Başlama Gerilimi, U_i	9
3.5.2. Kısmi Boşalma Sönme Gerilimi, U_e	9
3.5.3. Kısmi Boşalma Oluşmazlık Deney ^e Gerilimi	9
BÖLÜM 4. KISMI BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİ	10
4.1. Doğrudan Ölçme Yöntemi	11
4.1.1. Ölçü Empedansının Bağlama (Kuplaj) Kondansatörü İle Seri Bağlı Olduğu Devre	11
4.1.2. Ölçü Empedansının Deney Cismi İle Seri Bağlı Olduğu Devre	12
4.2. Dengelenmiş Devre İle Ölçme Yöntemi	12
4.3. Kayıp Ölçme Yöntemi	14
4.3.1. Kayıp Katsayısının ($tg \delta$) Ölçülmesi	14
4.3.2. Kaybın Wattmetre İle Ölçülmesi	16
BÖLÜM 5. KISMI BOŞALMA ÖLÇME DEVRELERİNİN ELEMANLARI	17
5.1. Yüksek Gerilim Kaynağı	17
5.2. Bağlama (Kuplaj) Kondansatörü	17
5.3. Ölçü Empedansı (Dört-Uçlusu)	18
5.4. Ölçü Aygıtı	19
5.4.1. Voltmetre	19
5.4.2. Osiloskop	19
5.4.3. Darbe Tepe Değer Ölçü Aygıtı	19
5.4.4. Darbe Sayıcı	19

BÖLÜM 6. ÖLÇÖ EMPEDANSININ ÖLÇME DOĞRULUĞU VE DUYARLIĞINA ETKİSİ	21
6.1. RC Devresi	21
6.2. RLC Devresi	29
6.3. Seçicilik	32
6.3.1. Osiloskobun Seçiciliği	33
6.3.2. Ölçme Devresinin Seçiciliği	33
6.3.3. Yükseltecin Seçiciliği	34
BÖLÜM 7. KISMİ BOŞALMA ÖLÇME DEVRELERİNİN AYARI	36
7.1. Alçak Gerilimde Ayar	37
7.2. Yüksek Gerilimde Ayar	39
7.2.1. Yüzeysel Boşalmalı Kaynak	40
7.2.2. İç Kısmi Boşalmalı Kaynak	41
7.2.3. Korona Boşalmalı Kaynak	42
BÖLÜM 8. KORONA BOŞALMALI AYAR KAYNAĞININ İNCELENMESİ	44
8.1. Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninde Boşalma Olayı	44
8.2. Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninde Alan Dağılımının İncelenmesi	47
8.2.1. Kuramsal İnceleme	48
8.2.2. Deneysel İnceleme	49
8.2.2.1. Elektrolitik Banyo Yöntemi	49
8.2.2.2. Elektrolitik Banyo Yöntemi İle Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninin Alan Dağılımının İncelenmesi	52
8.3. Korona Boşalmalı Ayar Kaynağı İle Deneyler	57
8.3.1. Delinme Gerilimlerinin Belirlenmesi	57
8.3.2. Kısmi Boşalma Başlama ve Sönme Gerilimlerinin Belirlenmesi	58
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	
EKLER	63
EK A. Sivri Uç Elektrodlar	63
EK B. Osilogramlar	66
EK C. Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninde Boşalma Resimleri	68
EK D. Deney Düzeni	70
ÖZGEÇMİŞ	72

ÖZET

Elektriksel kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesi konusundaki bu tezin ilk iki bölümünde, elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesinin ve ayarın önemine değinilmiş ve üçüncü bölümde kısmi boşalmalar ve kısmi boşalmalarla ilgili önemli büyüklüklerin tanımları verilmiştir.

Dördüncü bölümde, kısmi boşalmaların ölçülmesinde kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı bir biçimde verilmiştir.

Beşinci bölümde, kısmi boşalma ölçme devrelerinde kullanılan elemanlar tanımlanarak, bu elemanların özellikleri belirlenmiş ve kısmi boşalmaları ölçmek amacıyla kullanılan voltmetre, osiloskop, tepe değer ölçü aygıtı ve darbe sayıcı gibi aygıtları ile kısmi boşalma darbelerinin ölçülebilme olanakları incelenmiştir.

Altıncı bölümde, RC ve RLC elemanları ile gerçekleştirilebilen ölçü empedanslarının (dört uçluların), kullanılan ölçü aygıtları ile birlikte, kısmi boşalma darbelerinin ölçülebilme büyüklükleri üzerindeki etkileri incelenerek, bu etkilerin matematiksel bağıntıları elde edilmiştir. Ölçü empedansının zaman sabiti ve darbeleri ölçülebilecek bir düzeye çıkarmak üzere kullanılan yükselticinin zaman sabiti oranının, boşalma darbesi üzerinde oluşturduğu değişikliklerden söz edilmiştir.

Yedinci bölümde, kısmi boşalma ölçme devrelerinin alçak ve yüksek gerilimde ayarlanmasına ilişkin ilkeler verilmiş ve yüzeysel boşalmalı, iç kısmi boşalmalı ve korona boşalmalı yüksek gerilimde ayar kaynakları incelenerek bu kaynaklarla elde edilen ayar darbelerinin karakteristikleri tanımlanmıştır.

Sekizinci bölümde, sivri uç - yarım küre elektrod düzeni biçimindeki korona boşalmalı ayar kaynağında, boşalma olayı ve alan dağılımı incelenmiştir. Alan dağılımının kuramsal olarak bulunabilmesi amacıyla, sivri uç - yarım küre elektrod düzeni, eşmerkezli küresel elektrod düzenine benzetilmiştir. Sivri uç - yarım küre elektrod düzeninde alan dağılımının deneysel olarak incelenebilmesi için gerçekleştirilen özel bir elektrolitik banyo deney düzeneği ile elde edilen üç boyutlu eşpotansiyel çizgi dağılımının, kuramsal inceleme ile bulunan dağılımla tam bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Sonuç olarak, sivri uç - yarım küre elektrod düzeninin ayar kaynağı olarak kullanılabilmesine ilişkin yorumlar ve öneriler sunulmuştur. Ayrıca eklerde, çalışmada kullanılan sivri uçların, elektrod düzeninin ve bu düzenler de oluşan delinme olaylarının fotoğrafları ve kısmi boşalma darbelerinin osilogramları verilmiştir.

SUMMARY

CALIBRATION OF THE MEASUREMENT CIRCUITS OF ELECTRICAL PARTIAL DISCHARGES

Electric discharges which do not bridge electrodes are called partial discharges. Between the discharge and one or both electrodes a sound dielectric is present in the shape of a solid, liquid, or gaseous insulator. The term "partial discharge" is relatively new, as it includes a wide group of discharge phenomena: internal discharges may occur in voids or cavities within solid or liquid dielectrics; surface discharges appear at the boundary of different insulation materials; corona discharges are related to discharges in gaseous dielectrics, if strongly inhomogeneous fields are present; the continuous impact of discharges in solid dielectrics forms discharge channels (treeing). Although the magnitude of such discharges is usually small they can cause progressive deterioration and ultimate failure; so that it is essential to detect their presence as a non-destructive control test.

The presence of partial discharges at operating voltage in an insulation system may result in a significant reduction in the life of the insulating material. Such materials are more susceptible to such discharge damage than others. The presence of partial discharges in an apparently solid insulation may be an indication of the existence of internal cavities. Partial discharge tests have been useful in the design and inspection of molded, laminated, and composite insulation, as well as specimens in the form of cables, capacitors, transformers, and bushings.

Partial discharge inception and extinction voltages are used in the determination of the limiting voltage at which an insulation system will operate free of such discharges. The extinction voltage is often substantially lower than the inception voltage. Where the operating voltage is below the inception voltage but above the extinction voltage, a transient over-voltage may initiate discharges which then continue until the voltage is lowered below the extinction voltage. Inception and extinction voltages depend upon many factors, including temperature and the rate at which the voltage is changed. After a time at a voltage, discharges may start and stop in a nonuniform and predictable fashion, especially for discharges within cavities in certain materials.

The magnitude (pulse height) of a partial discharge is an indication of the amount of energy that it dissipates in the insulation system. Partial discharge magnitude and pulse rate are useful in estimating the rate or change of the rate, at which deterioration is produced.

In general, the occurrence of partial discharges is not directly related to the basic properties of solid insulating material, but usually results from overstressing of gaseous occlusions or similar imperfections or discontinuities in an insulating system. Partial discharges may originate at locations such as on the leads or terminals without resulting in any hazard within the main part of the insulation system.

The detection of partial discharges is based on energy exchanges which take place during the discharge. These exchanges are manifested as

I. Electric phenomena

- 1) Electrical impulse current,
- 2) Dielectric losses,
- 3) Electro-magnetic radiation.

II. Non-electric phenomena

- 1) Light,
- 2) Heat,
- 3) Sound (noise),
- 4) Gas pressure changes,
- 5) Chemical transformations.

Discharge detection and measuring techniques may be based on the observation of any of the above phenomena.

The most frequently used and the most successful methods are electrical impulse current ones. These methods aim to separate the impulse current linked with partial discharges from any other phenomena. A great variety of circuits is in use to detect these impulses. All these circuits are characterized by two important qualities, the sensitivity and the resolution. Unfortunately; the measuring impedance (four port) and devices act together to the original magnitude and shape of the signal, in all methods.

The sensitivity and calibration of partial discharge detection systems is an important aspect of general subject of partial-discharge measurements. The primary objective is to perform a measurement, using a detection system having a sensitivity adequate to the purposes of the test, in the presence of inevitable electrical noise. Of equal importance is the matter of calibration which requires that fairly-accurate information to be obtained as to the magnitudes of the charges that take place in the insulation system when it is stressed at some particular voltage.

A comment should be made about a basic aspect of the problem, which sometimes not fully appreciated. This comment has to do with the extremely small quantity of energy we are dealing with we try to measure the voltage amplitude of a discharge pulse, or its charge content. In other words, we are dealing with relationship expressed as $q = CU$, the q being in order of 10^{-12} C and the capacitance in order of 10^{-6} F or less. Therefore, U may be in the order of a few microvolts, before amplification. When a partial discharge occurs in an insulation system, it is, by definition, a limited-energy phenomenon, and the sensitivity required for its detection is comparable to the signal sensitivity required in the spaceborne-communication field.

It is necessary to have equipment providing discharges of known magnitude: in the first place, for checking discharge magnitudes as obtained with the aid of calibration impulse or by calculation. In this case a source is needed from which discharge magnitude is known beforehand, i.e. "primary discharge standard". In the second place, there is a need for a source of discharges for investigation of the sensitivity in complicated objects such as transformers, long lengths of cables, etc. It is essential that the presence of this source does not effect the object, i.e. the capacity of the source must be very small. Furthermore, the dimensions of the source should preferably be small also. These requirements are usually met by sources whose discharge magnitude must be determined beforehand, i.e. "secondary discharge standards". There is also a need for discharges of known magnitude for the comparison of different detection circuits, for instance in different laboratories.

Secondary standards usually made from sources of natural discharges. These reference source may be originated on surface discharges, on internal discharges, or on point-discharge gap. Because of, its discharges are constant and regular; the point-hemisphere discharge gap is the most convenient reference source, as secondary discharge standard.

The point-hemisphere discharge gap is energized by high-voltage supply to the test circuit. The device consists essentially of a stainless steel needle pointing into a hemisphere.

The device gives corona discharges of practically constant magnitude $|q|$ which is a function of the radius of stainless steel point. The pulse repetition rate corresponds to a few pulses per cycle of test voltage at the inception voltage and increases progressively as the applied voltage is raised to about $1,4 U_i$, without any significant effect on the discharge magnitude.

It can be said that the electrical field distribution on the point-hemisphere electrodes is like as on the concentric spheres, where electrical field distribution is symmetrical with reference to the centre point of the sphere, and it can be calculated by using Laplace and Poisson equations. As an experimental method, the electrolytic tank can be used to obtain the field distribution the system of the point hemisphere electrodes. For this intent a scale model of the system have been inserted in a simple Wheatstone bridge, as shown in Fig.1. The point has been represented by a small sphere mounted on the centre of the hemisphere. The results obtained by this experimental method are well-adjusted with the results of theoritical equations, mentioned above.

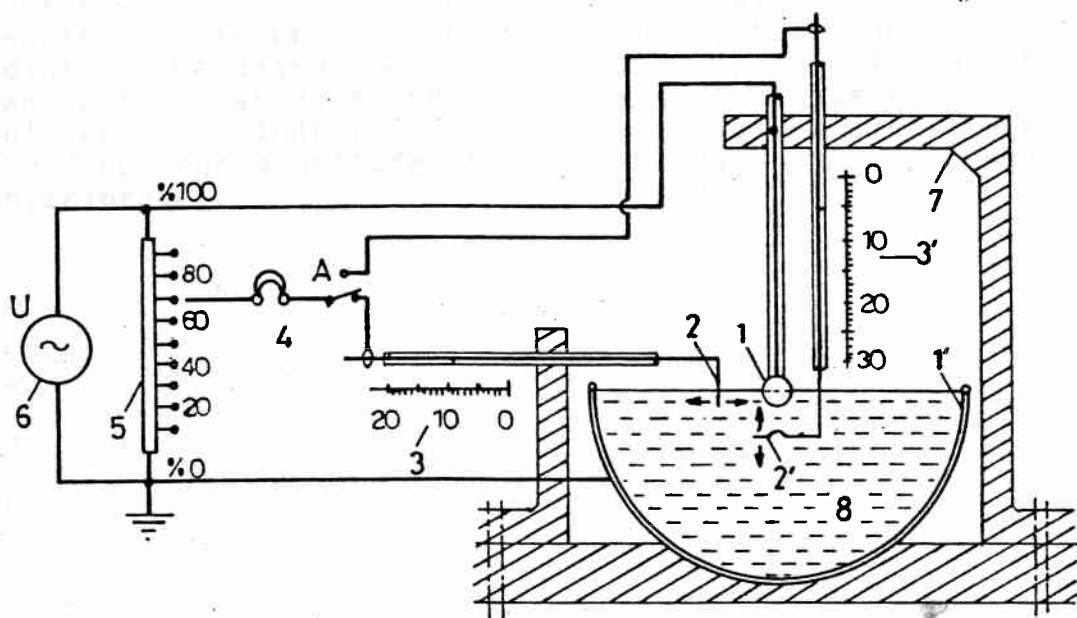


Fig.1. Electrolytic tank and a scale model of the system at the point-hemisphere electrodes.

- 1,1': Sphere and hemisphere electrodes,
- 2,2': Probes used for determining the equipotential lines on the horizontal plane and vertical axis,
- 3,3': Schedules to measure distance between probes and the centre of the sphere,
- 4 : Earphone,
- 5 : Voltage divider,
- 6 : A.c. voltage source,
- 7 : Support,
- 8 : Electrolyt (tap water, 325 μ S at 20°C),
- A : Selective switch.

Experiments to evaluate the source are described in which the voltage and point radius were varied. The measurement were carried out in air at room temperature. The conditions varied slowly with in ranges, temperature 24-26°C, barometric pressure 754-757 torr. The results obtained are set out.

The effect of increasing the applied voltage above the inception value U_i was investigated at 50 c/s. Typical record obtained at greater than inception voltage are given, for different radius of point.

As conclusion, that can be said; the device is of considerable use when checking discharge detectors. It is sufficiently reliable to be accepted as a secondary standard, under certain conditions. It is simple and of reasonable size, and range of specific discharge magnitudes can be obtained using only a small number of points. The discharge magnitude for a particular point can be taken as independent of applied voltage for voltages less than 1,4 U_i . At higher values of voltage the discharge magnitude changes quickly and the pattern deteriorates.

BÖLÜM 1

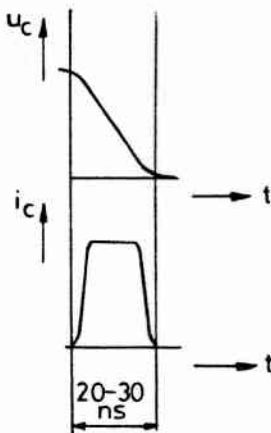
GİRİŞ

Elektriksel boşalma anlamında "korona" deyiminin ilk kez, tarihsel bir öyküde geçtiği söylenebilir. Öyküde; fırtınalı havalarda, yelkenli gemi direklerinin tepelerinde ve serenlerin uçlarında arasına ortaya çıkan mavimsi-mor renkli ışıkların, denizciler tarafından; bunun, koruyucuları Ermiş Elmo'nun bir marifeti olduğu ve kendilerini korumak amacıyla oluşturulduğu biçiminde yorumlandığı anlatılır. Uzun yıllar sonra, Benjamin Franklin, denizcilerin haklı olduklarını, ıslak direklerin uçlarında bir ışımaya oluştuğunu ve bunun koruyucu bir etkisinin olduğunu iddia etmiş; ancak olayı açıklayamamıştır. Ona göre, direklerin yuvarlatılmış başlarında, bir taç ya da hale biçiminde bir ışımaya görülürdü. Bu ışıklı olay daha sonra -Latince crown (taç) sözcüğünden esinlenerek- "korona" adıyla anılır olmuştur. Yıllar sonra yüksek gerilim tekniğinin gelişmesi ile benzer ışımaya olayları, laboratuvarlarda da gözlenmiş ve ilk isimlendirmeye sadık kalınarak, buna korona adı verilmiştir. Korona deyimini, günümüzde de elektriksel aygıtlarda ortaya çıkan elektriksel kısmi boşalmaları tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır [1].

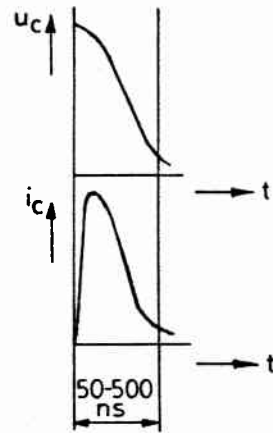
Standartlarda, korona ya da kısmi boşalma, uygulanan gerilim, kritik bir değeri aşınca, belirli bölgelerde ortaya çıkan ve gaz iyonizasyonundan kaynaklanan bir boşalma olarak tanımlanır. Bu boşalma süreci, elektrodlar arasında belirli ve küçük bir bölgede ortaya çıkar. İç kısmi boşalmalar için de kullanılan ve daha sonra vazgeçilen korona deyimini ile, iletkenlerin yüzeyinde ortaya çıkan boşalmaları anlatan korona deyimini ayırt edilmelidir. Bilindiği gibi korona olayı, yüksek gerilim hatlarındaki iletkenlerin yüzeyinde ışıklı bir boşalma şeklinde görülür. Bu boşalmalar, karanlık ve özellikle sisli gecelerde belirgin olarak ortaya çıkar. Ayrıca bu boşalmalarla birlikte koronanın karakteristik sesi duyulur.

Hangi olay için korona ya da kısmi boşalma teriminin kullanılması gerektiği konusundaki tartışmalar uzun süre devam etmiştir. Sonunda, yüksek gerilim iletim hatlarındaki kısmi boşalmaları belirtmek üzere "korona" deyiminin kullanılması uygun görülmüştür. Yalıtkanlar içinde ortaya çıkan kısmi boşalmalar için de "kısmi boşalma" deyiminin kullanılması benimsenmiştir. Bunların yanında bazı araştırmacılar, bu boşalmaları anlatmak için "iyonizasyon" deyimini kullanırlar. Ancak; olayın ne olduğunun bilinmesi, davranışı ve varlığının yarattığı sorunlar, isimlendirmeden çok daha önemlidir.

Yüksek gerilim aygıtlarında kullanılan yalıtkan malzemenin kalitesi üzerinde, birinci derecede önemli etkileri olan boşalmalar, birtakım boşalma büyüklükleri ile değerlendirilirler. Bu amaçla, en çok kullanılan ve tanımı üçüncü bölümde verilecek olan, görünen yük ve bu yükü oluşturan elektriksel büyüklüklerin ölçülmesi gerekir. Örneğin görünen yükü ortaya çıkaran yalıtkan malzeme içinde bir boşluktaki gerilim düşümü 20 ns ($20 \cdot 10^{-9} \text{ s}$) gibi çok kısa bir süre içinde ve yaklaşık olarak doğrusal bir biçimde oluşur. Bu gerilim değişimi ve bu sırada boşluktan geçen akım darbesinin biçimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Boşlukta oluşan iç kısmi boşalma gerilim ve akım darbelerinin zamanla değişimi.



Şekil 1.2. Dış kısmi (korona) boşalması gerilim ve akım darbelerinin zamanla değişimi.

Korona ya da dış kısmi boşalmalar-da oluşan gerilim değişimi biraz daha yavaştır. Örneğin negatif korona boşalmasında, gerilim $50 \div 500$ ns gibi bir süre içinde ve üstel olarak değişir. Buna ilişkin darbe şekilleri, Şekil 1.2'de verilmiştir. Pozitif korona da ise, sözkonusu darbeler biraz daha uzun sürelidirler.

