

AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMADA ARK BOYNUZLARININ ETKİNLİĞİ

Hasbi İSMAİLOĞLU
Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Gerilim Laboratuvarı
Umuttepe Yerleşkesi 41380 İzmit/KOCAELİ
hasbi@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Güç sistemleri ve bu sistemlerde yer alan aygıtlar, çeşitli etkenlerle ortaya çıkan aşırı gerilimlerle zorlanır. Aşırı gerilimler, oluşmalarına yol açan olaylara bağlı olarak, iç ve dış aşırı gerilimler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İç aşırı gerilimler, genel olarak, orta/yüksek frekanslı ve sönümlü karaktere sahipken; dış aşırı gerilimler, dik cepheli ve kısa süreli darbe gerilimleri biçimindedirler. Sistemler, işletme sırasında ortaya çıkan ve çoğunlukla şebeke frekansına sahip, kısa ya da uzun süreli olabilen gerilim yükselmelerinin de etkisinde kalırlar. Sistemlerde yer alan aygıtlar, genel olarak, bu gerilim yükselmelerine dayanacak biçimde boyutlandırılırken; genlikleri, işletme gerilimi genliğinin birkaç katına kadar ulaşabilen aşırı gerilimlerin etkilerine karşı koruma önlemlerine başvurulmaktadır. Bu amaca yönelik olarak, koruma yetenekleri son derece sınırlı olmasına rağmen, ark boynuzları (koruma elektrotları) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, güç sistemlerinde, yürüyen dalga biçiminde yayılan ve tüm aygıtlarda zorlanmalara yol açan aşırı gerilimlerin belirli karakteristik özellikleri tanımlanmış ve ark boynuzlarının, standart yıldırım darbe geriliminde çalışma karakteristiğinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, ark boynuzlarının, aşırı gerilimlere karşı korumada etkinlikleri irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşırı Gerilimler, Yürüyen Dalgalar, Ark Boynuzları - Koruma Elektrotları.

1. GİRİŞ

Enerji sürekliliğini bozan etkenlerin başında, sistemde yer alan aygıtlarda ortaya çıkan yalıtım bozulmaları ve bunlara bağlı olarak oluşan kısa-devreler gelmektedir. Aygıt yalıtımlarını zorlayan ve söz konusu arızalara yol açan olaylar arasında, aşırı gerilimler önemli bir yer tutmaktadır.

Bu olumsuzlukların önüne geçmek amacıyla aşırı gerilimlerin oluşumlarına engel olunmaya çalışılmakta ve/veya ortaya çıkan aşırı gerilimlerin etkilerini azaltmaya yönelik önlemlere başvurulmaktadır.

Dış aşırı gerilimlerin, iletim hatları ve şalt tesislerini etkileme olasılıklarını azaltmak amacıyla çevrenin doğal koruyucu yapısından yararlanılmaya, örneğin hatlar, olabildiğince yamaç, vadi gibi yerlerden geçirilmeye çalışılır. İletim hatları ve şalt tesislerini, doğrudan yıldırım düşmelerine karşı korumak üzere koruma iletkenleri kullanılır. Koruma iletkenlerinin görevlerini etkin bir biçimde yapabilmeleri için; diğer bir deyişle olası geri atlamaların önüne geçilebilmesi için, topraklama dirençlerinin küçük olması önem taşımaktadır [1, 2].

Parafudrlar, sistemlerde yer alan aygıtları aşırı gerilimlere karşı korumak üzere, yaygın olarak kullanılan koruma elemanlarıdır. Parafudrların, dağıtım sistemlerinde genel olarak dış aşırı gerilimlere karşı; iletim sistemlerinde ise hem iç hem de dış aşırı gerilimlere karşı koruma yapmaları beklenir [3]. Çalışma karakteristikleri ve yapısal özellikleri göz önüne alındığında, parafudrları başlıca iki gruba ayırmak gerekir. Bu grulardan birini, günümüzde kullanımı olmayan, porselen korungaç (mahfaza) içine yerleştirilen, atlama aralıklı (eklatörlü) değişken dirençli (SiC) parafudrlar oluşturmaktadır. Atlama aralıklarının kirlenmeye karşı çok duyarlı olması ve gecikmeli çalışma risklerinin bulunması nedeniyle bu tip parafudrlar, on yılı aşkın bir süreden beri üretimden kaldırılmışlardır [4-6]. Diğer grubu, günümüzde iletim ve dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan metaloksit parafudrlar oluşturmaktadır. Metaloksit parafudrların yapılarında atlama aralıklarının bulunmaması, kirlenmeye karşı duyarlılıklarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu parafudrların, şebeke geriliminin etkisi altında olmaları nedeniyle, normal işletme koşullarında, dirençleri üzerinden sürekli olarak küçük bir akım (<1 mA) geçişi olur. Bu özellikleri, aşırı gerilimlere karşı korumada gecikmeli çalışma risklerinin de azalmasını sağlamaktadır [7-10].

