

ELEKTRİK TESİSLERİNDE YILDIRIMIN ETKİLERİNİN ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK AÇISINDAN İNCELENMESİ

İlhami Çolak^{1*}, İlhan Koşalay²

¹Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar Ankara

²TRT Genel Müdürlüğü, Bilgi Teknolojileri Dairesi Başkanlığı, Enerji Sistemleri

Özet

Yıldırım akımının karakteristik parametreleri elektrik mühendisleri ve fizik dalında çalışan bilim adamları tarafından, yalıtım koordinasyonundaki önemi nedeniyle, uzun yıllardır yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Elektrik tesislerinin içindeki elektrik ve elektronik ekipmanların elektromanyetik açıdan birbiriyle uyumlu çalışma zorunluluğunun yanında bu tesisteki ekipmanların yıldırım sonrasında fonksiyonunu kaybetmeden çalışma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Güç tesislerinde Elektromanyetik uyumluluk (EMU) temel alınarak yapılan çalışmalar sonucunda, yıldırımın genel olarak üç mekanizmayı başlatabileceği belirlenmiştir. Bu makalede bu mekanizmalar ele alınmış, oluşan elektrik ve manyetik alanlar değerlendirilmiş ve sistem bazında genel sonuçlardan bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yıldırım, Elektrik tesisleri, Elektromanyetik uyumluluk

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LIGHTNING IN ELECTRICAL FACILITIES IN TERMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Abstract

The characteristic parameters of the lightning current have been studied in depth by electrical engineers and physicist for many years due to their importance in insulation coordination. Electrical and electronic equipments in the electrical facilities have to work compatibly by themselves. In addition to that, these equipments have to work without losing their functions after a lightning phenomenon. Referring to EMC in power installations, lightning may act mainly through three mechanisms. In this study, these mechanisms are investigated and electric – magnetic field produced by them are studied. Finally, general results based on system are discussed.

Keywords: Lightning, Electrical facilities, Electromagnetic compatibility

* E-posta: icolak@gazi.edu.tr

1. Giriş

Yıldırım akımının karakteristik parametreleri elektrik mühendisleri tarafından yalıtım koordinasyonundaki önemi nedeniyle uzun yıllardır yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Günümüzde ise, yıldırım akımlarının temel parametreleri (genlik, eğim, meydana gelme sıklığı vb.) üzerine yapılmış ve yıldırım oluşumu hakkındaki her türlü olası mekanizmayı içeren oldukça güvenilir ölçümlere dayanan veriler mevcuttur (1). Güç tesislerinde Elektromanyetik uyumluluk (EMU) baz alınarak yapılan çalışmalar sonucunda, yıldırımın genel olarak aşağıdaki üç mekanizmayı başlatabileceği belirlenmiştir.

1. Yakın çevrede oluşan yıldırım akımının neden olduğu elektromanyetik alanlar ekipmanlara doğrudan etki eder, fakat tesisin yapısına zarar vermez;
2. Yıldırım doğrudan elektrik tesisine düşer (örneğin; yüksek gerilim hatları, topraklama iletkenleri, binalar ve direkler) ardından yapı ve ekipmanlardaki akımlar arasında kuplajlar oluşturur.
3. Yıldırım neticesinde oluşan elektromanyetik alanın güç hatlarına veya herhangi bir yapıya kuplajı olması ve ardından yapı ve ekipman akımları arasındaki kuplajın oluşmasıdır.

Bu çalışmada yıldırım sonrasında gelişen mekanizmalar sırayla ele alınarak, oluşan elektrik ve manyetik alanlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar kısmında ise sistem bazında genel sonuçlardan bahsedilmiştir.