Kısmi boşalmalara ilişkin olarak, ölçülebilen büyüklüklerin genlikleri μV (mikrovolt)'lar ya da pC (pikokulon)'lar düzeyindedirler. Dolayısıyla, bunların ortam gürültülerden ayırt edilmesi sorun olmaktadır. Bu sorun; kısmi boşalma ölçme deneylerinin çok iyi ekranlanmış ortamlarda yapılması ve kullanılan deney devresi elemanlarının kısmi boşalmasız seçilmesi ile bir ölçüde giderilebilir. Yukarıda belirtildiği gibi kısmi boşalma büyüklükleri, genliklerinin çok küçük olmasının yanında; ortaya çıkan darbeler de çok kısa süreli-
dirler.

Sözü edilen nedenlerle, kısmi boşalmaların ölçülmesi amacıyla kullanılan aygıtların yapısal özelliklerini de gözönüne alarak; ölçme devrelerinin doğru bir biçimde ölçeklenmesi ölçme doğruluğu ve duyarlılığı bakımından önemli olmaktadır.

BÖLÜM 2

KISMI BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİNİN VE AYARIN ÖNEMİ

Kısmi boşalmalar, gerilim uygulanmış elektrodlar arasındaki yalıtkanın, boşalma bölgelerinde kısmen kısa devre olmasına neden olurlar. Yalıtkanın bu bölgelerinde çok kısa süreli akım darbeleri oluşur. Gerilim yükseldikçe sayıları artan bu darbelerin izlenmesi, gözlenmesi, değerlendirilmesi, kısmi boşalma ölçme tekniklerinin temelini oluşturur.

Kısmi boşalmalar çoğunlukla küçük genlikli oldukları halde, yalıtkanların zamanla bozularak delinmesine yol açabilirler. Bu nedenle bir yalıtkanın ömrü ile kısmi boşalma büyüklükleri arasında bir ilişki kurabilmek ya da en azından yalıtkanın kısmi boşalmalardan etkilenmemesini garanti edebilmek için, boşalmaların bazı büyüklüklerini ölçmek gerekir. Herbir kısmi boşalma, yalıtkan malzemeye çok küçük bir zarar vermekle birlikte; uzun süreli bir zorlanma altında, kısmi boşalmalar, yalıtkan için zararlı olabilmektedirler. Yalıtkanların ömrü ile kısmi boşalma büyüklükleri arasında henüz tam bir ilişki kurulamamış olmasına rağmen; bir yalıtım sisteminin uzun bir süre işlevini yerine getirebilmesi için kısmi boşalma düzeyinin belirli değerleri aşmaması gerektiği açıktır.

Özellikle yüksek gerilim aygıtlarında kısmi boşalmaların doğru olarak ölçülmesi ve kısmi boşalma ölçme düzenlerinin duyarlılık ve ayarı önemli bir konudur. Sorun, kaçınılmaz elektriksel gürültüler altında, deneyin amacına uygun duyarlılığı olan bir ölçü düzeni kullanılarak ölçme yapmaktır. Diğer bir deyişle belirli gerilimlerin etkisi altında iken, bir yalıtım sisteminde oluşan değişikliklere ilişkin büyüklükler hakkında en az hata ile bilgi sahibi olmak da önemli bir sorundur.

Önemi çoğu zaman yeterince kavranamayan bu soruna ilişkin olarak aşağıdaki gibi bir yorum yapılabilir. Bu yorum, boşalma

darbesinin yükü ya da geriliminin genliği gibi, ilgilenilen ve ölçülmeye çalışılan son derece küçük boşalma büyüklükleri ile ilgilidir.

Ölçülmek istenen büyüklüklerden biri olan boşalma yükü q , 10^{-12} [C] (piko kulon) düzeyinde bir büyüklüktür. Diğer bir büyüklük, 10^{-6} volt (mikrovolt) düzeyindeki gerilimdir. Dolayısıyla bir yalıtım sisteminde; tanım gereği çok sınırlı enerjili olan, bir boşalmaya ilişkin büyüklüklerin yeterli doğrulukta ölçülebilmesi için, ölçme düzen ve aygıtlarında bir duyarlılık ve ayar inceliği gereklidir.



Şekil 2.1. Ölçme düzen ve aygıtları, (a) Ölçme düzeni, (b) Ölçme aygıtı, (c) Ölçme aygıtının bağlantıları.

2.2. Ölçme Düzeni ve Aygıtları

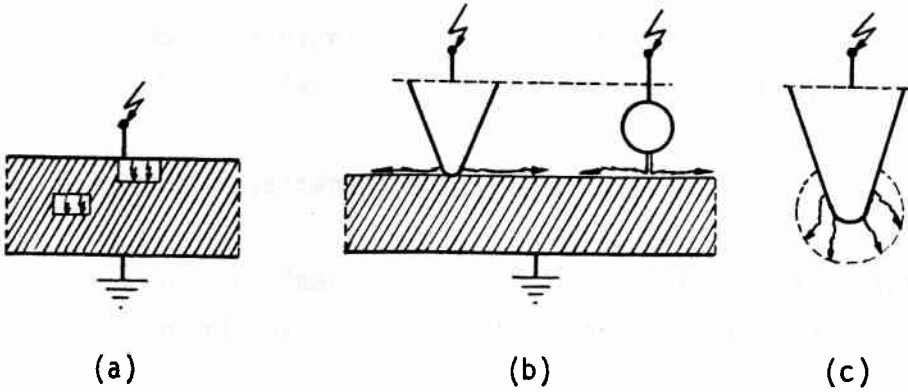
Bir ölçme düzeni, ölçülecek büyüklüğü ölçme aygıtına uygun şekilde aktaran, ölçme aygıtının ölçme sonucuyla ilgili olarak gerekli işlemleri yapan bir dizi aygıttan oluşur. Ölçme düzeni, ölçme aygıtının ölçme sonucuyla ilgili olarak gerekli işlemleri yapan bir dizi aygıttan oluşur.

BÖLÜM 3

TANIMLAR

3.1. Kısmi Boşalmalar

Bir elektrod düzeninde, elektrodları tamamen köprülemeyen fakat kendi kendini besleyebilen elektriksel boşalmalara "kısmi boşalmalar" adı verilir. Boşalma bölgesi ile bir ya da her iki elektrod arasında yalıtkan malzeme olarak katı, sıvı ya da gaz bir yalıtkan bulunur. Bu tür boşalmalara, katı yalıtkan bir malzemenin içindeki bir boşlukta oluşan boşalmalar (Şekil 3.1a) elektrodlardan birinin üzerinde ya da farklı yalıtkan malzemelerin ara kesitinde oluşan boşalmalar (Şekil 3.1b) ve yüksek gerilim altındaki bir sıvı ucun çevresinde oluşan boşalmalar (Şekil 3.1c) örnek olarak verilebilir.



Şekil 3.1. a) İç kısmi boşalmalar,
b) Yüzeysel boşalmalar,
c) Korona (dış kısmi) boşalmaları.

3.2. Kısmi Boşalma Yeğİnliği

Bir deney cisminde, belirlenen koşullar altında oluşan kısmi boşalmanın miktarı, birim belirtilmeksizin "boşalma yeğİnliği" genel terimi ile belirtilebilir [2,3,4].

3.3. Kısmi Boşalmalarla İlgili Büyüklükler

3.3.1. Görünen Yük, q

Bir kısmi boşalmanın görünen yükü q, deney cisminin uçlarına uygulandığında; bir kısmi boşalmanın, cismin bağlantı uçları arasında oluşturduğu ani gerilim genliği değişmesini yaratabilecek yük miktarıdır. Görünen yük q'nün mutlak değeri |q|, genellikle "boşalma genliği" olarak adlandırılır. Görünen yük, "kulon" [C] birimi ile belirtilir.

Tanımlanan görünen yük büyüklüğü, boşalmanın olduğu yalıtkan malzemedeki boşluğun içinden geçen gerçek yük miktarına eşit değildir. Bu tanımın kullanılmasının nedeni, boşalmanın, ölçü aygıtına etkisinin bunun bir fonksiyonu olmasıdır.

3.3.2. Tekrarlama (Yineleme) Sıklığı, n

Kısmi boşalma darbe tekrarlama sıklığı n, birim zamanda (sanide) oluşan ortalama kısmi boşalma darbe sayısıdır.

Uygulamada yalnızca belirli bir genlikteki darbeler ya da belirlenen genlik sınırları içindeki darbeler gözönüne alınır.

3.3.3. Bir Kısmi Boşalmanın Enerjisi, W

Bir kısmi boşalmanın enerjisi W, bir kısmi boşalma süresinde ortaya çıkan enerjidir. "Joule" (J) birimi ile belirtilir.

Bu enerji, q-ölçülen görünen yük ve U_i - boşalma başlama gerilimi olmak üzere,

$$W = \sqrt{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot q \cdot U_i \quad (3.1)$$

bağıntısıyla verilebilir.

3.4. Diğer Büyüklükler

Temel büyüklükler q ve n 'den gidilerek, deney cismine uygulanan gerilimin bir periyoduna göre daha uzun olan bir T zaman aralığında, toplam olarak değerlendirilen aşağıdaki büyüklükler de tanımlanabilir [2,3,4].

3.4.1. Ortalama Boşalma Akımı, I

Ortalama boşalma akımı I , kısmi boşalmalar nedeniyle, T belirli zaman aralığında deney cisminin bağlantı uçlarından geçen yük mutlak değerleri toplamının, bu zaman aralığına bölümüdür. Ortalama boşalma akımı, kulon/saniye = Amper [A] birimi ile belirtilir ve

$$I = \frac{1}{T} \left[|q_1| + |q_2| + \dots + |q_m| \right] \quad (3.2a)$$

bağıntısıyla gösterilir. Bütün yükler eşit genlikte ise bu bağıntı

$$I = \frac{1}{T} \cdot m|q| \quad (3.2b)$$

biçiminde yazılabilir.

3.4.2. Karesel Oran, D

Karesel oran D , kısmi boşalmalar nedeniyle bir deney cisminin uçlarından, T zaman aralığında geçen yük değerlerinin kareleri toplamının bu zaman aralığına bölümüdür. Karesel oran "(kulon)²/ saniye" birimi ile belirtilir ve

$$D = \frac{1}{T} \left[q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2 \right] \quad (3.3a)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Tüm yükler eşit genlikte ise bağıntı

$$D = \frac{1}{T} m q^2 \quad (3.3b)$$

biçimini alır.

3.4.3. Boşalma Gücü, P

Boşalma gücü P, kısmi boşalmalar nedeniyle deney cisminin bağlantı uçlarına, T-zaman aralığında uygulanan ortalama güçtür. Boşalma gücü, "watt" (W) birimi ile belirtilir. U_1, U_2, \dots, U_m büyüklükleri; q_1, q_2, \dots, q_m boşalmalarının oluştukları anlarda deney cisminin bağlantı uçlarındaki gerilim değerleri olmak üzere boşalma gücü,

$$P = \frac{1}{T} [q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_m U_m] \quad (3.4)$$

bağıntısıyla verilir.

3.5. Kısmi Boşalmalarla İlgili Gerilimler

Kısmi boşalma deneylerinde gerilim değerleri genellikle, gerilim tepe değerlerinin, $\sqrt{2}$ sayısına bölümü ile tanımlanırlar. Önemli birkaçının tanımı aşağıda verilmiştir.

3.5.1. Kısmi Boşalma Başlama Gerilimi, U_i

Kısmi boşalma başlama gerilimi U_i , belirli koşullarda deney cismine uygulanan gerilimin, hiçbir kısmi boşalmanın oluşmadığı düşük bir değerden başlayarak yavaş yavaş arttırıldığında, kısmi boşalmanın belirli bir yeğinliği geçtiği en düşük gerilim değeridir.

3.5.2. Kısmi Boşalma Sönme Gerilimi, U_e

Kısmi boşalma sönme gerilimi U_e , belirli koşullarda, uygulanan gerilim, U_i boşalma başlama geriliminin üstündeki bir değerden başlayarak yavaş yavaş düşürüldüğünde, kısmi boşalmanın belirli bir yeğnlikten geçerek son bulduğu gerilim değeridir.

3.5.3. Kısmi Boşalma Oluşmazlık Deney Gerilimi

Kısmi boşalma oluşmazlık deney gerilimi, belirli bir deney yöntemiyle de belirlenen ve deney cisminde kısmi boşalmanın belirli bir yeğinliği aşmadığı deney gerilimidir.

BÖLÜM 4

KISMI BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİ

Kısmi boşalmaların ölçülmesi, boşalmaların oluştuğu süre içinde ortaya çıkan enerji dönüşümlerinden yararlanma temeline dayanır. Söz konusu enerji dönüşümleri ya da etkiler,

1. Elektriksel olanlar

- a) Elektriksel akım darbeleri (kimi zaman darbesiz sürekli ark biçiminde),
- b) Dielektrik kayıplar,
- c) Elektromagnetik dalgalar.

2. Elektriksel olmayanlar

- a) Işık,
- b) Isı,
- c) Ses (gürültü),
- d) Gaz basıncı değişimleri,
- e) Kimyasal dönüşümler,

şeklinde sınıflandırılabilirler [5,6].

Kısmi boşalmaların belirlenmesi ve ölçülmesi teknikleri, yukarıda verilen enerji dönüşümlerinden herhangi birinin ölçülmesine dayandırılabilir. En eski ve basit yöntem, "tıslama-hışırtı" deneyi ile kısmi boşalmada ortaya çıkan sesin (gürültünün) dinlenmesine dayanır. Ancak bu yöntemin duyarlılığı oldukça düşüktür ve boşalma gürültüsünü, dış gürültülerden ayırt etmek önemli bir sorundur.

Kısmi boşalmalar sırasında oluşan elektriksel büyüklüklerin değerlendirilmesine dayanan yöntemler, diğerlerine göre daha duyarlı ve kullanışlı olmaları nedeniyle, günümüzde en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu amaçla farklı birkaç ölçme yöntemi kullanılabilir. Bunlar,

1. Doğrudan ölçme yöntemi,
2. Dengelenmiş devre ile ölçme yöntemi,
3. Kayıp ölçme yöntemi,

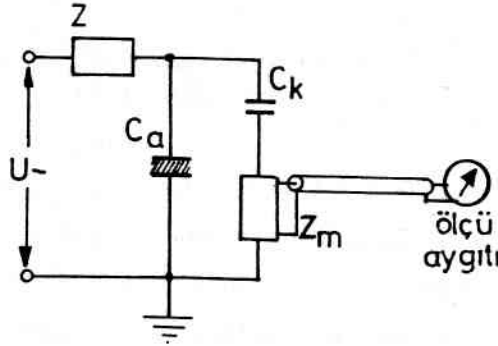
biçiminde sınıflandırılabilirler [5].

4.1. Doğrudan Ölçme Yöntemi

Doğrudan ölçme yöntemi, kısmi boşalmaların ölçülmesinde kullanılan temel yöntemdir. Deney cisminin bağlantı uçlarında, kısmi boşalma nedeniyle oluşan akım darbeleri, ölçü empedansı (dört-uçlusu) yardımıyla gerilim darbelerine dönüştürülüp, kuvvetlendirilir ve uygun bir aygıtla ölçülürler. Ölçü empedansının devreye bağlanma durumuna göre iki farklı ölçme düzeni kurulabilir.

4.1.1. Ölçü Empedansının Bağlama (Kuplaj) Kondansatörü ile Seri Bağlı Olduğu Devre

Bu tür ölçme devresinin en genel görünümü Şekil 4.1'deki gibidir.



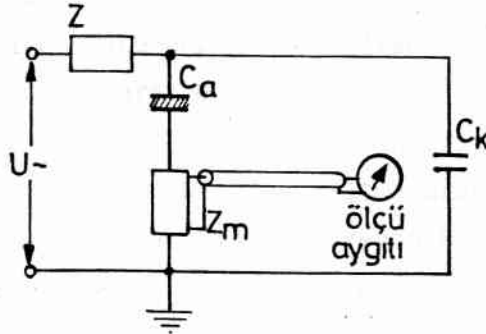
Şekil 4.1. Ölçü empedansının bağlama kondansatörü ile seri bağlı olduğu devre.

Bu devrede ölçü empedansı, bağlama kondansatörünün alçak gerilim tarafına bağlanır. Böylece deney cisminin topraktan yalıtılması olanağının bulunmadığı durumlarda, deney cismi doğrudan yüksek gerilim kaynağı ile toprak arasına bağlanabilir. Gerilim kaynağını herhangi bir kısa devre arızasından korumak -akımı sınırlamak- amacıyla devreye bir empedans ve/veya yüksek gerilim kaynağından

gelebilecek bozucu işaretlerin (yüksek frekanslı bileşenlerin) ölçme devresine geçmesini önlemek amacıyla bir elektriksel süzgeç (Z) konur.

4.1.2. Ölçü Empedansının Deney Cismi İle Seri Bağlı Olduğu Devre

Bağlama kondansatörünün kapasitesi, deney cisminin kapasitesinden daha büyükse ve deney cismi topraktan yalıtılabiliyorsa, kaynaktan gelebilecek bozucu işaretlerin daha iyi zayıflatılabilmesi amacıyla, ölçü empedansının deney cismi ile seri bağlı olduğu devre yeğlenir (Şekil 4.2).



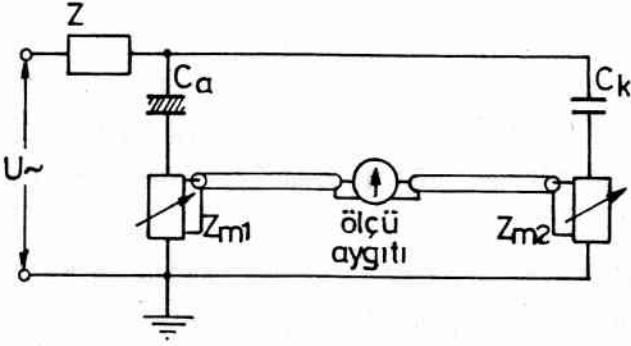
Şekil 4.2. Ölçü empedansının deney cismi ile seri bağlı olduğu devre.

Ancak bu devrenin, büyük kapasiteli deney cisimlerinde ölçü empedansından geçen kapasitif akımların büyük olması ve/veya deney cisminde ortaya çıkabilecek herhangi bir atlama ya da delinme sonucu ölçü düzeninin bozulmasına yolaçması gibi sakıncalı yanları vardır.

4.2. Dengelenmiş Devre İle Ölçme Yöntemi

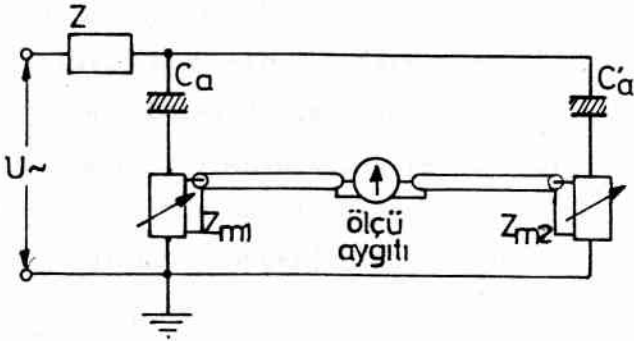
Yüksek gerilim kaynağı, bağlantı iletkenleri gibi devre elemanlarında oluşan boşalmaların, deney cisminde ortaya çıkan kısmi boşalmalardan ayırt edilmesi önemli sorunlardan biridir. Deney cismi dışındaki elemanlarda oluşan boşalmaların etkisini azaltabilmek için süzgeç kullanmak ve ölçü empedansı deney cismine seri bağlı iken, bağlama kondansatörünün kapasitesini, deney cisminin kapasitesine göre büyük seçmek gibi yollara başvurulabilir. Bunların yeterli

olmaması durumunda dengelenmiş devreler kullanılır.



Şekil 4.3. Dengelenmiş ölçme devresi.

Dengelenmiş devrede, hem deney cismine hem de bağlama kondansatörüne seri olarak birer ölçü empedansı bağlanır (Şekil 4.3). Ölçü empedanslarından alınan işaretlerin farkı bir ölçü aygıtında değerlendirilir. Ancak bu devrenin, ayarlanabildiği frekans bandı dar, duyarlılığı az ve istenmeyen darbeleri zayıflatma oranı küçük olduğundan, "diferansiyel devre" adıyla anılan devrenin kullanılması daha uygundur. Bu devrede bağlama kondansatörü yerine, deney cismi ile aynı yalıtıkana (dielektrik kayıplarına) sahip ikinci bir deney cismi kullanılır (Şekil 4.4). Böylece devre, daha geniş bir frekans bandında ayarlanabildiği gibi istenmeyen işaretleri de yeterince bastırabilmektedir.