İletim hatlarında izolatörlerin, aşırı gerilimler sonucu hasar görmelerini önlemeye yönelik olarak, ark boynuzları (koruma elektrotları) yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok basit bir yapıya sahip olan bu

elektrotlar, izolatörlerde oluşabilecek yüzeysel atlama ve arkları, izolatör yüzeylerinden uzaklaştırarak, izolatörlerin zarar görmelerine engel olmak ve kısmen de olsa gerilim dağılımlarını düzenlemek amacıyla kullanılırlar.

Ancak, ark boynuzları (koruma elektrotları), çoğu zaman dağıtım transformatörlerinin geçit izolatörlerinde (buşinglerinde) de kullanılmakta ve böylece transformatörlerin de korunmuş olacağı varsayılmaktadır [11,12]. Ark boynuzlarının bu amaçla kullanılabilmesine ilişkin değerlendirmeler yönetmeliklerimizde de yer almaktadır [2].

Bu çalışmada, enerji sistemlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan ve aygıt yalıtımlarının aşırı gerilimler tarafından zorlanmasına yol açan yürüyen dalgaların, karakteristikleri tanımlanıp, hatlarda yayılma hızlarına ilişkin eşitlikler verilmiştir. Dağıtım transformatör geçit izolatörlerinde kullanılan farklı açıklıklara sahip ark boynuzlarının, standart yıldırım darbe gerilimlerinde koruma düzeyleri deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ışığında, ark boynuzlarının, aşırı gerilimlere karşı koruma etkinliği irdelenmiştir.

2. YÜRÜYEN DALGALAR

Güç sisteminin herhangi bir noktasında, atmosferik olaylar, açma-kapama, daha yüksek işletme gerilimine sahip sistem iletkenlerinin teması vb nedenlerle ortaya çıkan etkiler, tüm sistem üzerinde kendilerini hissettirirler. Söz konusu etkiler, sistemde yürüyen dalga biçiminde yayılırlar. Örneğin bir iletim hattında, yıldırım düşmesi sonucu yürüyen dalgaların oluşumu, sembolik olarak, Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu durumda, yıldırım düşmesi ile hat üzerine aktarılan yüke bağlı olarak $i(t)$ akımının oluştuğu düşünülürse, bu akım iki kola ayrılarak, her iki yöne doğru $\frac{1}{2}i(t)$ biçiminde yayılır [1,6]. Gidiş-dönüş biçiminde paralel iki iletken oluşmuş bir hat için birim uzunluk başına endüktans ve kapasite değerleri, iletkenler arası uzaklık ve r - iletken yarıçapı olmak üzere, sırasıyla

$$L \cong 2 \cdot \ln(a/r) \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{18 \cdot \ln(a/r) \cdot 10^9} \text{ (F/m)} \quad (2)$$

eşitlikleri ile verilebilir [1]. Bu eşitlikler kullanılarak, yürüyen dalganın hat üzerinde ilerleme hızı için,

$$v \cong \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

ve hattın karakteristik empedansı için,

$$Z \cong \sqrt{L/C} \quad (4)$$

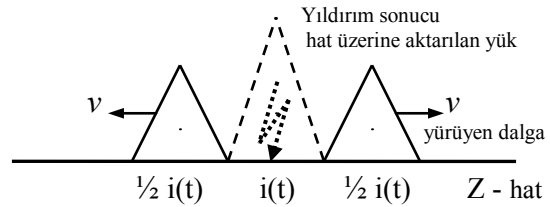
denklemleri elde edilebilir. Denklem (1) ve (2)'de verilen endüktans ve kapasite eşitlikleri ile yürüyen dalganın hava hattında yayılma hızı için,

$$v \cong 300 \text{ (m/}\mu\text{s)} \quad (5)$$

ve karakteristik empedans için,

$$Z \cong 250 - 450 \ \Omega \quad (6)$$

değerleri bulunur. Görüldüğü gibi, yürüyen dalgalar hava hatları üzerinde ışık hızıyla ilerlemektedirler. Kablo gibi, katı yalıtkan içeren ortamlarda yürüyen dalgaların yayılma hızları ise boşluktaki ışık hızının yarısı kadar olmaktadır.