2. Yıldırım Sonucu Oluşan Radyasyonun Doğrudan Etkisi

Elektriksel bir tesisin yakın çevresinde oluşan yıldırım akımının neden olduğu elektromanyetik alanlar ekipmanlara doğrudan etki etmekle birlikte genellikle tesisin yapısına zarar vermemektedir. Birinci mekanizmaya bağlı olan bu olay, çok yüksek enerji içeriğiyle değerlendirilen ve toprağa etki eden dönüş darbe akımı göz önünde bulundurularak temel yönleriyle araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda kanal akım dağılımına ilişkin çeşitli varsayımlardan yola çıkılarak farklı modeller geliştirilmiştir (2). Değişik mesafeler göz önünde bulundurularak toprak seviyesinde gözlenen ve yıldırım akımları nedeniyle ortaya çıkan elektriksel ve manyetik alanların hesaplanmasında baz alınan yapı Şekil 1'de verilmiştir.

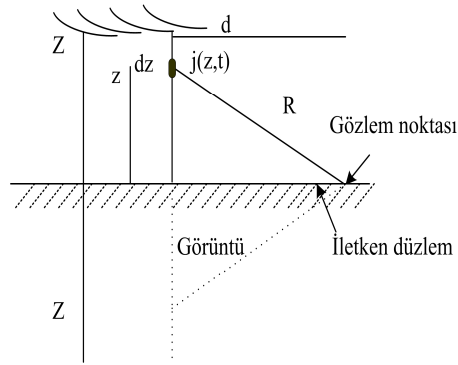
Başlama koşullarında yıldırım kanalının Z yükseklikli düz düşey bir anten olduğu, toprak düzleminin mükemmel iletken olduğu ve yıldırım kanalı kesitinin yarıçapının bu olayda oluşacak tipik minimum dalga boyu ile karşılaştırıldığında çok küçük olacağı varsayımları altında, düşey kanaldan d mesafesi uzakta toprak seviyesinde, düşey yıldırım kanalına Maxwell denklemlerini uygulayarak elektrik ve manyetik alanların hesabı için (1) ve (2) ifadeleri elde edilebilir.

Formül ifadelerinde; $i_{(z,t)}$ değeri yıldırım akımını, ϵ_0 ve μ_0 serbest uzayın dielektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliği, c ise serbest uzaydaki ışık hızını göstermektedir. Kanal bazında yıldırım akımı ölçümü verilerinden hareketle $i_{(z,t)}$ değerini hesaplamak amacıyla farklı modeller de geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, elektromanyetik alan bileşenleri, günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere yeterli kesinlikte belirlenebilmektedir.

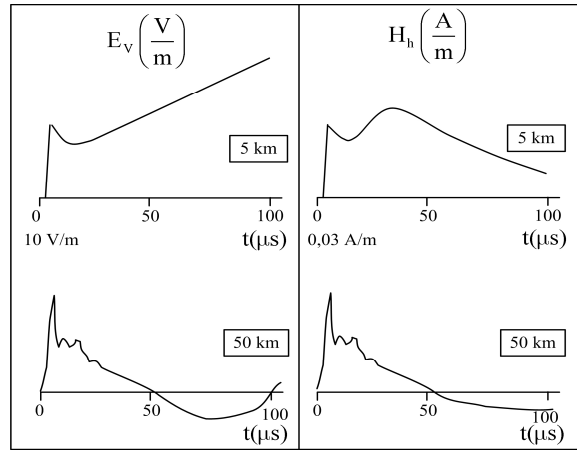
$$E_z(d,t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_0^z \frac{(2z^2 - d^2)}{R^5} i(z, \tau - R/c) d\tau dz + \int_0^z \frac{(2z^2 - d^2)}{cR^4} i(z, \tau - R/c) d\tau dz - \int_0^z \frac{d^2}{c^2 R^3} \left[\frac{\partial i(z, \tau - R/c)}{\partial t} \right] dz \right] \quad (1)$$

$$B_\Phi(d,t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_0^z \frac{d}{R^3} i(z, \tau - R/c) d\tau dz + \int_0^z \frac{d}{cR^2} \left[\frac{\partial i(z, \tau - R/c)}{\partial t} \right] dz \right] \quad (2)$$

Şekil 2, birinci ve peşinden gelen dönüş darbelerinden 5 ve 50 km'lik uzaklıktaki mesafelerde oluşan elektriksel ve manyetik alanlar için aynı anda alınmış tipik ölçüm değerlerini göstermektedir (2).