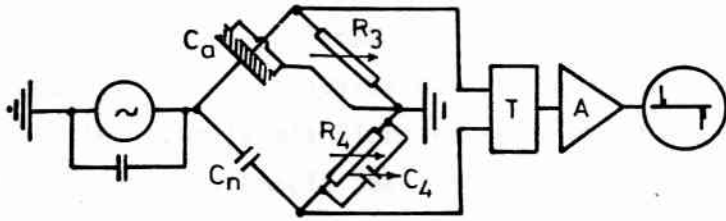
Şekil 4.4. Diferansiyel ölçme devresi.

4.3. Kayıp Ölçme Yöntemi

4.3.1. Kayıp Katsayısının ($\text{tg } \delta$) Ölçülmesi

Bu yöntem, boşalma kayıplarını karşılamak üzere deney cismine verilen enerjinin ölçülmesi ilkesine dayanır. Kayıp katsayısı ($\text{tg } \delta$) ile tanımlanan bu enerji, Schering köprüsü ile belirlenir.

Kısmi boşalma başlama geriliminde, kayıp katsayısındaki ani yükselmenin kısmi boşalma nedeniyle olduğu düşünülür. Kayıp katsayısında sezilebilir bir artış olması için, pekçok boşalma darbesinin oluşması gerekir. Köprü (Şekil 4.5), titreşimli galvanometre yardımıyla dengeye getirilerek $\text{tg } \delta_1$ belirlenir. Daha sonra galvanometre yerine osiloskop yerleştirilerek, 50 Hz'lik deney frekansında, köprü tekrar dengeye getirilir ve $\text{tg } \delta_2$ belirlenir [6].



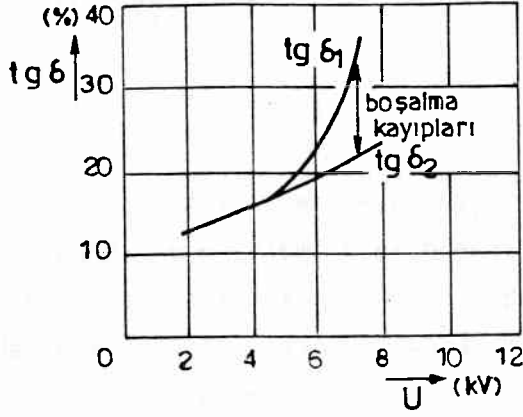
Şekil 4.5. Yüksek frekans Schering köprüsü.

Kısmi boşalmalardan kaynaklanan kayıp katsayısı, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, ($\text{tg } \delta_1 - \text{tg } \delta_2$) farkından elde edilir. Bu yöntemle, bir yarı peryottaki boşalma yükü cinsinden ölçülebilecek en küçük yük (duyarlık); C_a deney cisminin kapasitesi, U uygulanan gerilim ve $\Delta \text{tg } \delta$ kayıp katsayısında sezilebilir ve en küçük artış (en duyarlı köprülerde 10^{-6} gibi bir değer) olmak üzere,

$$q = \sqrt{2} \pi C_a U \Delta \text{tg } \delta \quad (4.1)$$

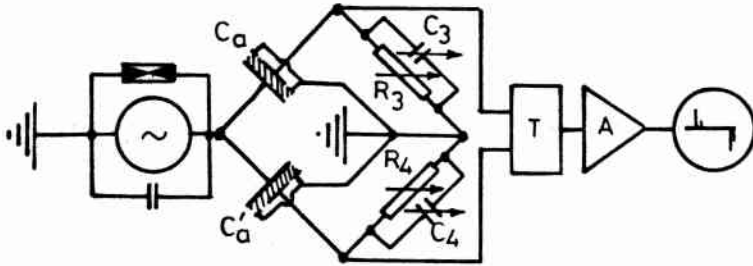
bağıntısı ile verilebilir. Örneğin kapasitesi 1 pF olan bir deney cisminde ölçülebilecek en küçük yük 50 pC kadardır. Şu halde en duyarlı köprü kullanılsa da, yöntem oldukça düşük duyarlıktadır.

Ayrıca yalıtkan malzemedeki her kayıp artışının kısmi boşalmalarla ilgili olması beklenemeyeceği gibi, artış başlangıcının belirlenmesi de genellikle zordur.



Şekil 4.6. Dielektrik kayıplarının gerilimle değişimi.

Schering köprüsünün, C_n kapasitesi bulunan kolunun alçak gerilim tarafına paralel bağlı ayarlanabilir bir direnç ve kapasite; deney cismi bulunan diğer koluna ayarlı bir direnç yerleştirilerek, Şekil 4.3'te verilen dengelenmiş ölçme devresinin daha duyarlı bir şekli elde edilebilir. Bu amaçla Şekil 4.5'te verilen yüksek frekans Schering köprüsü kullanılabilir.

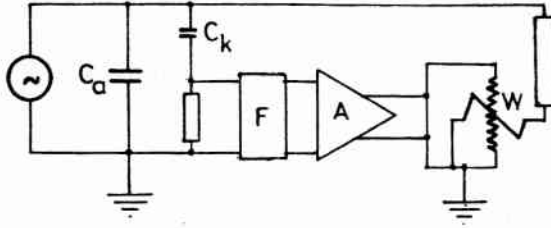


Şekil 4.7. Köprü biçiminde diferansiyel ölçme devresi.

Benzer şekilde, köprünün bir koluna deney cismi ve paralel bağlı ayarlanabilir birer direnç ve kapasite; diğer koluna deney cismi ile aynı dielektrik kayıplarına sahip bir kapasite yerleştirilerek, Şekil 4.4'teki diferansiyel ölçme devresinin daha duyarlı olanı elde edilebilir (Şekil 4.7).

4.3.2. Kaybın Wattmetre ile Ölçülmesi

Kayıp gücü ölçmek için izlenebilecek diğer bir yol, boşalma darbelerini entegre edip, deney cismi üzerindeki gerilime göre ölçen elektronik wattmetre kullanmaktır (Şekil 4.8). Bu şekilde yalnızca kısmi boşalmalardan kaynaklanan kayıplar okunabilir. Ancak deney cismi doğrudan yüksek gerilime bağlandığından, ölçümlerin dış boşalmalardan etkilenmemesi için önlem alınması gerekir.



Şekil 4.8. Kaybın wattmetre ile ölçülmesi.

BÖLÜM 5

KISMI BOŞALMA ÖLÇME DEVRELERİNİN ELEMANLARI

Bir kısmi boşalma ölçme deneyinde en büyük duyarlık, deney devresinin kendisinden ve dışardan gelen bozucu işaretlerin düzeyini, kısmi boşalma ölçü düzeninin iç gürültüsünün altına indirerek elde edilebilir. Bu amaçla tüm bağlantıların olabildiğince kısa ve koronasız iletkenlerle yapılması gerekir. Kısmi boşalma ölçme devreleri, aşağıda verilen temel elemanlardan oluşur:

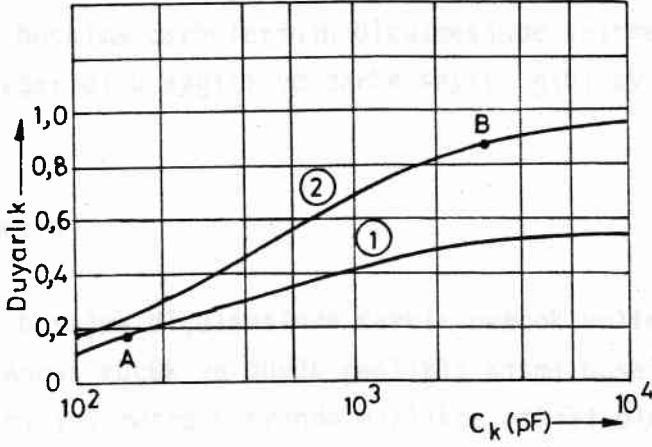
1. Yüksek gerilim kaynağı,
2. Bağlama (kuplaj) kondansatörü,
3. Ölçü empedansı (dört-uçlusu),
4. Ölçü aygıtı.

5.1. Yüksek Gerilim Kaynağı

Deneyde kullanılacak yüksek gerilim, genellikle şehir şebekesinden bir yüksek gerilim transformatörüyle sağlanır. Şebekeden gelebilecek bozucu işaret etkilerinin azaltılması amacıyla, transformatörün alçak gerilim tarafına da bir alçak geçiren süzgeç konması uygundur. Şebeke bozucu işaretlerinin etkisinden tamamen kurtulmak amacıyla, yüksek gerilim kaynağı olarak bir motor-generatör grubu da kullanılabilir.

5.2. Bağlama (Kuplaj) Kondansatörü

Ölçme düzeninde kullanılacak bağlama kondansatörü, en yüksek deney gerilimlerinde bile kısmi boşalmasız olmalıdır. Bağlama kondansatörünün kapasite değeri, yüksek frekanslı akım darbelerinin geçişi sırasında küçük bir empedans gösterecek kadar büyük olmalıdır. Şekil 5.1'de, duyarlığın, bağlama kondansatörünün kapasitesine göre değişimi, deney düzeneğindeki elemanların farklı değerleri için iki ayrı eğri ile gösterilmiştir [6].



Şekil 5.1. Duyarlığın bağlama kondansatörü kapasitesine göre değişimi.

1: $C_{ae} = 10^3$ pF için

2: $C_{ae} = 10^6$ pF için

A, B: Büyük ve küçük deney cisimleri için uygun C_k değerleri.

5.3. Ölçü Empedansı (Dört-Uçlusu)

Ölçü empedansı (dört-uçlusu), daha önce söz edildiği gibi deney devresine, ya bağlama kondansatörüne ya da deney cismine seri olmak üzere bağlanabilir. Yüksek gerilim kaynağı empedansının büyük olduğu varsayımı altında, her iki bağlanma biçimi, ölçü empedansının uçlarında oluşan gerilim açısından, özdeştir. Uygulamada, ölçü empedansının devreye bağlanma biçimi önemli olabilmektedir. Örneğin, deney cisminin kapasitesi büyükse; üzerinden büyük akımların geçmesi için, ölçü empedansı bağlama kondansatörüne seri bağlanabilir.

Ölçü empedansı olarak, genellikle bir R direnci ve buna paralel bağlı bir C parazit kapasitesinden oluşmuş bir RC devresi ya da paralel bağlı RLC elemanlarından oluşmuş bir salınım devresi kullanılır. Her iki tür ölçü empedansının belirli kullanma yerleri olmakla birlikte; günümüzde RLC elemanlarından oluşanlar daha çok tercih edilir.

5.4. Ölçü Aygıtı

Kısmi boşalma darbelerinin ölçülmesinde voltmetre, osiloskop, darbe tepe değer ölçü aygıtı ve darbe sayıcı gibi aygıtlardan yararlanılabilir.

5.4.1. Voltmetre

Kısmi boşalma ölçülmesinde farklı pek çok voltmetre türü kullanılabilir. Ancak küçük ve büyük genlikli kısmi boşalmalara ilişkin büyüklüklerin, voltmetre üzerinde birlikte etkili olmaları gibi dezavantajları olan bir ölçü aygıtıdır.

5.4.2. Osiloskop

Boşalma darbeleri, uygulanan deney gerilimi frekansının osiloskop ekranında oluşturduğu bazı üzerinde görülebilir. Ardışık periyotlarda yinelenerek ortaya çıkan boşalma darbeleri birbiri ile çakışır ve ekranda durağan bir görüntü elde edilir. Herbir darbenin genliği, osiloskop ekranından ayrı ayrı ölçülebilir. Ekrandaki darbe görüntülerinin biçiminden, ölçülen darbelerin deney cismindeki kısmi boşalmalardan kaynaklanıp kaynaklanmadığı belirlenebilir. Böylece deney cismindeki kısmi boşalmalara ilişkin büyüklükler, bozucu işaretlemlerden ayırt edilebilir.

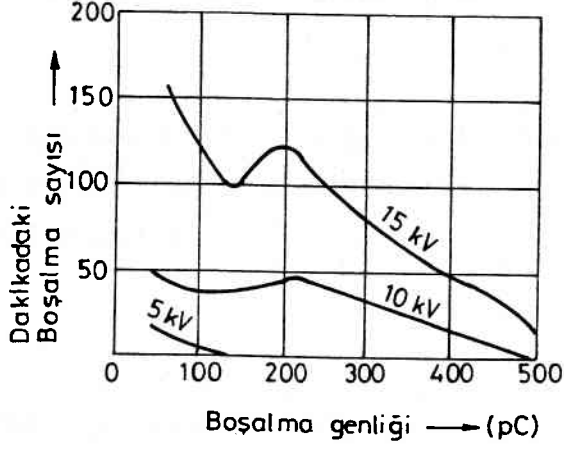
5.4.3. Darbe Tepe Değer Ölçü Aygıtı

Darbe tepe değer ölçü aygıtı, en büyük genlikli darbenin tepe değerini, dolayısıyla ortaya çıkan en büyük boşalmanın genliğini ölçen elektronik bir aygıttır. Aygıt, bir yazıcıya bağlanarak, doğrudan, boşalma darbesi genliğinin uygulanan gerilime göre değişimi, bir grafik biçiminde elde edilebilir.

5.4.4. Darbe Sayıcı

Kısmi boşalmaların ölçülmesinde, gelişmiş tekniklerden biri, ölçü aygıtı olarak darbe sayıcı kullanılmaktadır. Kısmi boşalma darbeleri, genliklerine göre sınıflandırılır ve sayıcı ile sayılırlar.

Böylece birim zamandaki boşalma sayısının boşalma genliğine göre değişimi elde edilir. Şekil 5.2'de bu şekilde bir değişim gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Darbe sayıcı ile boşalma genliğine göre boşalma sayısı.

Darbe sayıcı ile kısmi boşalma hakkında ayrıntılı bilgi edilebildiği halde, karmaşık bir aygıt olması sakıncalı bir yanıdır. Ayrıca deney cisminde birden çok yerde kısmi boşalma olması durumunda bunlara ilişkin eğriler üst üste binerler.

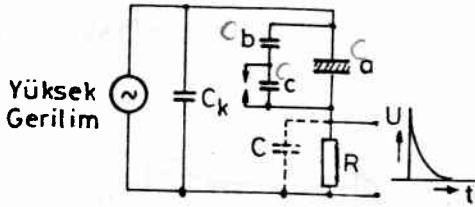
BÖLÜM 6

ÖLÇÜ EMPEDANSININ ÖLÇME DOĞRULUĞU VE DUYARLIĞINA ETKİSİ

Kullanılan ölçü empedansı, ölçü aygıtı ile birlikte, kısmi boşalma darbesinin ölçülen değeri üzerinde etkili olmaktadır. Bu etkiler aşağıda incelenmiştir.

6.1. RC-Devresi

Kısmi boşalmalı yalıtkan bir malzemenin bir eşdeğer devresini ve RC-ölçü empedansını içeren bir deney düzeneği, ölçü empedansı uçlarında oluşan gerilim darbesi ile birlikte Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Kısmi boşalmalı yalıtkanın eşdeğer devresinde; boşluğun kapasitesi C_c , boşluğa seri gelen yalıtkanın kapasitesi C_b ve kalan bölümünün kapasitesi C_a ile gösterilmiştir [1,5,6].



Şekil 6.1. Yalıtkanın eşdeğer devresi ve RC ölçü empedansının cevabı.

Kısmi boşalma sonucu ölçü empedansında oluşan darbe biçiminde işaret, tek yönlüdür. Darbeyi oluşturan boşalmanın genliği,

$$q = C_b \cdot \Delta U \quad (6.1)$$

ve

$$C_e = [C_a C_k / (C_a + C_k)] + C \quad (6.2)$$

olmak üzere, ölçü empedansı uçlarındaki darbe geriliminin ifadesi,

$$u = \frac{q}{(1+C/C_k)C_a+C} e^{-t/R.C} \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntı, toplam kapasite,

$$C_t = (1 + \frac{C}{C_k})C_a + C \quad (6.4)$$

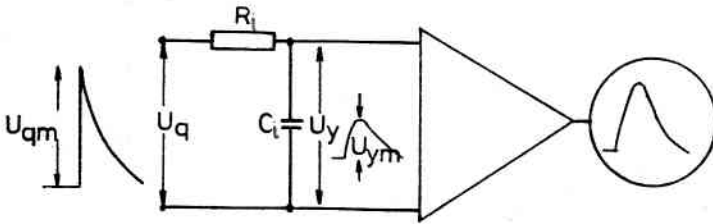
ve devrenin zaman sabiti

$$T_m = R.C_e = R.(\frac{C_a.C_k}{C_a+C_k} + C) \quad (6.5)$$

olmak üzere,

$$u = \frac{q}{C_t} e^{-t/T_m} \quad (6.6)$$

biçiminde yazılabilir. Bu bağıntı aynı zamanda, Schering köprüsü ile yapılan ölçmeye de uyarlanabilir. Sonlu bantlı bir yükselteç Şekil



Şekil 6.2. Sonlu bantlı yükseltecin eşdeğer devresi ve darbe üzerindeki etkileri.

6.2'deki gibi bir RC devresi ve ideal bir yükseltici ile gösterilebilir. Eşdeğer devredeki giriş işaretinin zaman sabiti, daha önce tanımlanan T_m 'dir. Şekil 6.2'de verilen $R_i C_i$ devresinin zaman sabiti de $T_y = R_i C_i$ olur. Şekilde gösterilen gerilimler arasındaki bağıntılar,

$$U_y(s) = \frac{1/sC_i}{R_i+1/sC_i} U_q = \frac{1/T_y}{s+1/T_y} \cdot \frac{U_{qm}}{s+1/T_m} \quad (6.7a)$$

ya da

$$U_y(s) = \frac{U_{qm} \cdot T_m}{T_y - T_m} \left[\frac{1}{s+1/T_y} - \frac{1}{s+1/T_m} \right] \quad (6.7b)$$

biçiminde elde edilebilir. Bu bağıntılardan,

$$U_y(t) = \frac{U_{qm} \cdot T_m}{T_y - T_m} \left[e^{-t/T_y} - e^{-t/T_m} \right] \quad (6.8)$$

bulunur. Bunun t'ye göre türevi sıfıra eşitlenir ve t'ye göre çözülürse,

$$U_{ym} = \frac{U_{qm} \cdot T_m}{T_y - T_m} \left[\left(\frac{T_y}{T_m} \right)^{-T_m/(T_y - T_m)} - \left(\frac{T_y}{T_m} \right)^{-T_y/(T_y - T_m)} \right] \quad (6.9)$$

eşitliği elde edilir. Bu bağıntı,

$$K_1 = \left(\frac{T_m}{T_y} \right)^{T_y/(T_y - T_m)} \quad (6.10)$$

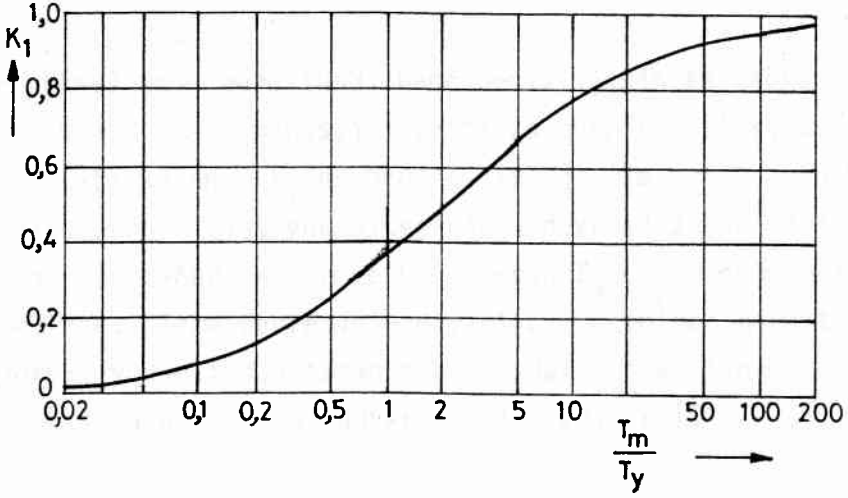
olmak üzere,

$$U_{ym} = K_1 \cdot U_{qm} \quad (6.11)$$

biçiminde basitleştirilebilir. Şekil 6.3'te, uygulamada karşılaşılan ve ideal olmayan bir yükselteçte kuvvetlendirilmiş darbe genliğinin, ideal bir yükselteçle kuvvetlendirilmiş darbe genliğine oranının, zaman sabitleri oranı ile değişimi gösterilmiştir. Darbenin zaman sabiti büyüdükçe ya da yükseltecin zaman sabiti küçüldükçe, yükseltecin darbeye cevabı K_1 büyür. Böylece (6.6) denkleminde göre, gerilim darbesinin genliği,

$$U_{ym} = K_1 U_{qm} = K_1 \frac{q}{C_t} \quad (6.12)$$

olacaktır.



Şekil 6.3. Sonlu bantlı yükseltecin bir darbeye cevabının işaret ve yükselteç zaman sabitleri oranı ile değişimi.