Şekil 1. Karakteristik empedansı Z olan iletim hattına yıldırım düşmesi sonucunda hat üzerinde iki yöne doğru yürüyen dalgaların oluşumu.

Yürüyen dalgalar, ortaya çıkmalarına yol açan olaylara ve şebekenin yapısına bağlı olarak, genlikleri, işletme geriliminin birkaç katına kadar ulaşabilen aşırı gerilimlerin oluşmasına yol açarlar.

Karakteristik empedansı Z olan hat üzerinde bir yönde ilerleyen ve akımı, $\frac{1}{2}i(t)$ biçiminde ifade edilen bir yürüyen dalganın gerilimi için,

$$U = \frac{1}{2} Z \cdot i(t) \quad (7)$$

eşitliği yazılabilir. Akımın maksimum değerinin I_m olduğu varsayılırsa, yürüyen dalga geriliminin maksimum değeri de,

$$U_m = \frac{1}{2} Z \cdot I_m \quad (8)$$

biçiminde verilebilir. Ortaya çıkan bu gerilim düzeyleri, sistemde yer alan tüm aygıtların yalıtımlarının zorlanmasına neden olurlar.

Yürüyen dalgalar, sistemde yayılırken, örneğin hat dirençleri, kaçak iletkenlikler ve oluşan korona kayıpları nedeniyle zayıflarlar. Ancak, sistemin süresizlik noktalarında oluşan yansıma ve kırılmalar sonucu,

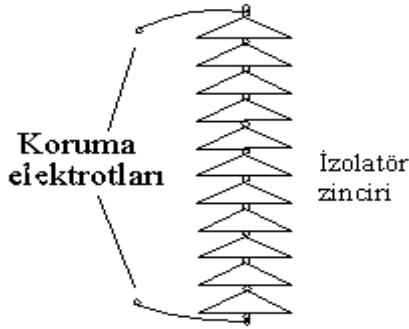
süresizliğin türüne bağlı olarak gerilimlerinin genlikleri artabilir ya da azalabilir.

Yürüyen dalgalar, büyük güçlere sahip olmakla birlikte; genel olarak çok kısa süreli olduklarından, düşük enerjilere sahiptirler. Ancak, üzerinde yol aldıkları iletim ortamlarının karakteristik empedanslarına bağlı olarak oluşturdukları aşırı gerilimler, aygıtların yalıtımlarını bozabilmektedirler. Genel olarak, sistem üzerinde işletme gerilimi de bulunduğundan, aşırı gerilimler nedeniyle ortaya çıkan yalıtım bozulmaları şebeke kısıdevrelerine dönüşmektedir. Şebeke kısıdevreleri ise enerji kesintilerine, sistemde önemli hasarlara ve aygıtların kullanılamaz hale gelmesine yol açabilmektedirler.

Sayılan bu nedenlerle aşırı gerilimlerin oluşumları engellenmeye çalışılmakta, oluşmaları durumunda da olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik önlemler alınmaktadır.

3. ARK BOYNUZLARI

Ark boynuzları (koruma elektrotları-eklatörler), genel olarak karşılıklı iki metal çubuktan oluşan elektrotlardır. Basit yapıda olmaları nedeniyle zincir izolatörleri, transformatör geçit izolatörleri gibi aygıtlara kolaylıkla yerleştirilebilirler. Ark boynuzlarının bir izolatör zincirine yerleştirilmiş biçimi, Şekil 2'de sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Bir izolatör zincirinde, sembolik olarak, koruma elektrotları (ark boynuzları).

Ark boynuzları, izolatörler bir aşırı gerilimle zorlandığında, oluşabilecek bir atlamayı ve buna bağlı olarak ortaya çıkabilecek arkı, izolatör yüzeyinden uzaklaştırmak amacıyla kullanılırlar. Bunun yanında, izolatörlerde gerilim dağılımının düzenlenmesinde, kısmen de olsa, etkileri vardır. Aşırı gerilim etkisi ile boynuzlar arasında atlama gerçekleştiğinde, sistemde şebeke gerilimi de bulunduğundan, oluşan ark faz-toprak kısıdevresine yol açar. Oluşan arkın sönmeye, yıldız noktası yalıtılmış sistemler hariç, enerjinin kesilmesine bağlıdır.