Şekil 1. Yıldırımın oluşturduğu alan için geometrik faktörler.



Şekil 2. Düşey elektrik alanı Ev ve manyetik alanın yatay bileşeni Hh

Bu ölçüm değerleri ışığında, yıldırım darbesi sonucunda oluşan elektrik ve manyetik alanların genel olarak şu ana karakteristiklere sahip olduğu söylenebilir:

1. Düşey elektrik alanı bileşeni Ev ve yatay manyetik alan bileşeni Hh, sırasıyla yatay bileşen Eh ve düşey bileşen Hv'ye oranla baskındırlar.

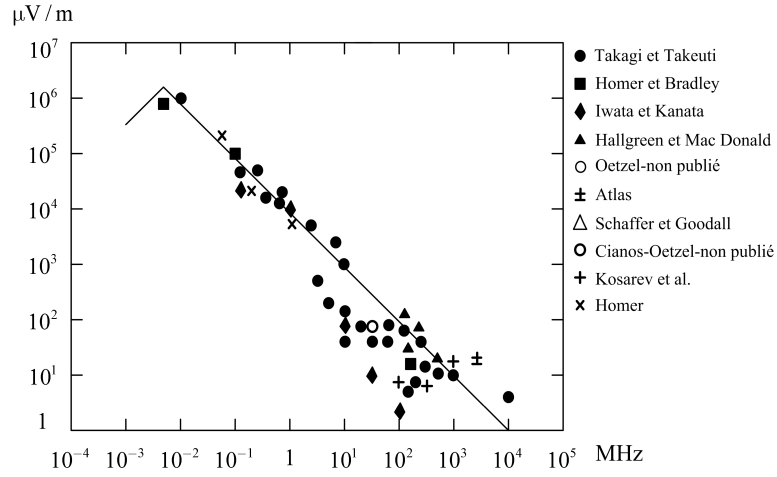
2. Hem düşey elektrik alanı bileşeni Ev ve hem de yatay manyetik alanı bileşeni Hh, peşinden çok daha az dik eğim ya da tümseklerle izlenen çok dik bir başlangıç rampası ile başlar (Şekil 2).

3. Elektriksel alanın başlangıç rampasının maksimum eğim değeri S_{Em} , EMC açısından bakıldığında çok önemli bir parametredir. Dönüş darbesi akımının ($S_{Im} = (dl/dt)_{max}$) maksimum eğimi ile orantılıdır.

$$S_{Em} = (V / (2\pi\epsilon_0 c^2)) S_{Im} / d \quad (V, A, m, s) \quad (3)$$

Burada: c, ışık hızı; v dönüş darbesi akımı hızı (0,2c'den 0,6c'ye kadar); ϵ_0 havanın dielektrik geçirgenliği ve d yıldırım kanalına olan uzaklıktır. S_{Im} 'nin yaklaşık 300kA/µs'ye kadar olan değerleri geçtiğimiz yıllarda ölçülmüştür. Yaygın olarak bilinen CIGRE dokümanlarında ölçüm aletlerinin frekans hassasiyetinin azlığı nedeniyle bu değerler 100kA/µs civarında kalmıştır. En yüksek S_{Em} değerine ulaşmak birkaç yüz ns'ye kadar sürebilir (3).

Şekil 3'de, Pierce eğrisi verilmiştir. Bu eğri, yıldırım olayının bütün bileşenleri açısından ölçülen elektriksel alanlara ilişkin, frekans domeninde bir özet vermektedir. Eğri, dönüş darbesi akımı ile bağlantılı olan elektriksel alanları 1



Şekil 3. Pierce eğrisi.

kHz ile 1 MHz arasında ve şarjların rekombinasyonu sonucu oluşan alanları da VHF-UHF aralığında (2 basamaklı MHz değerlerden GHz'e) göstermektedir.