Ölçü devrelerinde duyarlık, genellikle ısı gürültüden etkilenir. Gürültü, osiloskop ekranında parlak bir band şeklinde görülür ve bunun sıfır seviyesini aşma miktarı, U_g ile gösterilir. Osiloskop ekranında bir darbenin, gürültüden ayırt edilebilmesi için genliğinin, gürültü genliğine göre en azından iki kat büyük olması gerekir. Yani,

$$U_{ym} = 2U_g \quad (6.13)$$

ve (6.12) denklemine göre

$$K_1 \frac{q}{C_t} = 2U_g \quad (6.14)$$

yazılabilir. Şu halde ölçme düzeninin duyarlığı (ölçülebilecek en küçük boşalma yükü),

$$q_{duy} = \frac{2}{K_1} U_g C_t \quad (6.15)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bu bağıntı duyarlılığın, toplam kapasite ile (dolayısıyla büyük deney cisimleri için deney cismi kapasitesi C_a ile) orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.

Bir yükseltecin gürültüsü, band genişliğinin karekökü ile doğru orantılıdır. Band genişliği arttıkça gürültü artar; ancak yükselteç ön katı kazancı K_1 'de band genişliği ile artar. Şu halde işaret/gürültü oranı için, yükselteç giriş devresi zaman sabitine göre en uygun bir değer vardır ve bu değer $T_m = T_y$ olduğu belirlenmiştir. Böylece, ölçme devresinin duyarlılığı yükselteç gürültüsüne belirleniyorsa, yükseltecin zaman sabiti, darbe işaretinin zaman sabitine eşit kılınarak optimal duyarlılık elde edilir [6].

Yükseltecin band genişliği B , yükselteç giriş devresinin T_y zaman sabitince belirlenir ve $R_i C_i$ devresinin çıkış gerilimi,

$$f = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \quad (6.16)$$

frekansında, giriş geriliminin $1/\sqrt{2}$ değerine düşer. Alt kesim frekansı gözardı edilebileceği için, bu değer band genişliği olarak alınabilir. Böylece,

$$B = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \quad (6.17a)$$

ve zaman sabiti, $T_y = R_i C_i$ olduğundan

$$B = \frac{1}{2\pi T_y} \quad (6.17b)$$

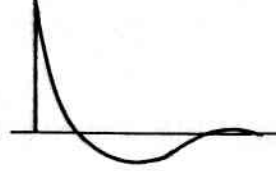
yazılabilir. Optimal band genişliği ise ($T_y = T_m$ için),

$$B = \frac{1}{2\pi T_m} \quad (6.17c)$$

şeklinde bulunur.

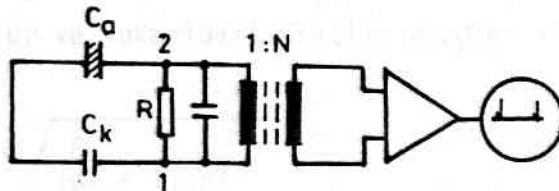
Optimal duyarlığın, farklı kapasiteli deney cisimleri için de sağlanması, darbe gerilimi zaman sabiti T_m 'in değişmez olmasına bağlıdır. Bunun için R ölçü direncinin, zaman sabiti $T_m = R.C_e$ sabit olacak biçimde ayarlanabilir olması gerekir. Böylece farklı kapasiteli deney cisimlerine göre, ölçü direnci (R) ayarlanarak, her deney cismi için optimal bir duyarlık elde edilebilir.

Yükseltecin frekans bandı, genellikle yalnız yüksek frekanslarda değil; alçak frekanslar bölgesinde de sınırlıdır. Çünkü çoğu kez 50 Hz'lik deney gerilimi ve bunun harmoniklerinin, yükselteç ve osiloskobu doyuma sokmaması için, kesilmesi gerekir. Bu ise darbe kuyruğunun, eksenin altına düşmesine neden olur (Şekil 6.4). Ancak bunun, darbe genliğine etkisinin olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Alt kesim frekansının yolaçtığı bozulma.

Pekçok durumda, (özellikle büyük kapasiteli deney cisimlerinde) ölçü devresinin ısı gürültüsü, yükselteç gürültüsünden daha küçüktür. Bu durumda ölçü direnci üzerindeki işaret, direnç gürültüsü, yükselteç gürültüsünü aşana dek bir transformatörle yükseltir (Şekil 6.5). Böylece, duyarlık ölçü devresi gürültüsünce belirlenirken; işaret de bir miktar yükseltilmiş olur.



Şekil 6.5. Transformatörlü doğrudan ölçme devresi.

Doğrudan ölçme devrelerinde ölçü direnci üzerindeki gürültü geriliminin etkin değeri; Boltzmann sabiti: $k=1,38.10^{-23}$ J/°K , T devrenin (ölçü direncinin) mutlak sıcaklığı (°K) ve C_g Şekil 6.5' te 1 ve 2 uçları arasındaki kapasite olmak üzere,

$$U_{ge} = \sqrt{\frac{kT}{C_g}} \quad (6.18a)$$

bağıntısı ile belirlidir. Bu bağıntı, C_a/C_k ya da dengelenmiş ölçme yöntemindeki C_a/C_a' oranına göre

$$U_{ge} = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT}{C_t}} \quad (6.18b)$$

biçiminde de yazılabilir. (C_t değeri (6.4) eşitliği ile tanımlanmıştır).

Gürültü bandı U_g , ölçü direnci gürültüsünün 2,5 katı kadardır. Buna göre

$$U_g = 2,5 \sqrt{\frac{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT}{C_t}} \quad (6.19a)$$

eşitliği yazılabilir. Bu gürültü düzeyi transformatörle yükseltilir ve yükselteç gürültüsüne eklenir. Transformatörün dönüştürme oranı, direnç gürültüsü, yükselteç gürültüsünün 1,2 katına çıkarılacak biçimde seçilir. Böylece elde edilen gürültü düzeyi, devre gürültüsünün 1,3 katı olur ve yukarıdaki eşitlik yardımı ile

$$U_g = 3,25 \sqrt{\frac{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT}{C_t}} \quad (6.19b)$$

elde edilir.

Ölçülmek istenen darbe genliği, gürültü düzeyinin en azından iki katı olması gerektiğine göre,

$$U_{ym} = 6,5 \sqrt{\frac{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT}{C_t}} \quad (6.20a)$$

olmalıdır. Bu eşitlik, (6.12) denklemi ile eşitlenirse

$$U_{ym} = K_1 \frac{q}{C_t} = 6,5 \sqrt{\frac{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT}{C_t}} \quad (6.20b)$$

elde edilir ve buradan, ölçülebilecek en küçük yük değeri (duyarlık)

$$q_{duy} = \frac{6,5}{K_1} \sqrt{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) kT} \cdot \sqrt{C_t} \quad (6.21a)$$

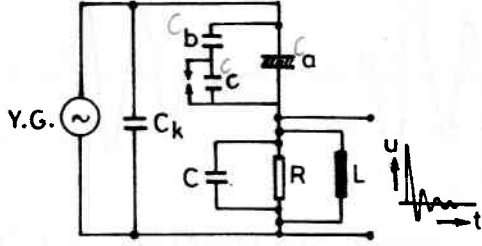
eşitliği ile bulunur. $T = 290^0K$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (J/°K) olarak ve toplam kapasite pF cinsinden eşitlikte yerine konulursa, ölçülebilecek en küçük boşalma yükü (duyarlık) için

$$q_{duy} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{K_1} \sqrt{\frac{C_a}{C_k} + 1} \cdot \sqrt{C_t} \quad (6.21b)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğe göre uygun duyarlık için K_1 'in olabildiğince 1'e yaklaşması gerekmektedir. Bu nedenle yükseltecin band genişliğinin büyük, dolayısıyla zaman sabitinin küçük olması istenir. Şekil 6.3'te verilen eğriye göre, örneğin $K_1 = 0,6$ için yükselteç band genişliği, işaret band genişliğinin üç katı; $K_1 = 0,9$ içinse otuz katı kadar olmalıdır.

6.2. RLC Devresi

Ölçü empedansı olarak salınımlı bir RLC devresini içeren bir deney düzeneği, ölçü empedansı uçlarında oluşan gerilim darbesi ile birlikte, Şekil 6.6'da gösterilmiştir [6].



Şekil 6.6. RLC devresinin cevabı.

Kısmi boşalma sonucu ölçü empedansında, sönümlü salınımlı bir işaret oluşur. Bu işaret için

$$U_q = \frac{q}{C_t} e^{-t/2.T_m} \cos \omega t \quad (6.22)$$

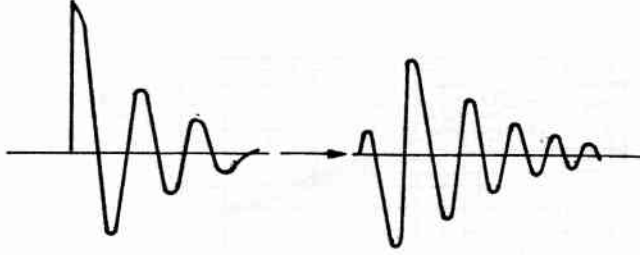
bağıntısı yazılabilir. Buradaki q , C_t ve T_m büyüklükleri sırasıyla (6.1), (6.4) ve (6.5) eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Açısal frekans ω ise, C_e (6.2) eşitliği ile tanımlı olmak üzere,

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{LC_e} - \frac{1}{4R^2C_e^2}\right)} \quad (6.23)$$

biçimindedir.

RC devresinde olduğu gibi, RLC devresinde de duyarlık, yükselteç gürültüsü ve ölçü devresi (direnci) gürültüsünden etkilenir. RLC türü ölçü empedanslarının çok kullanılan modellerinde devre (direnci) gürültüsü daha büyüktür.

Ölçü empedansı uçlarında oluşan salınımlı darbe, sonlu bantlı bir yükseltece uygulandığında, işaret Şekil 6.7'de gösterildiği gibi bozulur. Yükselteç band genişliği arttıkça işaret bozulması azalır ve gerçek biçimine yaklaşır.



Şekil 6.7. Salınımlı bir darbenin sonlu bantlı bir yükselteçte bozulması.

RC devresinde olduğu gibi ölçülen darbenin genliği, deney cismi kapasitesinin büyümesi ile artar. Devre gürültüsü de deney cismi kapasitesinin karekökü ile azalır. RC devresi için elde edilen duyarlık bağıntısına benzer biçimde, RLC devresi için de ölçülebilecek en küçük yük miktarı (duyarlık),

$$q_{\text{duy}} = \frac{7,1 \cdot \sqrt{kT}}{K_2} \sqrt{\left(\frac{C_a}{C_k} + 1\right) \cdot \sqrt{C_t}} \quad (6.24a)$$

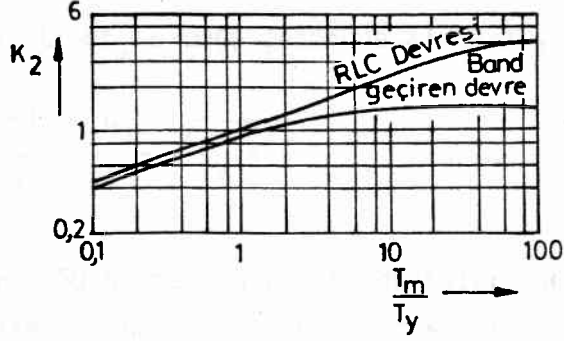
eşitliği ile verilebilir. Toplam kapasite pF cinsinden olmak üzere, $T = 290^{\circ}\text{K}$ ve $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^{\circ}\text{K}$ olarak eşitlikte yerlerine konması ile

$$q_{\text{duy}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{K_2} \sqrt{\frac{C_a}{C_k} + 1} \sqrt{C_t} \quad (6.24b)$$

elde edilir.

Bu bağıntıdaki K_2 katsayısı, K_1 'e benzetilebilir. Ancak K_1 katsayısında yükselteç band genişliğinin, gürültü üzerindeki etkisi gözardı edilirken; K_2 'de gözönüne alınmaktadır. K_2 katsayısının, yükselteç band genişliği ve işaret band genişliği oranına göre değişimi Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Şekil üzerindeki eğrilerden

biri, ölçü empedansı olarak bir RLC devresinin; diğeri band geçiren bir süzgecin kullanılmasına ilişkindir. 50 Hz'lik deney gerilimi frekanslardaki işaretleri daha iyi bastırdığı için band geçiren süzgecin, ölçü empedansı olarak kullanılması tercih edilebilmektedir.



Şekil 6.8. Yükselteç ön katı kazancının, yükselteç ve işaret band genişlikleri oranına göre değişimi.

Çizelge 6.1'de, deney cisminin kapasitesine göre, yukarıda verilen eşitliklerle hesaplanan ve deneysel olarak ölçülebilen en küçük yük miktarları (duyarlıklar) verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney cisminin kapasitesine göre duyarlıklar.

Deney cismi kapasitesi C_a (pF)	Hesaplanan duyarlık q_{duy} (pC)	Ölçülen duyarlık $q_{ö}$ (pC)
17-33	0,004	0,005
33-67	0,006	0,007
67-133	0,008	0,008
133-270	0,011	0,012
270-530	0,016	0,016
530-1070	0,02	0,02
1070-2100	0,03	0,05
2100-4200	0,04	0,06
4200-8300	0,06	0,08
8300-17000	0,09	0,11
17000-33000	0,12	0,14
33000-67000	0,18	0,20
67000-133000	0,26	0,32
133000-270000	0,35	0,45

Deney cisminin kapasitesi, bağlama kondansatörünün kapasitesine göre daha büyükse; (6.24b) eşitliğindeki $\sqrt{C_a/C_k+1}$ terimi $\sqrt{C_a/C_k}$ biçimini alır. Buna göre,

$$q_{duy} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{k_2} \sqrt{\frac{C_a}{C_k}} \sqrt{\left(1 + \frac{C}{C_k}\right) C_a + C} \quad (6.25a)$$

elde edilir. Eşitlik, $C \ll C_a$ olduğu gözönüne alınarak,

$$q_{duy} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{k_2} \frac{C_a}{C_k} \sqrt{C_k + C} \quad (6.25b)$$

biçiminde yazılabilir. Şu halde bağlama kondansatörünün kapasitesi, deney cisminin kapasitesine göre daha küçük ve sabitse; duyarlık, deney cismi kapasitesi ile orantılı olarak artar.

Deney cismi kapasitesinin, bağlama kondansatörü kapasitesine eşit yapılabildiği diferansiyel ölçme yöntemlerinde, $C_a/C_a' = 1$ olduğundan, bu tür ölçme yöntemlerinin duyarlığı daha iyidir.

Uygulamada istenen duyarlığın sağlanması oldukça güçtür. Elektromagnetik girişim, bağlantı iletkenlerinde ve deney cismi dışındaki devre elemanlarında oluşan boşalmalar, duyarlık üzerinde genellikle etkili olurlar. Özellikle yüksek deney gerilimlerinde istenmeyen boşalmaları önlemek güçtür. Örneğin 100 kV ve bunun üstündeki deney gerilimlerinde 1 pC'dan daha iyi duyarlık elde etmek çok güçtür.

6.3. Seçicilik

Kısmi boşalmalar, genellikle 50 Hz'lik sinüs dalgasının her iki yarı periyodunda da oluşurlar. Bu yarı periyodlarda rasgele olarak pekçok darbe ortaya çıkarsa, ardışık darbeler arasındaki süreler istatistiksel dağılım gösterirler. Boşalma darbelerinin, osiloskop ekranında temiz bir görüntü olarak elde edilebilmesi için, ölçme devresi, darbelerin büyük kısmını ayırt edebilmelidir. Ardışık darbeler arasındaki zaman farkı yeterince büyük değilse, osiloskop

ekranında karmaşık bir görüntü elde edilir. Bu durumda darbeler, birbirinden ayırtılamayacağı gibi üst üste binme nedeniyle boşalma darbe büyüklükleri hatalı ölçülür.

50 Hz'lik sinüs dalgasının bir yarı periyodunda ayırt edilebilecek darbe sayısı, biçiminde tanımlanabilen seçicilik (resolution) derecesinin belirlenebilmesi için, boşalma darbelerinin eşit zaman aralıkları ile ortaya çıktığı varsayılır.

Seçicilik,

- 1) Osiloskobun seçiciliğine,
- 2) Ölçü devresinin zaman sabitine ve
- 3) Yükseltecin band genişliğine

bağlıdır.

6.3.1. Osiloskobun Seçiciliği

Boşalma darbeleri osiloskop ekranında, genellikle eksene dik çizgiler biçiminde alınacak kadar kısa sürelidirler. Normal bir osiloskop ekranında parlak bir çizginin kalınlığı, en az 0,2 mm'dir. Ekran genişliğinin 10 cm olduğu varsayılırsa; seçilebilecek çizgi (darbe) sayısı 500 olur. 50 Hz'lik sinüs dalgasının bir periyodu tüm ekranı kaplayacak biçimde ayarlanırsa; bir yarı periyotta seçilebilecek darbe sayısı 250 olur.

6.3.2. Ölçme Devresinin Seçiciliği

Bir deney cisminde, hemen hemen eşzamanlı olarak çok sayıda boşalma darbesi ortaya çıkarsa, deney cismi bağlantı uçlarındaki akım darbeleri birbirine eklenir. Dolayısıyla ölçü empedansı uçlarındaki gerilim darbeleri, Şekil 6.9'da görüldüğü gibi birbirinin üstüne binerler. RC ölçü empedansında ortaya çıkan tek yönlü darbeler birbirinin üstüne binerken; RLC ölçü empedansında birbirlerinden çıkarılmış da olabilirler. Her iki durumda osiloskop ekranında elde edilen darbeler gerçektekinden farklı genliktedirler ve birbirlerinden ayırt edilemezler.



Şekil 6.9. RC ölçü empedansında darbelerin girişimi.

Darbelerin birbirinden ayırt edilebilmeleri için, aralarındaki zaman farkının, en azından darbe (ölçme devresi) zaman sabitinin 1,5-3 katı kadar uzun olması gerekir. Buna göre, T_m ölçme devresinin zaman sabiti olmak üzere, yarı periyod başına seçicilik s ,

$$s = \frac{1}{300 \cdot T_m} \div \frac{1}{600 \cdot T_m} \quad (6.26)$$

olarak tanımlanabilir.

6.3.3. Yükseltecin Seçiciliği

Yükseltecin band genişliği, işaretin (ölçme devresinin) band genişliğinden daha küçükse, seçicilik yükselteç tarafından belirlenir. Bu durumda işaretler Şekil 6.10'da gösterildiği gibi birbirlerinin üstüne binerler.



Şekil 6.10. Yükselteç band genişliği nedeniyle darbelerin üst üste binmesi.

Darbelerin birbirleri üzerindeki etkilerinin gözardı edilebilmesi için aralarındaki zaman farkının en az, yükselteç zaman sabitinin 1,5-3 katı kadar olması gerekir. (6.17b) denklemi ile tanımlı B band genişliği ve T_y yükselteç zaman sabiti arasındaki ilişkiye göre, yarı periyod başına sezilebilecek darbe sayısı (seçicilik),

$$s = \frac{B}{50} \div \frac{B}{100} \quad (6.27)$$

olmalıdır.

Sonuç olarak bir ölçme düzeninin seçiciliğinin, osiloskobun optik seçiciliği, işaretin (ölçme devresinin) zaman sabiti ve yükseltecin band genişliğince belirlendiği söylenebilir.

BÖLÜM 7

KISMI BOŞALMA ÖLÇME DEVRELERİNİN AYARI

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesine ilişkin standartlarda, kısmi boşalma deneylerinde tekrarlanabilir deney sonuçları elde edebilmek için ölçme işlemlerinin bütün aşamalarında, kullanma koşullarını da içerecek biçimde; ölçme düzenlerinin tüm özelliklerinin belirlenmesi ve ölçme aygıtının ayarlanması gerektiği belirtilir. Bu standartlara göre, aygıtın cevap süresi, darbe seçiciliği, skalanın düzgünlüğü ve aygıt içindeki ayar düzenlerinin değişmezliğinin belirlenmesi gerekir. Bu arada, ölçü empedansı ve bağlantı iletkenleri de gözönüne alınmalıdır.

Ölçü aygıtı özelliklerinin belirlenmesi, genel olarak aygıt aşırı yüklenmeksizin ayar darbesi genliklerinin giderek arttırılması, aygıtın doğru çıkış verip vermediğinin sınanmasını ve darbe seçicilik süresinin belirlenmesini içerir. Sınama, yükseltecin, darbesel aşırı yüklenmeden dolayı sınırlarının belirlenmesi amacıyla düşük yinelenme (tekrarlanma) sıklıklarında (örneğin 100 darbe/saniyede) yapılır. Seçicilik, değişmez genlikteki darbelerin yinelenme sıklığı arttırılarak belirlenir. Seçicilik süresi, darbe şeklini etkileyen devre koşullarına da bağlı olabilmektedir.