İşletme gerilimlerine göre kullanılması önerilen ark boynuzu açıklıkları Tablo 1'de verilmiştir [11,12].

Ark boynuzları, izolatör yüzeylerinde oluşabilecek arkları izolatörlerden uzaklaştırarak, zarar görmelerine engel olabildikleri için, özellikle iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1. İşletme gerilimlerine göre ark boynuzu açıklıkları (1000 m'ye kadar yükseklikler için).

İşl. gerilimi (kV)	6	10	15	30	60	150	380
Açıklık (cm)	6	8,6	11,5	22	40	83	230

Bunun yanında, ülkemizde, özellikle orta gerilim dağıtım transformatörlerinde geçit izolatörlerine ark boynuzları yerleştirilmekte ve bu şekilde, transformatörlerin aşırı gerilimlere karşı korunabileceği varsayılmaktadır. Bazı teknik yayın ve yönetmeliklerde de bu yönde değerlendirmeler yer almaktadır [2,11,12].

4. DENEY DÜZENİ ve DENEYLER

Orta gerilim dağıtım transformatörlerinde, aşırı gerilimlere karşı koruma amaçlı olarak da kullanıldıkları göz önüne alınarak, çalışma karakteristiklerini incelemek ve korumada etkinliklerini belirlemek amacıyla belirli açıklıklara sahip ark boynuzlarına darbe gerilimleri uygulanmıştır. Deneylerde, 240 kV ve 600 J'lük standart yıldırım darbe gerilimi (1,2/50 µs) üretici kullanılmıştır.

Deneyler, dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan gerilim düzeyi olması nedeniyle 36 kV'luk, ark boynuzlarına sahip transformatör tipi bir geçit izolatörü üzerinde yapılmıştır (Şekil 3). Kullanılan ark boynuzları, bir dağıtım transformatörü üzerinden sökülmiş, φ8 mm çapında, uçları küt, paslanmaz elektrotlardır. Deneylerde, ark boynuzlarının alt elektrodu topraklanmış, üst elektrodu darbe gerilimi üreticisine bağlanmıştır.



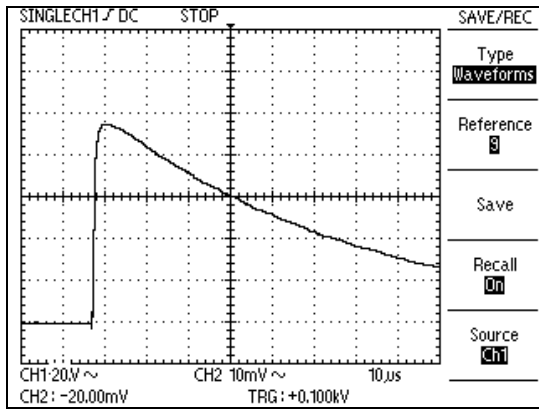
Şekil 3. Deneylerde kullanılan ark boynuzları ve 36 kV'luk transformatör tipi geçit izolatörü.

Deneyler sırasında ölçülen ortam sıcaklığı, hava basıncı ve nem oranı değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} t &= 21^{\circ}\text{C}, \\ b &= 735 \text{ mmHg}, \\ h &= \% 48. \end{aligned}$$

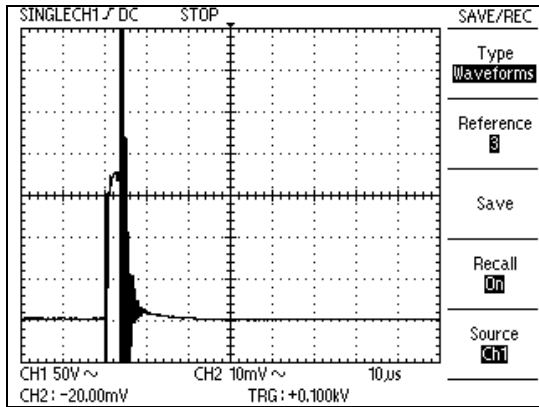
Bu değerlere göre, ortam koşulları düzeltme katsayısı belirlenmiş ve bu katsayı deney sonuçlarına yansıtılmıştır [13].