3. Elektrik Tesislerindeki Hatlara ve Yapılara Doğrudan Gelen Darbeler

3.1. Güç Hattına Etki Eden Doğrudan Darbe

Bu tür bir olayın etkisi ile hat boyunca ilerleyen bir dalga meydana gelir (2). Yıldırımın direkt olarak faz iletkenleri üzerine düştüğü durumda, hatta meydana gelen gerilim dalgasının, yıldırım darbesi akımının biçiminden bağımsız bir cephesi ve kuyruğu olur. Bu gerilim dalgasının yükselme süresi μs 'den çok kısa olabilir. Ve maksimum eğimi $50\text{MV}/\mu\text{s}$ 'ye ulaşabilir.

Direklerde ve toprak iletkenlerinde yıldırım darbeleri ile oluşan geri atlama oluşması olması halinde ve arkasından faz iletkenlerine doğru yayılan yalıtım çöküşlerinde gerilim dalgasının cephesi onlarca ns (büyük boşluklarda birkaç yüz ns) dır. Dalga kuyruğunun süresi, faz iletkenine doğrudan, darbe durumundaki dalga süresinden daha azdır; yaklaşık $5\mu\text{s}$ ile $15\mu\text{s}$ arasında değişir.

Her iki durumda dalga cephesinin korona impuls başlangıç geriliminin üzerindeki bölümü korona tarafından çok çabuk bir şekilde sönmelendirilir. EMU açısından bakıldığında hat yalıtımının çöküşü çok daha kritik bir durum arz eder. Bu durum, genellikle dalganın kuyruğunda, onlarca ns'den birkaç yüz ns'ye ulaşacak şekilde keskin değişimlerin ortaya çıkmasına neden olur. Bu keskin değişimin eğimi, korona distorsiyonundan etkilenmez. Sadece hat direnci ve kondüktansından kaynaklanan güç harcıyıcı etkiler bu eğimin sönmelmesine yol açar.

Sonuç olarak, yalıtımın çökmesinden kaynaklanan dalganın kuyruk kısmındaki kesilmeler, hat terminallerine bağlı ekipmanlarda (örneğin; akım transformatörlerinin ikincil sargılarında) dalga cephesinden daha yüksek gerilimler meydana getirmektedir.

3.2. Yapılara Gelen Direkt Darbeler

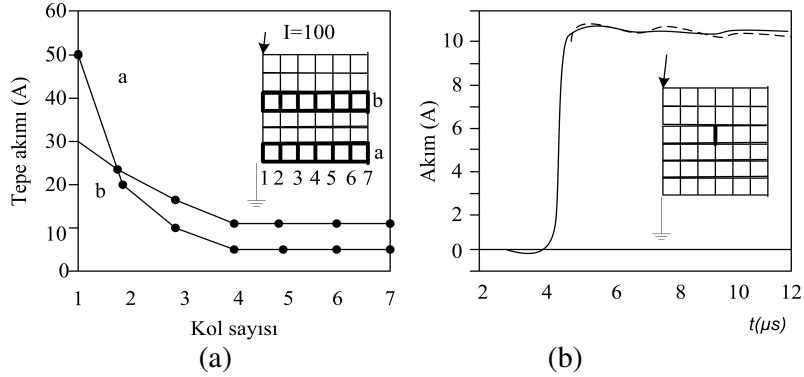
Yıldırım'ın doğrudan bir yapıya (bir binaya, yıldırım koruma sistemi iletkenlerine ya da açık hava trafo merkezinin toprak iletkenine) olan etkisinin hesaplanmasında dönüş darbe akımının yüksek frekans (HF) ışıması genellikle göz ardı edilir.