Aygıtın tüm deney düzeni ile birlikte ayarı, gerçek deney koşulları altında ve deney cismi devreye bağlı iken, istenen değerleri elde edebilmek üzere, aygıtın gösterdiği değerlerin çarpılacağı katsayının belirlenmesi amacıyla yapılır. Devre özellikleri ve özellikle deney cismi kapasitesinin bağlama (kuplaj) kondansatörü kapasitesine oranı (C_a/C_k) bu katsayı üzerinde etkilidir. Bu nedenle birbirinin benzeri olmayan deney cisimlerinin deneylerinde bu ayarın yinelenmesi gerekir. Ayarlama ile, devre özellikleri ve bozucu etkenlerce belirlenen, ölçülebilecek en düşük boşalma genliği de sınanabilir.

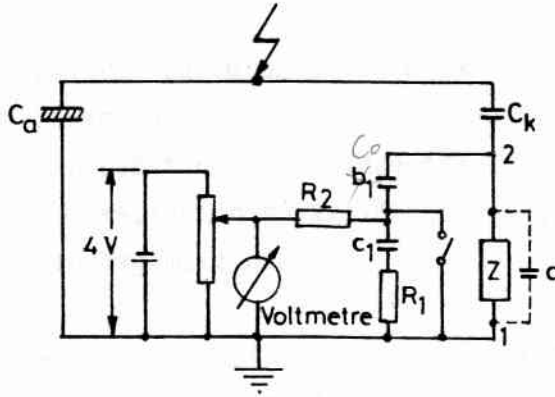
Sözü edilen ayar işlemlerinin gerçekleştirilmesinde, belirli genlikte darbeler üreten ve "standart ayar kaynakları" adı verilen darbe üreteçlerinden yararlanılır. Ayar, darbe üreteçlerinin yüksek gerilim altında deney devresine doğrudan bağlanıp bağlanamamasına göre yüksek gerilimde ayar ve alçak gerilimde ayar şeklinde iki sınıfa ayrılabilir [4,6].

7.1. Alçak Gerilimde Ayar

Alçak gerilimde ayarın temel ilkesi, deney düzenine yüksek gerilim uygulanmaksızın; ölçme devresine bilinen bir yükün verilmesidir. Bu amaçla çoğunlukla bir kare dalga gerilim üretici, ya ölçme devresine ya da düzeneğin belirli bir yerine, bir C_0 kondansatörü üzerinden bağlanır. Deney düzeneği, basit bir ayar kaynağı ile birlikte Şekil 7.1'de gösterilmiştir. C_0 kondansatörü ΔU_0 gerilimi ile dolup, 1/50 saniyede boşalır. Böylece, C_0 kapasitesi, devrenin 1 ve 2 noktaları arasındaki eşdeğer kapasiteye göre küçükse, uygulanan yük,

$$q_0 = C_0 \cdot \Delta U_0 \quad (7.1)$$

olur.



Şekil 7.1. Basit bir ayar kaynağı bağlı doğrudan ölçme düzeneği.

ΔU_0 gerilimi, gerilim bölücü ile ayarlanıp, bir doğru gerilim voltmetresi ile ölçülebilir. q_0 ayar yükünün, ölçü empedansının uçlarında oluşturduğu gerilim,

$$u_0 = \frac{q_0}{[C_a C_k / (C_a + C_k)] + C} \quad (7.2a)$$

ya da

$$u_0 = \frac{q_0}{[1 + (C/C_k)] C_a + C} \left(1 + \frac{C_a}{C_k}\right) \quad (7.2b)$$

dir.

Deney cismindeki gerçek bir boşalmanın yükü q 'nün ölçü empedansı üzerinde oluşturduğu gerilim ise,

$$u = \frac{q}{[1 + (C/C_k)] C_a + C} \quad (7.3)$$

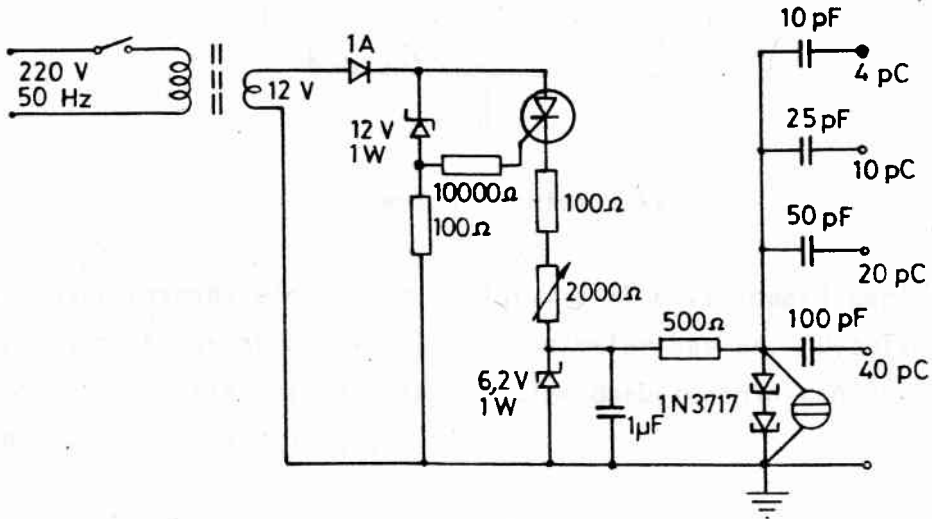
bağıntısıyla gösterilebilir. (7.2b) eşitliği, $u = u_0$ olacak biçimde q_0 ayar yükü ayarlanırsa, boşalma yeğnliği için,

$$q = \left(1 + \frac{C_a}{C_k}\right) q_0 \quad (7.4)$$

bağıntısı elde edilir. Bu durumda, ölçü empedansı üzerinde oluşan ayar darbesinin zaman sabiti, 1 ve 2 uçlarına etkiyen gerçek boşalma darbesinin zaman sabitine eşit olduğundan, (7.4) eşitliği ile elde edilen sonuç yükselticinin duyarlılığından ve giriş devresinin karakteristiklerinden bağımsız olur.

Ayar kaynağı olarak kullanılabilecek daha gelişmiş bir darbe üretici, Şekil 7.2'de gösterilmiştir. Üreteç, her bir pozitif yarı periyotta, aralarındaki süre 1 μ s ile 100 μ s arasında değiştirilebilen 40 pC'luk iki darbe üretir. Üretilen darbelerin yükselme süreleri (darbenin, tepe değerinin % 10'undan % 90'una yükselme süresi), 20 ns kadardır. 12 V'luk zener diyodu, kaynağın ardışık pozitif

yarı peryodlarının belirli ve kararlı noktalarında kontrollü doğrultucunun tetiklenmesini sağlar. 2 kohm'luk ayarlı direnç, 0,1 μ F'lık kondansatörün dolma hızını kontrol eder. Bu kondansatörün dolma hızı, tünel diyodlarının konum değiştirmeleri arasındaki süreyi belirler. Herbir diyodun konum değiştirmesi sırasında 400 mV'lık ve oldukça hızlı bir gerilim yükselmesi olur. Böylece 100 pF'lık kondansatör ile küçük empedanslı yük (ölçü empedansı) üzerinde 40 pC'lık bir boşalma sağlanır. 6,2 V'lık zener diyod, tünel diyodlarına uygulanan akımı sınırlarken; çıkıştaki neon lamba, yük empedansı (kondansatörü) üzerindeki statik yüklerin boşalmasını sağlar. Devrenin çıkış kondansatörünün kapasitesi değiştirilerek 4, 10, 20 ve 40 pC'lık ayar yükleri elde edilebilir.



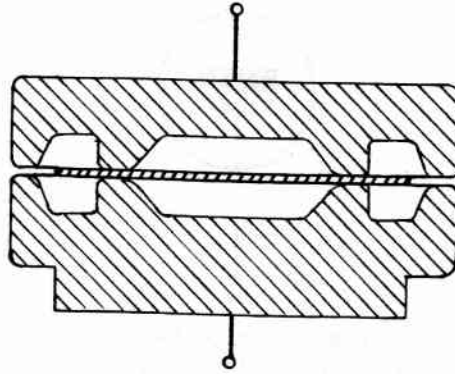
Şekil 7.2. İkili ayarlanabilir darbe üretici.

7.2. Yüksek Gerilimde Ayar

Yüksek gerilimde ayar, ikincil standart kaynaklar da denilen ve yüzeysel, iç kısmi ya da korona boşalmalarından yararlanılarak gerçekleştirilen ayar kaynakları ile yapılır. Sözü edilen ayar kaynakları, gerilim altındaki deney devresine doğrudan bağlanabilirler.

7.2.1. Yüzeysel Boşalmalı Kaynak

Yüzeysel boşalmalı bir kaynak, Şekil 7.3'te gösterildiği gibi, keskin kenarlı elektrodlar arasına bir cam levha yerleştirilerek elde edilebilir. Elektrodlar, ince bir yağ tabakasıyla ortamdaki havadan yalıtılır. Böylece boşalma darbe genlikleri sabit



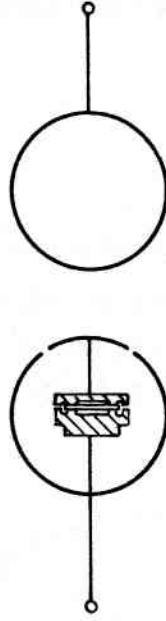
Şekil 7.3. Yüzeysel boşalmalı kaynak.

olan bir ayar kaynağı elde edilmiş olur. 2 kV civarındaki gerilimlerde elektrod kenarlarında yüzeysel boşalmalar başlar. Uygulanan gerilime bağlı olarak ortaya çıkan boşalma darbelerinin genlikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir [6].

Çizelge 7.1. Yüzeysel boşalmalı kaynak için standard gerilim ve boşalma genlikleri.

<u>Uygulanan gerilim (kV)</u>	<u>Boşalma genliği (pC)</u>
2,1	130
2,4	193
2,7	245

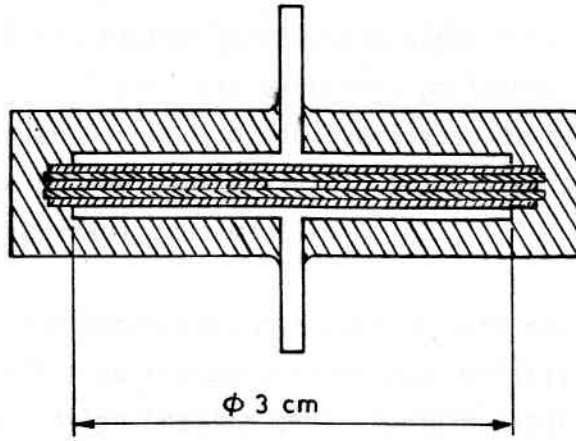
Düzenek, Şekil 7.4'te gösterildiği gibi küresel elektrod düzeni içine yerleştirilerek, daha yüksek gerilimlerde kullanılacak bir ayar kaynağına dönüştürülebilir.



Şekil 7.4. Yüksek gerilimler için yüzeysel boşalmalı kaynak.

7.2.2. İç Kısmi Boşalmalı Kaynak

Şekil 7.5'te iç kısmi boşalmalı bir ayar kaynağı gösterilmiştir. Plastik malzemeden yapılmış birkaç tabaka, 3 cm çaplı dairesel iki elektrot arasına yerleştirilir. Bu plastik tabakalardan birinin ortasına, 3 mm çaplı bir delik açılmıştır. Tüm sistem plastik ya da kauçuk bir malzeme içine yerleştirilir [6].

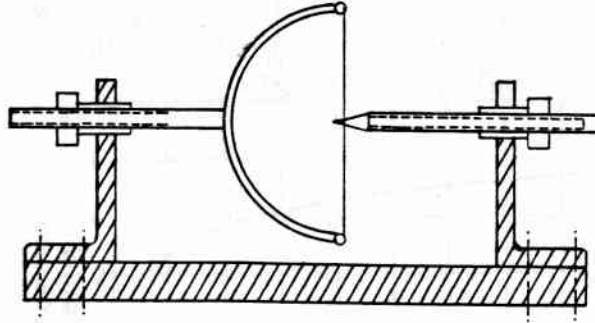


Şekil 7.5. İç kısmi boşalmalı kaynak.

Bu aygıtlarla elde edilen kısmi boşalma darbelerinin genlikleri uygulanan gerilimden oldukça bağımsızdır. Bu nedenle iç kısmi boşalmalı ayar kaynağı, yüzeysel boşalmalı kaynaktan daha kullanışlıdır.

7.2.3. Korona Boşalmalı Kaynak

İkincil standart ayar kaynakları için daha uygun bir örnek, düzenli ve değişmez genlikli korona boşalmaları sağlayan sivri uç-yarım küre elektrod düzenidir. Sivri uç, çevresinde simetrik bir elektrik alanı oluşacak biçimde, Şekil 7.6'da gösterildiği gibi



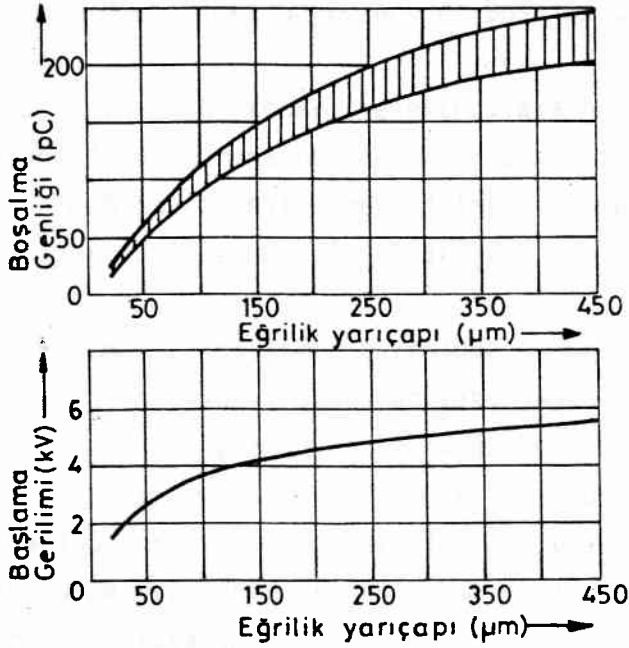
Şekil 7.6. Korona boşalmalı kaynak.

içi boş bir yarım kürenin karşısına yerleştirilir. Sivri uç üzerinde oluşacak küçük yük yer değiştirmeleri, boşalmaların olduğu bölgedeki alanı değiştirmeyeceğinden, sabit genlikli ve düzenli olarak yinelenen boşalma darbeleri elde edilir (Şekil 7.7). Ortaya çıkan ilk boşalma darbesi, kaynak geriliminin negatif tepe değerinde olduğu anı gösterir. Sivri uçlu elektrod, paslanmaz çelikten, ucuna tepe açısı 15° olan bir koni biçimi verilmiş bir elektrodur (tepe açısı $7,5^{\circ}$ ya da 30° de yapılabilir). Kullanılan sivri uca, belirli bir eğrilik yarıçapı verilmiştir.

Açıklanan bu düzeneğin, bir ayar kaynağı olarak kullanılabilceğini ilk kez öneren Kreuger, sivri ucun belirli bir eğrilik yarıçapı için elde edilen boşalma genliklerinin sabit olmayabileceğini; ancak belirli sınırlar arasında kalacağını ileri sürmüştür (Şekil 7.8).



Şekil 7.7. Sivri uç - yarım küre elektrod düzeni ile elde edilen düzenli ayar darbeleri.



Şekil 7.8. Sivri uç eğrilik yarıçapına göre boşalma genliği ve boşalma başlama geriliminin değişimi.

Sivri ucun eğrilik yarıçapı büyüdükçe, boşalma darbelerinin genliği ve boşalma başlama gerilimi büyür. Eğrilik yarıçapına göre, kısmi boşalma başlama gerilimi ve boşalma darbe genliğinin değişimine ilişkin, standartlarda belirtilmiş birkaç değer Çizelge 7.2'de verilmiştir [2,3].

Çizelge 7.2.

Sivri uç eğrilik yarıçapı r (mm)	Boşalma başlama gerilimi \hat{U}_j (kV)	Boşalma genliği $ q $ (pC)
0,05	3,8 $\sqrt{r} \approx 2,7$	40
0,2	6,5 $\sqrt{r} \approx 4,6$	140
0,5	8,5 $\sqrt{r} \approx 6$	240

BÖLÜM 8

KORONA BOŞALMALI AYAR KAYNAĞININ İNCELENMESİ

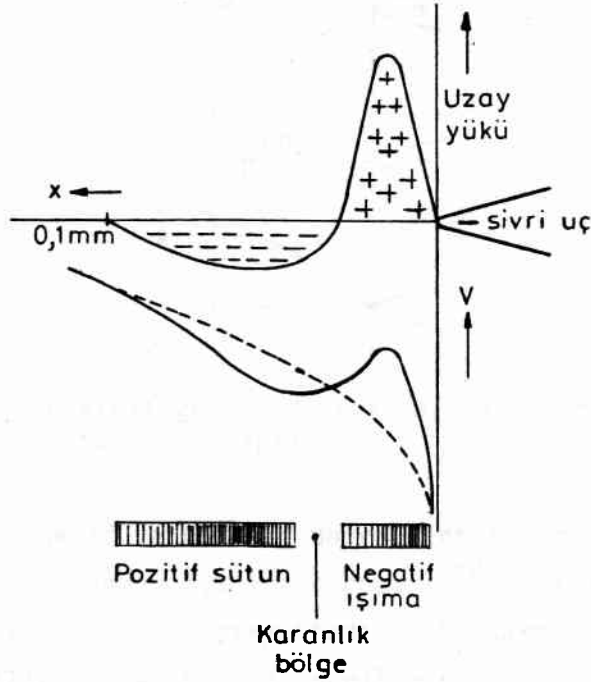
8.1. Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninde Boşalma Olayı

Sivri uç ya da (keskin) kenarlı elektrodla negatif bir yüksek gerilim uygulandığında korona boşalmaları, pozitif gerilimden önce başlar. Örneğin alternatif gerilimlerde, genellikle sinüs dalgasının negatif yarı dalgasında oluşurlar [8].

Sivri uç - yarım küre elektrod düzeninde, sivri uca negatif bir doğru gerilim uygulandığında, sivri uç yakınındaki pozitif bir iyon, elektriksel alan etkisiyle sivri uca doğru çekilir. İyon sivri uca çarpar ve Townsend teorisine göre sivri uç önünde pozitif bir iyon bulutu ve sivri uçtan uzaklaşan bir elektron bulutu oluşur. Bu süreç içinde sivri ucun yüzeyinde, katod ışması da denilen ve korona boşalmaları sonucu ortaya çıkan iyonize olmuş bölge yanlara doğru genişler ve fotoiyonizasyona neden olan bir ışma görülür (Şekil 8.1).

Katodtan biraz daha uzakta yavaşlayan elektronlar havadaki oksijen moleküllerine bağlanırlar. Böylece farklı yükler içeren iki uzay yükü bölgesi ortaya çıkar. Şekil 8.1'de görüldüğü gibi, sivri ucun yakınında, hava moleküllerinin iyonlaşması ile ortaya çıkan pozitif iyonlar pozitif bir uzay yükü oluştururken; sivri ucun biraz daha uzağında, elektronların oksijen moleküllerine bağlanması ile ortaya çıkan negatif iyonlar da negatif bir uzay yükü oluştururlar. Tüm bu süreç, sivri ucun önünde 0,1 mm'lik bir aralıkta ve 10^{-8} saniye gibi çok kısa bir zaman içinde gelişir. Bu sürece ilişkin uzay yükü ve potansiyel dağılımları Şekil 8.1'de gösterilmiştir. Negatif uzay yükü, sivri ucun önündeki elektrik alanını zayıflatır. Bu nedenle elektrik alan şiddeti çok küçülür ve pozitif iyonlar, iyonizasyona katılmadan sivri uçta nötrleşirler, boşalma sona erer.

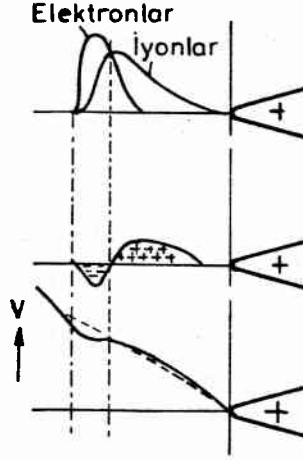
Boşalmanın kesilmesinin ardından, negatif uzay yükü bulutu anoda yönelir ve elektrik alan şiddeti artarak bir sonraki boşalmayı başlatır.



Şekil 8.1. Negatif gerilimde korona, uzay yükü ve potansiyel dağılımı.