Orta gerilim (30-36 kV'ta) ark boynuzlarında açıklığın 22 cm alınması önerilmekte olduğundan, elektrot açıklığı, öncelikle bu değere ayarlanmıştır. Elektrotlara uygulanan $U_m=107$ kV'luk pozitif tam bir standart yıldırım darbe geriliminin osilogramı, Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Ark boynuzlarına uygulanan $U_m=107$ kV'luk pozitif yıldırım darbe gerilimi.

Açıklık 22 cm olmak üzere, ark boynuzlarına, genlikleri giderek artırılan darbe gerilimleri uygulanmıştır. Elektrotlarda atlama oluşturan, bir pozitif darbe gerilimi ($U_a = 192$ kV ve $t_a \approx 3$ μs) osilogramı, Şekil 5'te gösterilmiştir. Pozitif ve negatif darbe atlama gerilimlerinin tepe değerleri ve atlama süreleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. Elektrot açıklığı 22 cm için atlama oluşturan pozitif bir darbe geriliminin osilogramı ($U_a = 192$ kV ve $t_a \approx 3$ μs, t_a : Atlama süresi).

Tablo 2. Ark boynuzlarında, $a = 22$ cm için pozitif ve negatif darbe atlama gerilimleri ve atlama süreleri.

Gerilim	Atlama gerilimi U_a (kV)	Atlama süresi t_a (μs)
Pozitif	174	6
	179	5
	192	3
Negatif	-181	8
	-183	6
	-188	4

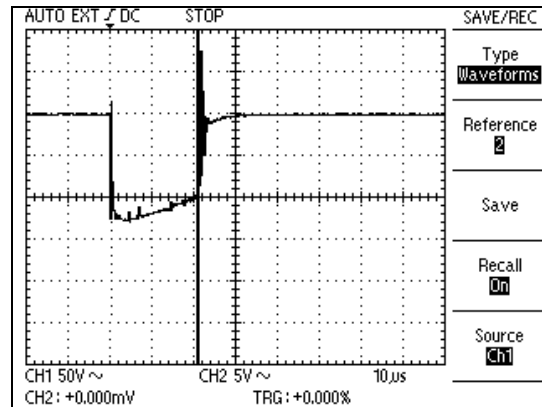
Tablo 2'de verilen değerlerden görüldüğü gibi, 22 cm açıklığa sahip ark boynuzlarında elde edilen atlama gerilimi değerleri, 36 kV'luk sistemlerde kullanılan aygıtların darbe dayanma gerilimi olan $U_m = 170$ kV'tan oldukça yüksektir. Bu nedenle deneyler, elektrot açıklığı 16 cm'ye düşürülerek yinelenmiştir.

Ark boynuzlarında, 16 cm'lik elektrot açıklığında elde edilen pozitif ve negatif darbe atlama gerilimlerinin tepe değerleri ve bu gerilimlerde ölçülen atlama süreleri, Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ark boynuzlarında, $a = 16$ cm için pozitif ve negatif darbe atlama gerilimleri ve atlama süreleri.

Gerilim	Atlama gerilimi U_a (kV)	Atlama süresi t_a (μs)
Pozitif	140	10
	142	4
	145	3
Negatif	-140	21
	-145	7
	-147	4

Negatif darbe geriliminde, 16 cm'lik elektrot açıklığında elde edilen osilogramlardan birisi, örnek olarak Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Elektrot açıklığı 16 cm için atlama oluşturan negatif bir darbe geriliminin osilogramı ($U_a = -140$ kV ve $t_a \approx 21$ μs).

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Orta gerilim dağıtım sistemlerinde kullanılan aygıtların darbe geriliminde dayanma düzeyleri ilgili standartlarda tanımlanmıştır. Örneğin, 36 kV'luk sistemde kullanılan aygıtlar için standart yıldırım darbe dayanma düzeyi, genel olarak 170 kV'tur. Diğer taraftan bu aygıtların aşırı gerilimlere karşı korunmasında kullanılacak koruma aygıtlarının (parafudrların) artık gerilimlerinin, belirli koşullarda 120 kV'u aşmaması gerekmektedir [8,9]. Bu sınır değer tanımlanmış olması, aşırı gerilimlere dayanma açısından, aygıt yalıtımlarında bir güvenlik payı bulunması gerektiği biçiminde yorumlanabilir. Diğer yandan, ark boynuzlarında, 30-36 kV'luk sistem için elektrot açıklığının 22 cm alınması gerektiği belirtilmektedir (Tablo 1). Oysa, yukarıda verilen deney sonuçlarına göre, 22 cm açıklığa sahip ark boynuzlarında, pozitif darbeye 170 kV, negatif darbeye ise 180 kV üstündeki gerilimlerde atlama olmakta; diğer bir deyişle ark boynuzları bu gerilimlerden daha yüksek gerilimlerde çalışabilmektedirler.