Bu halde, donanım içinde ya da yapı yakınında EMU açısından, yapının çeşitli kısımları boyunca olan impuls akım dağılımı etkin bir rol oynar. Bu tür olaylarda 2 ana etkileşim mekanizması etkilidir;

a) Alçak frekans mekanizması; ağırlıklı olarak topraklanma sisteminin gerilim potansiyel artışlarına bağlı, doğrudan yıldırım akımının genliği ile ilgilidir.

b) Yüksek frekans mekanizması; temel olarak yapının uzaysal konumu ile doğrudan yıldırım akımının eğimi ile ilişkilidir.

Bu tür olayların ana parametreleri hakkındaki hâlihazırdaki bilgi oldukça sınırlıdır. Bu nedenlerle özellikle yapının bağlantılı iletken kollarının kümesi olduğu şeklinde yaklaşım yapılabilirdiği durumda, pratik durumları simüle etmek için bir devre yaklaşımı uygun görülebilir. Buna bağlı olarak impuls akım dağılımını hesaplamak için, klasik devre yaklaşımının kolay bir araç olduğu bilinmektedir. Devre yaklaşımına dayanan bir model kurulup, indirgenmiş ölçekli yapılara laboratuvar testleri uygulayarak, frekans domeninde yapılmış bir analizin sonuçları Şekil 4’de gösterilmiştir (2). Laboratuvar deney sonuçlarının hesaplanan verilerle uyum içinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4. 1mm çaplı, 500mm aralıklı ince bakır kablolardan oluşmuş bir yapının; kollarındaki yıldırım akımının (1,2/50μs dalga biçimi) laboratuvar ölçümü ve hesaplama sonuçları.

Şekil 4 a’da: a ve b kolları üzerindeki akımların genlikleri gösterilmiştir. Burada, • ölçülmüş değerler, ---- hesaplanmış değerler’dir. Şekil 4 b’de, a kolundaki akımın dalga biçimi gösterilmiştir. Burada ölçülmüş değerler, _____ hesaplanmış değerler’dir.

4. Güç Hattına Veya Yapılara Gelen Işıma Ve Malzemeye Kuplaj

Bu mekanizma O.G. ve A.G. dağıtım hatları için büyük öneme sahiptir. Yüksek gerilim hatlarında daha az önem arz etmektedir. Bu kuplajın sonucu olarak hat boyunca ilerleyen bir gerilim akım dalgası meydana gelir. Bu olay yüksek gerilim hatlarına doğrudan düşen yıldırım darbeleri sonucu oluşan dalgalara benzemektedir.

Yıldırım darbesi ile hat arasındaki mesafe, dalga genliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. Dalga genliği, toprak hattının (mevcutsa) sağladığı koruma eşliğinde hattın yüksekliği ile doğru orantılı bir ilişki sergiler. O.G. ve A.G. hatlarında aşırı gerilim genliği çok sık olarak yalıtım dayanma düzeyini aşar, böylece yalıtımın çöküşünün ardından dalga kesimleri oluşur.

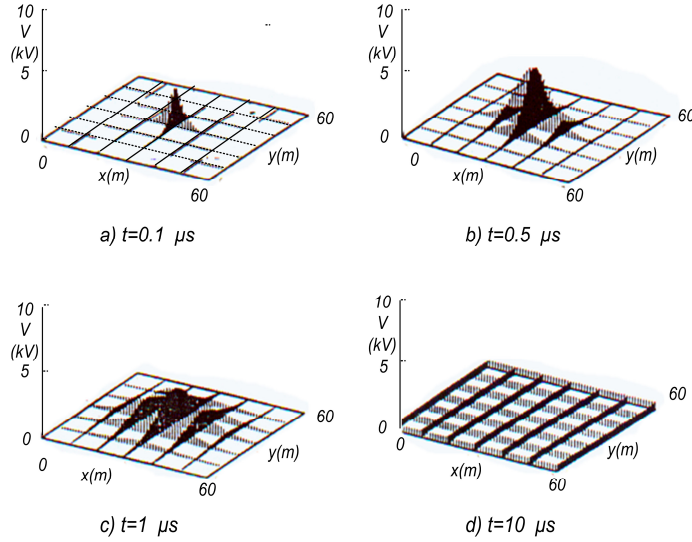
Gerilim dalgasının cephesi, darbenin düştüğü nokta yakınındaki kablo kesitinde, direkt darbelerle oluşan dalgalardaki gibidir. Kuyruk süresi, bunun bir sonucu olarak kısadır, yaklaşık 5μs’den 10μs’ye kadardır. Göreceli olarak küçük boyutlu yapıların ele alındığı hallerde, yapı tarafından toplanan elektromanyetik enerji, güç hatlarındaki enerjiden daha azdır; neticede oluşan bozucu etki yapı tarafından kendisine bağlı olan veya yakınında bulunan malzemelere iletilir. Bu etki malzeme düzgün bir biçimde topraklanmış ise, yıldırımdan kaynaklanan direkt ışımanın oluşturduğu gerilimlerden daha düşük gerilimlere sebep olur. Bu halde yapı ışıyan alana karşı bir ekran görevi görmektedir.