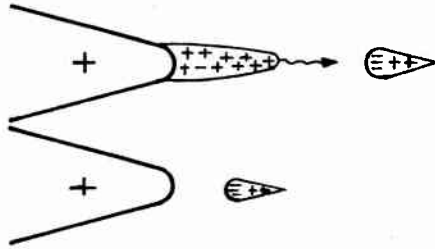
Sivri ucun yakınındaki kuvvetli elektrik alanında, negatif ışılta denilen parlak bir bölge; negatif uzay yükü bölgesinde, pozitif sütun adı verilen daha donuk bir ışılta görülür. Bu iki bölge arasında, küçük alan şiddetine sahip karanlık bir bölge bulunur (Şekil 8.1).

Sivri uca pozitif bir doğru gerilim uygulandığında; boşalmalar dar bir kanal içinde oluşur. Boşalma başlama gerilimine ulaşıldığında, Şekil 8.2'de gösterilen parçacık dağılımını oluşturan elektron çığı ortaya çıkar. Aynı şekil üzerinde yük dağılımı ile birlikte potansiyel dağılımı da verilmiştir. Elektron çığının ucunda elektriksel alan şiddeti artar ve yeni bir çığ oluşmaya başlar (Şekil 8.3). Boşalmanın gelişimi şekil üzerinde açıkça görülmektedir.



Şekil 8.2. Pozitif gerilimde korona, uzay yükü ve potansiyel dağılımı.

Yukarıda, negatif ve pozitif doğru gerilimler için anlatılan boşalma olaylarında, herbir boşalma süreci 10^{-8} saniye gibi çok kısa zaman aralıklarında ortaya çıkmaktadır. Bu süre, sinüs biçiminde değişen 50 Hz'lik bir alternatif gerilim kaynağının herbir yarı dalgasının 10 ms'lik süresi yanında çok küçüktür. Buna göre negatif ve pozitif doğru gerilimler için anlatılan boşalma sürecinin, alternatif gerilimin negatif ve pozitif yarı dalgaları için de geçerli olduğu söylenebilir.



Şekil 8.3. Kanal boşalmasının gelişmesi.

8.2. Sıyri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninde Alan Dağılımının İncelenmesi

Elektrodlar arasına bir gerilim uygulandığında, elektrod düzeninin biçiminden bağımsız olarak, elektrodlar arasında bir elektrostatik alan oluşur.

Elektrod düzeninde, elektrodların belirli bir simetrisi olduğunda; elektrodlar arasında oluşan elektriksel alan, matematiksel olarak kolaylıkla incelenebilir. Ancak belirli bir simetrinin bulunmadığı durumlarda elektrostatik alan dağılımının bulunmasında,

- a) Çizimsel (grafik),
- b) Konform dönüşüm,
- c) Sayısal (nümerik) ve
- d) Deneysel

yöntemler gibi yöntemlerden yararlanılabilir.

Çizimsel yöntem, elektriksel alanın her noktasında birbirine dik olan eşpotansiyel ve alan çizgilerinin belirlenmesine dayanır.

Konform dönüşüm yönteminde, analitik fonksiyonların özelliklerine dayanılarak; karışık alan şekilleri, daha basit alan şekillerine dönüştürülür. Alan problemleri, bu basit alan sistemleri üzerinde kolayca incelenir ve elde edilen sonuçlar, incelenmek istenen diğer düzenlerdeki gerçek alan sistemine, dönüşüm fonksiyonu yardımıyla dönüştürülür [9].

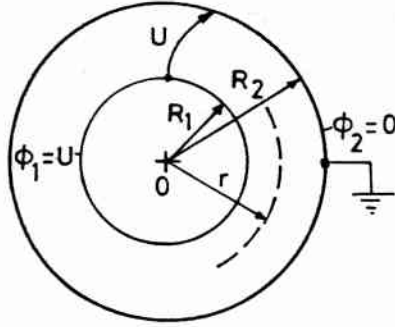
Sonlu farklar, sonlu elemanlar ve yük benzeşimi gibi sayısal yöntemlerle elektrostatik alanın incelenmesinde; Laplace ve Poisson denklemlerinin, bilgisayar yardımıyla çözülmesinden yararlanılır [11].

Deneysel yöntemler ise, gerçek bir alana ilişkin fiziksel büyüklüklerden, biri ya da birkaçının doğrudan ölçülmesine dayanır. Ancak bazı fiziksel sistemlerde, alan büyüklüklerinin doğrudan ölçülmesi, deneysel güçlükler nedeniyle sorun olabilmektedir. Bu yüzden, özellikle çok büyük ve çok küçük boyutlardaki elektrod düzenlerinde ya da yalıtkan olarak katı bir malzeme içeren elektrod düzenlerinde; elektrodların ölçekli bir modeli kullanılır ve alanlar

arasındaki benzeşimlerden yararlanılır. Bu amaçla, özellikle alçak gerilimde elektrolitik banyo yöntemi sıkça kullanılır.

8.2.1. Kuramsal İnceleme

Eş merkezli küresel elektrod sistemi, merkezden geçen bir düzleme göre simetriktir. Buna göre, belirli bir eğrilik yarıçapına sahip sivri uç ve yarım küre elektrod düzeni, eş merkezli yarım kürelerden oluşmuş bir elektrod sistemi olarak düşünülebilir. Dolayısıyla, eş merkezli küresel elektrod sistemine ilişkin alan dağılımı bağıntılarının, sivri uç - yarım küre elektrod düzeni için de geçerli olduğu söylenebilir.



Şekil 8.4

Şekil 8.4'te verilen eş merkezli küresel elektrod sisteminde; potansiyel yalnızca r koordinatına göre değiştiğinden, Laplace denklemi,

$$\Delta \phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \alpha^2} \right) = 0$$

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\phi}{dr} = 0 \quad (8.1)$$

biçimini alır. Bu denklemin genel çözümünü veren

$$\phi_r = A + B \frac{1}{r} \quad (8.2)$$

bağıntısında, sınır koşulları gözönüne alınarak, potansiyel dağılımı için,

$$\phi_r = U \frac{R_2}{(R_2 - R_1)} \left(\frac{R_2}{r} - 1 \right) \quad (8.3)$$

ve alan dağılımı için de, $E_r = -d\phi_r/dr$ bağıntısı yardımıyla,

$$E_r = U \frac{R_1 R_2}{(R_2 - R_1)} \frac{1}{r^2} \quad (8.4)$$

bağıntısı elde edilir.

Eş merkezli küresel elektrod sisteminde eş potansiyel yüzeyler, bilindiği gibi, eş merkezli birer küre yüzeyi ve bunların simetri düzlemi ile arakesitleri de eş merkezli birer dairedir. Eş potansiyel küre yüzeylerinin yarıçapları, i 'inci eş potansiyel yüzeyinin r_i yarıçapı bilindiğine göre,

$$k = \frac{\Delta \phi}{U} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2} \quad (8.5)$$

olmak üzere,

$$r_{i+1} = \frac{r_i}{1 - kr_i} \quad (8.6)$$

bağıntısı yardımı ile bulunabilir [9].

8.2.2. Deneysel İnceleme

8.2.2.1. Elektrolitik Banyo Yöntemi

Bir elektrod düzeninin statik alan dağılımının, elektrolitik banyo yöntemi yardımıyla bulunmasında, statik elektrik alanı ile stasyoner akım alanı arasındaki benzeşimden yararlanılır [10].

Bilindiği gibi, \vec{J} stasyoner alanın akım yoğunluğu ile \vec{E} elektriksel alanı arasında, χ ortamın öziletkenliği olmak üzere,

$$\vec{J} = \chi \vec{E} \quad (8.7)$$

bağıntısı yazılabilir.

Benzer biçimde, \vec{D} büyüklüğü ile gösterilen statik alanın akı yoğunluğu ile \vec{E} elektriksel alanı arasında da, ϵ ortamın dielektrik katsayısı olmak üzere,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (8.8)$$

bağıntısı geçerlidir.

Ortamın izotrop olması durumunda, χ skaler bir büyüklük olacağından, \vec{J} ve \vec{E} vektörleri aynı yön ve doğrultuda olacak ve akım çizgileri ile elektriksel alan çizgileri çakışacaktır.

Elektrolitik banyo yöntemi ile belirlenen elektriksel alan çizgileri, aslında akım çizgileridir. Ancak ortamın izotrop olduğu varsayımı altında, elde edilen akım çizgileri aynı zamanda elektriksel alan dağılımının kuvvet çizgileri olarak alınabilirler.

Stasyoner akım alanı ile statik elektrik alanı arasında yukarıda sözü edilen benzerliğin yapılabilmesi için, bu iki alanın sınır koşullarının eşit olması gerekir.

Elektrostatik alan ile stasyoner akım alanını belirleyen,

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \quad , \quad \oint_F \vec{D} \cdot d\vec{F} = Q \quad , \quad C = Q/U \\ \vec{J} &= \chi \vec{E} \quad , \quad \oint_F \vec{J} \cdot d\vec{F} = I \quad , \quad R = U/I \\ \vec{E} &= -\text{grad} \phi \quad , \quad \text{div grad} \phi = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

denklem sistemleri arasındaki benzerlik açıkça görülmektedir.

Her iki alanda eşpotansiyel ve alan çizgilerinin dağılımı, aynı matematiksel bağıntılara göre oluşur. Yukarıdaki bağıntılar, akım yoğunluğu vektörü ile alan şiddeti vektörünün aynı yönde

olduğunu ve dolayısıyla statik elektrik alanındaki alan çizgilerine, stasyoner alanda akım çizgilerinin karşı geleceğini gösterir. Stasyoner alan ile statik alanın temel denklemleri karşılaştırıldığında, statik alandaki \vec{D} deplasman vektörü yerine stasyoner alanda \vec{j} akım yoğunluğu vektörünün ve ϵ yerine χ 'nin geldiği ve dolayısıyla bu iki alan arasında bir benzerliğin sözkonusu olduğu görülür.

Statik alanda olduğu gibi, stasyoner alanda da, öziletkenlikleri (χ_1 ve χ_2 gibi) farklı iki ortamı ayıran sınır yüzeylerde akım çizgilerinde kırılmalar oluşur ve kırılma açıları ile öziletkenlikler arasında, statik alandakine benzer şekilde,

$$\frac{\text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2} = \frac{\chi_1}{\chi_2} \quad (8.10)$$

bağıntısı elde edilir. Ortamlardan birisinin mükemmel iletken (elektrod, $\chi_1/\chi_2 \rightarrow \infty$) olması durumunda, diğer ortamdaki kırılma açısı $\alpha_2 = 0$ olacağından, akım çizgileri statik alandaki alan çizgileri gibi iletken yüzeylerini dik olarak keserler. Böylece stasyoner alandaki mükemmel iletken ortam, elektrostatik alandaki elektrod yerine geçer.

Dielektrik sabitleri ve öziletkenlikleri ϵ_1, χ_1 ve ϵ_2, χ_2 olan iki ortamda statik ve stasyoner alanlar arasında, ancak belirli koşullar altında bir benzerlik sağlanabilir. İki ortamın sınır yüzeyinde, statik alanda, σ yüzeyel yük yoğunluğu olmak üzere,

$$D_{1n} - D_{2n} = \epsilon_1 E_{1n} - \epsilon_2 E_{2n} = \sigma \quad (8.11)$$

bağıntısı yazılabilir. Stasyoner alandaki

$$E_{1n} = j_{1n}/\chi_1, \quad E_{2n} = j_{2n}/\chi_2 \quad (8.12)$$

bağıntılarından; $j_{1n} = j_{2n} = j_n$ eşitliği gözönüne alınarak

$$\sigma = \left(\frac{\epsilon_1}{\chi_1} - \frac{\epsilon_2}{\chi_2} \right) j_n \quad (8.13)$$

bağıntısı elde edilir. Ancak,

$$\frac{\epsilon_1}{\chi_1} = \frac{\epsilon_2}{\chi_2} \quad (8.14)$$

eşitliğinin sağlanması durumunda, sınır yüzeyde serbest yük dağılışı oluşmayacağından ($\sigma = 0$), statik ve stasyoner alanlar arasında tam bir benzerlik ve sınır yüzeylerdeki kırılma açıları arasında tam bir eşitlik elde edilir [10].

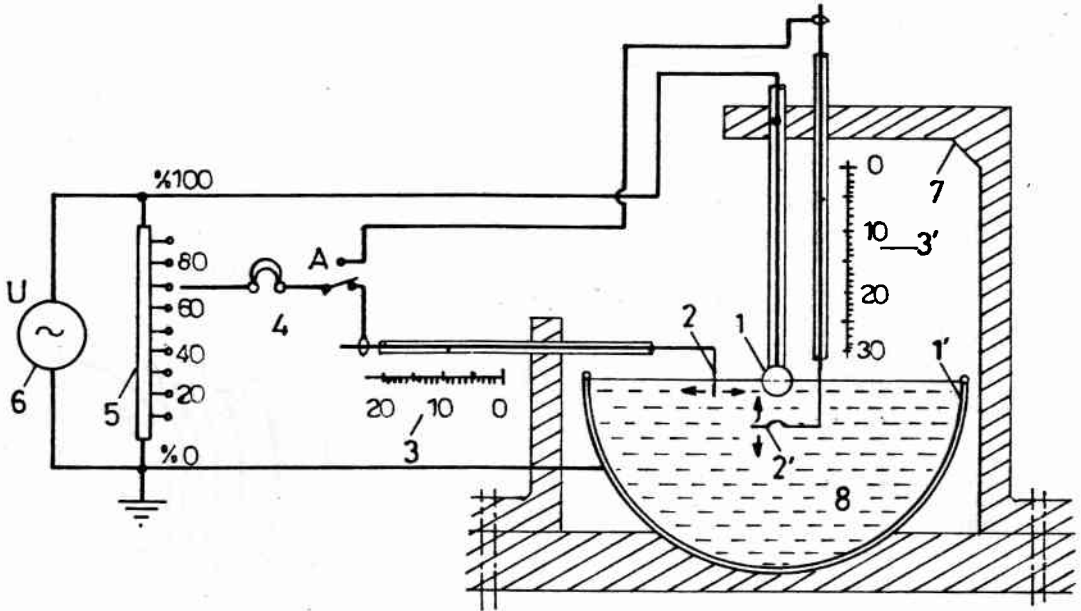
Yukarıdaki açıklamalar, bir elektrod düzeninin statik elektrik alan dağılımının, iletken ortamdaki stasyoner akım alanından gidilerek bulunabileceğini gösterir. İletken ortam olarak, iletken bir sıvı (elektrolit) ya da yarıiletken özel kağıtlar kullanılabilir. Alan dağılımı bulunacak elektrod düzeninin mükemmel iletken (örneğin bakır ya da benzeri iletkenlerden) yapılmış ölçekli bir modeli iletken ortama yerleştirilir. Düzendeki elektrodalara polarizasyona engel olmak amacıyla, orta frekanslı bir alternatif akım kaynağı bağlanır.

8.2.2.2. Elektrolitik Banyo Yöntemi İle Sivri Uç - Yarım Küre Elektrod Düzeninin Alan Dağılımının İncelenmesi

Sivri uç - yarım küre elektrod düzeninde, elektrostatik alan dağılımının bulunması amacıyla kullanılan elektrolitik banyo deney düzeneği Şekil 8.5'te gösterilmiştir.

Deneylerde, belirli bir eğrilik yarıçapına sahip sivri ucu temsil etmek üzere, şekilde gösterildiği gibi, bir küre kullanılmıştır. Bu küre, yatay konumda yerleştirilmiş ve elektrolit olarak musluk suyu (iletkenliği 20°C'de 325 μ S) ile doldurulmuş, bir yarım kürenin ortasına, eş merkezli bir biçimde yerleştirilmiştir. Hem yatay, hem de düşey eksen doğrultusunda eşpotansiyel çizgileri belirleyebilmek amacıyla, uygun konumlarda tutturulmuş cam borular içine, iki yöne hareket edebilen metal çubuklar yerleştirilmiştir. Metal çubuklara tutturulmuş sondaların, yalnızca uç noktaları elektrolit ile elektriksel temastadır. Yatay düzlemde, elektrolitin *olması sağlanmıştır.*

yüzeyinde, düşey eksen doğrultusunda ise sıyrı ucun tam altına gelen bölgede hareket eden sondalar, ucu dışında yalıtkan bir vernikle kaplanmıştır. Sondaların küre merkezinden uzaklıklarını belirlemek üzere, hareketli metal çubukların üzerine birer işaret konup, cam borular üzerine bu işaretlerin karşısına gelecek biçimde milimetrik taksimatlar yapılmıştır. Kaynak ve ölçme düzeni yerine, deneylerde, her ikisini birlikte içeren Messwandler - Bau marka hazır ölçme düzeni kullanılmıştır.

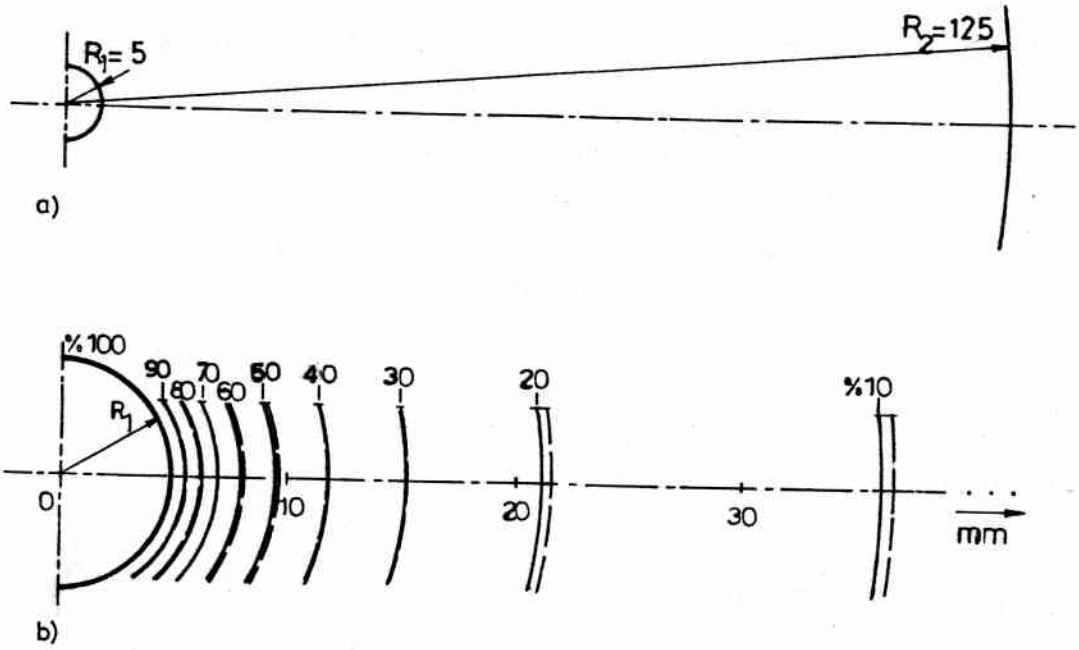


Şekil 8.5. Elektrolitik banyo deney düzeni.

- 1,1': Ayar kaynağı modeli, küre ve yarım küre elektrodlar,
- 2,2': Yatay düzlemde ve dikey eksen doğrultusunda eşpotansiyel çizgileri belirlemek amacıyla kullanılan metal sondalar,
- 3,3': Sondaların küre merkezlerinden uzaklığını gösteren cetveller,
- 4 : Kulaklık (denge aygıtı),
- 5 : Gerilim bölücü,
- 6 : Alternatif gerilim kaynağı,
- 7 : Kaide (mesnet),
- 8 : Elektrolit (musluk suyu, iletkenliği 20°C'de 325 μ S),
- A : Konum seçici anahtar.

Elektrolitik banyo yöntemiyle deneysel olarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımının, (8.6) bağıntısıyla kuramsal olarak elde edilenle yaklaşık olarak ($\% \pm 1$ hata ile) uyum sağladığı gözlenmiştir.

Şekil 8.6'da, $R_1 = 5$ mm ve $R_2 = 125$ mm'lik elektrodlarla yatay düzlemde ve düşey eksen doğrultusunda deneysel olarak ölçülen ve kuramsal olarak hesaplanan eşpotansiyel çizgilerin dağılımı gösterilmiştir.