Ark boynuzlarında elektrot açıklığı 16 cm'ye düşürüldüğünde, her iki kutbideki darbeler için 140 kV düzeyinde atlama gerilimleri elde edilmektedir. Buna göre, ilgili standartların, koruma aygıtları için öngördüğü 120 kV'luk sınırın altına düşülebilmesi için, ark boynuzlarında açıklığın 16 cm'den de küçük seçilmesi gerekmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken, önemli bir diğer konu, ark boynuzlarının gecikmeli çalışmalarıdır. Yukarıda kısaca açıklandığı gibi, yürüyen dalgaların yayılma hızları (hava hatlarında ~300 m/μs) ve özellikle yıldırım darbe gerilimlerinin cephe dikliği de göz önüne alındığında, ark boynuzlarının, örneğin dağıtım transformatörleri gibi aygıtların güvenli bir şekilde korunmasında yeterli olamayacağı görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Ark boynuzları, özellikle iletim sistemi izolatörlerinde, aşırı gerilim kaynaklı bir atlama sonucunda oluşabilecek bir arki, yüzeyden uzaklaştırarak, izolatörlerin hasar görmesini önlemek amacıyla kullanılırlar. Aşırı gerilimin etkisi geçtikten sonra arkın sönmeye, işletme geriliminin, dolayısıyla şebeke enerjisinin de kesilmesini gerektirir.

Ancak, elde edilen deneysel sonuçlardan da görülebileceği gibi, dağıtım transformatörü gibi aygıtların korunmasına yönelik olarak önerilen, ark boynuzu açıklıkları oldukça büyüktür. Ayrıca atlamamın, darbe sisteme ulaştıktan, en azından

birkaç μs sonra gerçekleşiyor olması, özellikle dik cepheli darbelerde, ark boynuzlarının koruma aygıtı olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, ark boynuzlarının, yalnızca izolatör koruma aygıtı olarak tanımlanabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ÖZKAYA, M., "Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 2", Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [2] Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, EMO Yayın No: TY/2005/3, Ankara, 2005.
- [3] RYAN, H.M. (Ed.), "High Voltage Engineering and Testing (2nd Ed.)", IEE-The Institution of Electrical Engineers, London, 2001.
- [4] TS EN 60099-1/Temmuz 1997, "Parafudrlar-Bölüm 1: A.A. Sistemleri için - Değişken Dirençli Tip Atlama Aralıklı Parafudrlar".
- [5] İSMAİLOĞLU, H., "Aşırı Gerilimler, Oluşumları, Etkileri ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma", Tesisat Mühendisliği Ulusal Kongresi - Yüksek Gerilim Çalıştayı, Bildiriler Kitabı, s.80-88, İzmir, 7-10 Mayıs 2009.
- [6] IEEE Std 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [7] HILEMAN, A.R., "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker Inc., New York, 1999.
- [8] TS 60099-4/Mart 2006 (Rev.), "Parafudrlar-Bölüm 4: A.A. Sistemleri için-Atlama Aralıksız Metal Oksit Parafudrlar".
- [9] IEC 60099-4/2004-5 (2nd Ed.), "Surge Arresters-Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems".
- [10] IEEE C62.22-1991, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arrester for Alternating-Current Systems.
- [11] SAÇKESEN, E.; AMAÇ, A., "Koruma Sistemleri", TEİAŞ, Soma Elektrik Tek. Gel. ve Eğitim Merkezi Müd. Yayını, 2001.
- [12] TMMOB-EMO, MİSEM, "Elektrik Yüksek Gerilim Tesislerinde İşletme Sorumluluğu Eğitimi Seminer Notları", 2005.
- [13] IEC 60060-1/1989-11, High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and requirements.