5.Yıldırım Ve Topraklama Sistemleri

Örnek olarak Şekil 5, tipik 1,2/50 μs’lik 1 kA genliğe sahip bir yıldırım darbesine maruz kalmış topraklama ızgara iletkenleri için hesaplanmış gerilim artışı dağılımının 3 boyutlu bir görüntüsünü göstermektedir (4). Şekil 5, geçici olay boyunca gerilim dağılımının oldukça düzensiz olduğunu göstermektedir. Geçici periyot sonrasında (yaklaşık 10μs) tipik bir D.C. uyarımı olan uniform bir gerilim dağılımı ortaya çıkar.

Topraklama iletkenlerinin farklı noktalarındaki geçici gerilimler, besleme noktasına yakın yerlerde bağlı olarak en yüksek değerleri alırlar. Böyle tepe değerler, kararlı durum periyodundaki değerlere oranla birkaç kat fazladır.

Geçici gerilim tepe değerleri, iletkenliği az olan toprak, daha dik akım impulsları ve ızgara köşesine yakın besleme noktaları için genellikle daha yüksektir.



Şekil 5. Izgarasının ortasına $1,2/50\mu s$ 'lik 1kA genlikli akım uygulanması

4. Sonuç

Yıldırım olgusuyalıtım koordinasyonundaki önemi nedeniyle uzun yıllar yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Günümüzde, yıldırım akımlarının temel parametreleri üzerine yapılmış ve yıldırım oluşumu hakkındaki her türlü olası mekanizmayı içeren oldukça güvenilir ölçümlere dayanan veriler mevcuttur. Güç tesislerindeki EMC temel alınarak yapılan çalışmalar neticesinde, yıldırımın genel olarak üç tür mekanizma ile işlediği belirlenmiştir. Yıldırım nedeniyle topraklama sistemi iletkenlerinden geçen kısa devre akımları, gerilim yükselmelerine sebebiyet vermektedir. Geçici gerilimin tepe değerlerinin az iletkenlikli toprak, daha dik akım impulsları ve ızgara köşesine yakın besleme noktaları için genellikle daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, topraklama sisteminin farklı noktaları arasındaki geçici potansiyel farklılıkları nedeniyle, ortamda bulunan elektronik cihazlar şiddetli bozucu etkilere maruz kalmaktadırlar.

Referanslar

- [1] Sengupta, D.L. and Valdis V. Liepa, Applied electromagnetics and electromagnetic compatibility, Wiley-Interscience, 2006.
- [2] Working group 36.04, Guide on EMC in power plants and substations, CIGRE PUBLICATION., Paris, 1997 and 2003 up-date edition
- [3] Andersen, R.B., Erikson, A.J., Lightning parameters for Engineering Application, ELECTRA, Iss 69, pp : 11-15 ,1980
- [4] Grev, L., Computer analysis of transient voltages in large grounding systems, IEEE TRANSACTION ON POWER DELIVERY, vol 11, Iss 1 , pp 815-823, 1996