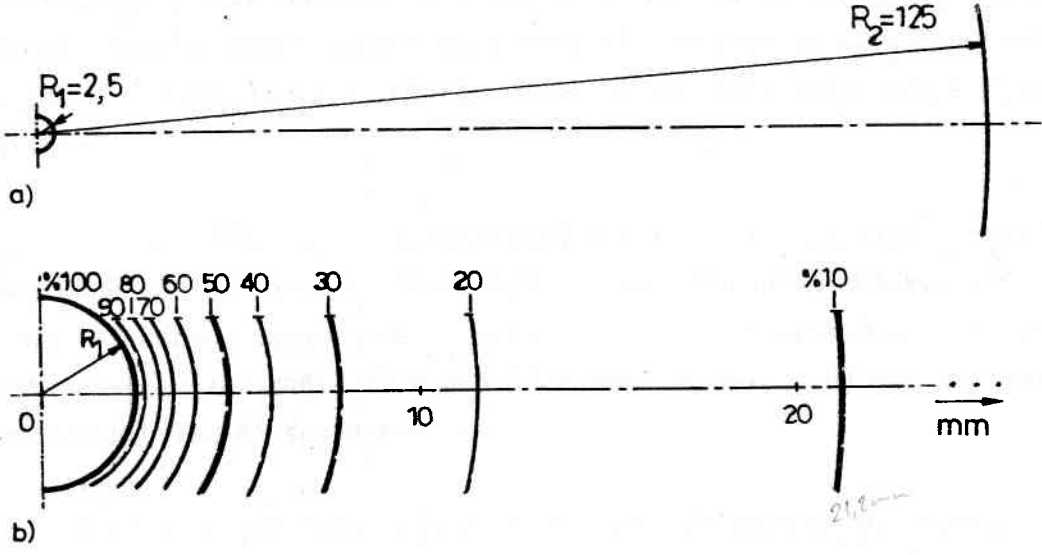


Şekil 8.6. $R_1 = 5$ mm ve $R_2 = 125$ mm'lik elektrodlarla ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.

- a) Elektrodların gerçek boyutları,
b) 3/1 ölçekle çizilmiş eşpotansiyel çizgi dağılımı,
—— : deneysel,
----- : kuramsal.

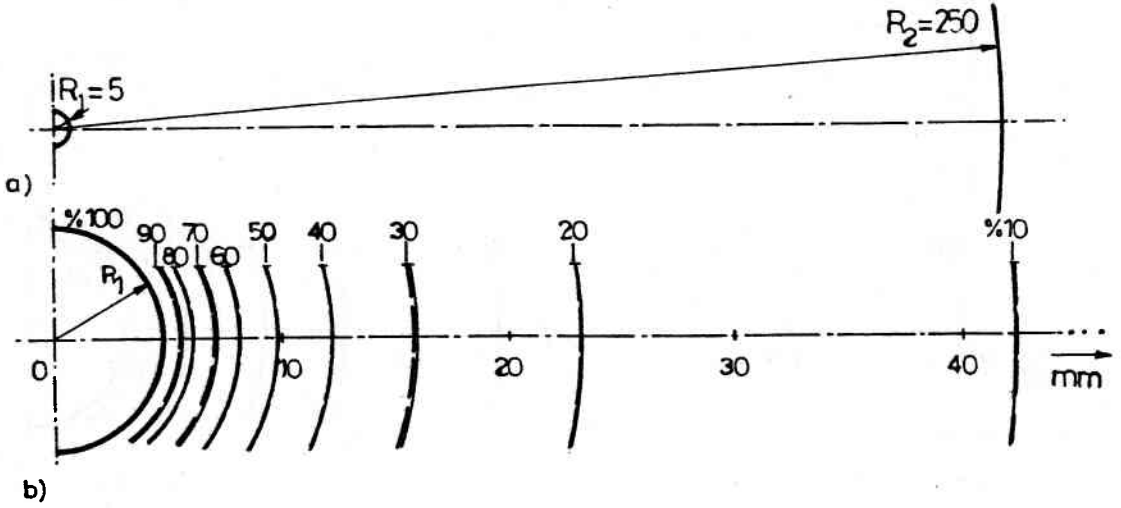
Eğrilik yarıçapı 0,5 mm olan bir sivri uç, 2,5 mm yarıçaplı bir küre ve yarıçapı 25 mm olan yarım küre 125 mm'lik yarım küre ile temsil edilerek bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımı, Şekil 8.7'de gösterilmiştir.

Şekil 8.8'de ise, yarıçapı 5 mm olan bir küre ve 250 mm olan bir yarım küre kullanılarak elde edilen dağılım gösterilmiştir.



Şekil 8.7. $R_1 = 2,5$ mm ve $R_2 = 125$ mm'lik elektrodla ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.

- a) Elektrodların gerçek boyutları,
b) 5/1 ölçekle çizilmiş eşpotansiyel çizgi dağılımı,
—— : deneysel,
----- : kuramsal.



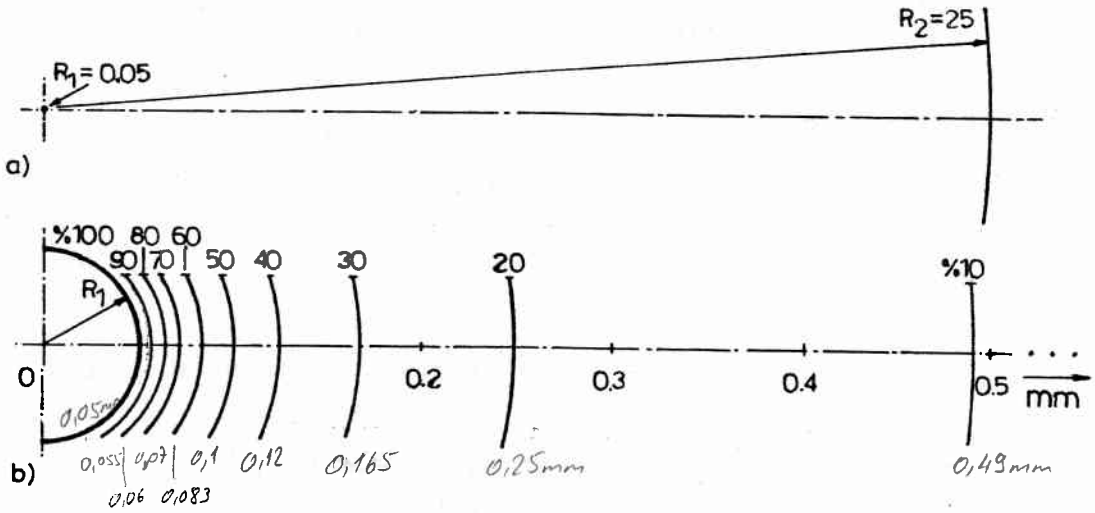
Şekil 8.8. $R_1 = 5$ mm ve $R_2 = 250$ mm elektrod düzeni için elde edilen eşpotansiyel çizgi dağılımı.

- a) 1/2 ölçekli olarak elektrodlar,
b) 3/1 ölçeğinde eşpotansiyel çizgi dağılımı,
—— : deneysel,
----- : kuramsal.

Standart ayar kaynağı olarak kullanılan sivri uçların eğrilik yarıçapları, 0,05 mm, 0,2 mm ve 0,5 mm gibi son derece küçük değerlerde olduklarından; gerçek boyutlardaki elektrodlar için eşpotansiyel çizgi dağılımları, elektrolitik banyo yöntemiyle belirlenemmiştir.

Ancak daha büyük boyutlardaki elektrodlarla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, kuramsal olarak bulunan sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Buna göre, sözkonusu standard elektrodlar için eşpotansiyel çizgi dağılımlarının, kuramsal olarak (8.6) bağıntısıyla belirlenebileceği söylenebilir.

Eğrilik yarıçapı, $R_1 = 0,05$ mm olan bir küre ve yarıçapı, $R_2 = 25$ mm olan bir yarım küreden oluşan elektrod düzeninde kuramsal olarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımı, elektrodların ölçekli bir kesiti ile birlikte Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



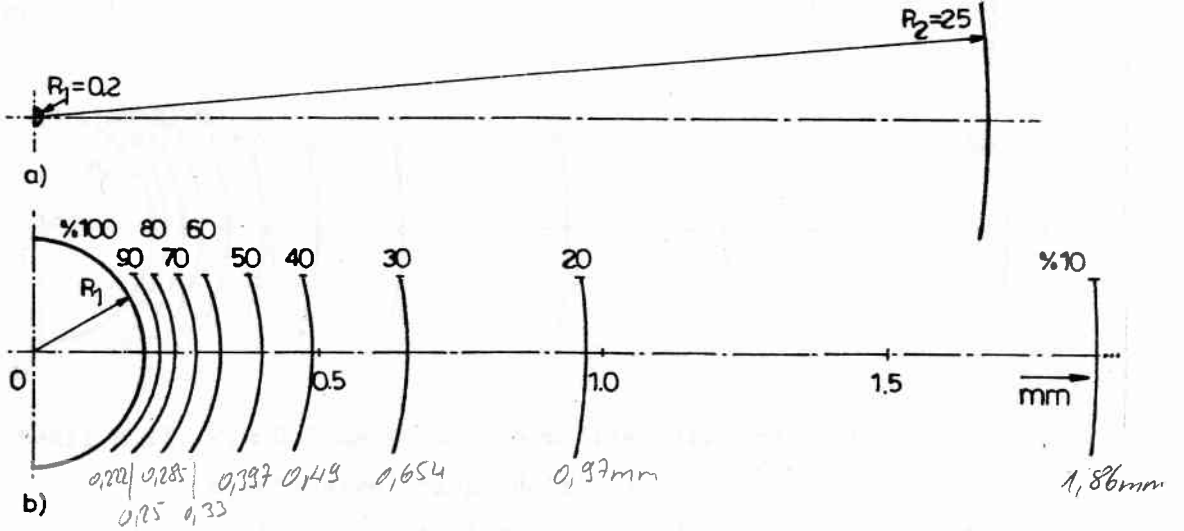
Şekil 8.9. $R_1 = 0,05$ mm ve $R_2 = 25$ mm'lik elektrod düzeni ve eşpotansiyel çizgi dağılımı.

a) 5/1 ölçeğinde, elektrod düzeninin bir kesiti,

b) 250/1 ölçeğinde, kuramsal olarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımı,

////// : deneysel,
----- : kuramsal.

Benzer biçimde, $R_1 = 0,2$ mm yarıçaplı bir küre ve $R_2 = 25$ mm yarıçaplı bir yarım küreden oluşan elektrod düzeni için elde edilen eşpotansiyel çizgi dağılımı, ölçekli bir kesitle birlikte, Şekil 8.10'da verilmiştir.



Şekil 8.10. $R_1 = 0,2$ mm ve $R_2 = 25$ mm'lik elektrod düzeni ve eşpotansiyel çizgi dağılımı.

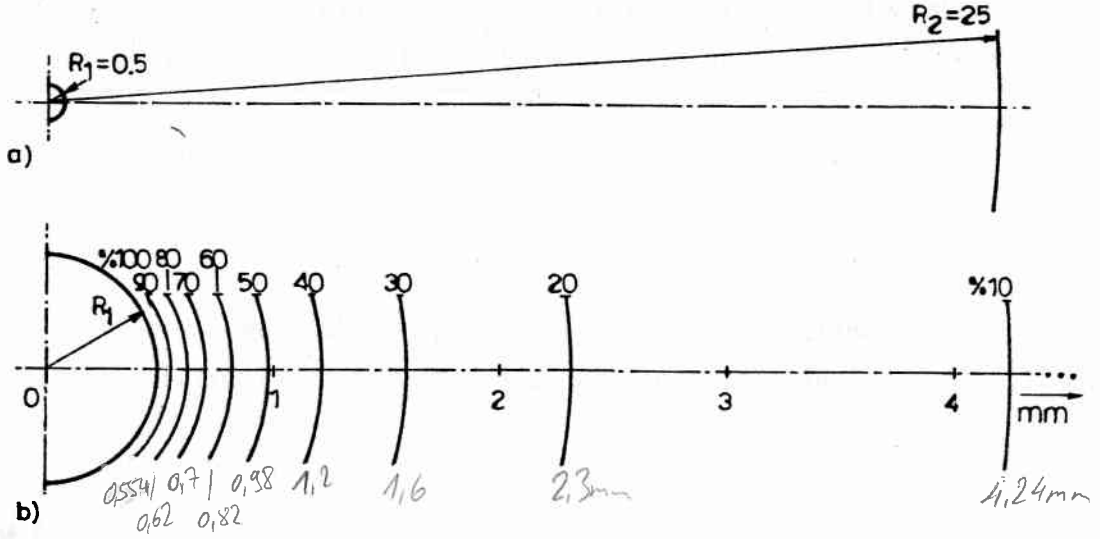
- a) 5/1 ölçeğinde elektrod düzeninin bir kesiti,
- b) 75/1 ölçeğinde, kuramsal olarak elde edilen eşpotansiyel çizgi dağılımı.

$R_1 = 0,5$ mm ve $R_2 = 25$ mm boyutlarındaki elektrodlar için hesaplanan eşpotansiyel çizgi dağılımı da Şekil 8.11'de verilmiştir.

8.3. Korona Boşalmalı Ayar Kaynağı İle Deneyler

8.3.1. Delinme Gerilimlerinin Belirlenmesi

Eğrilik yarıçapı 0,034 mm olan sivri uç ve yarıçapı 25 mm olan bir yarım küreden oluşan elektrod düzeninde, alternatif ve pozitif ve negatif doğru gerilimler için elde edilen delinme gerilimlerinin ortalama değerleri, Çizelge 8.1'de verilmiştir. Herbir delinme geriliminin belirlenmesinde beş deney yapılmıştır. Deney sırasında ortam koşulları, $p = 759,2$ mmHg, $t = 22^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş olup, delinmeler sırasında çekilen fotoğraflar Ek C'de verilmiştir.



Şekil 8.11. $R_1 = 0,5$ mm ve $R_2 = 25$ mm'lik elektrod düzeni ve eşpotansiyel çizgi dağılımı.

- a) 5/1 ölçekli olarak elektrod düzeninin bir kesiti.
b) 30/1 ölçekli olarak, hesaplanarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımı.

Çizelge 8.1.

Uygulanan gerilim türü	Delinme gerilimi [kV]
Alternatif gerilim (50 Hz)	13,2 ($\hat{U}/\sqrt{2}$)
Pozitif doğru gerilim	18,8
Negatif doğru gerilim	35,3

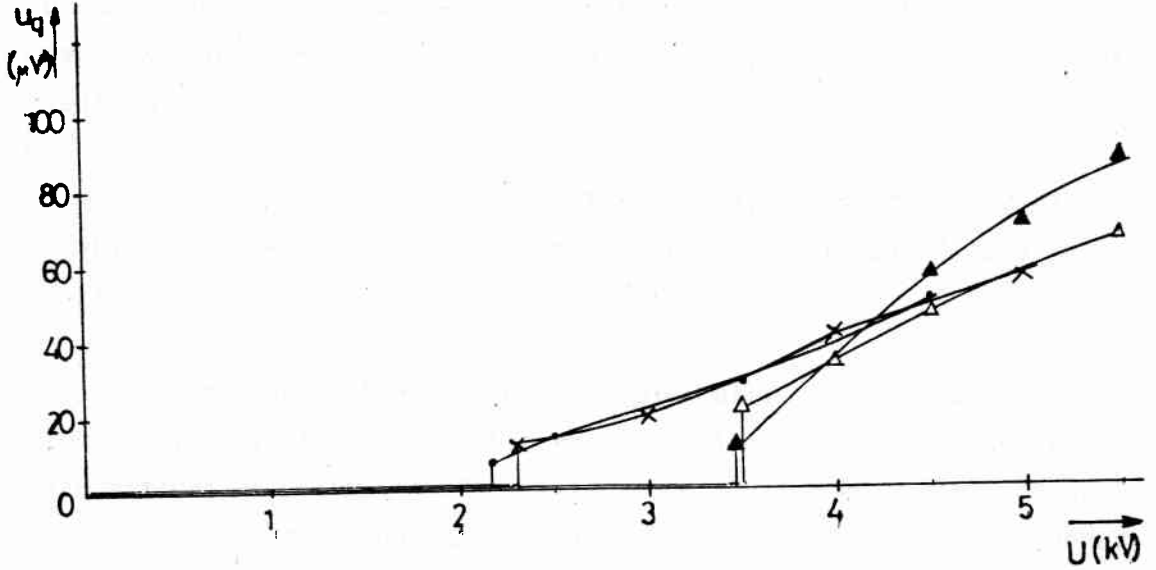
8.3.2. Kısmi Boşalma Başlama ve Sönme Gerilimlerinin Belirlenmesi

Yarım küre yarıçapı, $R = 25$ mm = sabit olmak üzere eğrilik yarıçapları, $r = 0,054$; $0,056$; $0,192$ ve $0,2$ mm olan sivri uçlar için, Şekil 6.1'de verilen deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. Kullanılan sivri uç eğrilik yarıçaplarına göre elde edilen kısmi boşalma başlama ve sönme gerilimleri, Çizelge 8.2'de verilmiştir (kısmi boşalma başlama gerilimi olarak, uygulanan sinüzoidal deney gerilimlerinin negatif tepe değerlerinde kararlı ve düzenli birer boşalma darbesinin ortaya çıktığı gerilim değerleri alınmıştır). Eğrilik yarıçapı $0,2$ mm olan sivri uçlu elektrod düzeninde elde edilen kısmi boşalma osilogramları Ek B'de verilmiştir.

Çizelge 8.2.

Sivri uç eğrilik yarıçapı [mm]	Kısmi boşalma başlama gerilimi: $\hat{U}/\sqrt{2}$ [kV]	Kısmi boşalma sönme gerilimi: $\hat{U}/\sqrt{2}$ [kV]
0,054	2,16	2,05
0,056	2,32	2,25
0,192	3,45	3,4
0,20	3,48	3,35

Farklı eğrilik yarıçaplı sivri uçlarla uygulanan gerilimin değişik değerleri için elde edilen boşalma genlikleri, Şekil 8.12'de gösterilmiştir.



Şekil 8.12. Farklı eğrilik yarıçaplı sivri uçlar için boşalma genliklerinin uygulanan gerilimle değişimleri.

- : $r = 0,054$ mm
- x : $r = 0,056$ mm
- ▲ : $r = 0,192$ mm
- △ : $r = 0,2$ mm

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektriksel kısmi boşalmaların, yüksek gerilimde yalıtım düzenlerinin ömrü üzerinde önemli etkilerinin olması nedeniyle; ölçümlerinde ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde titiz davranılması gerektiği açıktır. Ancak kısmi boşalma büyüklüklerinin son derece küçük değerlerde olması, kullanılan ölçü aygıtlarının duyarlıklarının belirlenmesini ve ayarlarının doğru olarak yapılmasını da önemli kılmaktadır. Bu da ölçü aygıtlarının, kararlı ve belirli ayar darbeleri üreten ayar kaynakları ile ölçeklenmesini gerektirmektedir.

Yapılan çalışmada, belirli koşullarda, uygun eğrilik yarıçaplı sivri uç ve yarım küre elektrod düzenlerinden ayar kaynağı olarak yararlanabileceği görülmüştür.

Kısmi boşalmaları ölçmek amacıyla kullanılan ölçü aygıtının, tüm deney düzeneği ile birlikte ayarlanması aşamasında, yüksek gerilim altında da kullanılabilmesi, sivri uç - yarım küre elektrod düzeninin sağladığı en önemli avantajlardan biridir. Özellikle, deney cisminin kısmi boşalma başlama gerilimi, sözkonusu ayar kaynağının boşalma başlama geriliminden daha büyükse; böyle bir ayar kaynağı, yüksek gerilim uygulanmış deney cisminin etkileri de dahil, ölçü aygıtını, gerçek deney koşulları altında ölçekleme olanağı sağlar. Düzenin ürettiği boşalma darbeleri tekrarlama sıklığı konusunda bu aşamada, kesin birşey söylenememekle birlikte, düzen, belirli bir gerilim altında, sabit genlikli boşalma darbeleri vermektedir.

Çalışmada, sivri uç - yarım küre elektrod düzeninin, uygulanan alternatif gerilimin negatif tepe değerlerinde kararlı ve düzenli birer darbe verdiği gerilim değeri, kısmi boşalma başlama gerilimi olarak kabul edildiğinde, bu gerilimlerin bazı standartlarda verilen boşalma başlama gerilimlerinden daha küçük olduğu görülmüştür.

Bunun yanında, verilen boşalma başlama gerilimlerinin 1,4 katından da büyük gerilimlerde; tekrarlama sıklığı artmakla birlikte, sabit genlikli boşalma darbelerinin elde edilebildiği gözlenmiştir. Ancak, sözü edilen standartlarda verilen boşalma başlama gerilimleri için darbe tekrarlama sıklıkları verilmemiştir.

Bu nedenle, standartlarda, boşalma başlama gerilimi ve buna ilişkin boşalma genliği ile birlikte, darbe tekrarlama sıklığının da verilmesinin yararlı olacağı söylenebilir.

Ayrıca, kullanılacak ölçü aygıtının frekans bandının ve ölçü frekansının doğru olarak seçilebilmesi için, sözkonusu elektrod düzeninin verdiği boşalma darbelerinin frekans spektrumunun belirlenmesi yararlı olur. Düzenin boşalma darbe genliğinin basınçla değişiminin çıkarılması ve yüksek doğru gerilim altındaki davranışının incelenmesi de yapılabilecek araştırmalardandır.

Sonuç olarak, sivri uç - yarım küre elektrod düzeni, belirli koşullar altında, güvenilir bir ikincil standart ayar kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak ölçü aygıtının seçiciliğinin belirlenmesinde kullanılmaya uygun değildir. Bununla beraber, frekansı ayarlanabilir bir yüksek gerilim kaynağı kullanılarak, bu sakınca da ortadan kaldırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] BARTNIKAS, R., Mc Mahon, E.J., Corona Measurement and Interpretation Engineering Dielectrics, Volume I, ASTM-STP 669, Philadelphia USA, 1979.
- [2] TS 2051/1975, Elektriksel Kısmi Boşalmaların Ölçülmesi (Partial Discharge Measurements), Türk Standardları Enstitüsü, 1975.
- [3] IEC-270/1968, Partial Discharge Measurements, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève, 1968.
- [4] ASTM-D 1868-81, Standard Method for Detection And Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems, American Society for Testing and Materials, Philadelphia USA, 1981.
- [5] ERGAN, N., Elektriksel Kısmi Boşalmaların Değişik Yöntemlerle Ölçülmesi ve Ölçü Sonuçlarının Karşılaştırılması, İ.T.Ü. Doktora Tezi, İ.T.Ü. Müh.-Mim. Fak. Matbaası, 1982.
- [6] KREUGER, F.H., Discharge Detection in High Voltage Equipment, American Elsevier Publish. Comp., New York, 1964.
- [7] HOGG, W.K., WALLEY, C.A., An Assesment of the Point-Hemisphere Discharge Gap as a Partial Discharge Reference, J. Scntf. Instr. Vol.43, No.1, 1966.
- [8] KUFFEL, E., ABDULLAH, M., High Voltage Engineering, Pergamon Press, Oxford, 1978.
- [9] GÖNENÇ, İ., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrod Sistemleri, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1085, İstanbul, 1977.
- [10] VITKOVITCH, D., Field Analysis, Experimental and Computational Method, D. Van Nostrand Company Ltd., London, pp.205-259, 1966.
- [11] KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, pp.433-461, 1984.

EK A

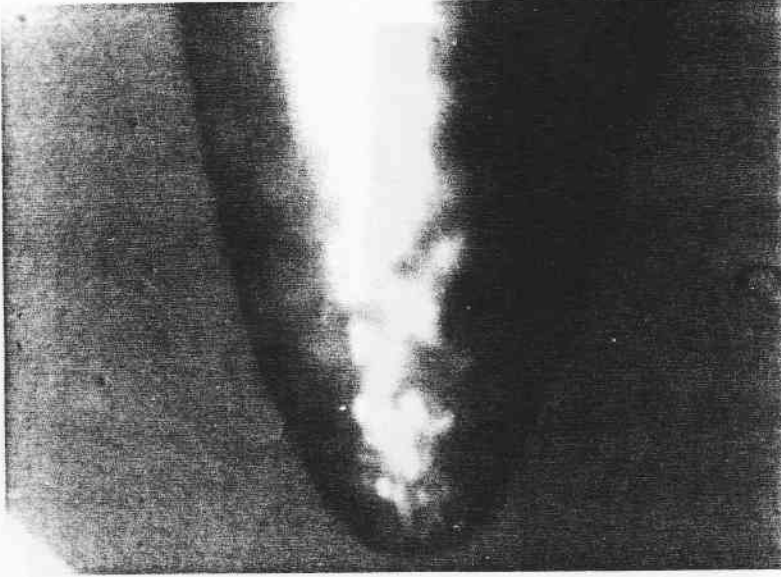
Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan sivri uçlu elektrodların, uç eğriliklerinin belirlenmesinde, Şekil A.1'de görülen elektron mikroskobu ve monitör düzeninden yararlanılmıştır. Uçlar, monitörde



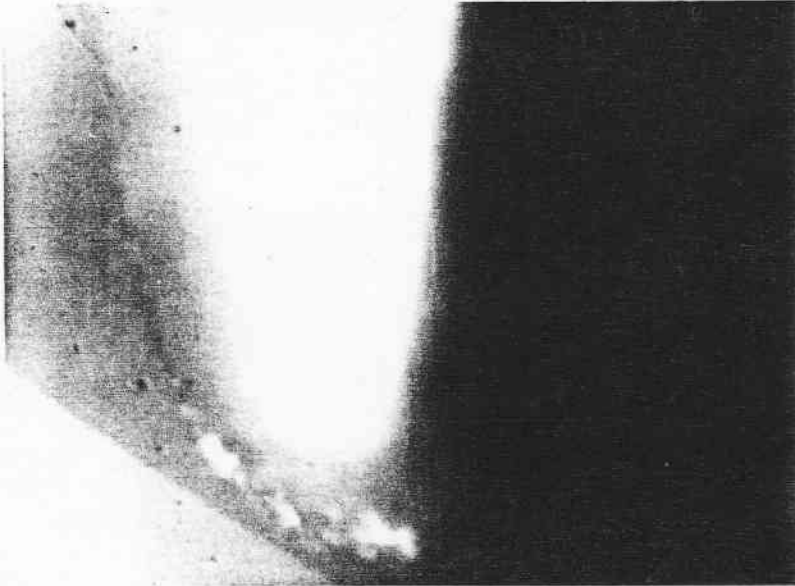
Şekil A.1. Sivri uçların incelenmesinde kullanılan elektron mikroskobu ve monitör.

yaklaşık olarak 250 kez büyütülmüş ve fotoğrafları çekilmiştir. Eğrilik yarıçapları, 0,05; 0,054 ve 0,2 mm olan sivri uçlara ilişkin olarak elde edilen fotoğrafları sırasıyla Şekil A.2; A.3 ve A.4'te gösterilmiştir. Monitörden ve verilen şekillerden, uçların düzgün ve eğrilik yarıçaplarının uygun olduğu görülebilmektedir.

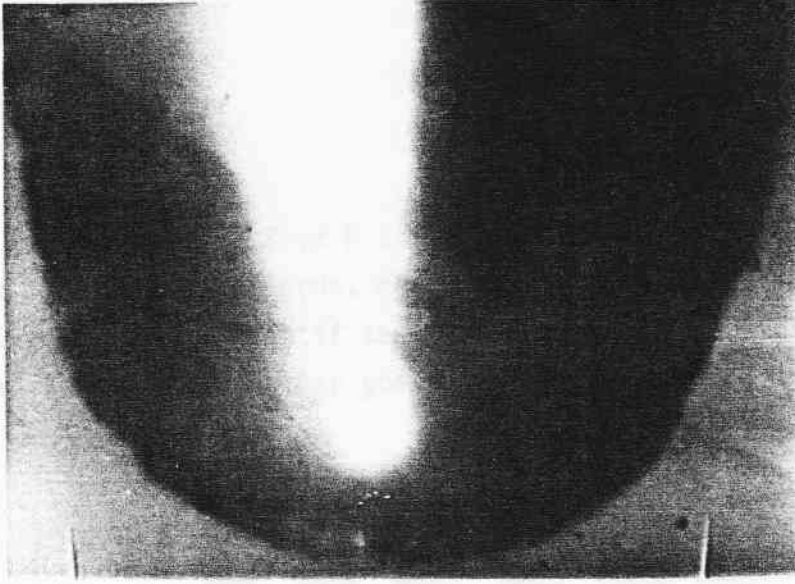
Sivri uçların eğrilik yarıçapları, elektron mikroskobu içindeki ölçekli mercekten yararlanılarak ölçülmüştür.



Şekil A.2. Paslanmaz çelikten, 0,05 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç
(ölçek: 250/1).



Şekil A.3. Krom-nikel'den, 0,054 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç
(ölçek: 500/1).



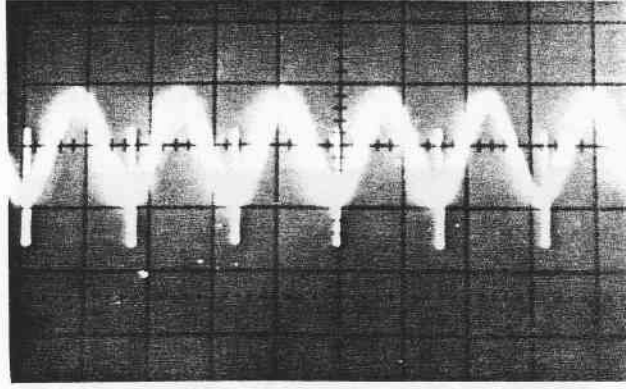
Şekil A.4. Piring'ten, 0,2 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç
(ölçek: 250/1).



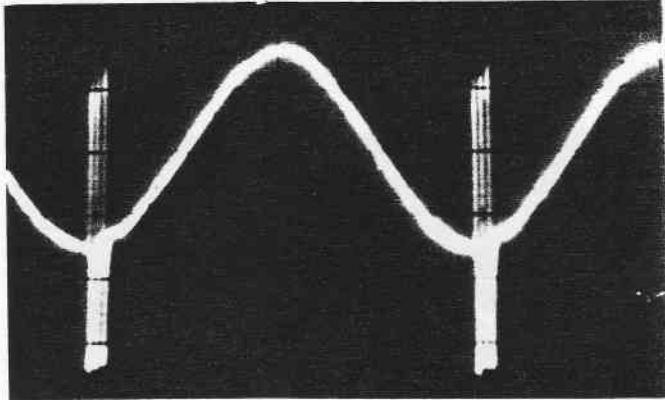
EK B.

OSİLOGRAMLAR

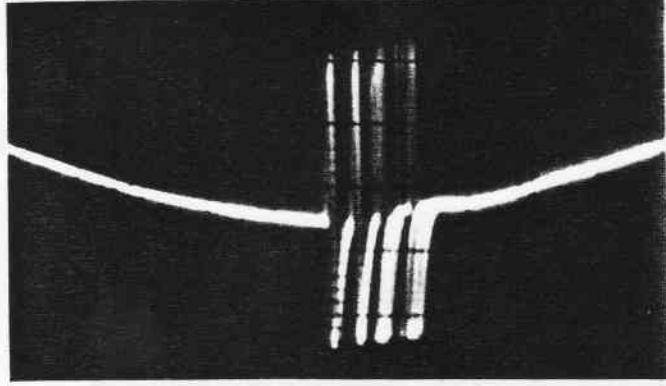
Şekil B.1, B.2 ve B.3'te, 0,2 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç için değişik gerilimlerde, değişik tekraralama sıklıklı, sinüzoidal deney geriliminin negatif tepelerinde ortaya çıkan kararlı boşalmalara ilişkin osilogramlar gösterilmiştir.



Şekil B.1. $r = 0,2$ mm, $U = 3,4$ kV (etkin değer).

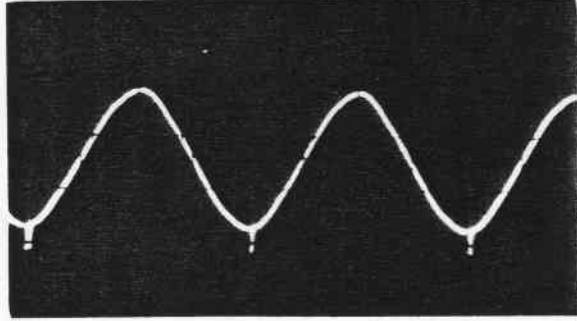


Şekil B.2. $r = 0,2$ mm, $U = 3,5$ kV (etkin değer).

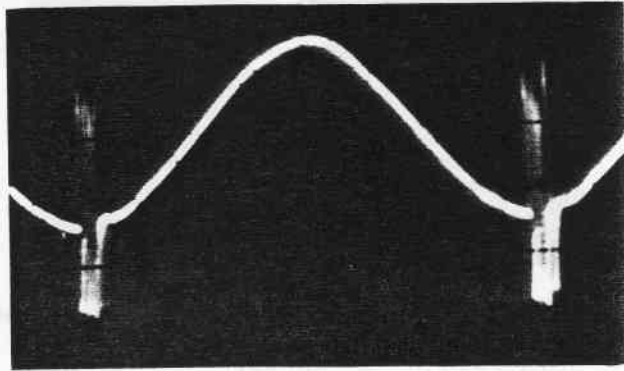


Şekil B.3. $r = 0,2$ mm, $U = 3,54$ kV (etkin değer).

Şekil B.4'te, 0,054 mm eğrilik yarıçaplı, Şekil B.5'te de, 0,056 mm eğrilik yarıçaplı elektroda ilişkin kararlı kısmi boşalma durumundaki osilogramlar gösterilmiştir.



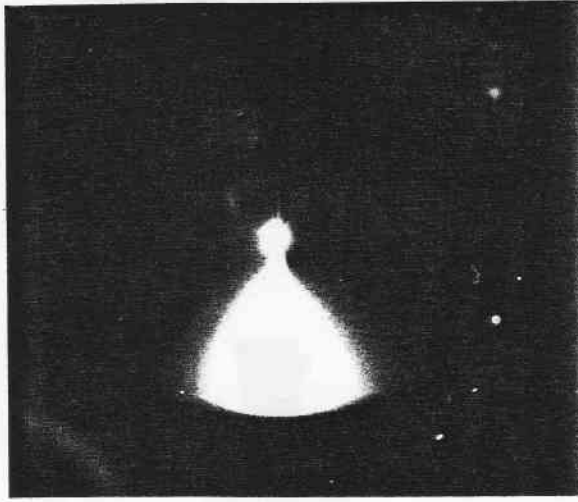
Şekil B.4. $r = 0,054$ mm, $U = 2,1$ kV (etkin değer).



Şekil B.5. $r = 0,056$ mm, $U = 2,38$ kV (etkin değer).

EK C.

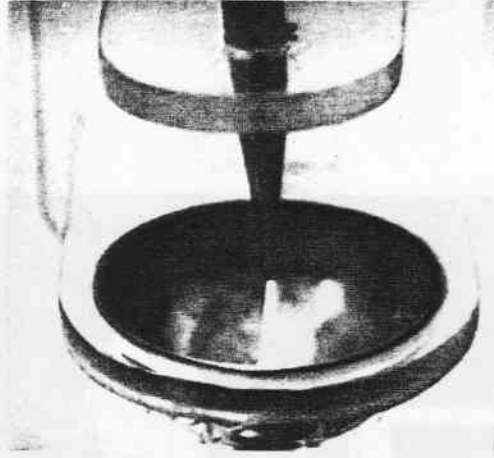
SIVRI UÇ - YARIM KÜRE ELEKTROD DÜZENİNDE BOŞALMA RESİMLERİ



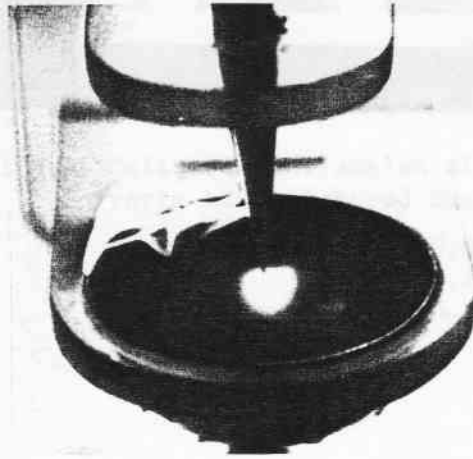
Şekil C.1. Alternatif gerilimde kısmi boşalma.
($r = 0,05$ mm (sivri uç), $R = 25$ mm (yarım küre), $U = 12$ kV)



Şekil C.2. Alternatif gerilimde boşalma
($r = 0,034$ mm, $U = 13,2$ kV,
 $p = 759,2$ mmHg, $t = 22^{\circ}\text{C}$).

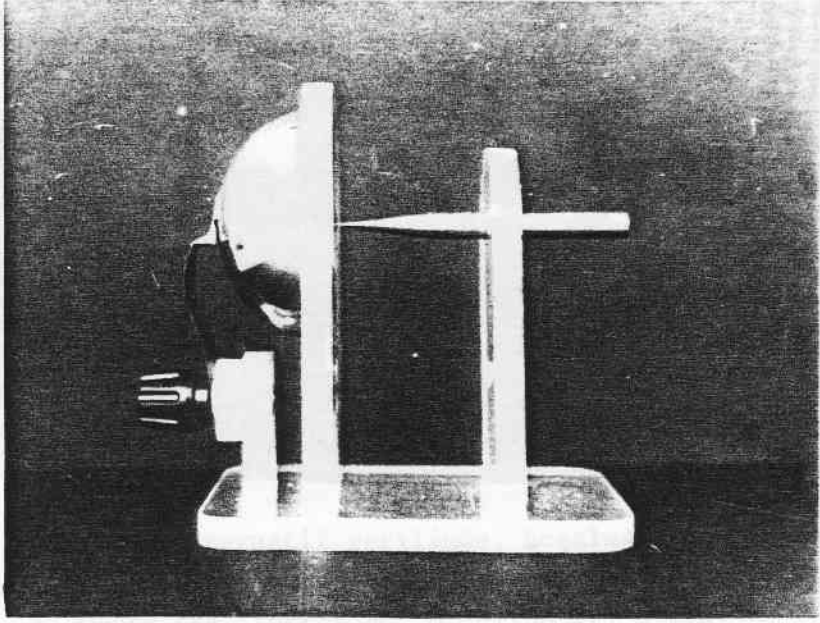


Şekil C.3. Pozitif doğru gerilimde boşalma
($r=0,034$ mm, $U=18,8$ kV,
 $p=759,2$ mmHg, $t=22^{\circ}\text{C}$).



Şekil C.4. Negatif doğru gerilimde boşalma
($r=0,034$ mm, $U=35,3$ kV,
 $p=759,2$ mmHg, $t=22^{\circ}\text{C}$).

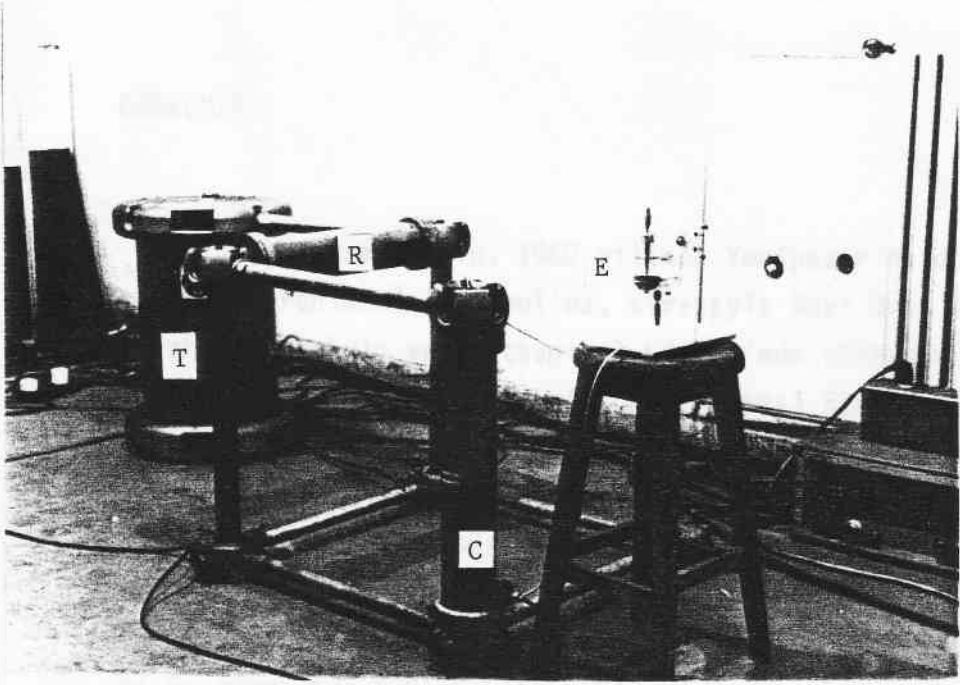
EK D.



Şekil D.1. Çalışmada kullanılan sivri uç -
yarım küre elektrod düzeni.

Sivri uç, $r = 0,034; 0,05; 0,054;$
 $0,056; 0,2$ mm.

Yarım küre, $R = 25$ mm = sabit (bakır)
Gövde, plexiglass.



Şekil D.2. Doğru ve alternatif gerilimde, boşalma deneylerinin yapıldığı deney düzeneği.

- T: Deney transformatörü, 0,22/100 kV, 5 kVA,
R: Koruma direnci, 50 k Ω , 140 kV,
C: Gerilim bölücü, 100 pF, 100 kV,
E: Sivri uç - yarım küre elektrod düzeni.

ÖZGEÇMİŞ

Hasbi İsmailoğlu, 1960 yılında Yenipazar'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da, sırasıyla Nuri Ürs İlkokulu, 50.Yıl Ođuzhan Ortaokulu ve Pertevniyal Lisesi'nde görmüştür. 1979-80 öğretim yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Bölümü'ne girmiştir. 1983-84 öğretim yılı kış yarıyılı sonunda adı geçen bölümden Elektrik Mühendisi olarak mezun olmuştur. Bir süre serbest mühendis olarak çalıştıktan sonra, 1986-87 öğretim yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Elektronik ve Haberleşme Programı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır. 1986 Eylül ayından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Yüksek Gerilim Tekniği Biriminde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. İngilizce ve Sırpça-Hırvatça bilmektedir.